

WIENER MITTEILUNGEN

WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER

Niederschlag-Abfluss-Modellierung – Simulation und Prognose

Band 164 - Wien 2000

WIENER MITTEILUNGEN

WASSER • ABWASSER • GEWÄSSER

Band 164

Niederschlag-Abfluss Modellierung Simulation und Prognose

ÖWAV – Seminar

an der Technischen Universität Wien

12. - 13. September 2000

Herausgeber:

o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dieter Gutknecht

Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft

Technische Universität Wien

Veranstalter:



Österreichischer Wasser- und
Abfallwirtschaftsverband
Marc-Aurel-Straße 5
1010 Wien



Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und
Wasserwirtschaft
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/223
1040 Wien



Verbundgesellschaft
Am Hof 6A
1010 Wien

Druck: Riegelnik
Piaristengasse 19
1080 Wien

ISBN 3-85234-055-1

Vorwort

In den letzten Jahren hat die Niederschlag-Abfluss Modellierung aus verschiedenen Gründen einen Wandel erfahren. In den traditionellen Fragestellungen – Bemessung und Prognose – wird nun eine höhere Aussageschärfe gefordert. Beigetragen haben dazu erhöhte Genauigkeitsanforderungen an Hochwasserberechnungen in Zusammenhang mit der Ausweisung von Überflutungsbereichen und mit Sicherheitsfragen. Neue Aufgabenstellungen ergaben sich im Bereich der Wasserkraftnutzung im Zuge der Liberalisierung des Strommarktes wie z. B. der verstärkte Einsatz von Echtzeit-Entscheidungsmodellen. Immer stärker wird ferner der Druck, Abflußsimulationen auch für Fragen des Stofftransportes in Einzugsgebieten einzusetzen. Diesen neuen Anforderungen stehen Neuentwicklungen von Modellen gegenüber, die durchwegs sehr hohe Ansprüche an die Datenverfügbarkeit stellen. Zwar existieren heute in Österreich flächendeckend sehr umfangreiche Datensätze, wie etwa digitale Geländemodelle und von Satellitenbildern abgeleitete Landnutzungsdaten, doch sind viele andere hydrologisch wichtige Eingangsdaten oft nicht so detailliert vorhanden wie es wünschenswert oder notwendig ist. Datenfragen sind deshalb ein ebenso aktuelles Thema wie die Modellwahl und die richtige Modellanwendung. Auch der fachgerechte Umgang mit neuen Softwarepaketen für die Niederschlag-Abfluß Modellierung ist heute ein für die Praxis zentraler Aspekt.

Es schien deshalb an der Zeit, ein Seminar zum Thema Niederschlag-Abfluss Modellierung abzuhalten. Ziel dieses gemeinsam vom ÖWAV, der TU Wien und der Verbundgesellschaft veranstalteten Seminars war es, eine Standortbestimmung in Praxis und Forschung durchzuführen, verschiedene - auch neuere - Methoden vorzustellen und deren Praxistauglichkeit zu bewerten, einen Überblick über die verfügbaren Daten zu geben, sowie einen österreichweiten Erfahrungsaustausch über die komplexen Probleme bei der Niederschlag-Abfluss Modellierung zu ermöglichen. Der Zielsetzung entsprechend war das Seminar in die folgenden Themenblöcke gegliedert: Niederschlag-Abfluss Simulation; Einsatz operationeller Prognosemodelle; Daten und Datenbanken für die Niederschlag-Abfluss Modellierung; Daten mittels Regionalisierung; und Softwareeinsatz. Der vorliegende Band fasst die schriftlichen Beiträge der Seminarvorträge zusammen, um die Seminarinhalte einem weiteren Fachpublikum zugänglich zu machen.

Dieter Gutknecht

Günter Blöschl

Inhaltsverzeichnis

Niederschlag-Abfluss Simulation

<i>G. Müller und A. Münch:</i> Landnutzungsänderungen und Wasserbilanz - Modellierung des Wasserhaushaltes mit dem Modell AKWA-M	7
<i>R. Kirnbauer:</i> Niederschlag-Abfluss-Simulation für Gefahrenzonenpläne - Fallstudie Schesatobel bei Bludenz	19
<i>G. Blöschl und R. Grayson:</i> Flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung	33

Einsatz operationeller Prognosemodelle

<i>M. Bachhiesl und O. Pirker:</i> Zuflussvorhersage im Verbund	57
<i>W. Kugi:</i> Vom Rechenmodell zum operationellen Einsatz	73
<i>H. Wiesenegger:</i> Hochwassermanagement in Salzburg	87
<i>E. David-Labor und M. Heilig:</i> Hydrologische Prognosen in Niederösterreich	101
<i>W. Bors:</i> Hochwassermanagement	113

Daten und Datenbanken für die Niederschlag-Abfluss Modellierung

<i>R. Godina:</i> Überblick über Daten und Datenarchive im Hydrographischen Dienst für Österreich	119
<i>H. Schönlaub:</i> Innkraftwerk Langkampfen - Hochwasserprognosemodell, Datenverwaltung, Datenaustausch	129
<i>H. R. Rezabek:</i> Zur Organisation wasserwirtschaftlicher Daten im Ingenieurbüro	135
<i>W. Lipa:</i> Datenverwaltung und -austausch: Beispiel ZAMG (MET Austria)	139

Daten mittels Regionalisierung

<i>G. Blöschl und R. Merz:</i> Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung	149
<i>P. Lorenz und G. Skoda:</i> Bemessungsniederschläge auf der Fläche für kurze Dauerstufen ($D \leq 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten	179
<i>R. Löhmannsröben:</i> Die Bedeutung des Bodens im Zusammenhang mit der hydrologischen Regionalisierung	201

Softwareeinsatz

<i>F.M. Cate:</i> Softwareeinsatz bei der NA-Modellierung und "Standard" NA Modelle	215
<i>R. Merz und G. Blöschl:</i> Marktüberblick und Beispiele - Software für die NA-Modellierung	223

LANDNUTZUNGSÄNDERUNGEN UND WASSERBILANZ – MODELLIERUNG DES WASSERHAUSHALTES MIT DEM MODELL AKWA-M

Gabriele Müller und Albrecht Münch

Zusammenfassung

Die Landnutzung sowie ihre zeitliche und räumliche Variabilität besitzt für den Wasserhaushalt eine große Bedeutung. Mit dem Wasserhaushaltsmodell AKWA-M lässt sich der Einfluss der Landnutzung sowie deren Änderung beschreiben. Durch ein breites Spektrum von Anwendungsfällen und langjährige Erfahrungen konnte das Modell zu einem geeigneten Instrument zur Erfassung des Wasserdargebots entwickelt werden. Anhand des Einzugsgebietes Lange Bramke/Harz werden die Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten für einen aufwachsenden Fichtenbestand simuliert.

1. Wasserbilanz und Landnutzungsänderungen

Die Kenntnis der natürlichen Verteilung des Wassers nach Ort, Zeit, Menge und Beschaffenheit ist für ein weites Aufgabenspektrum erforderlich: Es reicht von der Wasserbereitstellung und -bewirtschaftung über den Wasserbau und Hochwasserschutz bis hin zu ökologischen Fragen. Der räumliche Bezug der Aufgaben umfasst sowohl lokale und regionale als auch globale Dimensionen. Nicht zuletzt gilt es, die Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt zu quantifizieren.

Angesichts der zunehmenden Brisanz des Wasserproblems auf der Erde und im Hinblick auf die Auswirkungen möglicher Änderungen von Landnutzung und Klima genügen oft mittlere Wasserbilanzen nicht mehr. Vielmehr werden aktuelle Aussagen zur Dynamik der Wasserhaushaltsprozesse sowie zu deren einzelnen Komponenten gefordert, die sowohl den zeitlichen Horizont (z.B. einzelne Jahre oder Monate) als auch die räumliche Detailliertheit (z.B. geologische und pedologische Besonderheiten, die Landnutzung und deren Veränderung) umfassen. Den vielfältigen Forderungen lässt sich nur durch den Einsatz geeigneter Wasserhaushaltsmodelle gerecht werden. Dieses Hilfsmittel erlaubt nicht nur die Wirkungen der wichtigsten Einflussfaktoren auf den Wasserhaushalt zu erfassen, sondern über Szenariorechnungen Prognosen zur förderlichen oder beeinträchtigenden Entwicklung des Wasserhaushaltes zu geben und damit Entscheidungen vorzubereiten.

In diesem Beitrag wird das Wasserhaushaltsmodell AKWA-M vorgestellt und auf Erfahrungen einer breiten Anwendung eingegangen. Es wurde auf der Basis langjähriger Wasserhaushaltsforschung an der TU Dresden in den 80er und 90er Jahren als Modell AKWA (*Aktueller Wasserhaushalt*) entwickelt (Golf und Luckner, 1991; Golf et al., 1993). Eine sowohl inhaltliche wie auch technische Weiterentwicklung zur Variante AKWA-M erfuhr das Modell durch Münch (1994; 1998). Im Ergebnis liegt ein konzeptionelles Wasserhaushaltsmodell vor, das die teilflächenspezifische Berechnung mittlerer und aktueller Wasserbilanzen unter

besonderer Berücksichtigung der Landnutzung ermöglicht. Das Modell besitzt eine modulare Struktur, arbeitet mit Routinemessdaten und ist nutzerfreundlich, einfach handhabbar, praktikabel und robust.

2. Modell AKWA-M

2.1 Überblick

AKWA-M dient der kontinuierlichen Berechnung, Bilanzierung und Darstellung der wichtigsten Verdunstungs- und Abflusskomponenten sowie Speicherinhalte. Sein Hauptanwendungsbereich liegt in Einzugsgebieten des Mittelgebirges und dessen Vorländern mit einer Größe von ca. 1 bis 300 km². Grundsätzlich bietet das Modell jedoch auch für die Anwendung im Hochgebirge und im Lockergesteinsbereich geeignete Voraussetzungen (Müller und Münch, 1997; Dittrich et al., 1999; Dittrich et al., 2000).

Die *meteorologischen Eingangsdaten* können als Tageswerte, aber auch in Pentaden- und Dekadenschritten oder Monatswerten vorliegen. *Berechnungsschrittweite* ist ein Tag. Liegen die Eingangsdaten in anderer zeitlicher Diskretisierung vor, erfolgt programmintern eine Aufteilung in Tageswerte über Wichtungsfaktoren, die einen regionaltypischen Witterungsverlauf widerspiegeln. Die *Ergebnisse* – Verdunstungskomponenten, Zu- und Ausflüsse aus den Speichern sowie Speicherinhalte - sind als Tages-, Pentaden-, Dekaden-, Monats-, Halbjahres- und Jahreswerte zu vereinbaren. Durch die Berechnungsschrittweite „Tag“ lassen sich neben monatlichen oder jährlichen Wasserbilanzen auch innermonatliche Wasserhaushaltsgrößen in ausreichender Genauigkeit bereitstellen.

Zur Validierung des Modells dienen *Kontrolldaten*, die sowohl kontinuierlich (i.d.R. Durchflüsse) und/oder in Form von Terminwerten (z.B. Bodenfeuchten oder Quellschüttungen) vorliegen können. Zum Vergleich berechneter und gemessener Werte und zur Einschätzung der Simulationsgüte werden statistische *Gütekriterien* ermittelt.

Für die Berechnung des Wasserhaushaltes mit AKWA-M wird der fallende Niederschlag auf vertikal angeordnete Speicher, die unterschiedlich schnell durch Verdunstung ausgeschöpft werden bzw. auslaufen, aufgeteilt (Abb. 1). Maß für die mögliche Verdunstungsmenge je Zeitintervall ist die zu ermittelnde potentielle Verdunstung. Das im Gebiet herrschende Feuchteangebot entscheidet über die vollständige oder nur teilweise Umsetzung der verfügbaren Energie in die reale Verdunstung: Nacheinander kommt es zur Ausschöpfung der Energie durch die Komponenten Interzeption, Streu- und Schneeverdunstung, Transpiration, Bodenverdunstung.

Das auf unterschiedlichen Wegen zum Vorfluter gelangende Wasser wird auf Direkt- und Basisabflussspeicher mit charakteristischem Auslaufverhalten verteilt. Die Summe dieser Abflusskomponenten bildet den Gesamtabfluss.

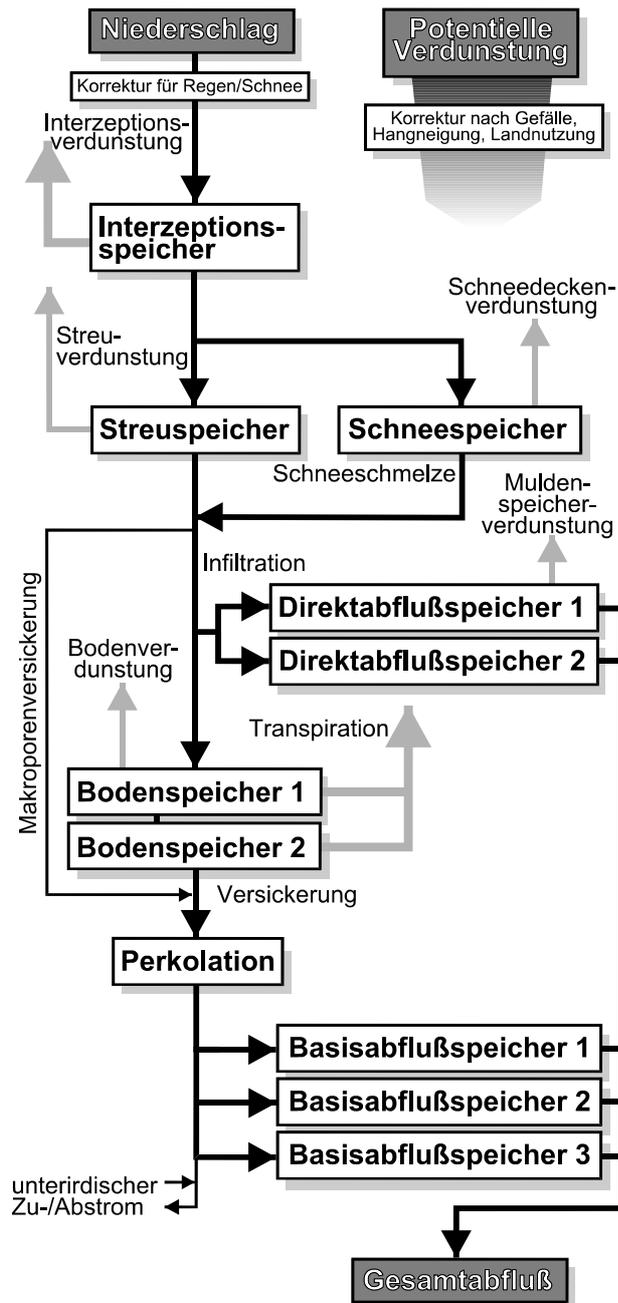


Abb. 1: Struktur von AKWA-M.

Das Modell ist als Blockmodell oder flächendifferenziert einsetzbar. Die lineare, flächengewichtete Superposition der Ergebnisse einzelner Teilflächen oder -gebiete ergibt das Ergebnis für das gesamte Gebiet. Die Gestalt der Teilflächen (z.B. Flächen gleicher hydrologischer Reaktion (Hydrotöpfe)) ist variabel, d.h. es bestehen keine Restriktionen hinsichtlich ihrer Form. Ein Lagebezug zwischen den Teilflächen wird nicht explizit berücksichtigt.

AKWA-M besitzt einen *modularen Aufbau*, wodurch eine flexible Anpassung an die Gegebenheiten der Anwendungsgebiete und an unterschiedliche Datensituationen gewährleistet wird. So kann für die Nachbildung eines Prozesses aus verschiedenen Berechnungsansätzen ausgewählt und die Abfolge der vertikal angeordneten Speicher

z.T. variabel gehandhabt werden. Ebenso sind Erweiterungen hinsichtlich der Vertikalgliederung und zusätzlicher Berechnungsansätze bzw. deren Austausch möglich. Ausführliche Beschreibungen zu den Berechnungsansätzen sind in Münch (1994; 1998) enthalten.

2.2 Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen

AKWA-M berücksichtigt unterschiedliche Landnutzungstypen (Abb. 2). Das geschieht über vegetationsspezifische Parameter und deren Jahresgang bzw. über die Angabe von versiegelten und Wasserflächenanteilen. Waldflächen erhalten eine zusätzliche Abstufung entsprechend des Baumalters und des Grades der anthropogenen Beeinflussung. Änderungen der Landnutzung lassen sich durch eine Dynamik der entsprechenden Parameter über den Simulationszeitraum direkt in die Berechnung einbeziehen. So kann das reale Geschehen, insbesondere bei sukzessiven Änderungen, vorteilhaft verarbeitet werden.

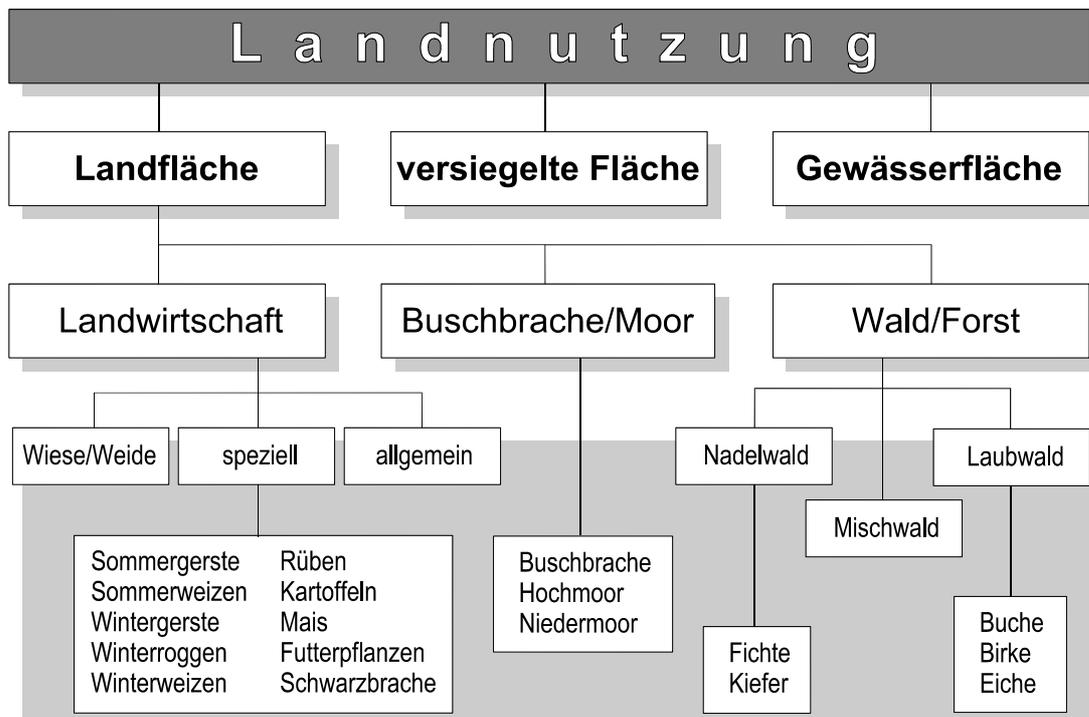


Abb. 2: Landnutzungen, die in AKWA-M berücksichtigt werden.

Abb. 3 zeigt die mittlere Wasserhaushaltsbilanz für einen Standort, dessen Landnutzung (Vegetation, Versiegelungsgrad) bei sonst gleichbleibenden Faktoren variiert wurde. Es wird deutlich, welche Bedeutung die Landnutzung für den Wasserhaushalt besitzt.

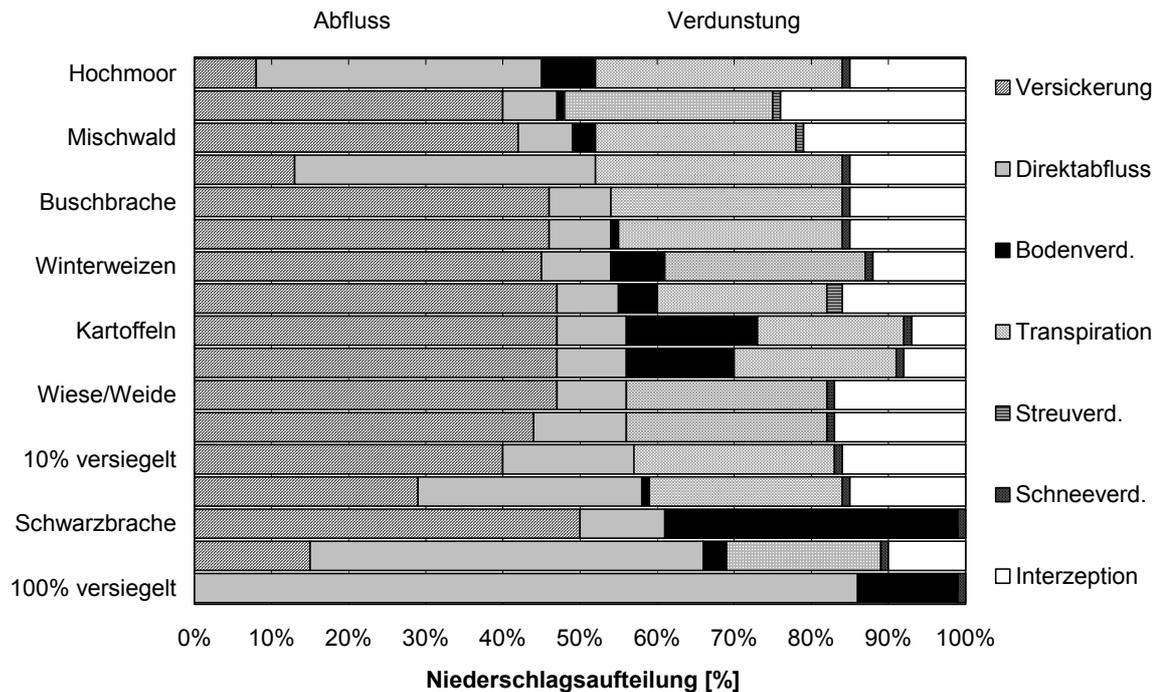


Abb. 3: Einfluss unterschiedlicher Landnutzungen auf Verdunstung und Abfluss sowie deren Komponenten.

3. Wasserhaushalt eines aufwachsenden Fichtenbestandes im Gebiet der Langen Bramke (Harz)

Das Einzugsgebiet der Langen Bramke (0,76 km²) wurde 1948 fast vollständig kahlgeschlagen und in den Folgejahren mit Fichtenmonokultur bestockt, ausgenommen einem teilweise stark vernässten Bereich der Talaue. Mitte der 50er Jahre war der Bestand zu einer Dickung herangewachsen, ab den 70er Jahren erfolgte der Übergang zum Stangenholz. Durch gleichzeitige Einrichtung von Messanlagen ist heute ein wertvolles Datenmaterial über eine Beobachtungsdauer von mehreren Jahrzehnten nutzbar (Liebscher, 1988).

Der Wasserhaushalt des aufwachsenden Fichtenbestandes wurde mit dem Modell AKWA-M über den Zeitraum von November 1948 bis Dezember 1986 berechnet. Das Gebiet wurde in einen Südosthang, einen Nordhang und den grundwasserbeeinflussten Talauenbereich untergliedert. Um das Aufwachsen des Bestandes in die Simulation einfließen zu lassen, bekam der Modellparameter „Wuchsklasse“, der die für Interzeption bzw. Transpiration verantwortlichen Größen Interzeptionsspeicher, Blattflächenindex und Wurzeltiefe beeinflusst, Werte zugewiesen, welche den ermittelten Bestockungsgraden entsprachen. Während der Simulation über den Gesamtzeitraum variierte die Wuchsklasse entsprechend des aufwachsenden Bestandes.

Die Modelleichung anhand gemessener Durchflüsse und der Ergebnisse aus der Ganglinien-analyse (Schwarze et al., 1991) erfolgte in den zwei Perioden, für welche relativ sichere Aussagen zum Entwicklungsstand des Waldes vorlagen (1949-53 und

1980-83). Mit dem kalibrierten Parametersatz wurde eine kontinuierliche Simulation über den Gesamtzeitraum durchgeführt.

Den Einfluss des aufwachsenden Bestandes auf den Wasserhaushalt dokumentieren sowohl der Abfluss als auch die Verdunstung. Der *Abfluss* aus dem Einzugsgebiet nahm von ca. 60 % des Niederschlages im Simulationszeitraum auf ca. 54 % ab. Im Mittel berechnete das Modell einen Abfluss $Q = 703 \text{ mm/a}$, der beobachtete Abfluss betrug $Q_{\text{BEO}} = 693 \text{ mm/a}$. Der Korrelationskoeffizient der simulierten und beobachteten Jahresabflüsse ergab sich zu 0,95. Abb. 4 zeigt die aktuellen Jahresabflüsse. Deutlich erkennbar und vom Modell gut wiedergegeben ist die hohe Dynamik in den einzelnen Jahren.

Die Entwicklung der *Verdunstung* lässt sich wie folgt beschreiben: Während des Aufwachsens des Bestandes stiegen die Gesamtverdunstung von anfänglich ca. 400 mm/a auf 550 bis 600 mm/a, die Interzeptionsverdunstung bzw. die Transpiration von etwa 50 bzw. 60 mm/a auf 280 bis 320 bzw. 250 bis 300 mm/a. Die infolge geringerer Interzeption bzw. Transpiration in den Anfangsjahren vorhandene „überschüssige“ Wassermenge kam jedoch nicht voll zum Abfluss, sondern verdunstete direkt aus dem Boden und durch die sich schnell ansiedelnde Bodenvegetation. Zunächst wurden dafür ca. 280 mm/a berechnet, bis Mitte der 60er Jahre ging dieser Betrag bis auf Null zurück. Die in den ersten Berechnungsjahren zu hoch simulierten Jahresabflüsse zeigen, dass diese Verdunstungsmenge durchaus noch größer sein kann.

Die Aufteilung des Niederschlages auf einzelne Verdunstungs- und Abflusskomponenten zeigt Abb. 5. Angegeben sind die 5-Jahresmittel. Deutlich ist die Zunahme der Verdunstung, speziell der Interzeption und der Transpiration auf Kosten der Boden- und Streuverdunstung und eines Teils des Abflusses (etwa 7 bis 10 % des Niederschlages). Den höchsten Anteil an der Verdunstung erreicht sehr schnell die Transpiration (rund ein Viertel des Niederschlages). Bei getrennter Betrachtung der Teilflächen liegt die Transpiration für die Teilfläche mit südöstlicher Exposition ab 1970 meist über 300 mm/a, während die nordexponierte Teilfläche diese Werte nur selten erreicht.

Zwei Szenariorechnungen geben darüber Auskunft, wie sich der Wasserhaushalt entwickelt hätte, wenn der Altbestand belassen bzw. das abgeholzte Gebiet nicht aufgeforstet, sondern als Wiesenfläche genutzt worden wäre. Durch den Kahlschlag flossen in den ersten zehn Jahren zwischen 80 und 180 mm/a mehr ab. Nach 1965 entspricht das Verdunstungsverhalten des aufwachsenden Bestandes bereits dem eines Altbestandes. Im Gegensatz dazu erzeugt eine unaufgeforstete Wiesenfläche im Mittel ca. 80 mm/a mehr Abfluss als der Fichtenbestand (Abb. 6).

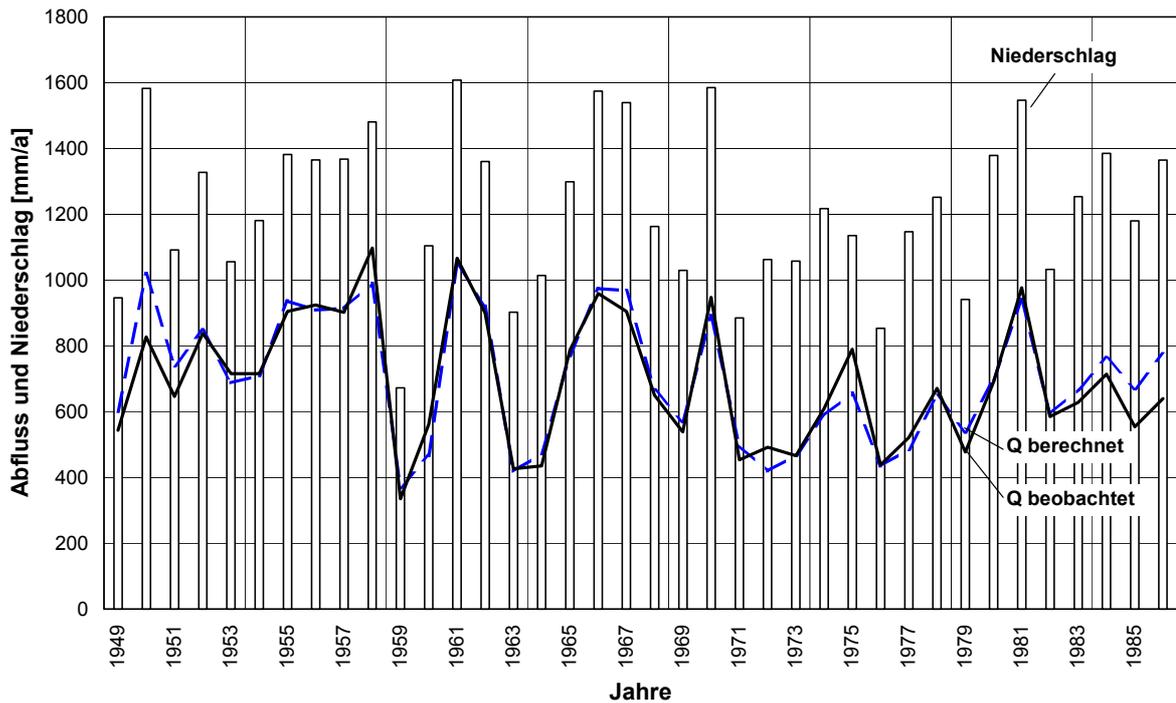


Abb. 4: Aktuelle Jahresabflüsse für das Gebiet der Langen Bramke, Simulationszeitraum 11/1948 - 12/1986.

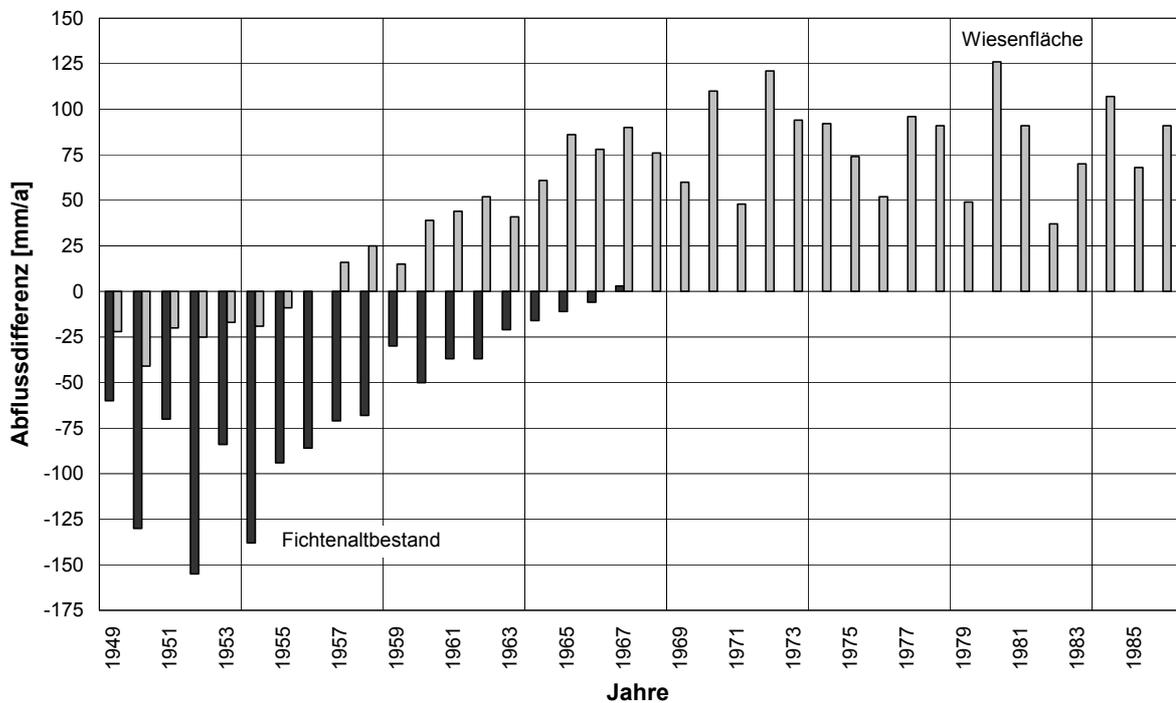


Abb. 5: Aufteilung des Niederschlages auf Verdunstungs- und Abflusskomponenten der Langen Bramke, berechnet mit AKWA-M als 5-Jahresmittel.

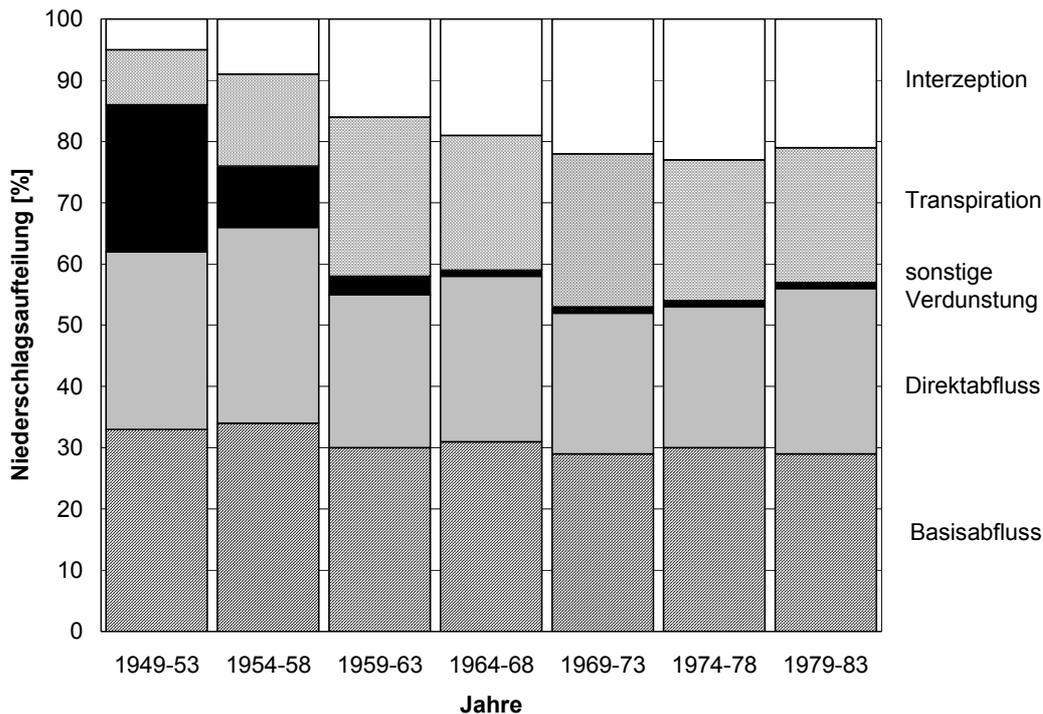


Abb. 6: Jahresabflussdifferenz der Szenarien „Fichtenaltbestand“ und „Wiesenfläche“ gegenüber den simulierten Werten für den aufwachsenden Fichtenbestand der Langen Bramke.

4. Erfahrungen mit AKWA-M

Nicht nur dieses Beispiel der Langen Bramke hat gezeigt, dass es mit einem Modell wie AKWA-M möglich ist, Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt berechnen zu können. Seit seiner Entwicklung hat AKWA-M eine breite Anwendung gefunden (Münch 1994; Müller und Münch 1997). Die Palette der bearbeiteten Aufgaben umfasst sowohl Forschungsthemen wie auch praktische Fragestellungen (siehe Tab. 1): Sie reicht vom Prozessstudium zum Wasserhaushalt über die gemeinsame Betrachtung von Wasser- und Stoffhaushalt bis zur Wasserdargebotsermittlung für unbeobachtete und anthropogen beeinflusste Gebiete. Die Mehrzahl der bisherigen Anwendungen war im Festgesteinsbereich der Mittelgebirge und seiner Vorländer angesiedelt. Die Speicheransätze, auf denen das Modell größtenteils beruht, sind dafür gut geeignet.

Die Erfahrungen bestätigen darüber hinaus die Anwendbarkeit von AKWA-M auch für Fragestellungen im Lockergesteinsbereich. Um den hier vorliegenden natürlichen Gegebenheiten Rechnung zu tragen, müssen zusätzlich die Wechselwirkungen mit den Grundwasserleitern beachtet und bilanziert werden. Die teilflächenspezifisch berechnete Grundwasserneubildung kann als Input für instationäre Grundwasserleitermodelle übernommen werden. In Verbindung mit Grundwasserleiter- und Seenmodellen sowie teilgebietsbezogener Betrachtung und Bilanzierung eignet sich AKWA-M auch für die Bearbeitung von Gebieten mit intensiven Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Oberflächengewässern (Seen, Talsperren).

Tab. 1: Beispiele für Anwendungsbereiche des Modells AKWA-M.

Problemkreis/Anwendungsbereich	Beispiel
Modellgestützte Untersuchungen zu Wasserhaushaltsprozessen und ihren Einflussfaktoren	hydrologisches Versuchsgebiet Wernersbach/ Tharandter Wald der TU Dresden
Hydrologische Erstbeurteilung und hydrologisch-wasserwirtschaftliche Analyse für unbeobachtete bzw. stark anthropogen beeinflusste Gebiete	Naturschutzgebiete „Oberlausitzer Heide- und Teichlandschaft“, „Niederspree“, „Presseler Heidewald- und Moorgebiet“; Kaitzbach-Einzugsgebiet im Randgebiet der Stadt Dresden,
Schlagbezogene Modellierung des Wasserhaushaltes im landwirtschaftlich genutzten Wassereinzugsgebiet einer Trinkwassertalsperre	Talsperre Saidenbach/Erzgebirge
Wasserhaushaltsuntersuchungen im ausschließlich forstlich genutzten Einzugsgebiet einer Trinkwassertalsperre	Talsperre Neunzehnhain/Erzgebirge
Erfassung von Landnutzungsänderungen und ihres möglichen Einflusses auf den Wasserhaushalt	Einzugsgebiete im Erzgebirge, Harz und Hessischen Bergland; Regenwasserver-sickerungsanlagen in Dresden
Erfassung des Wasserdargebots, Abschätzung der Grundwasserneubildung und der Zehr-wirkung von Seen in Gebieten des Lockergesteinsbereiches	Wentowgewässer, Werbellinseegebiet (Brandenburg)
Ermittlung von Wasserhaushaltskomponenten als Grundlage für die Anwendung von Stoffauswaschungsmodellen	Einzugsgebiete im Erzgebirge und im Lößhügelland bei Meißen (Sachsen)

Sowohl im Tiefland wie auch generell bei größeren Einzugsgebieten sind Translationsprozesse nicht mehr zu vernachlässigen. Die Kopplung mit einem Flusslaufmodell ist darum sinnvoll. Eine Alternative dazu besteht in einer teilgebietsbezogenen Anwendung von AKWA-M in einem Flussgebiet mit anschließendem Zusammenschalten der Ergebnisse entsprechend ihrer Translationszeit.

Für eine Anwendung des Modells für Gebiete im Hochgebirge sind die Voraussetzungen gegeben. Entsprechend den extremeren Bedingungen, der Höhenverteilung des Gebietes, dem stärkeren Gefälle und der alpinen Vegetation sind örtliche Anpassungen vorzunehmen. Das betrifft die Gebietsgliederung in Teilflächen, die Wahl der Kennwerte und Parameter oder auch die Auswahl von geeigneteren Berechnungsansätzen für Schneeschmelze, Verdunstung und Abflussbildung.

Insgesamt bestätigen die bisherigen Erfahrungen das Modell AKWA-M als ein geeignetes Instrument zur Erfassung des Wasserhaushaltes und zur Bewertung der vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Situation. Die enge Verbindung von Erfahrungsträgern der Modellierung einerseits und Entscheidungsgremien (Behörden, Firmen) andererseits führen zu effektiven Lösungen bei Modellanwendungen. Künftige Weiterentwicklungen sollten sich sowohl auf oben genannte inhaltliche Aspekte als auch auf die Software konzentrieren. Der Parameterzusammenstellung für die Landnutzung auf Grundlage neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse und deren Integration in die AKWA-M-Struktur kommt dabei große Bedeutung zu.

5. Literatur

Dittrich, I. und A. Münch (1999) Künstliche Niederschlagsversickerung und die Änderung der Grundwasserneubildung. *Wasser und Boden*, 51/9, 11-15.

Dittrich, I., S. Kleber und A. Münch (1999) Pflege- und Entwicklungsplan Naturschutzgroßprojekt „Presseler Heidewald- und Moorgebiet“ – Abiotische Verhältnisse. Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, Bannewitz.

Dittrich, I. und A. Münch (2000) Pflege- und Entwicklungsplan Naturschutzgroßprojekt „Teichgebiete Niederspree-Hammerstadt“ – Abiotische Grundlagen und Randbedingungen. Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, Bannewitz.

Golf, W. und K. Luckner (1991) AKWA - ein Modell zur Berechnung aktueller Wasserhaushaltsbilanzen kleiner Einzugsgebiete im Erzgebirge. *Acta Hydrophysica* 32 (1), 5-20.

Golf, W., K. Luckner und A. Münch (1993) Berechnung der Waldverdunstung im Wasserhaushaltsmodell AKWA. *Meteorologische Zeitschrift* 2 (3), 99-107.

Liebscher, H.-J. (1988) Oberharzer Versuchsgebiete: Bericht über die Untersuchungen in den Jahren 1981 bis 1985. Mitt. der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz.

Münch, A. (1994) Wasserhaushaltsberechnungen für Mittelgebirgseinzugsgebiete unter Berücksichtigung einer sich ändernden Landnutzung. Diss., TU Dresden, Fak. f. Forst-, Geo- u. Hydrowissenschaften.

Müller, G. und A. Münch (1997) Wasserhaushaltsmodellierung in Einzugsgebieten des Fest- und Lockergesteins mit dem Modell AKWA-M. Tagungsband „Modellierung in der Hydrologie“, Dresden, 191-200.

Münch, A. (1998) Wasserhaushaltsmodell AKWA-M. Programmdokumentation Version 2.3. Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, Bannewitz (unveröff.).

Schwarze, R., A. Herrmann, A. Münch, U. Grünwald und M. Schöniger (1991) Rechnergestützte Analyse von Abflusskomponenten und Verweilzeiten in kleinen Einzugsgebieten. *Acta Hydrophysica* 35, Heft 2, 143-184, Berlin.

Anschrift der Verfasser:

Dr. Gabriele Müller
Bundesministerium f. Land- u. Forstwirtschaft, Umwelt u. Wasserwirtschaft -
Hydrographisches Zentralbüro
Marxergasse 2
A - 1030 Wien
Tel. +43 1 / 711 00 - 6930
E-mail: Gabriele.Mueller@bmlfuw.gv.at

Dr. Albrecht Münch
Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH
Gerlinger Str. 4
D - 01728 Bannewitz
E-mail: Hydro-Consult@t-online.de

NIEDERSCHLAG-ABFLUSS-SIMULATION FÜR GEFAHRENZONENPLÄNE FALLSTUDIE SCESATOBEL BEI BLUDENZ

Robert Kirnbauer

1. Einleitung

Die Schesa bei Bludenz, ein linksseitiger Zubringer der Ill in Vorarlberg, ist ein Wildbach, der seit ca. 200 Jahren den Siedlungsraum und die Verkehrswege im Bereich von Bludenz bedroht (Üblagger, 1995; Aulitzky, 1994).

Diese Bedrohung ergibt sich aus Hochwasser- und Murengefahr, ganz besonders aber aus der Gefährdung durch riesige Massenbewegungen, die durch den unterirdischen Wasserhaushalt im oberen Einzugsgebiet des Schesabaches mit beeinflusst werden können. Das Gefährdungspotenzial resultiert aus dem Zusammenwirken vieler Einflussfaktoren: Die geologischen Verhältnisse (die Lockersedimente sind in einem glazialen Eisrandsee abgelagert worden, das anstehende Gebirge, insbesondere die Raiblerschichten, zeigt Gipskarst; Pirkl, 2000) in Verbindung mit der meteorologischen Situation (hohe Jahresniederschläge von ca. 1500mm) führen zu Bodenbildungen, die das Auftreten von Vernässungszonen und somit die Hochwasserentstehung begünstigen. Durchnässung des anstehenden Lockermaterials als Folge von Versickerung bzw. von unterirdischem Zustrom kann zu dessen Labilisierung führen und erhöht das Risiko großer Massenbewegungen. Anthropogene Eingriffe, speziell die im 18. Jahrhundert vollzogene Entwaldung, haben zusätzlich mitgewirkt, die Erosions-, Muren- und Bruchkesseldynamik auszulösen, die das Bild des Schesatobels heute prägt (Aulitzky, 1994). Siehe Abb. 1.

In der vorliegenden Arbeit wird berichtet über Untersuchungen zur Ermittlung des Bemessungshochwassers der Schesa als Grundlage der Gefahrenzonenplanung und in der Folge auch der wildbachtechnischen Maßnahmen zur Beherrschung des Muren- und Massenbewegungsrisikos. Diesem Ziel soll eine Rückböschung der Steilabbrüche und Verwertung des Abtragsmaterials als Betonkies dienen. Die durch den Abtrag wesentlich verflachten neuen Böschungen sollen durch ein adäquates System von Entwässerungsgerinnen dräniert und vor größerer Linienerosion geschützt werden. In diesem Schutz soll sich in natürlicher Sukzession eine standortgerechte Vegetation entwickeln, die zur endgültigen Stabilisierung führen soll (Üblagger, 1995).

Das Bemessungshochwasser, dessen Ermittlung im Folgenden skizziert wird, ist somit nur ein einzelner Aspekt bei der Erstellung des Gefahrenzonenplanes für die Schesa. Zu berichten ist von einer Ingenieurarbeit, die auf den Ergebnissen interdisziplinärer Zusammenarbeit aufbauen konnte und ohne diese nicht möglich gewesen wäre.

2. Voruntersuchungen als Basis der Bearbeitungen

Entsprechend der Bedeutung des Risikopotenzials der Schesa wurde von anderen Bearbeitern eine Fülle von Voruntersuchungen durchgeführt, zum Teil auch Detailuntersuchungen, deren Berichte nicht leicht greifbar sind, deren Ergebnisse aber in den weiter unten besprochenen Arbeiten zusammengefasst werden.



Abb.1: Blick in den Schesa-Bruchkessel von ca. NE (aus Mölk, 1996).

Generelle Überlegungen zur Kritikalität, zum Risikomanagement und zur Maßnahmenplanung stellte der Projektleiter des Pilotprojektes Schesasanierung, Üblagger (1995) an. Geologische und sedimentologische Untersuchungen, Überlegungen zur Verwertbarkeit des Rückböschungsmaterials, Pollenanalysen, Altersbestimmungen mit der Radiokarbonmethode wurden von Bertle (1998) und Bertle (1999) durchgeführt bzw. angestellt. Beregnungsversuche, Erhebungen der Bodenfeuchte sowie die Ergebnisse von bodenphysikalischen und Biomasseuntersuchungen sind in Markart et al. (1996) und Markart et al. (1997) dokumentiert. Aufbauend auf Untersuchungen zur Hydrogeologie (Pirkl, 2000) und auf den Ergebnissen der Beregnungsversuche (Markart et al., 1996) entwickeln Pirkl et al. (2000) Konzepte zur örtlichen Verteilung der Versickerungsleistung der Böden bzw. von ober- bzw. unterirdischem Abfluss. Die Untersuchungen von Mölk (1996) dienen dazu, an Hand detaillierter Untersuchungen im Mühltobel, der dem Schesatobel benachbart ist, sich aber in einem weitgehend selbstregelnden, substationären Systemzustand befindet, Analogieschlüsse auf die im Schesatobel anzuwendende Stabilisierungsstrategie zu ziehen. Als geometrische Grundlage der nachstehend beschriebenen Arbeiten zur Ermittlung des Bemessungshochwassers wurde von der Wildbach- und Lawinenverbauung Bludenz eine Luftbilddauswertung als AutoCAD Datei zur Verfügung gestellt.

Bedauerlicher Weise lagen keine unmittelbar im Einzugsgebiet der Schesa erhobene Niederschlagsdaten in hoher zeitlicher Auflösung vor. Daher musste auf regionale Untersuchungen zurückgegriffen werden, die weiter unten (Abschnitt 3.2) behandelt werden.

3. Verfahren

3.1 Überblick

Unterschiedliche Bemessungsregenganglinien von Ereignissen der Dauer einer Stunde, diskretisiert nach Intervallen von fünf Minuten, wurden in einem einfachen Niederschlag-Abfluss-Modell verarbeitet, dessen Parameter innerhalb plausibler Grenzen variiert wurden. Die Abflussbildung wird in diesem Modell beschrieben durch örtlich unterschiedliche Abflussbeiwerte, wie sie sich aus den Beregnungsversuchen von Markart et al. (1996) in Verbindung mit den Überlegungen zur Hydrogeologie von Pirkl et al. (2000) ergeben. Das Abflusskonzentrationsmodell fußt auf einem Isochronenmodell, dem Zeit-Flächen-Diagramm, erweitert um einen nachgeschalteten Linearspeicher, wie in Gutknecht (1978) beschrieben. Das Modell ist zweistufig, mit je einem Teilmodell für die rasche bzw. für die verzögerte Abflussreaktion.

Jener Anteil des Bemessungsregens, der nicht als schnelle Abflussreaktion wirksam wird, wird durch einen zweiten, parallelgeschalteten Linearspeicher geleitet und dort stärker retendiert als der rasche Abflussanteil. Beide Anteile werden zuletzt überlagert und ergeben die Bemessungswelle. Dieser Modellansatz wird für die drei Teileinzugsgebiete der Schesa, den Hölltobel, den Schesa Hauptbach und den Burtschabach angesetzt. Bezugspunkt für den Bemessungsabfluss ist der Zusammenfluss dieser drei Bäche im Bruchkessel.

3.2 Bemessungsregen

Mangels ausgewerteter bzw. auswertbarer Datenbasis für das unmittelbare Projektgebiet mussten die Bemessungsregen aus Analogieschlüssen abgeleitet werden: In den umfangreichen Niederschlagsauswertungen von Zeller et al. (1977) findet sich als örtlich nächstgelegene ausgewertete Ombrographenstation die Messstelle St. Gallen-Rotmonten. Sie liegt auf ca. 600 Meter Seehöhe. Die Topographie ihrer Umgebung ist zwar dem Schesa-Gebiet sehr unähnlich, aber als einziger Ombrographenstation in der Nähe des Projektgebiets wurde ihr der Vorzug gegenüber anderen Messstellen gegeben, deren Regenreihen aus Tagessummen des Niederschlages ermittelt und in den Bereich von kurzen Regendauern extrapoliert wurden. Angesichts der Kleinheit und der Steilheit des Schesagebietes war zu fordern, dass die Regenreihen auch noch im Minutenbereich durch Messungen belegt sein sollten. Die Kompatibilität der Bemessungswerte von St. Gallen mit lokalem Beobachtungen wurde überprüft an Hand von Starkregenuntersuchungen von Gutknecht und Watzinger (1993). Diese Überprüfung ergab, dass der hundertjährige Ein-Stunden-Regen von St. Gallen in der Größenordnung des hundertjährigen Tagesniederschlages an den Stationen der näheren Umgebung der Schesa (Bürs, Schruns, Parthenen, Blons) liegt. Der Bemessungswert liegt also offensichtlich weit auf der sicheren Seite. Das Landeswasserbauamt Vorarlberg (1996) stellte eine Regenreihe für Bregenz zur Verfügung. Auch diese lag mit ihren Niederschlagsintensitäten deutlich tiefer als St. Gallen.

Angesichts des Höhenunterschiedes zwischen der Messstelle St. Gallen-Rotmonten (ca. 600 m ü. A.) und dem Schesa-Gebiet (ca. 1500 m ü. A.) erschien es sinnvoll, eine meteorologisch plausible Abwertung des Bemessungsregens an Hand von DVWK (1989) vorzunehmen. Diese Abminderung fußt auf den folgenden Überlegungen: Bei lokalen Starkregen, wie sie als Bemessungsregen für Kleinstzugsgebiete, also auch für die Schesa, angesetzt werden, ist es entscheidend, wie viel Wasser in der Atmosphäre über dem betrachteten kleinen Gebiet als Wasserdampf enthalten ist, und dies ist stark abhängig von der Höhe der Luftsäule. Und wegen der Temperaturabhängigkeit des Wassergehaltes der Luft ist in den tieferen, wärmeren Luftschichten relativ mehr Wasser gebunden als in den höheren, kühleren. Liegt das Einzugsgebiet der Bemessung auf großer Seehöhe, dann bedingt das "Wegschneiden" der Luftsäule von unten einen relativ großen Verlust an ausfällbarem Wasser. Im Falle der Ableitung des Bemessungsregens für die Schesa (auf ca. 1500m ü. A.) aus St. Gallen (auf ca. 600m ü. A.) bedingt das Beschneiden der Luftsäule um ca. 10% einen Wasserverlust von rund 25%. Die höhenreduzierten Ordinaten des Bemessungsregens für die Schesa sind somit um 25% kleiner als jene von St. Gallen-Rotmonten.

Zwei Varianten der zeitlichen Verteilung des Bemessungsregens wurden angesetzt, und zwar jeweils eine Gleichverteilung bzw. ein anfangsbetonter, zeitlich variabler Bemessungsregen, der durch Umsortieren der Regenelemente laut Regenreihe entstanden war. Die Summenlinien der Bemessungsregen sind in Abb. 2 dargestellt. Die Regenordinaten der zeitlich variablen Bemessungsregen in ursprünglicher bzw. in höhenreduzierter Größe sind in Tab. 1 aufgelistet.

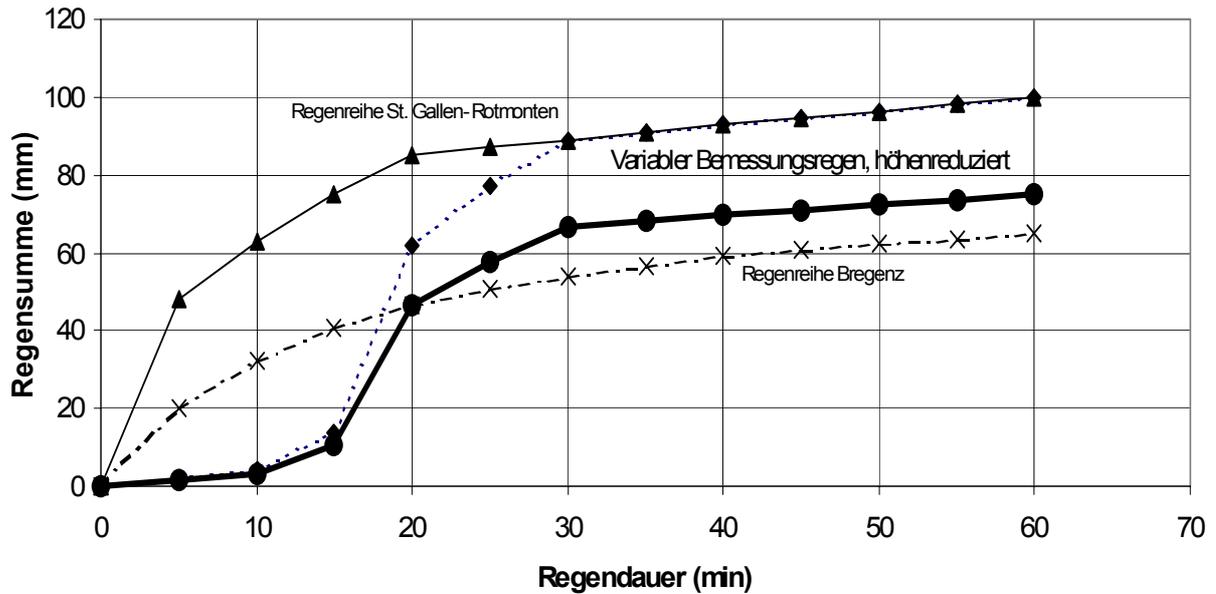


Abb. 2: Bemessungsregen für den Oberlauf der Schesa.

Tab. 1: Zeitlich variable Bemessungsregen für die Schesa aus St. Gallen Rotmonten (ohne bzw. mit Abminderung lt. DVWK (1989)).

Zeitintervall (min)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60
ohne Abmind (mm / 5 min)	2,0	2,0	10,0	48,0	15,0	12,0	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8
höhenreduziert (mm / 5 min)	1,5	1,5	7,5	36,0	11,25	9,0	1,43	1,43	1,35	1,35	1,35	1,35

3.3 Isochronen

Die Laufzeitberechnungen zur Bestimmung der Isochronen für das Zeit-Flächen-Diagramm wurden nach zwei Ansätzen vorgenommen.

- a) Für den Abfluss in den Gerinnen die bekannte Laufzeitformel nach Kirpich:

$$t_c = \frac{0,0195 \cdot L^{1,155}}{\delta H^{0,385}} \quad (1)$$

Hierin ist t_c die Konzentrationszeit in Minuten, L die Lauflänge in Metern von der Wasserscheide bis zum betrachteten Punkt, und δH der zugehörige Höhenunterschied in Metern.

- b) Für den Abfluss im Gelände wurde die Formel nach Morgali und Linsley (1965) herangezogen:

$$t = \frac{628,3 \cdot L^{0,593} \cdot n^{0,602}}{r^{0,388} \cdot J^{0,38}} \quad (2)$$

Hierin ist t die Laufzeit in Sekunden, L die Lauflänge in Metern, n die Rauigkeit, dargestellt als Reziprokwert des Beiwertes nach Manning-Strickler, r die Effektivregenspende in l/(s.ha) und J das Gefälle als dimensionslose Zahl.

Gelände- und Gerinnelaufzeit werden entlang ausgewählter Falllinien ermittelt, sinngemäß addiert, und daraus das Isochronenbild interpoliert. Das Isochronenbild für das Projektgebiet ist in Abb. 3 dargestellt.

3.4 Abflussbildungsansatz

Die Abflussbeiwertverteilungen nach Markart et al., (1996), siehe Abb. 4, sind entstanden auf Basis von Berechnungsversuchen durch Markart und von Geländebegehungen, Bodensondierungen, Schurfen (Forster und Rickli, (1995)). Sie werden mit dem Isochronenbild, Abb. 3, verschnitten, und für jeden Isochronenstreifen wird der jeweils gültige Abflussbeiwert durch flächengewogene Mittelung bestimmt. Von den in Abb. 4 angegebenen Spannweiten für die Abflussbeiwerte wurden jeweils die Mittelwerte zwischen Ober- und Untergrenze sowie vergleichsweise auch die Obergrenzen verwendet. Die daraus abgeleiteten Abflussbeiwerte der Isochronenstreifen sind in Tab. 2 zusammengefasst. Dadurch entsteht ein quasi flächendetailliertes Abflussmodell.

Tab. 2: Abflussbeiwerte der Isochronenstreifen in den Teilgebieten der Schesa für mittlere Verhältnisse.

		Isochronenstreifen (Minuten)					k_o	k_u
		0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	(min)	(min)
Hölltobel							30 bis 60	1800
Fläche	(ha)	9,43	17,69	10,27	5,85	1,43		
Abflussbeiwert	(-)	0,69	0,41	0,34	0,34	0,31		
Schesa Hauptbach							30 bis 60	1800
Fläche	(ha)	19,76	20,33	17,79	18,04	9,94		
Abflussbeiwert	(-)	0,88	0,83	0,52	0,31	0,14		
Burtschabach							25 bis 50	1800
Fläche	(ha)	10,63	10,84	6,14	1,59			
Abflussbeiwert	(-)	0,76	0,55	0,22	0,17			

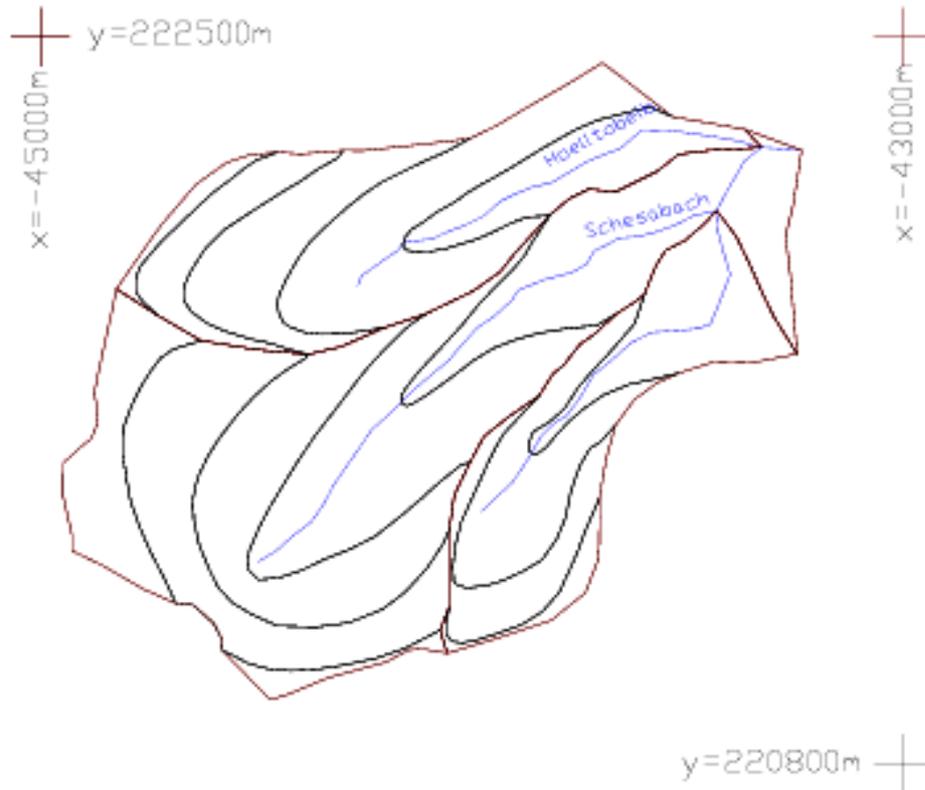


Abb. 3: Isochronenbild Schesa; Intervall: 5 Minuten.

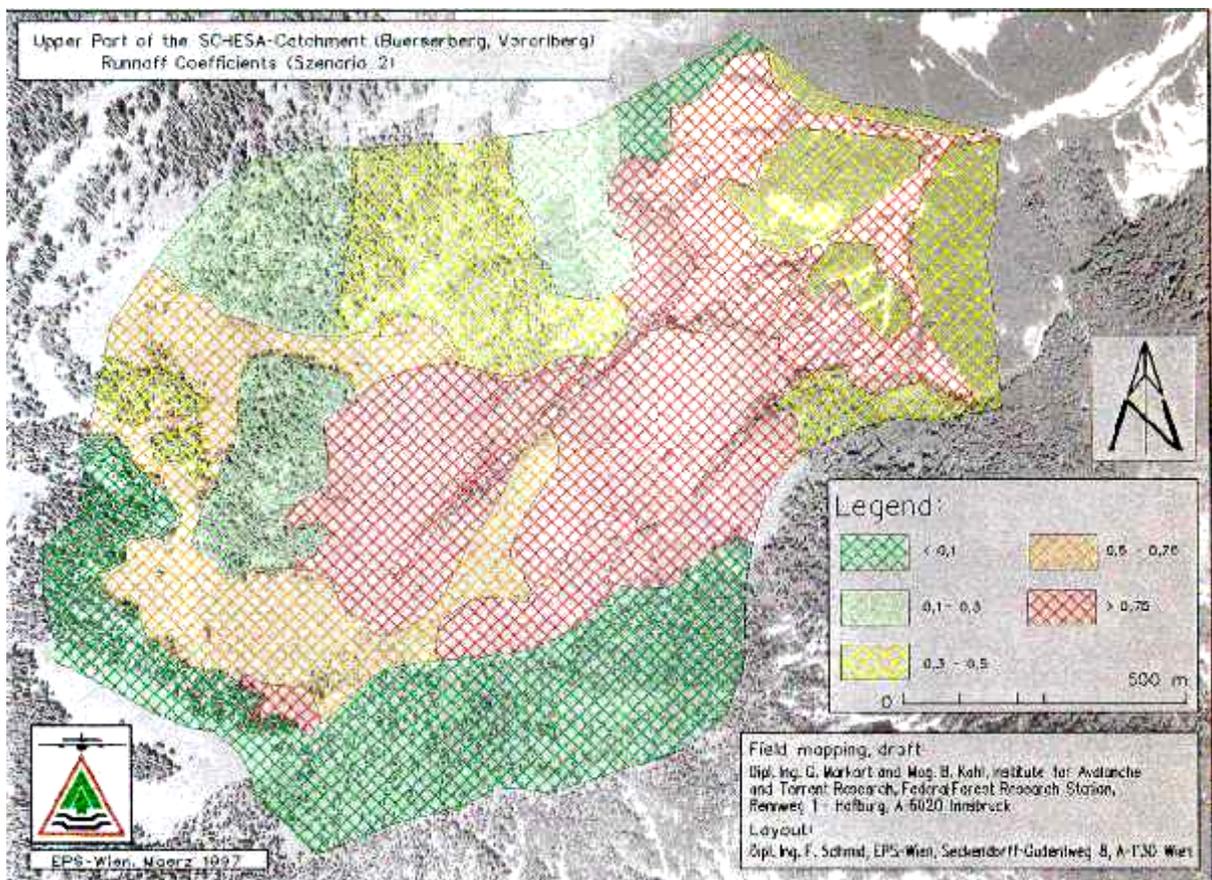


Abb. 4: Örtliche Verteilung der Abflussbeiwerte in der Schesa nach Markart et al. (1996).

3.5 Abflusskonzentrationsmodell

Das erweiterte Zeit-Flächen-Diagramm-Verfahren nach Gutknecht (1978) schließt an die Faltungsoperation des rasch abflusswirksamen Regenanteiles (Effektivregens) mit dem Zeit-Flächen-Diagramm noch einen Linearspeicher an, durch den Retentions- und Dämpfungsvorgänge im Einzugsgebiet nachgebildet werden. Die Speicherkonstante (k-Wert) dieses Linearspeichers wird im allgemeinen durch Analyse von Auslauflinien des zu modellierenden Gewässers ermittelt. Beim Modell für die Schesa waren zwei Speicherkonstanten zu ermitteln, eine für die rasche Abflussreaktion, eine für den verzögerten Abfluss. Bei der Schesa war mangels Beobachtungen die Ableitung der k-Werte aus beobachteten Abflussganglinien nicht möglich. Daher musste auf übliche Schätzverfahren bzw. Analogieschlüsse zurückgegriffen werden. Der k-Wert für die rasche Abflussreaktion wurde wie üblich mit der ein- bis zweifachen Konzentrationszeit geschätzt, die Schätzung für den verzögerten Abflussanteil basiert auf Erfahrungswerten von Ganglinienanalysen einer größeren Anzahl von Gewässern in Österreich (Kresser und Kirnbauer, 1983). Die für die Berechnung des Bemessungsabflusses verwendeten Parameter k_0 bzw. k_u für den raschen bzw den verzögerten Abflussanteil in den drei Teileinzugsgebieten der Schesa sind in Tab. 2 enthalten.

3.6 Ergebnisse

Grundsätzlich sind die nachstehend angeführten Input- und Parameterkombinationen als Ausgangsgrößen für die Simulationsläufe denkbar:

Niederschlag:

- St. Gallen Rotmonten unabgemindert
- St. Gallen Rotmonten abgemindert (höhenreduziert)
- Bregenz unabgemindert
- Bregenz abgemindert (höhenreduziert)

Zeitliche Verteilung des Niederschlages:

- Gleichverteilung
- anfangsbetont variabel

Abflussbeiwert:

- Obere Szenariogrenze
- Mittelwert laut Szenario

Retentionskonstante der raschen Abflussreaktion:

- einfache Konzentrationszeit
- doppelte Konzentrationszeit

Die Retentionskonstante der verzögerten Abflussreaktion zu variieren ist nicht sinnvoll, da sich die Ergebnisse mit unterschiedlichen, aber innerhalb plausibler Grenzen liegenden Parametern nicht deutlich unterscheiden.

Aus der Kombination aller dieser Eingangsgrößen bzw. Modellparameter ergibt sich eine Mannigfaltigkeit von $4*2*2*2=32$ möglichen Bemessungsdurchflüssen. Alle diese Permutationen durchzurechnen, ist nicht sinnvoll. Manche Parameterkombi-

nationen ergeben unrealistisch große oder kleine Abflüsse, manche zeitlichen Regenverteilungen ergeben Bemessungsganglinien, deren Form unrealistisch ist. Eine Auswahl der berechneten Ergebnisse wird in Tab. 3 wiedergegeben, drei plausible Bemessungsganglinien in Abb. 5. Letztere wurden mit folgenden Eingangsgrößen bzw. Parametersätzen berechnet: Bemessungsregen: 100-jährlicher Ein-Stunden-Regen lt. Regenreihe von St.Gallen-Rotmonten nach Zeller et al. (1977); Parametersatz a: zeitlich gleichverteilter Regen, mittlere Abflussbeiwerte, Speicherkonstante $k=2*tc$, Niederschlag nicht höhenreduziert; Parametersatz b: zeitlich variabler Regen, höhenreduziert nach DVWK (1989) (Abschn. 3.2, siehe Abb. 2), Speicherkonstante $k=1*tc$; Parametersatz c: zeitlich variabler Regen, höhenreduziert nach DVWK (1989) (Abschn. 3.2, siehe Abb. 2), Speicherkonstante $k=2*tc$.

Tab. 3: Kennzahlen von Simulationsergebnissen der Bemessungswellen für die Schesa.

Regen	HN	Abfl. beiw.	a-Wert	n	Scheitelwert	Spende	Fracht	Anmerkung
(-)	(mm)	(-)	(-)	(-)	m ³ /s	l/(s.ha)	m ³	(-)
St. Gallen, variabel	100	max	0,639	1	32,6	204	102 310	unrealistisch hoch
St. Gallen, variabel	100	max	0,639	2	20,5	128	102 310	
St. Gallen, gleichverteilt	100	max	0,639	1	24,1	151	102 310	
St. Gallen, gleichverteilt	100	max	0,639	2	17,8	111	102 310	
St. Gallen, variabel	100	mean	0,536	1	27,8	174	85 771	
St. Gallen, variabel	100	mean	0,536	2	17,5	109	85 771	
St. Gallen, gleichverteilt.	100	mean	0,536	1	20,4	128	85 771	
St. Gallen, gleichverteilt	100	mean	0,536	2	15,2	95	85 771	
St. Gallen, var., höhenred.	75	mean	0,536	1	20,9	130	64 328	plausibel
St. Gallen, var., höhenred.	75	mean	0,536	2	13,1	82	64 328	plausibel
Bregenz, variabel	64,8	max	0,639	1	19,1	119	66 338	
Bregenz, variabel	64,8	max	0,639	2	12,3	77	66 338	
Bregenz, gleichverteilt	64,8	max	0,639	1	15,6	98	66 338	
Bregenz, gleichverteilt	64,8	max	0,639	2	11,5	72	66 338	

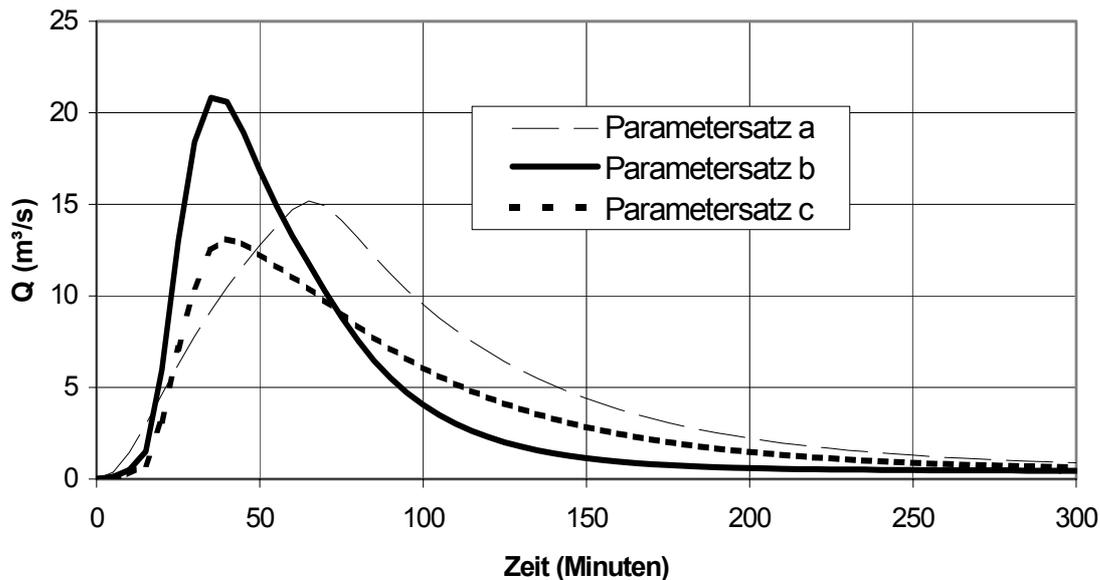


Abb. 5: Ganglinien plausibler Bemessungswellen für die Schesa. Eingangsgrößen und Parametersätze: siehe Text.

3.7 Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse

Die beste Kontrolle der Plausibilität des Simulationsergebnisses für den Bemessungswert wäre der Vergleich mit einer auf langjährigen Durchflussbeobachtungen aufbauenden Hochwasserstatistik. An der Schesa liegen derartige Beobachtungen nicht vor. Sollen Abflussbeobachtungen in der Region als Vergleichsbasis herangezogen werden, so ist die hydrologische Vergleichbarkeit der zu vergleichenden Einzugsgebiete zu beachten: Die Exposition bezüglich der wichtigsten Wetterzugstraßen, pedologische, lithologische und tektonische Verhältnisse sowie die topographische Situation sollten ähnlich sein. Und insbesondere die Größenordnung der zu vergleichenden Einzugsgebiete sollte etwa gleich sein. Unter diesen Gesichtspunkten erscheint ein unmittelbarer Vergleich der o. a. Ergebnisse mit den Resultaten von Abflussbeobachtungen in der Region etwas problematisch: Lochau / Ruggbach ($\text{HHq} = 90 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{ha})$ bei $A_E = 7.2 \text{ km}^2$) und Schönenbach / Subersach ($\text{HHq} = 22.5 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{ha})$ bei $A_E = 31.1 \text{ km}^2$) sind die kleinsten Einzugsgebiete in Vorarlberg, für die Abflussbeobachtungen von mindestens zwanzig Jahren vorliegen. Die genannten Einzugsgebiete sind wesentlich größer als die bloß 160 Hektar große Einzugsgebietsfläche der Schesa bis zum Bruchkessel, und sie liegen in Gebieten, die bezüglich der obengenannten Kriterien der Schesa nicht sehr ähnlich sind. Eine Übertragbarkeit der Abfluss-Spenden dieser größeren Gebiete auf die Schesa erscheint daher nur bedingt möglich. Mit der daraus folgenden Unschärfe erscheint dennoch die Aussage gerechtfertigt, dass die in Tab. 3 als plausibel ausgewiesenen Bemessungswerte nicht im Widerspruch zu lokalen Beobachtungen stehen.

4. Zusammenfassung und Kritik

Grundsätzlich ist die Niederschlag-Abfluss-Simulation ein geeignetes Werkzeug zur Ermittlung von Bemessungsabflüssen für kleine alpine Einzugsgebiete als Basis für die Gefahrenzonenplanung oder für Projektierungen. Die Aussageschärfe wird allerdings durch folgende Faktoren begrenzt: a) Liegen für das gegenständliche Projektgebiet keine langjährigen, als Regenreihen ausgewertete Niederschlags-(Ombrographen-)beobachtungen vor, dann muss die fehlende Niederschlagsinformation von Messstellen in anderen Gebieten übertragen werden. Damit verbunden ist eine gewisse Unsicherheit über das tatsächliche Niederschlagsgeschehen im Projektgebiet. b) Die Wahl der zeitlichen Verteilung des Bemessungsregens (anfangs-, mitten-, endbetont, oder überhaupt anders) ist im allgemeinen einer gutachtlichen Wahl durch den Bearbeiter überlassen. c) Bei Gebieten von einer Größe ab ca. 10 bis 15km² kann das Ziehen einer Schauerzelle in Richtung des Vorfluters zu deutlich höheren Abflüssen führen, als es bei stationärer Lage der Schauerzelle der Fall wäre. Dieser Effekt müsste berücksichtigt werden, wenn bekannt wäre, dass er für das Projektgebiet typisch ist. d) Je komplexer das eingesetzte Niederschlag-Abfluss-Modell, desto größer ist die Zahl der kalibrierbaren bzw. sonst wie zu bestimmenden Parameter des Modells. Alle diese Parameter müssen als statistische Größen angesehen werden, die keine definierten, sondern bestenfalls plausible, Grenzwerte annehmen können. Die von der Statik her gewohnte Strategie der Überlagerung der ungünstigsten Einflussfaktoren führt daher zu unrealistisch großen Bemessungsabflüssen. In der vorliegenden Studie wurde versucht, den ingenieurmäßigen Weg zu plausiblen Bemessungswerten für die Risikoabschätzung bzw. Gefahrenzonenplanung für die Schesa so weit wie möglich nachvollziehbar zu schildern.

5. Literatur

Aulitzky, H. (1994) The Schesa gully near Bludenz, Vorarlberg. – *Mountain Research and Development*, Vol. 14, S. 302-305.

Bertle, H. (1998) Pilotprojekt Schesasanierung, Geologischer Abschlußbericht im Rahmen der erweiterten Hauptstudie. Unveröff. Bericht an den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung Gebietsbauleitung Bludenz. Schruns, 1998.

Bertle, H. (1999) Schesa-Bruchkessel, Bürserberg – Vorarlberg: Mehrphasiger Murschuttfächeraufbau, Ausräumungsgeschichte, Sanierung durch Rückböschung. - *Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud.Österr.*, 42, 139-179.

DVWK (1989) Wahl des Bemessungshochwassers. Merkblatt 209. Verlag Paul Parey.

Forster, F. und Ch. Rickli (1995) Begehungen und Bodenansprachen in der Schesa 25.-29.7.1995 (persönliche Mitteilung).

Gutknecht, D. (1978) Methoden der hydrologischen Kurzfristvorhersage. Wiener Mitteilungen, Wasser, Abwasser, Gewässer, Bd. 26.

Gutknecht, D. und A. Watzinger (1993) Untersuchung zur Kennzeichnung und Definition von PMF-Ereignissen für österreichische Einzugsgebiete. Unveröff. Forschungsbericht an die Österreichische Akademie der Wissenschaften. Technische Universität Wien.

Kresser, W. und R. Kirnbauer (1983) Forschungsprojekt "Niederwasseranalyse" Endbericht. Inst. F. Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Techn. Universität Wien, (Unveröff. Forschungsbericht an das BM für Land- und Forstwirtschaft), 169 S. Wien.

Landeswasserbauamt Vorarlberg (1996) Regenreihe Bregenz. Persönliche Mitteilung.

Markart, G., B. Kohl und B. Zanetti (1997) Oberflächenabfluß bei Starkregen – Abflußbildung auf Wald-, Weide- und Feuchtflächen (am Beispiel des oberen Einzugsgebietes der Schesa – Bürserberg, Vorarlberg). Cbl. ges Forstwesen, 114, H. 2/3, 123-144.

Markart, G., B. Zanetti und B. Kohl (1996) Die Abflußdisposition alpwirtschaftlich genutzter Bereiche im oberen Einzugsgebiet der Schesa. Ergebnisse der Beregnungsversuche, der Bodenfeuchtemessungen, der bodenphysikalischen Analysen und der Untersuchungen der Bestandesbiomasse auf Weideflächen im Rahmen des Pilotprojektes Schesasanierung. Unveröff. Bericht, Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien.

Mölk, M. (1996) Bericht zu geologisch-geomorphologischen Aufnahmen im Einzugsgebiet des Mühlebaches und des oberen Einzugsgebietes des Schesabaches zur Erarbeitung von Modellgrundlagen für die Rückböschungsformen im Schesatobel (Bürserberg, Vorarlberg). Unveröff. Bericht, Institut für Geologie und Paläontologie der Univ. Innsbruck. 25 S. zahlr. Abb. und Pläne.

Morgali J. R. and R. K. Linsley (1965) Computer Analysis of Overland Flow. *Journ. Hydraul. Div., Proc. ASCE*, Vol. 91, HY 5, 81-100.

Pirkl, H. (2000) Geohydrologische Situation des Schesatobeleinzugsgebiets – Implikationen für eine Sanierung durch Rückböschung. Unveröff. Bericht an den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung Gebietsbauleitung Bludenz. Wien, 2000.

Pirkl, H., G. Markart und B. Kohl (2000) Von Fachkartierungen zu flächenhaften Prozessdarstellungen in Wildbacheinzugsgebieten – Aggregierungsschritte als Weg. - Interprävent 2000, 3, 259-270, Villach 2000.

Üblagger, G. (1995) Pilotprojekt Schesasanierung. Unveröff. Bericht an das BM f. Land- und Forstwirtschaft. Seekirchen a. Wallersee, 1995.

Zeller, J., H. Geiger und G. Röthlisberger (1977) Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes, Intensitäten und Häufigkeiten. Ausgewertete Periode 1901-1970. Band 2: Fürstentum Liechtenstein, St. Gallen,(1977); Band 6: Ausgewählte Stationen von Jura, Mittelland und grenznahem Ausland (1983). Eidgen. Anstalt f. d. forstl. Versuchswesen (WSL).

Anschrift des Verfassers:

Dr. Robert Kirnbauer
Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13 / 223
A-1040 Wien
Tel. +43 1 58801 22320 Fax. +43 1 58801 22399
E-mail: kirnbauer@hydro.tuwien.ac.at
<http://www.hydro.tuwien.ac.at/>

FLÄCHENDETAILLIERTE NIEDERSCHLAG-ABFLUSS MODELLIERUNG

Günter Blöschl und Rodger Grayson

1. Einleitung

Die flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung ist in den letzten Jahren für wasserwirtschaftliche Aufgaben eine überaus interessante Methode geworden. Während herkömmliche räumlich nicht aufgelöste Modelle etwa für die Bestimmung von Bemessungsabflüssen sehr gut geeignet sind (siehe z.B. Beven, 2001), sind in den letzten Jahren neue Fragestellungen in den Vordergrund getreten, wie etwa die Auswirkung von Umweltveränderungen (Klima, Landnutzung, etc.) aber auch die Modellierung von Transportvorgängen, d.h. Wasserqualitätsfragen. Die Wasser-Rahmenrichtlinie der EG (Europäische Gemeinschaft, 2000; Vogl, 2001) sieht vor, Bewirtschaftungspläne für Flussgebiete aufzustellen, die – flächendetailliert – Angaben über die möglichen Auswirkungen von Belastungen der Gewässer zu enthalten haben. "Die Mitgliedstaaten können Modellierungstechniken anwenden, um diese Beurteilung zu unterstützen" (Europäische Gemeinschaft, 2000, p. 29). Es ist jetzt häufig nicht mehr ausreichend, die Quantität und Qualität der Abflüsse in Vorflutern zu bestimmen und vorherzusagen, es ist nun auch erforderlich, zu ermitteln woher mögliche Verunreinigungen stammen und wo knappe finanzielle Ressourcen für Bewirtschaftungsmaßnahmen am besten einzusetzen sind.

Die enorme Zunahme der Leistungsfähigkeit von Computern in den letzten Jahren erlaubt den Einsatz komplexer Modelle. Während die flächendetaillierte Simulation der hydrologisch-hydraulischen Dynamik von Gebieten noch vor zwanzig Jahren Hochleistungsrechner erforderte, ist dies heute auf einem Laptop möglich. Solche komplexen Modelle benötigen eine Fülle von Eingangsdaten. Zahlreiche räumliche Daten stehen heute für die Modellierung zur Verfügung, wie etwa von Satellitendaten abgeleitete Landnutzungsdaten und genaue Digitale Geländemodelle. Bereits durch die Analyse von Digitalen Geländemodellen alleine ist es möglich, räumliche Darstellungen zu erzeugen, die intuitiv mit hydrologischen Größen in Zusammenhang zu bringen sind. Ein Beispiel ist die Berechnung von topographischen Bodenfeuchteindices (Wilson and Gallant, 2000; Blöschl und Merz, 2002). Software für die flächendetaillierte Modellierung steht zu verhältnismäßig günstigen Preisen zur Verfügung (siehe Merz und Blöschl, 2002). Alle diese Entwicklungen machen die flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung zu einer attraktiven Methode.

Allerdings zeigen konkrete Anwendungen, dass zwar rechnerische Ergebnisse mit verhältnismäßig wenig Aufwand zu erzielen sind, die Genauigkeit dieser Ergebnisse aber mitunter ungenügend ist (siehe Beven, 1989; Grayson and Blöschl, 2000). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die hydrologischen Größen räumlich sehr stark variieren. Punktmessungen der hydraulischen Leitfähigkeit des Boden können beispielsweise innerhalb von 100 m über Zehnerpotenzen variieren, und auch andere Systemkenngrößen besitzen oft einen enormen Schwankungsbereich innerhalb einer

Region oder eines Einzugsgebietes (Western et al., 2002). Die hydrologischen Daten stehen in der Regel nicht auf den gleichen Raum-Zeitskalen zur Verfügung wie sie im Modell benötigt werden. Oft stehen Punktmessungen zur Verfügung, aber flächige Mittelwerte über ein Rechenelement werden im Modell benötigt. Auch der räumliche Abstand der hydrologischen Daten ist oft wesentlich größer als die Rasterweite der Modelle. Die naturräumliche Variabilität führt zu einem Skalenproblem, das die zuverlässige Übertragung der Messwerte auf die Modellskala erschwert, ja – je nach Datenlage – mitunter unmöglich macht. Deshalb ist die zutreffende Beschreibung der räumlichen Variabilität der Schlüssel für zuverlässige Modellaussagen. Den methodischen Aspekten bei der Anwendung von flächendetaillierten Niederschlag-Abfluss Modellen kommt somit besonderes Gewicht zu. Ein tiefergehendes Verständnis der Methoden ist die Voraussetzung für gültige Simulationen und Vorhersagen mit solchen Modellen.

Ausgehend von diesen Überlegungen widmet sich der vorliegende Beitrag der Modellbildung und Modellanwendung bei der flächendetaillierten Niederschlag-Abfluss Modellierung unter besonderer Berücksichtigung der räumlichen Variabilität hydrologischer Größen.

2. Räumliche Modellstruktur

Räumliche hydrologische Variabilität kann eine unterschiedliche Ausprägung aufweisen: Zonen innerhalb derer das Merkmal konstant ist mit scharfen Unterschieden zwischen den Zonen (z.B. die geologischen Verhältnisse); zufällige räumliche Variabilität, die eine bestimmte räumliche Korrelation aufweisen kann (z.B. die hydraulische Leitfähigkeit) wobei diese entweder eher glatt variieren kann mit großen Korrelationslängen oder erratisch mit kurzen Korrelationslängen; sowie strukturierte, organisierte räumliche Muster (z.B. Landnutzungsverteilung) (Gutknecht, 1993). Grundsätzlich ist es sinnvoll, die räumliche Modellstruktur entsprechend dem Typus der natürlichen räumlichen Variabilität zu wählen. Wenn beispielsweise die zu erfassenden Variablen räumlich eher glatt variieren (große Korrelationslänge), können größere Rechenelemente im Modell angenommen werden als bei erratischer Variabilität. Wenn die Variabilität zonal ist, bietet sich eine Unterteilung des Einzugsgebietes in Teilflächen auf Basis dieser Zonen an.

Flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modelle können das Einzugsgebiet nach unterschiedlichen Grundsätzen untergliedern. Jede Untergliederung besitzt gewisse Vor- und Nachteile. Die einfachste Methode sind Quadratraster (z.B. Abbott et al., 1986; Wigmosta et al., 1994), die den Vorteil besitzen, dass Digitale Geländemodelle oft auf Quadratrasterbasis vorliegen, und somit direkt verwendet werden können. Allerdings ist die Bestimmung der Fließrichtungen kompliziert. Eine Alternative ist die Untergliederung des Gebietes auf Basis von Höhenschichtenlinien und Falllinien (z.B. Grayson et al., 1995; Vertessy et al., 2000), die den Vorteil besitzt, dass die Fließrichtungen einfach definiert werden können, doch ist das Erstellen des Elementnetzes (z.B. bei Sattelpunkten des Geländes) ziemlich aufwendig und nicht leicht automatisierbar. Eine dritte Möglichkeit sind dreiecksförmige Elemente

(sogenannte Triangulated Irregular Networks, TINs, Palacios-Vélez et al., 1998), die das Gelände am effizientesten beschreiben in Hinblick auf die erforderliche Datenmenge, jedoch ist auch hier die Bestimmung der Fließrichtungen nicht einfach. Ein häufig verwendeter Ansatz, besonders für kleine Gebiete, ist die Unterteilung des Gebietes in Hangflächen und Gerinneabschnitte (z.B. Smith et al., 1995; Watershed Modeling System, WMS, 2001). Diese Unterteilung entspricht am ehesten der hydrologischen Struktur von Fließvorgängen in einem Einzugsgebiet. Allerdings muss die Unterteilung eines Gebietes in Hänge und Gerinnestrecken meist händisch vorgenommen werden. Ein weiterer Ansatz sind sogenannte Hydrotope oder Hydrological Response Units (HRUs) (Leavesley and Stannard, 1995), bei dem verschiedene Datenlayers (Landnutzung, Bodentyp, Geländeneigung etc.) verschnitten werden, und viele Teilflächen (Hydrotope) definiert werden, von denen jede eine bestimmte Kombination dieser Daten aufweist. Ein Hydrotop kann etwa aus sämtlichen Flächen in einem Einzugsgebiet bestehen, die eine Hangneigung zwischen 5 und 10°, und die Landnutzung Wald besitzen. Hinter dem Hydrotopansatz steht die Annahme, daß bestimmte Datenlayerkombinationen ein bestimmtes, typisches, hydrologisches Verhalten bewirken. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die Hydrotope mittels Geographischer Informationssysteme einfach bestimmt werden können. Dem steht der Nachteil gegenüber, dass die üblicherweise zur Verfügung stehenden flächendeckenden Daten nicht sehr aussagekräftig für die tatsächlichen hydrologischen Vorgänge sind (Blöschl et al., 2001).

In diesem Beitrag sollen vier Modelle mit unterschiedlicher Flächengliederung verglichen werden, um die Bedeutung der Untergliederung aufzuzeigen. Die Modelle basieren auf Quadratrastern (DISTFW, Willgoose and Kuczera, 1995); Dreieckselementen (SHIFT, Palacios-Vélez et al., 1998); Hangelementen (KINEROS, Smith et al., 1995) und Höhenschichtenlinien (THALES, Grayson et al., 1995) (Abb. 1). Alle Modelle sind quasi-zweidimensional, d.h. sie zerlegen die komplexe Geländekonfiguration, auf unterschiedliche Art, in eindimensionale Längenschnitte. Im Falle des Quadratrasters erfolgt dies durch die Wasserbewegung von einem Rasterelement in eines der acht benachbarten Rasterelemente, entsprechend dem steilsten Gradienten. Im Falle der Dreieckselemente wird das Element durch ein äquivalentes eindimensionales Element ersetzt und der Durchfluß flächengewichtet den beiden unteren Rändern zugeordnet. Im Falle der Hangelemente folgt das Wasser einer Kaskade von eindimensionalen Hangflächen bzw. Gerinneelementen, die vom Benutzer festzulegen sind. Im Falle der Höhenschichtenlinien werden die Elemente durch den Verschnitt von Höhenschichtenlinien und Stromröhren bestimmt. In diesem Modell erfolgt die Wasserbewegung zum unterliegenden Nachbarn und ist damit am klarsten definiert. Die hydrologisch/hydraulischen Ansätze in den vier Modellen sind ähnlich: Oberflächenfließen und Gerinneabfluss werden durch die Kontinuitätsgleichung (1), die kinematische Näherung für die Impulsgleichung (2) sowie den Reibungsansatz nach Manning-Strickler (3) beschrieben:

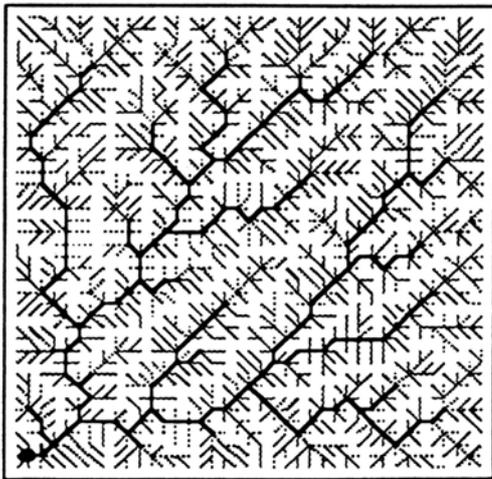
$$\frac{\partial Q(A)}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = q(t) \quad (1)$$

$$S_0 = S_f \quad (2)$$

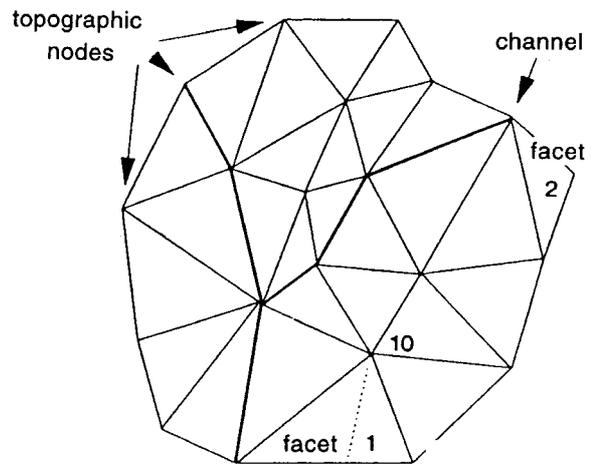
$$Q = S_f^{1/2} k_s R^{2/3} A \quad (3)$$

wobei Q der Durchfluss, A die durchflossene Querschnittsfläche, s die Entfernung in Hangrichtung, t die Zeit, q der seitliche Zufluß, S_0 die Geländeneigung, S_f das Reibungsgefälle, k_s der Rauigkeitsbeiwert nach Strickler und R der hydraulische Radius ist. Für den Modellvergleich wurde das Einzugsgebiet als undurchlässig angesehen (keine Infiltration). Vorerst wurden die vier Modelle auf einen *eindimensionalen* Hangschnitt angewendet. Die Abflussreaktion zufolge eines Regenblocks ist in Abb. 2a dargestellt. Alle vier Modelle geben sehr ähnliche Abflusswellen, die mit der analytischen Lösung gut übereinstimmen. Dies bedeutet, dass die numerische Implementierung der Gleichungen (1-3) (durch Differenzenverfahren) für diese Parameterkombination zufriedenstellend ist. Sodann wurden die Modelle auf ein 9 ha großes Einzugsgebiet in Oklahoma angewendet. Das Gebiet ist in Loague und Gander (1990) beschrieben. Für zwei der Modelle (KINEROS und THALES) ist das Rechnetz in Abb. 1 unten dargestellt. Die Unterschiede zwischen den berechneten Abflusswellen (Abb. 2b) sind in diesem Fall ziemlich groß (bis zu 30% für den Scheiteldurchfluss und bis zu 37% für die Zeit bis zum Scheitel). Die schnellste Reaktion wird mit dem Höhenschichtenlinienmodell berechnet, da der Wassertropfen dem kürzesten Weg hangabwärts (Fallinie) folgt. Die langsamste Reaktion wird durch das Rastermodell berechnet, da der Wassertropfen nicht der Fallinie, sondern einem längeren Weg zu einem der acht Nachbarelemente folgt. Insgesamt zeigt der Modellvergleich in Abb. 2, dass die Struktur der räumlichen Diskretisierung die berechneten Abflüsse stark beeinflusst. Man kann nicht erwarten, dass punktuell gemessene Werte der Rauigkeit in das Modell eingesetzt zu einer korrekten Abflussganglinie führen, da die Ganglinie auch stark von der räumlichen Modellstruktur abhängt. Würde man die Modellparameter (z.B. den Rauigkeitsbeiwert k_s) in den vier Modellen auf Basis beobachteter Abflussganglinien eichen, so ergäben sich für jedes der Modelle unterschiedliche Werte. Das Rastermodell erfordert etwa ein größeres k_s als das Höhenschichtenlinienmodell um eine ähnliche Welle zu erzeugen. Es wird also deutlich, dass geeichte Modellparameter auch in prozessnahen flächendetaillierten Modellen stark von der Modellstruktur abhängen und sozusagen die Modellstruktur implizit enthalten.

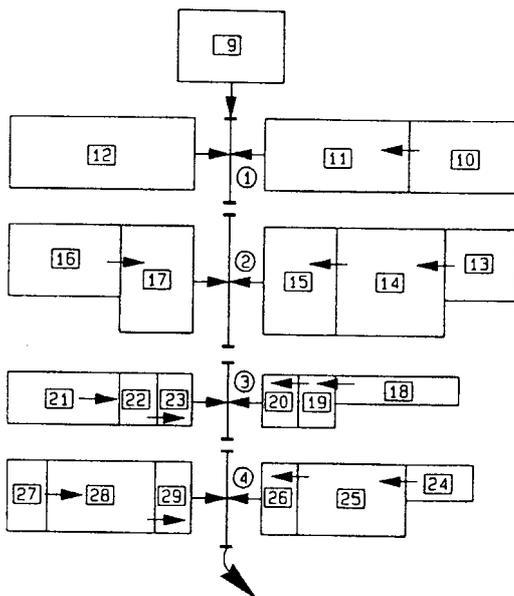
Quadratraster



Dreiecksförmige Elemente



Hangflächen und Gerinneabschnitte



Höhenschichtenlinien und Falllinien

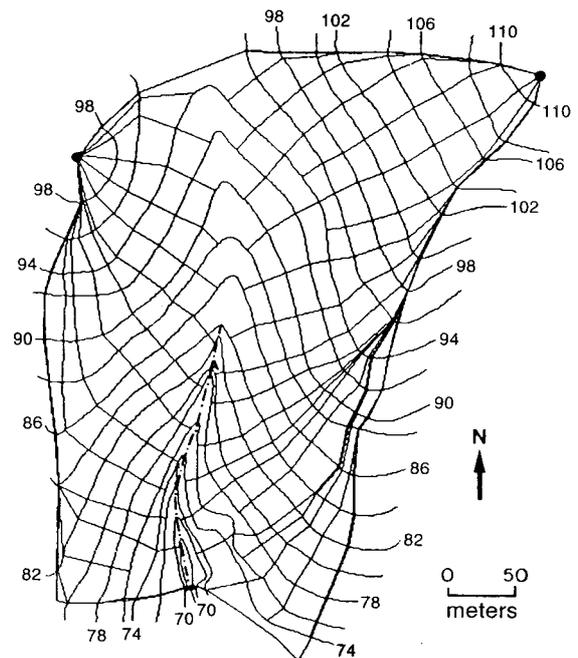


Abb. 1: Räumliche Struktur von flächendetaillierten Niederschlag-Abfluss Modellen. Aus Grayson and Blöschl (2000).

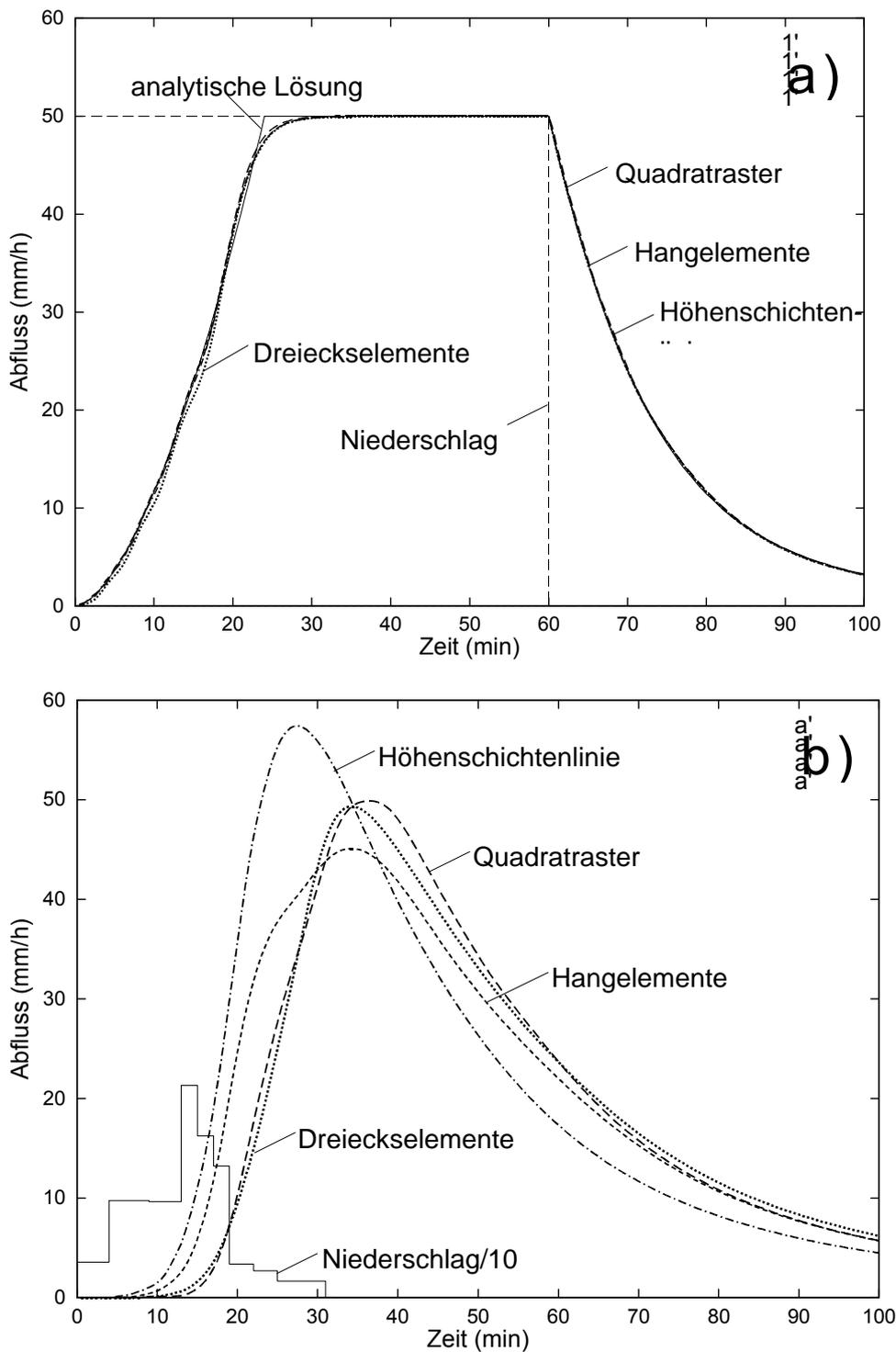


Abb. 2: Abflussreaktion berechnet mit vier unterschiedlichen Modellen. a) Eindimensionaler Hangschnitt (106m Länge; 10% Neigung; Rauigkeit $k_s = 3,16 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$; Niederschlag 50 mm über 1 Stunde). b) R-5 Gebiet in Oklahoma, USA. (9 ha Fläche; Rauigkeit $k_s = 4 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ für Hänge und Gerinne; beobachteter Niederschlag). Aus Blöschl (1996).

3. Räumliche Variabilität und Effektive Modellparameter

Die Untergliederung des Einzugsgebietes in Teilflächen kann unter dem Gesichtspunkt betrachtet werden, dass die gesamte räumliche hydrologische Variabilität aus zwei Komponenten besteht, einer großräumigen und einer kleinräumigen Komponente (Blöschl and Sivapalan, 1995). Die großräumige Variabilität wird im Modell explizit erfasst durch unterschiedliche Werte (z.B. der hydraulischen Durchlässigkeit) in unterschiedlichen Elementen. Die kleinräumige Variabilität (innerhalb eines Elementes) ist jedoch nicht im Detail bekannt, und wird deshalb durch einen summarischen Parameter (z.B. den Mittelwert) beschrieben. Das Aufspalten der gesamten Varianz σ_{ges}^2 in (großräumige) Variabilität zwischen den Elementen σ_{zw}^2 und (kleinräumige) Subgrid-Variabilität σ_{in}^2 kann durch die folgende Beziehung beschrieben werden (Isaaks and Srivastava, 1989):

$$\sigma_{ges}^2 = \sigma_{in}^2 + \sigma_{zw}^2 \quad (4)$$

Wenn die Elementgröße sehr klein gewählt wird, ist σ_{zw}^2 groß und σ_{in}^2 ist klein. In diesem Fall ist es schwierig, die Werte der Modellparameter (und Eingangsgrößen) in jedem der vielen Rechenelemente zu ermitteln. Wenn umgekehrt die Elementgröße groß gewählt wird, ist zwar σ_{zw}^2 klein und die Bestimmung der Parameter für jedes Element weniger schwierig, dafür ist aber die Variabilität innerhalb eines Elementes σ_{in}^2 groß und muss in geeigneter Weise berücksichtigt werden.

Bei der Bestimmung von Eingangsgrößen (z.B. Niederschlag) und Modellparametern (z.B. hydraulische Leitfähigkeit, Rauigkeit, ...) für jedes der Modellelemente müssen Daten meist interpoliert oder regionalisiert werden. Dafür stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung: einfache Geostatistische Ansätze; Methoden, die Zusatzinformation verwenden; sowie verschiedene Formen von Ähnlichkeitsschlüssen (z.B. Pedotransferfunktionen, ÖBG, 2001). Einen Überblick über die verschiedenen Verfahren der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abfluss Modellierung gibt Blöschl und Merz (2002). Die Bedeutung des Bodens bei der Regionalisierung wird in Löhmannsröben (2002) diskutiert.

Die kleinräumige Variabilität (innerhalb eines Flächenelementes) darf nicht vernachlässigt werden und muss ebenfalls bei der Modellierung bzw. Modellanwendung berücksichtigt werden, denn sie besitzt in der Regel einen wesentlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis (Blöschl, 1996). In den meisten wasserwirtschaftlichen Anwendungen wird der sogenannte Ansatz der Effektiven Parameter verwendet. Dabei wird das Element als homogene Einheit angesehen und die tatsächliche Variabilität durch mittlere, effektive Parameter ersetzt, die den Effekt der kleinräumigen Variabilität summarisch wiedergeben sollen. Wenn beispielsweise hangparalleler unterirdischer Abfluss sowohl durch die Bodenmatrix als auch durch Makroporen erfolgt, so kann als effektive hydraulische Durchlässigkeit ein Wert angenommen werden, der zwischen der geringen Durchlässigkeit der Bodenmatrix und der hohen Durchlässigkeit der Makroporen liegt. Abb. 3 zeigt ein Schema dieses Konzeptes. Ein Effektiver Parameter K_{eff} ist derart definiert, dass er für ein homogenes Ersatzmedium den

gleichen Output liefert wie ein heterogenes Medium. Während es möglich ist, für bestimmte Typen der kleinräumigen Variabilität analytische Beziehung für den Wert des effektiven Parameters abzuleiten (siehe z.B. Blöschl, 1996), werden in der Praxis effektive Parameter meist durch Eichung bestimmt, da die kleinräumige Variabilität selten bekannt ist. Dabei wird der Parameter so lange variiert, bis das Modell den gleichen Output wie die Beobachtung liefert. Wichtig ist, dass derart gewonnene Modellparameter keine Punktwerte darstellen, sondern effektive Werte über ein Modellelement. Deshalb sind sie auch nicht direkt vergleichbar mit Punktmessungen des jeweiligen Parameters innerhalb des Gebietes.

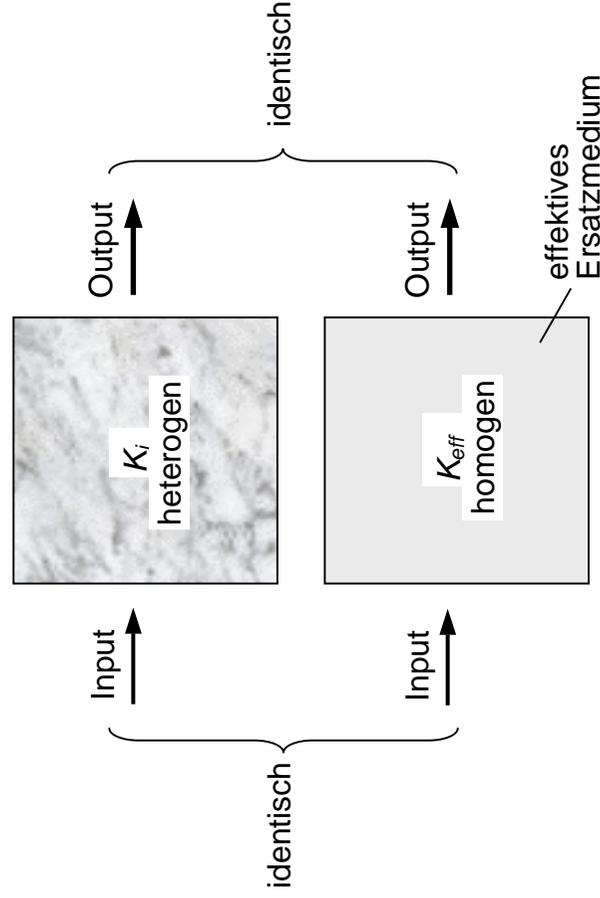


Abb. 3: Abflussreaktion berechnet mit vier unterschiedlichen Modellen. a) Eindimensionaler Hangschnitt (106m Länge; 10% Neigung; Rauigkeit $k_s=3,16 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$; Niederschlag 50 mm über 1 Stunde). b) R-5 Gebiet in Oklahoma, USA. (9 ha Fläche; Rauigkeit $k_s=4 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ für Hänge und Gerinne; beobachteter Niederschlag). Aus Blöschl (1996).

In der Literatur gibt es zwei alternative Ansätze zur Erfassung der kleinräumigen Variabilität innerhalb eines Elementes. Der erste Ansatz wird als Parameterisierung bezeichnet, bei dem die Variabilität durch eine eigene Beziehung beschrieben (d.h. parameterisiert) wird. Ein Beispiel für eine derartige Parameterisierung ist der Ansatz für Oberflächenfließen nach Moore und Burch (1986), bei dem der wirksame hydraulische Radius als Funktion der durchflossenen Querschnittsfläche und weiterer das Mikrorelief der Geländeoberfläche beschreibenden Parameter angesetzt wird (Willgoose and Kuczera, 1995). Ein anderes Beispiel ist die Beschreibung des Stofftransportes im Grundwasser. Der Einfluss der kleinräumigen Heterogenitäten innerhalb eines Rechenelementes auf den Stofftransport wird meist durch eine Makrodispersion beschrieben. Der die Makrodispersion kennzeichnende Parameter, die Makrodispersivität, kann zwar in Beziehung gesetzt werden zur kleinräumigen Variabilität der hydraulischen Leitfähigkeit des Untergrundes (z.B. Jussel, 1992) wird

aber in der Regel durch Eichung bestimmt. Im Gegensatz zum Ansatz der effektiven Parameter wird bei der Parameterisierung eine zusätzliche Modellgleichung eingeführt, die den Effekt der Subgridvariabilität erfaßt. Der zweite Ansatz ist der Perturbationsansatz, bei dem die Variablen und Parameter als Zufallsgrößen angesehen und in Mittelwert und Fluktuation (kleinräumige Schwankung) getrennt werden (Gelhar, 1993). Allerdings setzt diese Methode voraus, daß eine geschlossene Gleichung zur Beschreibung der Abflußmechanismen vorliegt und sich die entsprechenden Kreuzkorrelationsterme formulieren lassen. Da dies in der Einzugsgebietshydrologie noch nicht gelungen ist, hat sich dieser Ansatz bei praktischen Anwendungen der flächendetaillierten Niederschlag-Abfluß Modellierung noch nicht durchgesetzt.

4. Wahl der Elementgröße und Modellkomplexität

Die heute vielfach zur Verfügung stehenden Computerressourcen erlauben es, hochkomplexe Modelle für wasserwirtschaftliche Fragestellungen anzuwenden. Flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modelle besitzen eine wesentlich höhere Modellkomplexität als herkömmliche, räumlich nicht aufgelöste Modelle, einerseits wegen der großen Anzahl von Rechenelementen, und andererseits wegen der komplexeren Struktur der Modellgleichungen mit einer größeren Anzahl von Variablen und Parametern für jedes Element (Anderson and Bates, 2001). Man müsste annehmen, dass eine Erhöhung der Anzahl der Modellelemente und der Komplexität der Gleichungen auch eine genauere Beschreibung der hydrologischen Prozesse bewirkt. Dies ist allerdings in der Regel nicht der Fall. Bereits Stephenson and Freeze (1974) zeigten, dass für konkrete Anwendungen eine große Modellkomplexität zu Schwierigkeiten bei der Eichung (d.h. Bestimmung der zutreffenden Modellparameter) und "Modellidentifikation" (d.h. Bestimmung der zutreffenden Modellstruktur) führt. Zahlreiche spätere Studien belegten dieses Ergebnis (Naef, 1981; Loague and Freeze, 1985; Beven, 1989). Diese scheinbar mit anderen Disziplinen (wie z.B. der Fluidodynamik) in Widerspruch stehende Erfahrung dürfte auf drei wesentliche Unterschiede zurückzuführen sein. Im Gegensatz zu anderen Disziplinen ist in der Einzugsgebietshydrologie keine Grundgleichung bekannt, und die meisten Modelle basieren auf einer Reihe von empirischen Annahmen (Beven, 1989). Zum zweiten dürften die flächendetaillierten Niederschlag-Abfluss Modelle stärker von den Randbedingungen (z.B. Niederschlag) abhängen, als andere detaillierte Modelle in den Geowissenschaften. Es ist beispielsweise nicht möglich, die Modelldynamik zu untersuchen, indem man das Modell eine Zeitperiode "laufen lässt", ohne zu jedem Zeitpunkt Randbedingungen vorzugeben. Der dritte, und vermutlich wichtigste, Unterschied ist, dass die Eigenschaften des Mediums (d.h. vor allem der Untergrund) höchst heterogen und weitgehend unbekannt sind.

Diese drei Aspekte haben wichtige Implikationen für die flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung. Einerseits führen sie dazu, dass für konkrete wasserwirtschaftliche Anwendungen immer ein gewisses Maß an Eichung notwendig ist. Andererseits bewirken sie, dass die geeignete Wahl der Modellkomplexität (ein-

schließlich der Wahl der Anzahl der Elemente) weitgehend davon abhängt, wie detailliert die zur Verfügung stehende hydrologische Information im betrachteten Gebiet ist. Wenn räumlich sehr detaillierte hydrologische Daten vorliegen, können kleinere Elemente gewählt werden (d.h. eine feinere räumliche Unterteilung) als dies sinnvoll ist, wenn nur wenige räumliche Daten vorhanden sind. Als "hydrologische Daten" sind dabei Messwerte der hydrologischen Dynamik zu verstehen, wie etwa Abfluss und Grundwasserstände. Es existiert also eine optimale Modellkomplexität. Wenn das Modell (im Vergleich zur Datenlage) zu komplex ist, führen Identifizierbarkeitsprobleme und Mehrdeutigkeiten bei der Eichung dazu, dass die Vorhersagegüte absinkt, da nicht genügend Daten vorhanden sind, die zutreffende Modellstruktur und die Parameter zu bestimmen. Wenn umgekehrt das Modell (im Vergleich zur Datenlage) zu einfach ist, können die vorhandenen Daten nicht vollständig verwertet werden. Diese Überlegungen sind in Abb. 4 als Prinzipdarstellung skizziert. Für eine bestimmte Modellkomplexität führt eine Verbesserung der hydrologischen Datengrundlage zu besseren Vorhersagen bis zu einem Punkt, bei dem die Daten keine zusätzlich verwertbare Information enthalten (strichlierte Linie in Abb. 4). In diesem Fall müsste ein komplexeres Modell verwendet werden, um die Vorhersagegüte zu verbessern (punktierte Linie in Abb. 4). Die übliche Situation bei praktischen Anwendungen von flächendetaillierten Niederschlag-Abfluss Modellen ist jedoch die, dass ein Modell verwendet wird, das zu komplex ist für die vorhandenen Daten (Schnittpunkt der punktierten und durchgezogenen Linie). In diesem Fall können entweder eine Vereinfachung der Modellstruktur oder zusätzliche Daten die Simulationsgüte verbessern. Zusätzliche Daten sind besonders dann wertvoll, wenn sie Zustandsgrößen beschreiben, die bereits im Modell enthalten sind, während die Verwendung anderer Variablen (z.B. geochemischer Variablen im Gewässer) auch die Modellkomplexität erhöht und damit den Vorteil zusätzlicher Information vermindert (Anderton et al., 2002; Bergström et al., 2002). Es hat sich gezeigt, dass räumliche Muster von Zustandsgrößen (z.B. der Bodenfeuchte) für die flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung besonders aussagekräftig sind (Peschke et al., 1999; Grayson and Blöschl 2000). Im folgenden soll an Hand zweier Fallstudien gezeigt werden, wie flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modelle mittels räumlicher Beobachtungen geeicht und verifiziert werden können.

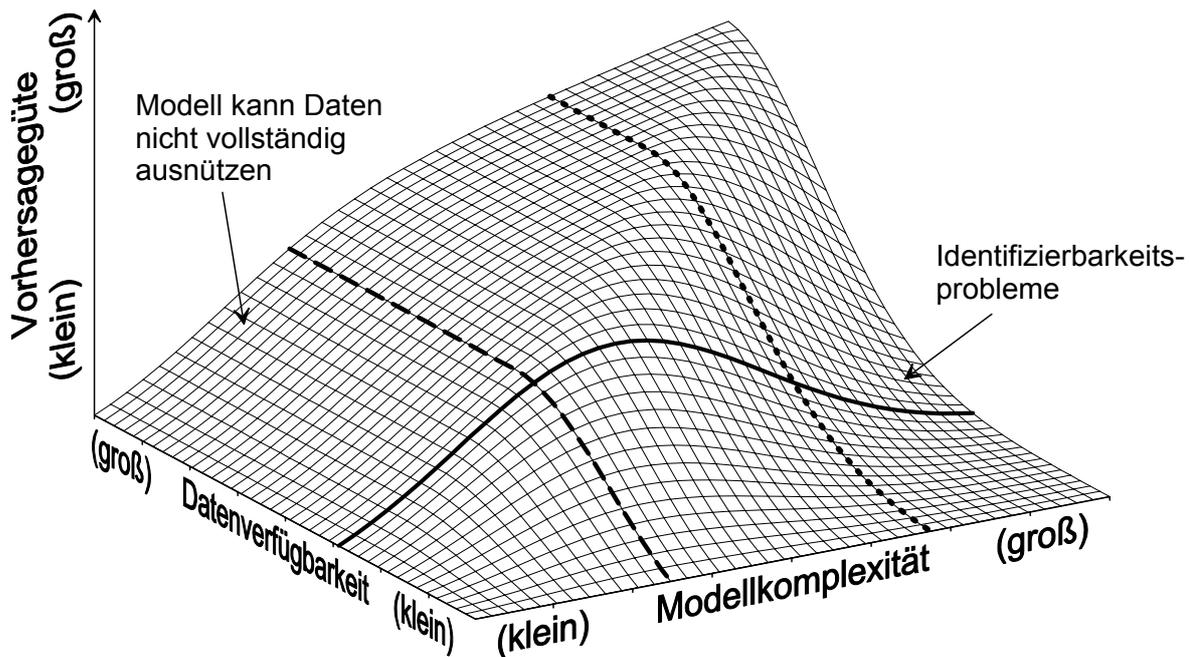


Abb. 4: Schematische Darstellung der Beziehung zwischen Modellkomplexität, Datenverfügbarkeit und Modellgüte. Aus Grayson and Blöschl (2000).

5. Fallbeispiel Bodenfeuchte im Tarrawarra Gebiet

Im ersten Fallbeispiel werden gemessene räumliche Muster der Bodenfeuchte zur Eichung und Verifikation eines flächendetaillierten Niederschlag-Abfluss Modells verwendet (Blöschl and Western, 1997; Western and Grayson, 2000). Die Untersuchungen wurden im Tarrawarra Gebiet in der Nähe von Melbourne durchgeführt. Das Gebiet besitzt eine Fläche von 10.5 ha und weist ein humides Klima mit feuchten Wintern und verhältnismäßig trockenen Sommern auf. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 1000 mm. Das Einzugsgebiet ist flach hügelig mit maximalen Hangneigungen von 14%. Die Vegetation besteht einheitlich aus Gras und das Gebiet wird als Weide verwendet. Das Gebiet ist mit zahlreichen hydrologischen Messgeräten ausgestattet (Western and Grayson, 2000). Die Messung der Bodenfeuchte erfolgte durch eine große Anzahl von Punktmessungen. Time Domain Reflectometry (TDR) Sensoren wurden dabei auf ein geländegängiges Kleinfahrzeug montiert. Messung und Meßwerterfassung erfolgten vollautomatisch durch hydraulische Rammen bzw. Computer. Die Vorteile des TDR Systems sind vor allem kurze Messzeit, Eindringtiefe bis etwa 60 cm (wenn gerammt), und gute Genauigkeit selbst bei heterogenem Untergrund. Die TDR Messwerte wurden durch unabhängige gravimetrische Messungen verifiziert. Für den Messfehler ergab sich ein verhältnismäßig kleiner Wert von nur etwa $3 (\%V/V)^2$. Abb. 5 zeigt das Geländefahrzeug bei den Messungen im Tarrawarra Gebiet. Mit Hilfe des Positionierungssystems des Fahrzeugs (30cm Genauigkeit) war es möglich, die Bodenfeuchte auf einem regelmäßigen Rechteckraster zu messen. Unter anderem wurden an zwölf Messterminen im Raster 10 x 20 m jeweils ungefähr 500 Einzelmessungen durchgeführt. Einige der gemessenen räumlichen Muster sind in Abb. 6 links dargestellt.



Abb. 5: Geländefahrzeug bei den Messungen im Tarrawarra Gebiet. Links sieht man die beiden



Abb. 7: Messvorrichtung zur Bestimmung des Auftretens von Oberflächenfließen. Aus Vertessy et

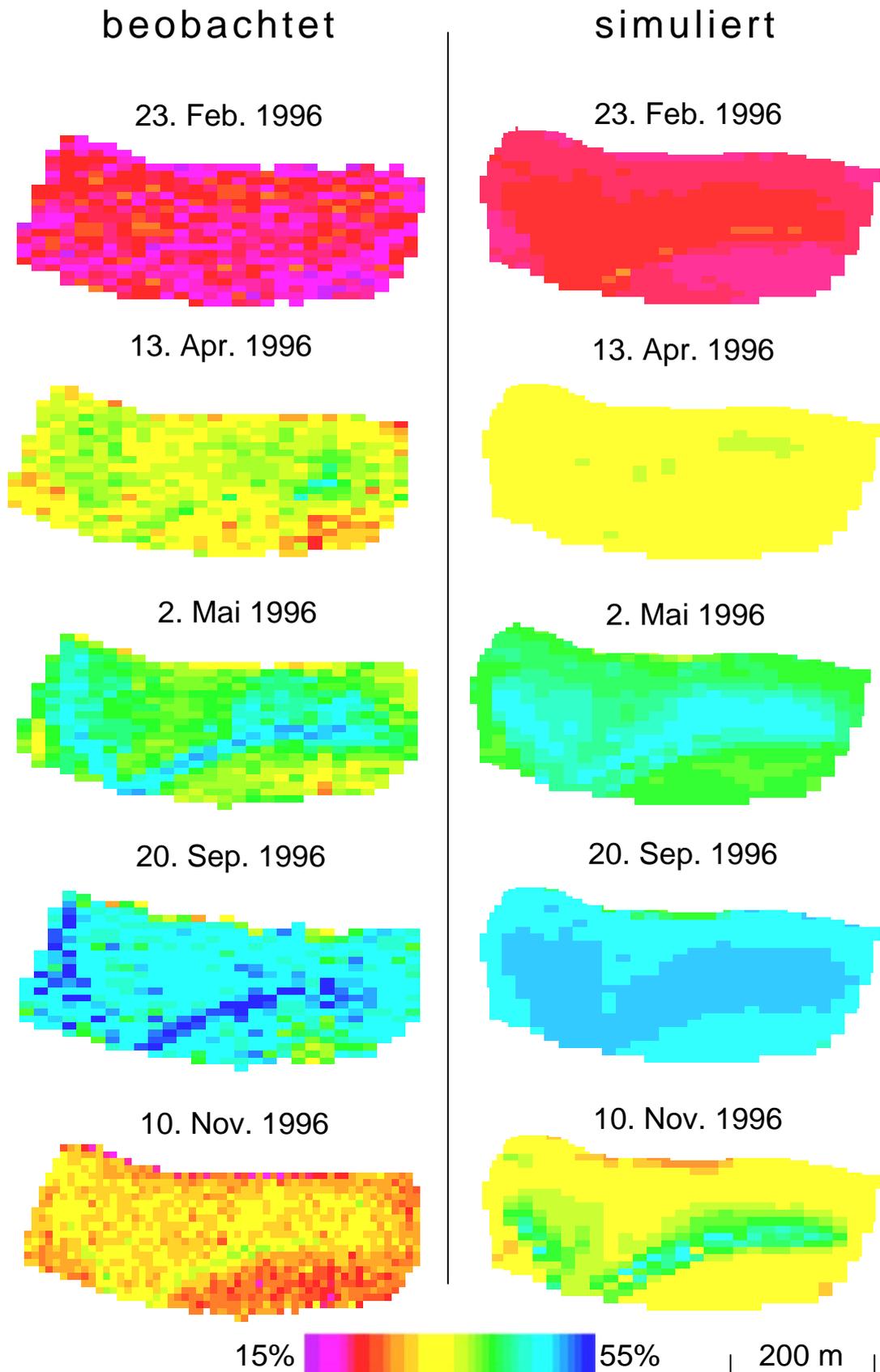


Abb. 6: Simulierte (rechts) und beobachtete (links) räumliche Muster der Bodenfeuchte im Tarrawarra Gebiet, Australien. Aus Western et al. (2002).

Jedes Rechteck entspricht einer Einzelmessung der mittleren Bodenfeuchte über die obersten 30 cm des Bodenprofils. Keiner der dargestellten Werte wurde interpoliert. Aus Abb. 6 ist ersichtlich, dass zu den verschiedenen Jahreszeiten eine unterschiedliche räumliche Struktur der Bodenfeuchte vorliegt. Zu den Winterterminen (13. April, 2. Mai, 20. September, 10. November, 1996) zeigt sich eine ausgeprägte Struktur mit höherer Bodenfeuchte im Bereich der topographischen Konvergenzzonen. Zu den Sommerterminen (in Abb. 6 dargestellt: 23. Feb. 1996) zeigt sich keine ausgeprägte räumliche Struktur. Bei diesen Terminen ist die Bodenfeuchte "zufällig" räumlich verteilt.

Für die hydrologische Modellierung verwendeten Western and Grayson (2000) das Thales Modell (Grayson et al., 1995). Thales ist ein flächendetailliertes Niederschlag-Abfluss Modell basierend auf Höhenschichtenlinien und Falllinien (Abb. 1 rechts unten). Es verwendet Niederschlag und potentielle Verdunstung als Eingangsgrößen und beschreibt den Boden durch zwei Schichten. Simuliert werden die unterirdische seitliche Wasserbewegung (kinematische Welle), Exfiltration von Bodenwasser, Sättigungsflächenabfluss, Oberflächenfließen (einschließlich Infiltration), Tiefensickerung und Verdunstung. Die Simulationen wurden kontinuierlich für einen Zeitraum von etwa eineinhalb Jahren durchgeführt, wobei verschiedene alternative Modellkonzeptionen bzw. Parameterkombinationen zur Anwendung kamen. Bandbreiten für jeden der Modellparameter (z.B. hydraulische Leitfähigkeit, Bodentiefe) wurden vorerst aus den Feldmessungen abgeleitet. Es zeigte sich, daß der Gerinneabfluss aus dem Gebiet mit unterschiedlichen Parameterkombinationen gleich gut simuliert werden kann. Nun wurden die simulierten Bodenfeuchtemuster mit den beobachteten Bodenfeuchtemustern für die verschiedenen Termine verglichen. Die unterschiedlichen Parameterkombinationen ergaben stark unterschiedliche simulierte Bodenfeuchtemuster. Auf Basis des Vergleiches Beobachtung – Simulation an einigen Terminen war es nun möglich, eine zutreffende Parameterkombination zu bestimmen, d.h. eine Eichung durchzuführen. Diejenige Parameterkombination, die die den Messungen am ähnlichsten Muster ergab, wurde als zutreffend angesehen. Bei dieser Kombination waren die Parameterwerte: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit $k_{\text{sat}} = 40 \text{ mm/h}$; hydraulische Leitfähigkeit für die Tiefensickerung $k_{\text{deep}} = 0$; Bodenmächtigkeit $d_{\text{soil}} = 600 \text{ mm}$; Mächtigkeit der oberen Bodenschichte $d_{\text{upper}} = 400 \text{ mm}$; ein Parameter, der die räumliche Variabilität der Verdunstung beschreibt, ergab sich zu $\gamma = 0$, d.h. starker Einfluss des Geländes auf die Verdunstung. Die mit diesen Parametern simulierten Bodenfeuchtemuster konnten nun für andere Termine (die nicht bei der Eichung verwendet wurden) mit den entsprechenden beobachteten Mustern verglichen werden. Den Vergleich zeigt Abb. 6. Obwohl noch gewisse Unterschiede zwischen Beobachtung und Simulation festzustellen sind, stimmen insgesamt sowohl die mittleren Feuchtwerte als auch die räumliche Struktur recht gut überein. Es war durch diesen Vergleich also möglich, die Parameter des flächendetaillierten Niederschlag-Abfluss Modells sowohl zu eichen, als auch zu verifizieren. Alleine mit Abflussdaten am Gebietsauslass wäre dies nicht im gleichen Maße möglich gewesen. Der Stellenwert der Bodenfeuchtedaten kann auch an Hand von Abb. 4 aufgezeigt werden. In Abb. 4 schieben sich die Modellierungscharak-

teristika durch die zusätzlichen Bodenfeuchtedaten vom Schnittpunkt der gepunkteten und der durchgezogenen Linie hinauf entlang der gepunkteten Linie. Dementsprechend ist zu erwarten, dass das Modell für neue Situationen, wie etwa geänderte Landnutzungsbedingungen und Transportfragen, zutreffendere Aussagen liefert, als ein Modell, das nur mit Abflussdaten geeicht wurde.

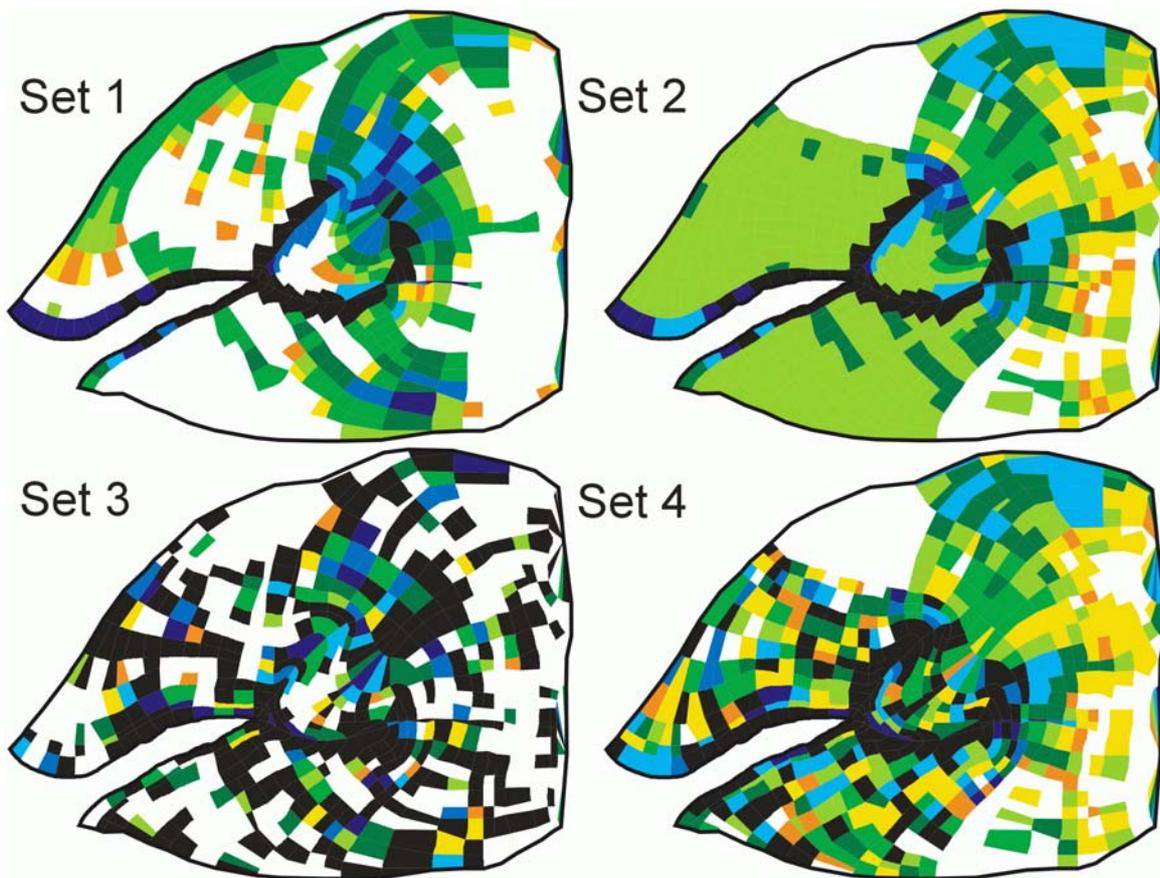
Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den hydrologischen Daten (Abfluss, Bodenfeuchte, ...) für die verschiedenen Parameterkombinationen führte nicht nur zur Erstellung eines geeichten Modells, sondern erlaubte auch Aussagen über die hydrologischen Mechanismen in diesem Gebiet (Western and Grayson, 2000). Es zeigte sich u. a., dass eine Wahl räumlich unterschiedlicher hydraulischer Bodeneigenschaften auf Basis des Bodentyps die Ergebnisse nicht verbessert. Das bedeutet, dass in diesem Fall der Bodentyp keine besonders gute Prediktorvariable für die flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung ist. Außerdem zeigten die Simulationen, dass im Modell die bevorzugten Wasserwegigkeiten des Bodens berücksichtigt werden müssen, und diese eine saisonale Schwankung aufweisen dürften. Dieser Effekt lässt sich durch das Öffnen und Schließen von Rissen im Boden bei Veränderung des Feuchtezustandes erklären. Schließlich zeigte sich, dass eine zweite Bodenschicht im Modell eine deutlich bessere Wasserbilanzmodellierung erlaubte, als die Verwendung einer einzigen Bodenschicht. Die Wasserbewegung im Untergrund dürfte demnach in der oberflächennahen Schicht und in der tieferen Schicht mit deutlich unterschiedlichen Geschwindigkeiten ablaufen.

6. Fallbeispiel Oberflächenfließen im La Cuenca Gebiet

Das zweite Fallbeispiel ist Vertessy et al. (2000) entnommen. Es handelt sich dabei um Messungen und Simulationen im La Cuenca Gebiet in Zentralperu. Das Gebiet besitzt eine Größe von 0.75 ha und die Vegetation besteht aus tropischem Regenwald. Das Gebiet wurde als Versuchseinzugsgebiet zum Studium der räumlichen Variabilität der Bodeneigenschaften und der Abflussprozesse eingerichtet. Über 700 ungestörte Bodenproben zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften wurden entnommen. Zusätzlich wurde an 72 Stellen im Gebiet der Oberflächenabfluss gemessen. Dafür wurden PVC Rohre von 25 cm Länge und 5 cm Durchmesser, am Boden aufgelegt (Abb. 7). Die eine Seite war verschlossen und in der Mitte war ein T-Stück angebracht. Die andere Seite des Rohrs war perforiert, um das Eindringen des Wassers zu erleichtern. Diese Messmethode wurde verwendet, um den Abfluss während 180 Niederschlagsereignissen zu messen. Dabei wurde nach jedem Ereignis durch einen Beobachter überprüft, ob sich Wasser in dem Rohr befand. War der Boden des Rohres im T-Stück mit Wasser bedeckt, so wurde angenommen, daß an dieser Stelle Oberflächenabfluss stattgefunden hat.

Vertessy et al. (2000) wandten nun das Topog_SBM Modell auf dieses Gebiet an. Es ist ebenso wie das Thales Modell ein flächendetailliertes Niederschlag-Abfluss Modell basierend auf Höhenschichtenlinien und Falllinien (Abb. 1 rechts unten). Im Gegensatz zu Thales simuliert es einzelne Ereignisse, wobei jeweils Anfangsbedingungen

simuliert



beobachtet

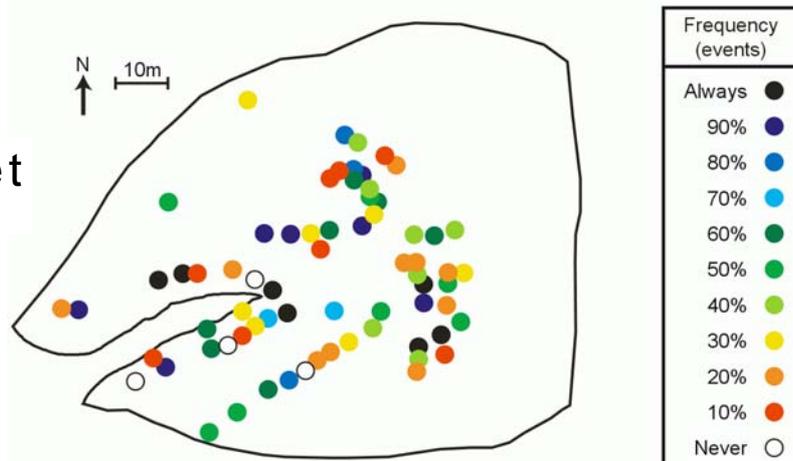


Abb. 8: Simulierte (oben) und beobachtete (unten) räumliche Muster der Häufigkeit des Auftretens von Oberflächenabfluss für 10 Ereignisse im La Cuenca Gebiet in Peru. Aus Vertessy et al. (2000).

vorzugeben sind. Der Boden wird im Modell als eine Schicht oberhalb einer undurchlässigen Grenzfläche dargestellt. Die unterirdische seitliche Wasserbewegung wird durch einen einfachen Speicheransatz und Oberflächenfließen durch die kinematische Welle beschrieben. Infiltration, Exfiltration von Bodenwasser und Sättigungsflächenabfluss werden vom Modell ebenfalls wiedergegeben. Das Modell wurde dafür verwendet, Oberflächenabfluss zu simulieren. Dabei wurden vier alternative Annahmen über die räumliche Verteilung der effektiven hydraulischen Leitfähigkeit getroffen. Die erste Annahme (set 1) bestand aus räumlich konstanter Leitfähigkeit, wobei alle Elementwerte gleich dem Median der Messwerte gesetzt wurden. Die zweite Annahme (set 2) bestand aus drei unterschiedlichen Werten für jede der drei Bodentypen im Gebiet. Für jede der Bodentypen wurde der Median der Messwerte angesetzt. Die dritte Annahme (set 3) war eine zufällige Verteilung der Leitfähigkeit. Die Verteilungsfunktion wurde entsprechend der Verteilungsfunktion der Messwerte gewählt. Die vierte Annahme (set 4) bestand schließlich aus einer zufälligen Verteilung für jede der drei Bodentypen, entsprechend den Verteilungsfunktionen der jeweiligen Messungen. Jede dieser Annahmen entspricht einer unterschiedlichen Hypothese über die wirksamen hydrologischen Mechanismen in diesem Gebiet.

Die simulierten Muster der Häufigkeit des Oberflächenabflusses wurden sodann mit den Mustern verglichen, die aus den Beobachtungen mittels der PVC Rohre abgeleitet wurden (Abb. 8). Set 1 und set 2 sind zu gleichförmig und weisen zu wenig räumliche Variabilität der Häufigkeit des Oberflächenabflusses auf. Set 3 zeigt in den oberen Gebietsteilen zu häufigen Oberflächenabfluss. Die Muster mit der vierten Annahme (set 4) sind den Messungen am ähnlichsten, da sowohl das Ausmaß der Variabilität als auch die größere Neigung zu Oberflächenabfluss in der Nähe des Gebietsauslasses mit den Beobachtungen übereinstimmen. Dieses Muster (set 4) kombiniert eine deterministische räumliche Variabilität (die drei Bodentypen) mit zufälliger Variabilität. Es ist also anzunehmen, dass das detaillierte Muster der wahren (und nicht im Detail messbaren) hydraulischen Leitfähigkeit in diesem Gebiet aus einer deterministischen und einer zufälligen Komponente besteht. In dem Gebiet wurden während der Beobachtungen auch Abflüsse kontinuierlich gemessen. Die Abflussdaten erwiesen sich zur Ergänzung der beobachteten Muster als sehr aussagekräftig (Vertessy et al., 2000).

Obwohl die beobachteten Muster von sehr unterschiedlicher Art als die Muster in der Studie von Western and Grayson (2000) waren, war das grundsätzliche Ergebnis ähnlich. Bei beiden Arbeiten zeigte sich der enorme Wert flächendetaillierter hydrologischer Beobachtungen für die flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung. Auch in diesem Fall bestand das Ergebnis nicht nur aus einem geeichten Modell, sondern auch aus Aussagen über die hydrologischen Mechanismen in diesem Gebiet. Räumlich unterschiedliche hydraulische Bodeneigenschaften entsprechend der Bodentypen erklären die räumliche Verteilung des Oberflächenfließens nicht vollständig. Kleinmaßstäbliche bevorzugte Wasserwegigkeiten besitzen einen wesentlichen Einfluss auf die größermaßstäblichen Abflussvorgänge.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modelle sind heute eine attraktive Methode für viele wasserwirtschaftliche Fragestellungen. Wegen der großen räumlichen Variabilität der natürlichen Vorgänge hat aber die Parameterwahl und die Wahl der Modellstruktur mit viel Sorgfalt zu erfolgen. Insbesondere können Punktmessungen (z.B. der hydraulischen Leitfähigkeit) nicht direkt in das Modell übernommen werden. Auch besteht ein gewisses Wechselspiel zwischen Modellstruktur und den optimalen Parametern, wie hier am Beispiel des Oberflächenabflusses gezeigt wurde. Aus beiden Gründen ist ein gewisses Maß der Eichung der Modellparameter immer erforderlich. Am günstigsten erweisen sich beobachtete räumliche Muster hydrologischer Größen. Mit der räumlichen Auflösung, in der solche Muster vorliegen, lassen sich die Modelle eichen und verifizieren. Komplexere Modelle, oder Modelle mit einer größeren Anzahl von Elementen, sind nicht notwendigerweise genauer als einfachere Modelle. Es existiert eine optimale Modellkomplexität, die nicht nur von der Fragestellung sondern vor allem von den verfügbaren Daten abhängt. Für die flächendetaillierte Modellierung bedeutet dies, dass i.a. keine wesentlich feinere räumliche Auflösung notwendig ist, als hydrologische Daten (z.B. Abfluss) vorliegen.

Dieser Beitrag zeigte Beispiele der flächendetaillierten Niederschlag-Abfluss Modellierung in kleinen Einzugsgebieten, in denen eine Fülle von hydrologischen Daten vorhanden waren, womit sich die methodischen Aspekte der Modellierung gut zeigen ließen. Für wasserwirtschaftliche Fragestellungen sind vor allem größere Gebiete von Interesse, in denen meist nur Daten des Standardmessnetzes vorliegen. Für diesen Fall gelten die gleichen methodischen Aussagen bezüglich räumlicher Modellstruktur, Effektiver Modellparameter, Modellkomplexität und –identifizierbarkeit. Während heute die Computerressourcen vorhanden sind, komplexe flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modelle auch auf große Gebiete anzuwenden (Sivapalan und Blöschl, 1995; Senarath, et al., 2000; Bormann, 2001), bedingen die in diesem Beitrag diskutierten methodischen Aspekte, dass die Modelleichung und Verifizierung – besonders auf großen Skalen essentiell ist (Grayson et al., 1993). Bei größeren Gebieten liegen meist Abflussdaten von Teileinzugsgebieten vor, die für die Modelleichung und Verifikation wertvoll sind. Diese räumlichen Muster der Abflussdaten können für den Einzelfall durch Simultanmessungen des Abflusses verfeinert werden. Zusätzlich ist es sinnvoll, auch beobachtete qualitative Kenngrößen des hydrologischen Verhaltens zu verwenden. Ein ausgezeichnetes Beispiel für ein kleines Gebiet sind die Abflussteststreifen von Srinivasan et al. (2002). Aber auch in größeren Regionen ist es möglich, Daten in einer Weise auszuwerten, die klare Aussagen über die Abflussdynamik erlaubt. Ein Beispiel sind die von Merz et al. (1999) vorgeschlagenen Saisonalitätsmuster, die es ermöglichen, aus dem Auftrittszeitpunkt von Starkniederschlägen und Hochwässern auf die maßgebenden Prozesse rückzuschließen. Ein weitere Prozessindikator ist etwa die Dauer von hochwasserauslösenden Niederschlagsereignissen. Merz and Blöschl (2001) wiesen darauf hin, dass eine Kombination mehrerer Prozessindikatoren für die Erfassung der Abflussdynamik auf regionaler Ebene besonders aussagekräftig ist. Auch manche Satellitendaten sind

sinnvoll für die Modelleichung und Verifikation einsetzbar, wie etwa räumliche Muster von Überschwemmungsflächen (Grayson et al., 2002). Da die Vergleiche von beobachteten und simulierten Mustern für die flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung so zentral sind, werden von Grayson et al. (2002) zusätzlich zu den visuellen Vergleichen auch quantitative Mustervergleiche vorgeschlagen. Diese Methoden ergeben Maßzahlen, die auch für die automatische Eichung flächendetaillierter Niederschlag-Abfluss Modelle verwendet werden können.

8. Danksagung

Wir danken dem Jubiläumsfonds der Oesterreichischen Nationalbank Projekt Nr. 5309 für finanzielle Unterstützung der Arbeiten im Tarrawarra Gebiet. Weiters danken wir für finanzielle Unterstützung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (Projekt Nr. HOE18) dem Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, dem Australian Research Council (projects C39804872, A39801842), und dem University of Melbourne Collaborative Grant's scheme.

9. Literatur

- Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell and J. Rasmussen (1986) An introduction to the European Hydrologic System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 1, History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *J. Hydrol.*, 87, 45-49.
- Anderson, M. G. and P. D. Bates (Eds.) (2001) *Model Validation: Perspectives in Hydrological Science*. John Wiley, Chichester, 512 pp.
- Anderton, S., J. Latron and F. Gallart (2002) Sensitivity analysis and multi-response, multi-criteria evaluation of a physically based distributed model. *Hydrol. Processes*, 16, 333-353 .
- Bergström, S., G. Lindström and A. Pettersson (2002) Multi-variable parameter estimation to increase confidence in hydrological modelling. *Hydrol. Processes*, 16, 413-421.
- Beven, K. (1989) Changing ideas in hydrology - the case of physically based models, *J. Hydrol.*, 105, 157-172.
- Beven, K. J. (2001) *Rainfall-runoff modelling – The primer*. John Wiley and Sons, 360p.
- Blöschl, G. (1996) *Scale and Scaling in Hydrology* (Habilitationsschrift). Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band 132, Institut für Hydraulik, TU Wien, 346 pp.
- Blöschl, G. and M. Sivapalan (1995) Scale issues in hydrological modelling - a review. *Hydrol. Processes*, 9, 251-290.

Blöschl, G. und A. W. Western (1997) Räumliche Struktur hydrologischer Größen in kleinen Einzugsgebieten. Endbericht an den Jubiläumsfonds der Oesterreichischen Nationalbank Projekt Nr. 5309. Institut für Hydraulik, TU Wien.

Blöschl, G. und R. Merz (2002) Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflußmodellierung. Wiener Mitteilungen Band 164: Niederschlag-Abfluss Modellierung - Simulation und Prognose, 149-178.

Blöschl, G., R. Merz, Ch. Reszler and J. Skøien (2001) Skalierungsprobleme in der Hydrologie. Jahresbericht an die Österreichische Akademie der Wissenschaften HÖ 18/00, Nov. 2001, Institut für Hydraulik, TU Wien.

Bormann, H. (2001) Hochskalieren von prozessorientierten Wassertransportmodellen - Methoden und Grenzen; Herbert-Utz Verlag - Wissenschaft (Reihe Geowissenschaften), München.

Europäische Gemeinschaft (2000) Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L327.

Gelhar, L.W. (1993) *Stochastic Subsurface Hydrology*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 390 pp.

Grayson, R. and G. Blöschl (2000) Spatial modelling of catchment dynamics. Chapter 3 in R. Grayson and G. Blöschl (Eds.) *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 51-81.

Grayson, R. B., G. Blöschl and I. D. Moore (1995) Distributed parameter hydrologic modelling using vector elevation data: THALES and TAPES-C. Chapter 19 in: Singh, V. P. (Ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 669-696.

Grayson, R. B., G. Blöschl, R. D. Barling and I. D. Moore (1993) Process, scale and constraints to hydrological modelling in GIS. In: Kovar, K. and Nachtnebel, H.P. (Eds.) *Applications of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management (Proc. Vienna Symp., April 1993)*. IAHS Publ. No. 211, 83-92.

Grayson, R., G. Blöschl, A. Western and T. McMahon (2002) Advances in the use of observed spatial patterns of catchment hydrological response. *Advances in Water Resources*, 25th Anniversary Issue, in press.

Gutknecht, D. (1993) Grundphänomene hydrologischer Prozesse. *Zürcher Geographische Schriften*, 53, ETH Zürich, 25-38.

Isaaks, E.H. and R.M. Srivastava (1989) *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, Oxford, 561pp.

Jussel, P. (1992) Modellierung des Transports gelöster Stoffe in inhomogenen Grundwasserleitern. Dissertation, ETH, Zürich, 323pp.

- Leavesley, G.H. and L.G. Stannard (1995) The Precipitation-Runoff Modeling System – PRMS. Chapter 9 in: Singh, V. P. (Ed.) Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 281-310.
- Loague, K. M and R. A. Freeze (1985) A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments. *Water Resour. Res.*, 21, 229-248.
- Loague, K. and G. A. Gander (1990) R-5 revisited. 1. Spatial variability of infiltration on a small rangeland catchment. *Water Resour. Res.*, 26, 957-971.
- Löhmannsröben, R. (2002) Die Bedeutung des Bodens im Zusammenhang mit der hydrologischen Regionalisierung. Wiener Mitteilungen Band 164: Niederschlag-Abfluß Modellierung - Simulation und Prognose, 201-213.
- Merz, R. and G. Blöschl (2001) A new look at hydrologic data for improving derived flood frequency parameterisations. Abstract Proceedings of the International Workshop on Catchment-scale Hydrological Modeling and Data Assimilation, September 3-5 2001, Wageningen, The Netherlands, pp. 25-26.
- Merz, R. und G. Blöschl (2002) Marktüberblick - Software für die Niederschlag-Abfluß Modellierung. Wiener Mitteilungen Band 164: Niederschlag-Abfluß Modellierung - Simulation und Prognose, 223-242.
- Merz, R., U. Piöck-Ellena, G. Blöschl and D. Gutknecht (1999) Seasonality of flood processes in Austria. In: Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating (ed. by L. Gottschalk, J.C. Olivry, D. Reed and D. Rosbjerg) Proc. Birmingham Symp., July 1990. IAHS Publ. no. 255, pp. 273-278.
- Moore, I. D. and G. J. Burch (1986) Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory. *Water Resour. Res.*, 22:1350-1360.
- Naef, F. (1981) Can we model the rainfall-runoff process today? *Hydrol. Sci. Bull.*, 26, 281-289.
- ÖBG (2001) Bodenaufnahmesysteme in Österreich. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft. Heft 62.
- Palacios-Vélez O., L., W. Gandoy-Bernasconi and B. Cuevas-Renaud (1998) Geometric analysis of surface runoff and the computation order of unit elements in distributed hydrological models, *J. Hydrol.*, 211, 266-274.
- Peschke, G., C. Etzenberg, G. Müller, J. Töpfer and S. Zimmermann (1999) Das wissensbasierte System FLAB – ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflußbildung. IHI-Schriften, H.10, Internat. Hochschulinstitut Zittau.
- Senarath, S. U. S, Ogden F. L., Downer, Ch. W., Sharif H. O. (2000) On the calibration and verification of two-dimensional, distributed, Hortonian, continuous watershed models. *Water Resour. Res.*, 36, 1495-1510.

- Sivapalan, M. and G. Blöschl (1995) An overview of large scale hydrological modelling. Proceedings MODSIM 95, International Congress on Modelling and Simulation, Newcastle, NSW, Australia, Nov. 27-30, 1995, Vol. 1. Modelling and Simulation Society of Australia, pp. 139-149.
- Smith, R.E., D.R. Goodrich, D.A. Woolhiser and C.L. Unkrich (1995). KINEROS – A KINematic Runoff and EROSION Model. Chapter 20 in: Singh, V. P. (Ed.) (1995) Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado 697-732.
- Srinivasan, M. S., W. J. Gburek and J. M. Hamlett (2002) Dynamics of stormflow generation - A hillslope-scale field study in east-central Pennsylvania, USA. *Hydrol. Processes*, 16 (3), 649-665.
- Stephenson, G. R. and R. A. Freeze (1974) Mathematical simulation of subsurface flow contributions to snowmelt runoff, Reynolds Creek Watershed, Idaho. *Water Resour. Res.*, 10, 284-294.
- Vertessy, R., H. Elsenbeer, Y. Bessard and A. Lack (2000) Storm runoff generation at La Cuenca. Chapter 10 in R. Grayson and G. Blöschl (Eds.) Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 247-271.
- Vogl, Ch. (2001) Der neue Ordnungsrahmen für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik – die rechtliche Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Österreich. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, 53, 111-116.
- Western, A. W. and R. Grayson (2000) Soil moisture and runoff processes at Tarrawarra. Chapter 9 in R. Grayson and G. Blöschl (Eds.) Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 209-246.
- Western, A. W., R. B. Grayson, G. Blöschl and D. Wilson (2002) Spatial variability of soil moisture and its implications for scaling. Chapter in: Radcliffe, Selim and Pachepsky (Eds.) Scaling Methods in Soil Physics. CRC press LLC, Boca Raton, FL, USA., in press.
- Wigmosta, M. S., L.W. Vail and D. P. Lettenmaier (1994) A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Wat. Resour. Res.* 30(6):1665-1679.
- Willgoose, G. and G. Kuczera (1995) Estimation of sub-grid scale kinematic wave parameters for hillslopes. *Hydrol. Processes*, 9, 469-482.
- Wilson J. P and J. C. Gallant (Editors) (2000) Terrain Analysis: Principles and Applications. John Wiley. Chichester 512 pp.
- WMS (2001) http://www.ground-water-models.com/products/wms_overview/wms_overview.html, accessed on Dec. 28, 2001.

Anschrift der Verfasser:

Ao.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl
Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/223, A-1040 Wien
Tel. +43 1 58801 22315, Fax. +43 1 58801 22399
E-mail: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at
<http://www.hydro.tuwien.ac.at/>

Associate Professor Rodger Grayson
Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology and
Centre for Environmental Applied Hydrology
Department of Civil and Environmental Engineering
University of Melbourne
Victoria 3010, Australia
Tel. +61 3 8344 6641, Fax. +61 3 8344 6215
E-mail: rodger@civag.unimelb.edu.au

ZUFLUSSVORHERSAGE IM VERBUND

Martin Bachhiesl und Otto Pirker

1. Die Bedeutung hydrologischer Vorhersagen für ein wasserkraftdominiertes EVU

1.1 Allgemeine Situation

Am Beispiel des Verbund wird die Bedeutung und der Einsatz hydrologischer Vorhersagemodelle für ein wasserkraftdominiertes Elektrizitätsversorgungsunternehmen dargestellt. Der Verbund, Österreichs größter Stromproduzent, verfügt über insgesamt 71 Wasserkraftanlagen (14 Speicherkraftwerke, 20 Laufschwellokraftwerke, 37 Laufkraftwerke) und 5 kalorische Kraftwerke.

1.2 Erzeugungsstruktur

Im Mittel liegt der Erzeugungsanteil der Wasserkraft im Verbund bei rund 90 %. Im Jahr 1999 (siehe Abbildung 1) lag der Wert aufgrund der guten Wasserführungsverhältnisse bei 92,5 % (Laufkraftwerke 58,3 %, Laufschwellokraftwerke 14,3 % und Speicherkraftwerke 19,9 %).

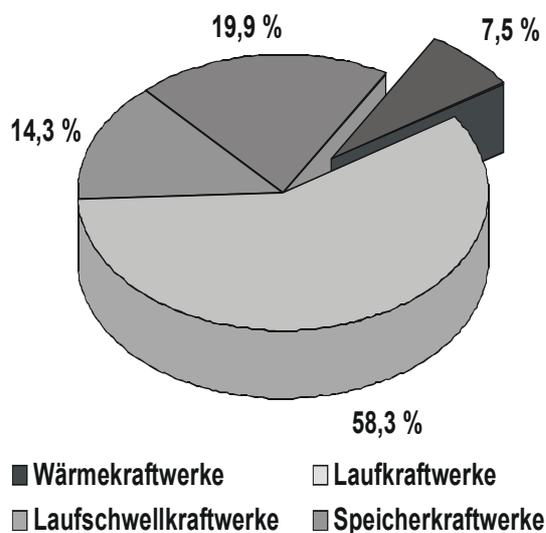


Abb. 1: Erzeugungsanteile an der Stromerzeugung des Verbund 1999.

Das Regelarbeitsvermögen der Wasserkraftwerke des Verbund beträgt rund 23.200 GWh (siehe Tab. 1). Eine Besonderheit dieses Systems ist, dass rund 84 % der Regelerzeugung auf Lauf- und Laufschwellokraftwerke entfallen, also auf jene Kraftwerkstypen, deren Erzeugung unmittelbar vom Wasserdargebot abhängt. Der Anteil der Laufkraftwerke beträgt rund 65 %, wobei 55 % auf die Donaukraftwerke entfallen. Aufgrund des hohen Wasserkraftanteils an der Gesamterzeugung an elektrischer Energie im Verbund, ist eine große Variabilität in der Erzeugung gegeben.

Tab. 1: Engpassleistung und Regelarbeitsvermögen der Wasserkraftwerke des Verbund.

Wasserkrafttypen	EPL		RAV	
	[MW]	[%]	[GWh]	[%]
Laufkraftwerke	2.605,6	43,0	15.138,8	65,3
Laufkraftwerke mit Schwellbetrieb	995,0	16,4	4.305,6	18,6
Tagesspeicher	188,7	3,1	710,7	3,1
Jahresspeicher	2.276,5	37,5	3.029,2	13,1
Summe Lauf- Laufschnellkraftwerke	3.600,6	59,4	19.444,4	83,9
Summe Speicherkraftwerke	2.465,2	40,6	3.739,9	16,1
Summe Wasserkraftwerke	6.065,8	100,0	23.184,3	100,0
Laufkraft - Donau	2.126,9	35,1	12.786,2	55,2

1.3 Zuflussvorhersagen für den Kraftwerksbetrieb

Die Wasserkrafterzeugung des Verbund unterliegt kurzfristigen sowie saisonalen Schwankungen. Der Einsatz hydrologischer Vorhersagemodelle ist daher für das Unternehmen schon seit 1969 (1. Zuflüßvorhersage für die Draukraftwerke) ein wichtiges Thema. Durch die Strommarktliberalisierung in der Europäischen Union ist die Notwendigkeit zuverlässiger, operationeller Vorhersagen sogar gestiegen. Im Zusammenhang mit dem Klimaschutz hat die Elektrizitätserzeugung aus erneuerbarer Energie zusätzlich an Bedeutung gewonnen. Ein möglichst effizienter Einsatz der Wasserkraftwerke ist ein Beitrag zur Substitution fossiler Energieträger.

Zuflussvorhersagen werden sowohl für den unmittelbaren Kraftwerksbetrieb als auch bei der übergeordneten energiewirtschaftlichen Planung benötigt. Beim Kraftwerksbetrieb liegt der Schwerpunkt in der kurzfristigen Abflussvorhersage, insbesondere für die geordnete Abfuhr einer Hochwasserwelle. Um beim Durchgang einer Hochwasserwelle entlang einer Staukette die Wasserspiegellagen optimal zu steuern, sind zuverlässige Zuflussvorhersagen sowohl aus Gründen der Sicherheit als aus hinsichtlich einer effizienten Energieerzeugung ein wichtiges Instrument. Für die kurzfristige Planung des erforderlichen Personaleinsatzes im Hochwasserfall (Besetzung von Leitstellen) sind Vorhersagemodelle hilfreich. An den Kraftwerksketten der Drau, der Enns und der Salzach sind derartige Modelle bereits im Einsatz.

1.4 Zuflussvorhersage für die energiewirtschaftliche Planung

Für die energiewirtschaftliche Planung sind die Anforderungen vielfältiger und beschränken sich nicht ausschließlich auf den Hochwasserfall. Anwender von Zuflussvorhersagen sind in erster Linie der Hauptlastverteiler, der für die Kraftwerkseinsatzplanung verantwortlich ist, aber auch der Stromhandel, wobei zwischen den beiden Bereichen ein enger Zusammenhang gegeben ist. Im Verbund wird als Entscheidungsunterstützung für diese Bereiche ein energiewirtschaftliches Planungswerkzeug entwickelt. Als Input für das Optimierungssystem sind Zufluss- bzw. Erzeugungsvorhersagen unbedingt erforderlich.

Die einzelnen Wasserkraftwerkstypen erfüllen verschiedene Aufgaben im Gesamtsystem, unterliegen aber auch unterschiedlichen hydraulischen und hydrologischen Randbedingungen. Einige der wichtigsten Kriterien sind in Tab. 2 angeführt.

Tab. 2: Energiewirtschaftliche Kriterien bei Wasserkraftwerken.

Kraftwerkstyp \ Kriterien	Laufkraftwerke	Laufkraftwerke mit Schwellbetrieb	Tagesspeicher	Jahresspeicher
Abhängigkeit vom momentanen Zufluß	sehr hoch	hoch	weitgehend unabhängig	praktisch unabhängig
Verlagerungsmöglichkeit	keine	wenige Stunden	Tage	saisonal
Leistungsverfügbarkeit	zuflußabhängig	zuflußabhängig	kurzzeitig hoch	hoch
Regelzwecke	Primärregelung	Primärregelung	-	Sekundärregelung
Reservehaltung	nein	nein	kurzfristig	ja
Grundlastbereich	ja	ja	nein	nein
Abdeckung Lastspitzen	nein	nein	kurzfristig	ja
spezifische Kosten*	gering	mittel	mittel	hoch

Aufgrund der Dominanz der Laufwasserkrafterzeugung im Verbundsystem haben für die Einsatzplanung die Erzeugungsprognosen für Donau und Inn oberste Priorität. Die große Variabilität der Zuflüsse und damit auch der Erzeugung ist aus Abb. 2 ersichtlich. Seitens der Anwender besteht daher die Forderung nach einer möglichst stabilen Online-Prognose mit einer Prognosefrist bis zu 4 Tagen, die sowohl im „Alltagsbetrieb“, als auch im Hochwasserfall zufriedenstellende Vorhersagen liefert. Darüber hinaus besteht der Wunsch zumindest die Abflusstendenzen bis zu einer Woche zu prognostizieren. Die Vorhersagen dienen als Entscheidungsgrundlage für die tägliche „Fahrplanerstellung“, beim Abschluss kurzfristiger Energieimporte oder -exporte (Spotmarktgeschäfte) sowie für kurzfristige Entscheidungen bei Revisionsplanungen.

Hohe Abflüsse bedeuten für eine Kraftwerkskette nicht unbedingt eine hohe Energieerzeugung. Wird die Ausbauwassermenge (beim Donaukraftwerk Ybbs-Persenbeug beispielsweise bei rund 3.150 m³/s) überschritten, so kommt es aufgrund der geringeren Fallhöhe durch den höheren Unterwasserspiegel zu einem Rückgang der Kraftwerksleistung. Die in Abbildung 2 dargestellten Ganglinien zeigen, dass die Leistungseinbrüche Ende Februar und Anfang März sowie in der zweiten Maihälfte durch Hochwasserereignisse verursacht wurden. Diese Erzeugungsminderung muss durch andere Aufbringungskomponenten wie z.B. Speicherenergie, kalorischer Kraftwerkseinsatz oder Zukauf von Energie kompensiert werden. Auch im Stromhandel müssen entsprechende Strategien in solche Situationen angewendet werden. In Abb. 3 ist der Zusammenhang zwischen Durchfluss und Leistung für das Kraftwerk Ybbs-Persenbeug dargestellt. Je genauer die Entwicklung des Abflussesgeschehens und somit der Erzeugungsverlauf vorhergesagt werden kann, desto besser kann auf die jeweilige Situation, die auch vom Energieangebot am Markt und vom Preis abhängt, reagiert werden. Daraus kann sich ein Vorteil im Wettbewerb ergeben.

Auch eine Vorhersage der Zuflüsse zu den Jahresspeichern wäre für den Lastverteiler von Bedeutung. Vor allem in Hinblick auf den Pumpeinsatz können kurzfristige Vorhersagen auf Tagesbasis als Entscheidungsgrundlage verwertet werden. Längerfristige Vorhersagen würden die saisonale Speicherbewirtschaftung unterstützen.

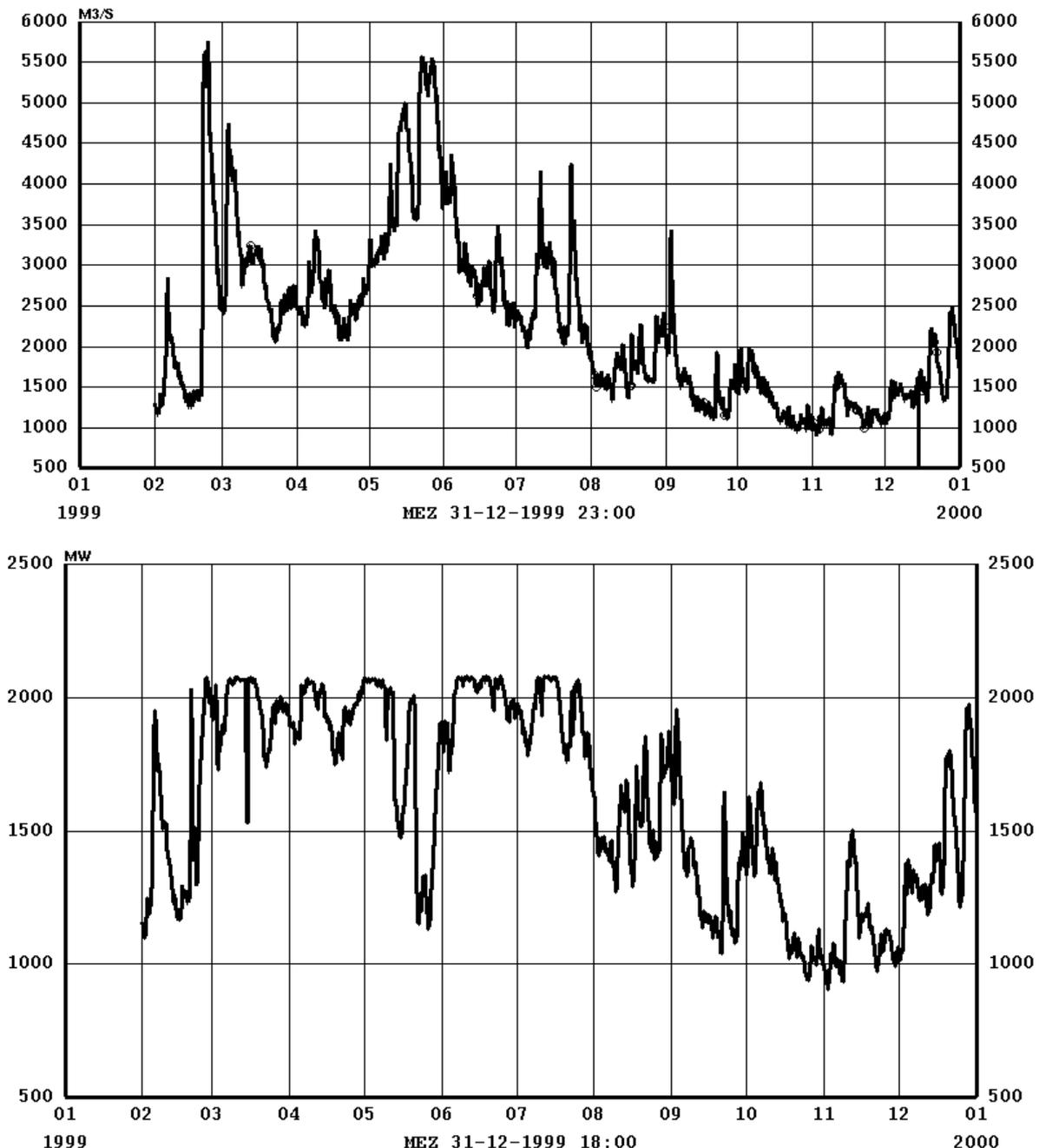


Abb. 2: Abfluss Kraftwerk Greifenstein (oben) und Wirkleistung (unten) der österreichischen Donaukraftwerke (Februar bis Dezember 1999).

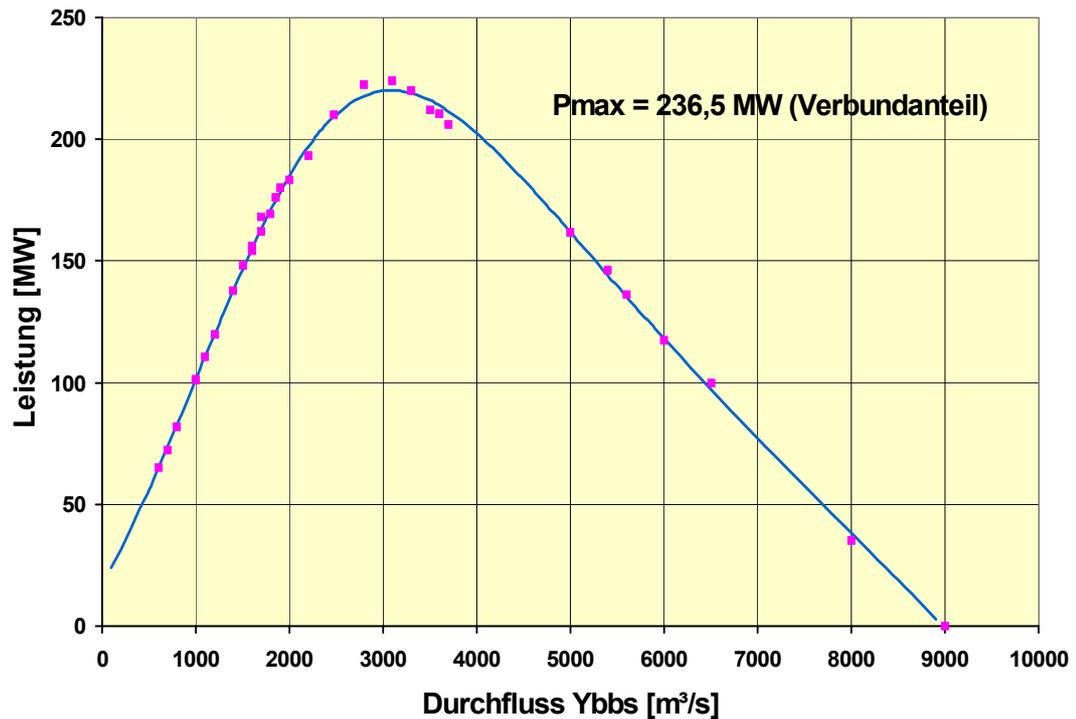


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Durchfluss und Leistung beim Kraftwerk Ybbs-Persenbeug.

2. Zuflussvorhersagen für den Kraftwerksbetrieb und energiewirtschaftliche Planung

2.1 Motive für die Entwicklung und den Einsatz von Zuflußprognosen

Folgende Gründe können angeführt werden, welche den Aufbau eines operationellen Zuflussvorhersagesystems für den Verbund rechtfertigen:

⇒ Vorteile für den Kraftwerksbetrieb

- Erfüllung von Behördenauflagen
- Optimierung bei der Steuerung der Kraftwerksketten
- Planung des Personaleinsatzes im Hochwasserfall

⇒ Vorteile bei der energiewirtschaftlichen Planung

- Kraftwerkseinsatzplanung (Fahrplanerstellung)
- Fahrplanerstellung durch den Lastverteiler
- Planung des Speichereinsatzes; Pumpeinsatz
- Kurzfristige Revisionsplanungen
- Vorteile für den Stromhandel im liberalisierten Markt
- Entscheidungsgrundlage für den Abschluss kurzfristiger Geschäfte
- Unterstützung für die mittelfristige Planung

2.2 Aufgabenstellung / Zielsetzung

Aufgrund der dargestellten Situation wurde im Verbund der Entschluss gefasst, ein energiewirtschaftliches Planungssystem im Verbund (EPV) zu entwickeln, welches sowohl die Anforderungen der Kraftwerkseinsatzplanung als auch jene des Stromhandels erfüllen soll. Die Zuflussvorhersage der Laufkraftwerkserzeugung an Donau und Inn stellt für dieses Planungswerkzeug eine wichtige Eingangsgröße dar. Unabhängig davon wird eine möglichst genaue Zuflussvorhersage auch direkt von den Entscheidungsträgern verwendet. Aus dieser Aufgabenstellung ergaben sich somit folgende Forderungen bzw. Vorgaben an das Zuflussvorhersagesystem:

- ⇒ Vorhersage der Zuflüsse an Donau und Inn für ausgewählten Kraftwerken
- ⇒ rasch verfügbare operationelle Vorhersagen
- ⇒ hohe Zuverlässigkeit des Vorhersagesystems
- ⇒ Vorhersagefrist bis 4 Tage
- ⇒ Verwendung von im Verbund vorhandener Modellbausteine

2.3 Hydrologische Situation/Einzugsgebiet

Das zu modellierende Einzugsgebiet weist beim Kraftwerk Greifenstein eine Größe von ca. 100.000 km² mit einer sehr heterogenen hydrologischen Charakteristik auf. Es umfasst sowohl alpine Bereiche als auch weite Bereiche des Alpenvorlandes. Um über das gesamte Einzugsgebiet ein besseres hydrologisches Verständnis zu erhalten, wurde das Institut für Hydrologie, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft der TU Wien mit einer räumlichen Analyse der Durchflussentwicklung beauftragt. Dabei konnten typische hydrologische Situationen, wie beispielsweise Regen auf Schnee, Weihnachtstauwetter, usw. in ihrer Entstehung charakterisiert werden.

2.4 Modell-Konzept

Aufgrund der Vorgaben wurde ein generelles Konzept – siehe Abb. 4 - für die Datenbeschaffung und Modellkonfiguration erstellt. Dabei zeigte sich, dass für eine 4 Tagesvorhersage die Einbeziehung meteorologischer Vorhersagen unbedingt erforderlich ist. Weiters zeigte sich, dass die Forderungen nur durch eine Kombination unterschiedlicher Modellansätze (Wellenablaufmodell, Niederschlag-Abflussmodell und Regressionsmodell) erfüllt werden können.

Entsprechend der Zielsetzung und der Vorgabe, möglichst auf im Konzern bereits vorhandene Modelle zurückzugreifen, wurde folgende Aufgabenteilung für die Entwicklung gewählt:

- Verbund: Projektleitung, Datenbeschaffung, -organisation und Integration in das Gesamtsystem
- ZAMG: Berechnung und Bereitstellung meteorologischer Daten (Gebietswerte und Vorhersagen)
- BOKU: Regressionsmodell und NA-Modell bis 72 Std.

TU Wien: räumliche Analyse der Durchflussentwicklung, Wellenablauf- und Niederschlag-Abfluss-Modell mit adaptiver Parameternachführung bis 36 Stunden, Zusammenführung der Modellergebnisse

2.5 Gebietsaufteilung

Aufgrund der Einzugsgebietsgröße sowie der Möglichkeiten zur Bereitstellung von meteorologischen Daten für ein so großes Gebiet, erfolgte eine Unterteilung in Teileinzugsgebiete entsprechend der Abb. 5, die nach hydrologischen und meteorologischen Gesichtspunkten bestimmt wurden. Dadurch konnte auch erreicht werden, dass die aktuelle Situation im Gesamtgebiet für den Anwender überschaubar blieb, und die Datenmenge, aber auch die Kosten für den laufenden Betrieb reduziert werden konnten.

2.6 Meteorologische Eingangsgrößen

Für diese Teileinzugsgebiete werden von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) Gebietsmittelwerte der wesentlichen meteorologischen Größen wie Niederschlag, Lufttemperatur in unterschiedlichen Höhen und Schneefallgrenze, sowohl aus Messwerten als auch aus Vorhersagen berechnet. Basis für die Vorhersageberechnung sind die Modelle ECMWF und ALADIN-Vienna. Die Modellvorhersagen für die einzelnen Teilgebiete werden mittels statistischer Verfahren verbessert. Die Datenübertragung von der ZAMG zur Verbund erfolgt im operativen Betrieb automatisiert.

3. Hydrologische Modelle

Das Zuflussvorhersagesystem, das zur hydrologischen Modellierung verwendet wird, setzt sich aus verschiedenen Teilkomponenten zusammen, die den unterschiedlichen zeitlichen Anforderungen und Genauigkeitsansprüchen gerecht werden. Im folgenden werden die nun eingesetzten Modelle und das Gesamtsystem kurz dargestellt.

3.1 Wellenablauf- Niederschlagabflussmodell

Das für die Drau gemeinsam mit der TU (Institut Prof. Gutknecht) entwickelte Flussgebietsmodell HYSIM bildet die Basis für die Modellierung der Transformation der Wellen entlang der Flusstrecken und des Verhaltens kleinerer Seitenzubringer mit dem integrierten Niederschlags-Abflussmodul.

Das Modell ist so aufgebaut, dass die wesentlichen zu beschreibenden Phänomene durch entsprechende Bausteine modelliert werden. Je nach herrschender hydrologischer Situation werden die einzelnen Modellbausteine so kombiniert, dass aus ihnen eine dem natürlichen Geschehen adäquate Modellkonfiguration entsteht. Folgende Prozesse können mit dem modular aufgebauten System HYSIM beschrieben werden: Wellenablauf, Wellenablauf mit Berücksichtigung des Niederschlages im Zwischeneinzugsgebiet, Niederschlags-Abflussverhalten von Zubringern, Überlagerung mehrerer Zuflüsse, Modellierung der Abstauvorgänge bei Hochwasser (Kraftwerksmodul) und Leistungsberechnung für die einzelnen Kraftwerke.

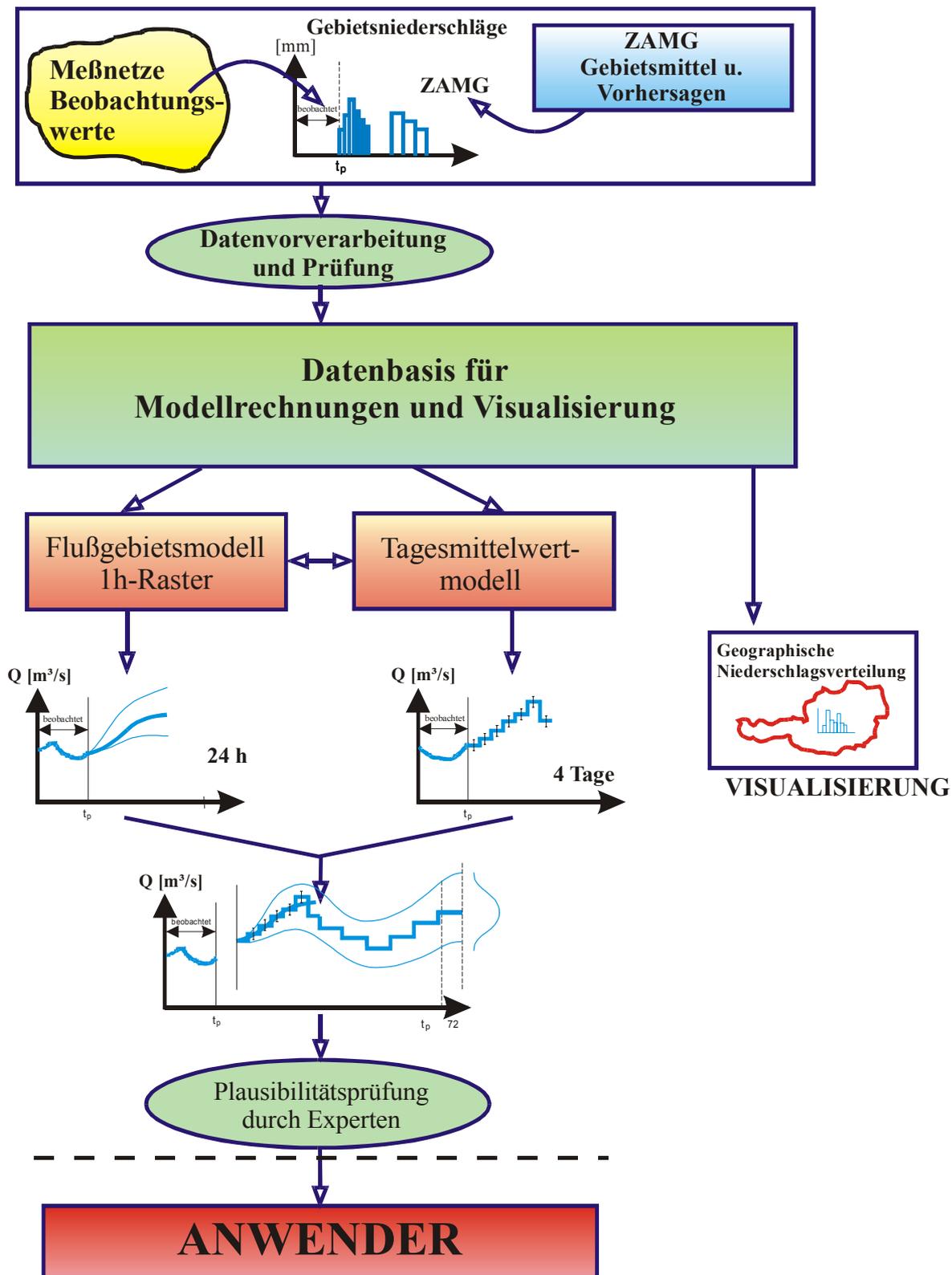


Abb. 4: Generelles Konzept für Datenbeschaffung und Modellkonfiguration.

Das Modell eignet sich besonders gut zur Vorhersage der Abflüsse für die unmittelbare Zukunft von 24 bis 36 Stunden im 1-h-Raster, da eine rekursive Online-Schätzung der Systemparameter für jedes Modul mittels Kalmanfilter erfolgt und so dynamische Veränderungen im Einzugsgebiet gut erfasst und in der aktuellen Vorhersage auch berücksichtigt werden.

Der bestehende Algorithmus wurde entsprechend den Anforderungen erweitert bzw. adaptiert, sodass zum Beispiel externe Prognosen an einzelnen Pegeln in das System übernommen werden können. Mit historischen Abflussreihen und den von der ZAMG zur Verfügung gestellten meteorologischen Daten konnten für die einzelnen Teilsysteme die Parameter kalibriert werden. Diese Teilsysteme sind durch geeignete Kombinationen zu einem Gesamtsystem zusammengefügt.

Durch den Einsatz eines neu entwickelten Glättungsmoduls für die zum Teil sehr stark anthropogen beeinflussten Abflussreihen konnte eine deutliche Verbesserung (Beruhigung) der Vorhersagen erreicht werden.

3.2 Niederschlagabflussmodell

Das Abflussprognosemodell P2R (Precipitation to Runoff) ist ein kontinuierliches, deterministisches Niederschlags-Abflussmodell (N/A-Modell). Es handelt sich um ein konzeptuelles Modell mit einer physikalisch basierten Struktur unter Berücksichtigung der physikalischen Grundregeln und der Prozesse im Einzugsgebiet.

Das Einzugsgebiet jedes Pegels wird durch eine Reihe von linearen Speichern repräsentiert, mit denen die Abflussanteile Oberflächenabfluss, Interflow (= oberflächennaher Abfluss) und Basisabfluss (= Grundwasserabfluss) simuliert werden, die in Summe den Gesamtabfluss ergeben. Die Bodenzone wird ebenfalls einbezogen. Das Einzugsgebiet des zu berechnenden Pegels wird somit im Modell durch eine einheitliche, vertikale Gebietssäule ersetzt. Alle diese Gebietssäule kennzeichnenden Größen sind mittlere Gebietskennwerte. Die Summe der Abflüsse aus den 3 Speichern ergibt den Abfluss am Prognosepegel. Wenn eine Schneedecke vorhanden ist, wird sie auf die Bodenzone aufgesetzt. Zur Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit von Niederschlag und Temperatur und den damit verbundenen Konsequenzen für die hydrologischen Prozesse kann das Modell mehrere Höhenzonen für die Berechnung unterscheiden.

3.3 Schnee- und Bodenabflussmodell

Das Tagesmittelwertmodell setzt sich aus zwei Modulen zusammen. Ein Schnee- und Bodenfeuchtemodul ergänzt das multiple lineare Regressionsmodell und ermöglicht durch Einbeziehung von Systemzuständen in die Regression das „Modellgedächtnis“ entscheidend. Das Schnee- und Bodenfeuchtemodell ermöglicht die Berechnung der raschen (oberflächigen) Abflusskomponente, des Zwischenabflusses und des langsamen Basisabflusses. Das System ist durch zwei Speicher beschrieben, wobei der erste den Mulden- und Bodenspeicher, der zweite den Grundwasserspeicher charakterisiert.

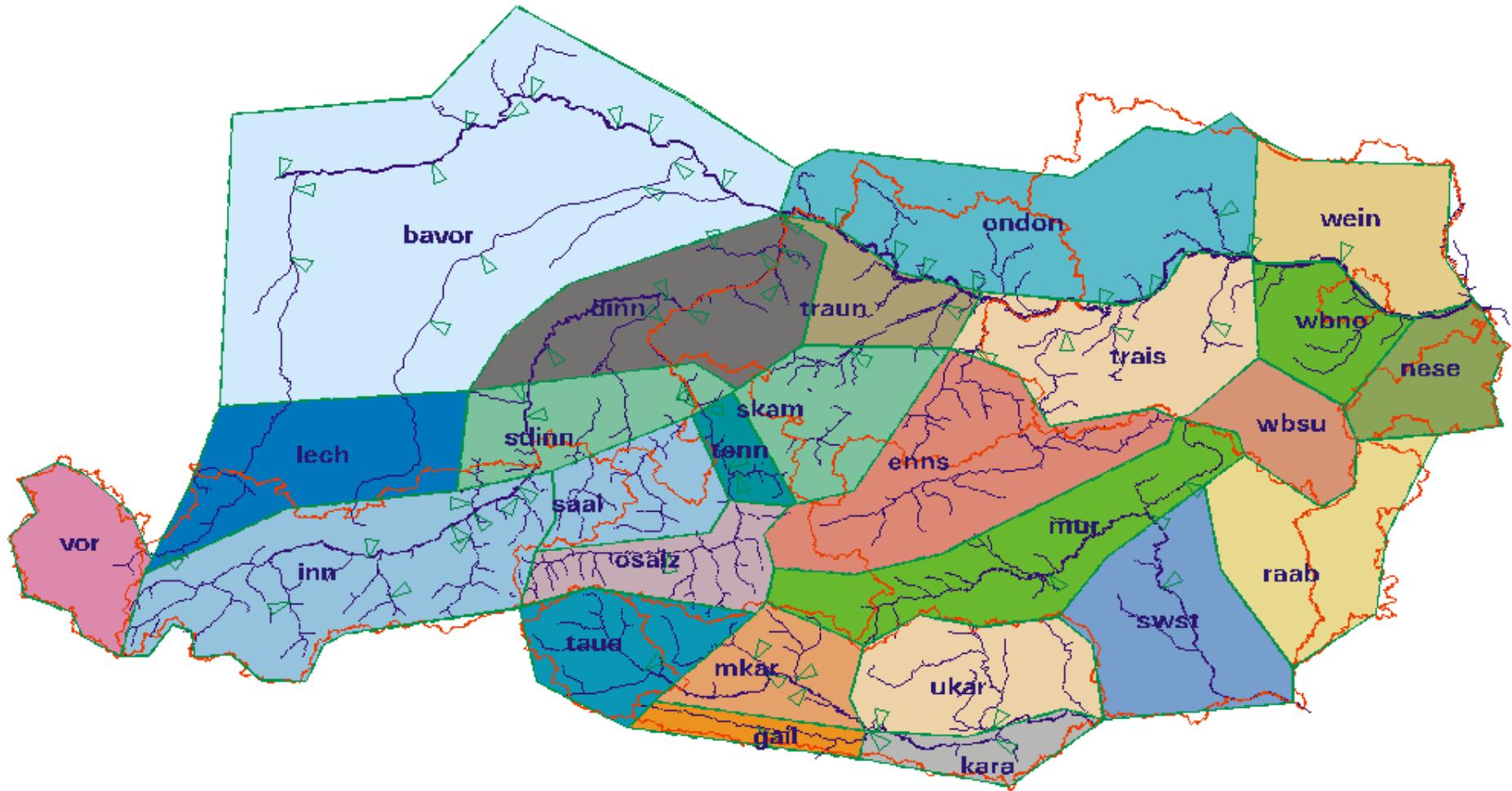


Abb. 5: Gebietseinteilung für die Vorhersagemodelle.

3.4 Regressionsmodell

Für die Regressionsrechnung werden sowohl die Summenwerte wie auch optional die Einzelkomponenten als Eingangswerte verwendet.

Der gewählte Modellansatz ist die lineare Mehrfachregression. Dieses Verfahren basiert auf der Beschreibung von statistischen Zusammenhängen zwischen der modellierten Größe und den verschiedenen Eingangsgrößen, den Prediktoren. Diese Zusammenhänge werden über die Regressionskoeffizienten quantifiziert. Die Schätzung der Regressionskoeffizienten erfolgt nach der „Methode der kleinsten Fehlerquadrate“.

3.5 Gesamtmodell

Durch geeignete Kombination der einzelnen Modelle wurde ein System konfiguriert, in dem abhängig von meteorologischen und hydrologischen Größen und dem Zustand des Einzugsgebietes verschiedene Prozesse beschrieben werden. Die Modellierung des Wellenablaufes entlang der Hauptflüsse ist Grundgerüst des Systems und daher durchgehend aktiv (in Abb.5 durch Rechtecke dargestellt). Im Ereignisfall werden an einzelnen Seitenzubringern bzw. Zwischeneinzugsgebieten mit Hilfe des NA-Moduls (grüne Dreiecke) zusätzlich Vorhersagen berechnet, die an das Wellenablaufmodell übergeben werden. An einigen Kopfstationen bzw. großen Seitenzubringern berechnet das P₂R-Modell (orange Dreiecke) kontinuierliche Vorhersagen, die über die Schnittstelle Datenbank an das Wellenablaufmodell weitergeleitet werden.

4. Ergebnisse

Die Abb. 7 und 8 zeigen beispielhaft, wie die Ergebnisse des Vorhersagesystems bei den Anwendern visualisiert werden.

Abb. 7 stellt die Durchflussvorhersage für das KW Greifenstein dar, die beiden kürzeren Prognosen sind Ergebnisse des Kurzfristmodells HYSIM, die 4-Tagesprognose jenes des Regressionsmodells. Äquivalent dazu zeigt das zweite Bild (Abb. 8) die prognostizierte Summe der Wirkleistungen an der Donau.

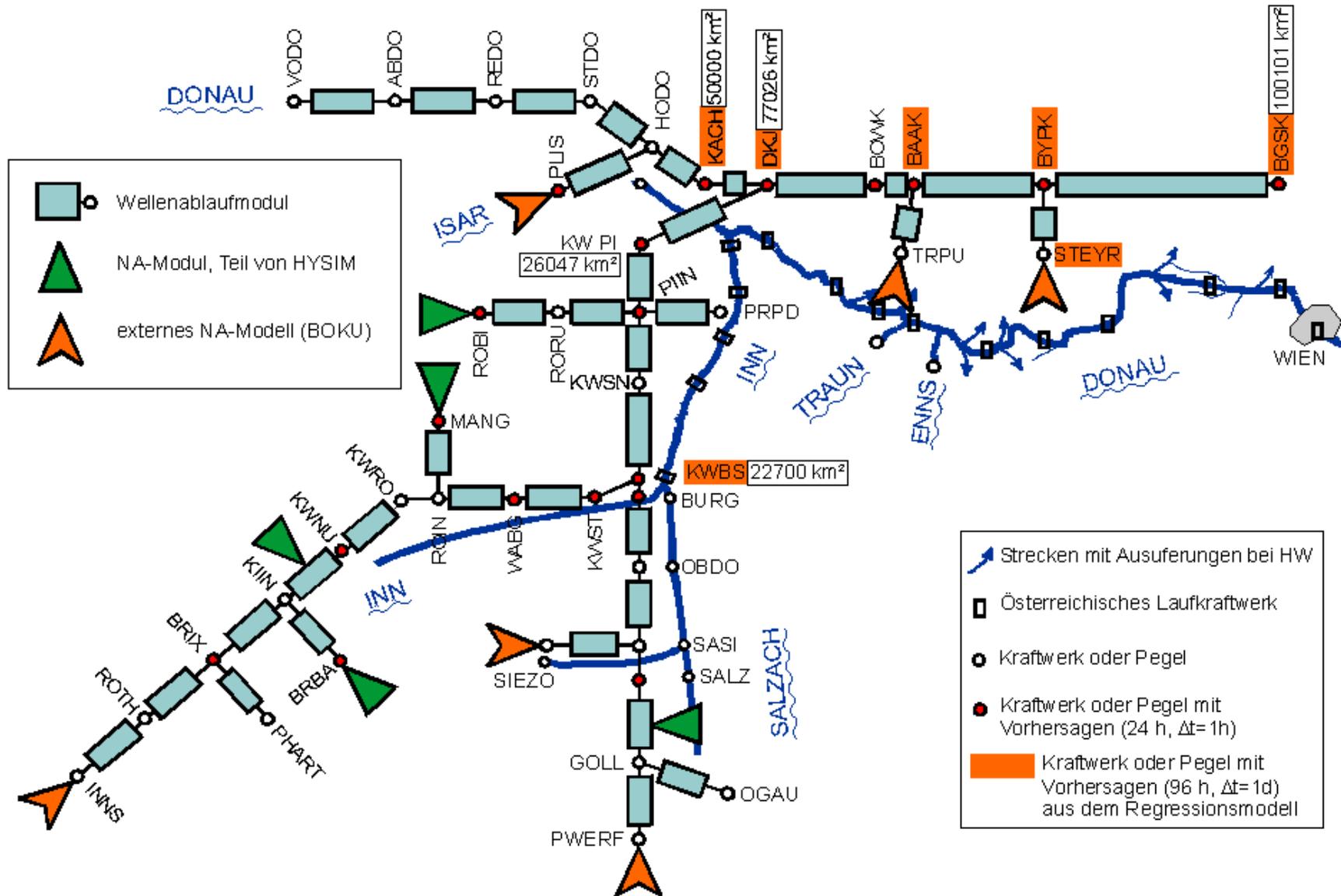


Abb. 6: Konfiguration des gesamten Vorhersagesystems.

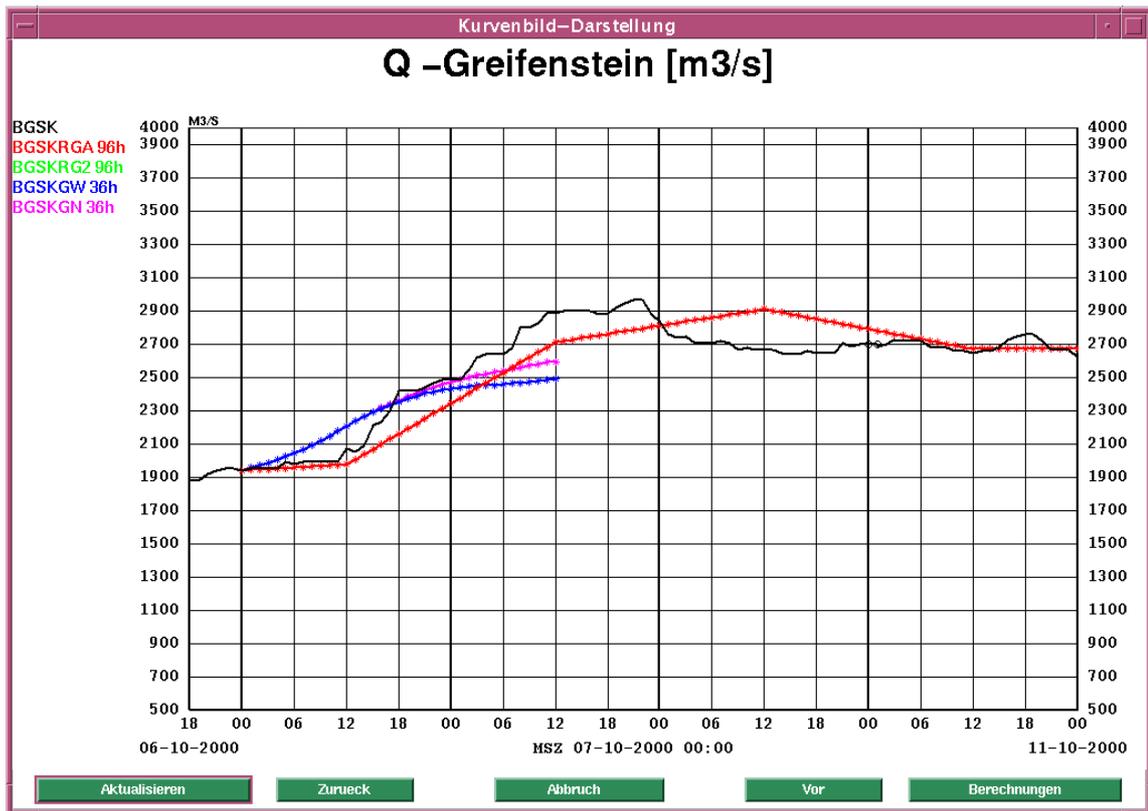


Abb. 7: Beispiel Zuflußvorhersage KW Greifenstein.

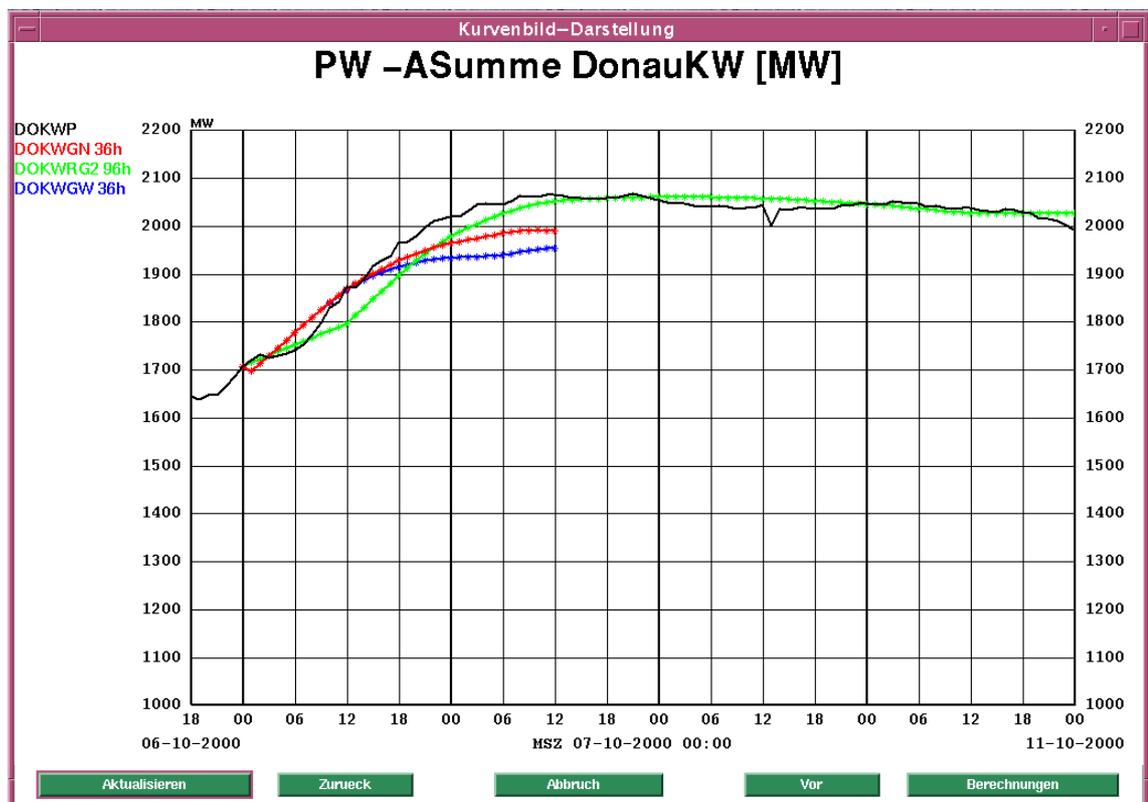


Abb. 8: Vorhersage der Wirkleistung für Σ Donau.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das im Rahmen des EPV-Projektes entwickelte Zuflussvorhersagesystem wurde im Gesamtsystem EPV integriert und auf einer dafür vorgesehenen Hardwareplattform implementiert. Für die Berechnung von Zuflussvorhersagen sind neben den Durchflussdaten auch meteorologische Messwerte und Vorhersagen der Niederschlagssummen sowie der Lufttemperaturen notwendig. Diese werden für 26 Teileinzugsgebiete von der ZAMG zyklisch berechnet und vom Verbund automatisiert abgerufen. Damit werden für die Flussgebiete, an denen der Verbund Lauf- und Laufschnellkraftwerke betreibt, die Zuflüsse bis zu vier Tage voraus berechnet. Diese Modelle berechnen für ausgewählte Kraftwerksstandorte mehrere Vorhersagevarianten mit unterschiedlicher Diskretisierung und Vorhersagefrist (1 Stundenrastr bis 36 Std. und Tagesmittelwerte bis 4 Tage). Mit einem nachgeschalteten Modell wird automatisch, abhängig von der jeweiligen hydrologischen und meteorologischen Situation (es können auch energiewirtschaftliche Situationen definiert werden) aus verschiedenen Vorhersagevarianten eine mit der größten Treffsicherheit kombiniert. Weiters werden für diese Varianten auch Unsicherheiten in Abhängigkeit von der Vorhersagefrist berechnet. Damit steht dem Anwender eine „beste“ Vorhersage mit einer Unsicherheitsangabe als Ergebnis zur Verfügung. Dieses wird auch als Eingangsgröße für die Optimierungsrechnungen verwendet. Die Detailergebnisse können für spezielle Betrachtungen selbstverständlich abgerufen werden. Aus den Zuflussvorhersagen wird für die Kraftwerke am Inn und an der Donau eine Wirkleistungsprognose ermittelt und als Summe für Inn und Donau zusammengefasst. Diese Ergebnisse stellen eine wesentliche Hilfe bei der Fahrplanerstellung im Hauptlastverteiler dar.

Die grafische Darstellung der Ergebnisse und der Inputdaten erfolgt mit einer modifizierten Version der Visualisierung, die bereits für die „Drau-Zuflussvorhersage“ entwickelt worden ist.

Die Zuflussvorhersage wurde bereits während der Entwicklung von den Anwendern im praktischen Einsatz getestet, sodass Wünsche und Anregungen bereits berücksichtigt werden konnten.

Anschrift der Verfasser:

Mag. Martin Bachhiesl
Dipl.-Ing. Dr. Otto Pirker
VERBUND-Austrian Hydro Power AG
Am Hof 6A
A-1010 Wien
Tel. +43 1 / 531 13 – 52592
E-Mail: martin.bachhiesl@verbund.at

VOM RECHENMODELL ZUM OPERATIONELLEN EINSATZ

Wilhelm Kugi

1. Rückblick auf die Entstehung des Vorhersagemodells

Die Vorhersagetechnik hat bei den Österr. Draukraftwerken bereits eine lange Tradition. Bereits Anfang der 70er Jahre wurde aufgrund der Hochwässer 1965 und 1966 ein erstes Vorhersagemodell an der Drau für das damalige Führungskraftwerk Feistritz-Ludmannsdorf im Rosental entwickelt. Der weitere Ausbau der Drau mit Kraftwerken sowie der Bau von zwei großen Speicherkraftwerksanlagen reduzierten die Vorhersagezeit so sehr, dass Anfang der 80er Jahre eine neue Modellkonzeption entwickelt werden mußte.

Am Beginn eines solchen Projektes steht die Definition der Anforderungen an ein solches Vorhersagemodell. Diese waren:

- *Laufende Zuflussvorhersage* (Alltagsbetrieb) für die Betriebsführung.
- *Abflüsse über der Ausbauwassermenge* zur Energiegewinnung, Vorhersage von Betriebseinschränkungen und zur Benachrichtigung interner Stellen.
- *Hochwasserabflüsse* zur Durchführung des Hochwassermanagements, der Verständigung von Behörden und der Ausgabe einer allgemeinen Hochwasserwarnung.

Über diese allgemeinen Anforderungen hinausgehend war es auch erforderlich, an einzelnen Vorhersagepegelstellen spezielle Anforderungen zu definieren. In der Abb. 1 sind als Beispiel für den Pegel Drau/Sachsenburg solche Grenzmarken festgelegt. Es sind dies der Abfluss von 240 m³/s mit dem Beginn der Einschränkung des Kraftwerksbetriebes beim KW Malta-Unterstufe bzw. die Vorhersage des Abflusses von 350 m³/s, bei dem der Betrieb des KW Malta-Unterstufe überhaupt eingestellt werden muss. Weiters von Interesse sind die beginnende Ausuferung im Oberlauf des Pegels sowie der zu erwartende Scheitelabfluss.

Um alle diese Anforderungen erfüllen zu können, wurde gemeinsam von der TU Wien und der Draukraft/Klagenfurt in einem iterativen und interaktiven Prozess ein neues Vorhersagemodell entwickelt. Diese Vorgangsweise hat sich als besonders zweckmäßig erwiesen, weil dabei sowohl die Erfahrungen der zukünftigen Modellanwender und Hydrologen vor Ort als auch die großen Erfahrungen der Modelltheoretiker an der Universität in die Projektkonzeption und in die Modellerstellung eingeflossen sind. Die Abb. 2 zeigt die intensive Verzahnung der einzelnen Arbeitsschritte am Projekt, welche Voraussetzung waren, um ein brauchbares auch im Online-Betrieb sicher funktionierendes Vorhersagemodell realisieren zu können.

Um ein solches Vorhersagemodell in der Praxis realisieren zu können, ist es natürlich erforderlich, umfassende Informationen über das Niederschlags- und Abflussgeschehen im Einzugsgebiet zu haben. Hiezu wurden im Einzugsgebiet der Drau ca. 30 Abflussmessstellen und 30 Niederschlags- und Temperaturmessstellen errichtet, die

ihre Messwerte über Datenleitungen direkt in die Hauptverwaltung nach Klagenfurt übertragen und dort die Grundlage für die Berechnung von Vorhersagen bilden. Die derzeit bestehende Messnetzkonfiguration ist in der Abb. 3 dargestellt. Über diese Feldmesswerte hinausgehend stehen für die Vorhersageerstellung auch noch Informationen aus dem Meteosat bzw. aus Niederschlags- und Wettervorhersagen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Klagenfurt zur Verfügung. Sie werden jedoch nicht direkt in den Berechnungsalgorithmus einbezogen, sondern dienen im wesentlichen zur Interpretation der Vorhersageergebnisse.

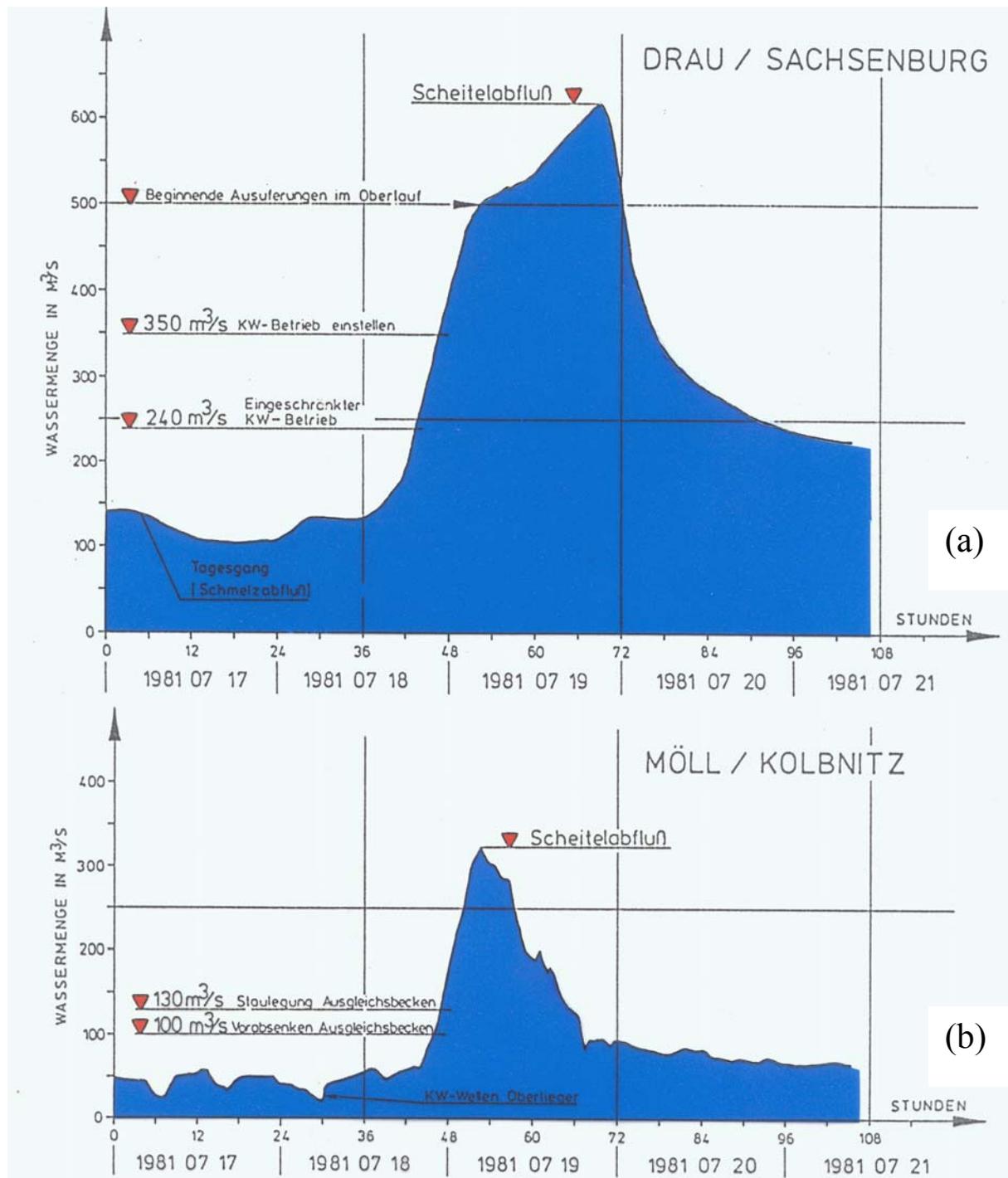


Abb. 1: Hochwasserwelle vom Juli 1981 (a) Sachsenburg / Drau; (b) Kolbnitz / Möll.

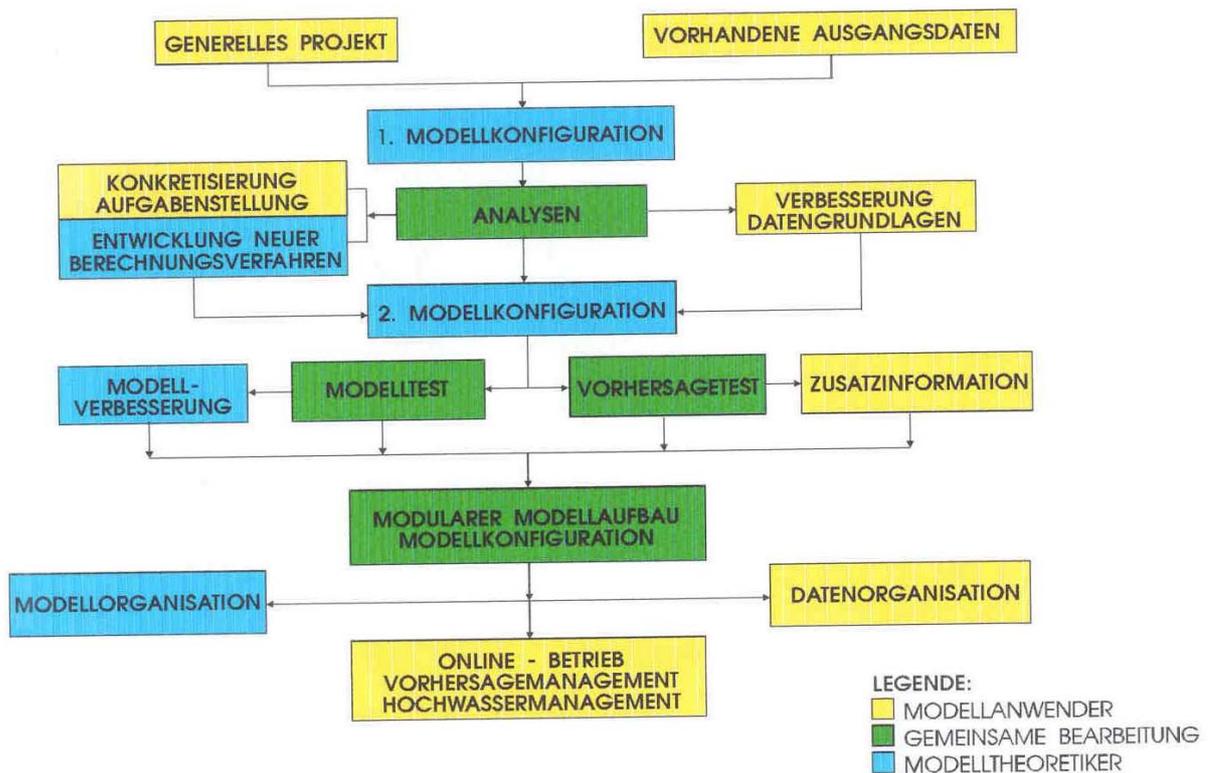


Abb. 2: Iterativer und interaktiver Modellaufbau.

2. Verbesserungen aus der Betriebserfahrung

Das modular aufgebaute Flussgebietsmodell erfüllte nach seiner Erstkonfiguration weitgehend die Erwartungen, doch konnten aufgrund der ersten Betriebserfahrungen einige Modellverbesserungen erreicht werden. So wurde beispielsweise das Einzugsgebiet der Isel mit ca. 1.200 km², welches ursprünglich nur durch ein einziges Niederschlag-Abflussmodell beschrieben wurde, in Teileinzugsgebiete mit Einzugsgebietsgrößen von ca. 250 bis 350 km² unterteilt. Dies führte zu einer wesentlichen Verbesserung der Vorhersagen. Die Ergebnisse dieser Unterteilung sind in der Abb. 4 dargestellt.

Eine weitere Verbesserung der Ergebnisse wurde dadurch erreicht, dass die Zuflüsse aus den Zwischeneinzugsgebieten zwischen zwei Pegelstellen durch eigene Niederschlag-Abflussmodelle beschrieben wurden, wodurch der Volumskorrekturfaktor im Wellenablaufmodell deutlich entlastet und so die Vorhersagen stabiler und besser wurden. Die Ergebnisse dieser Maßnahme sind in Abb. 5 dargestellt.

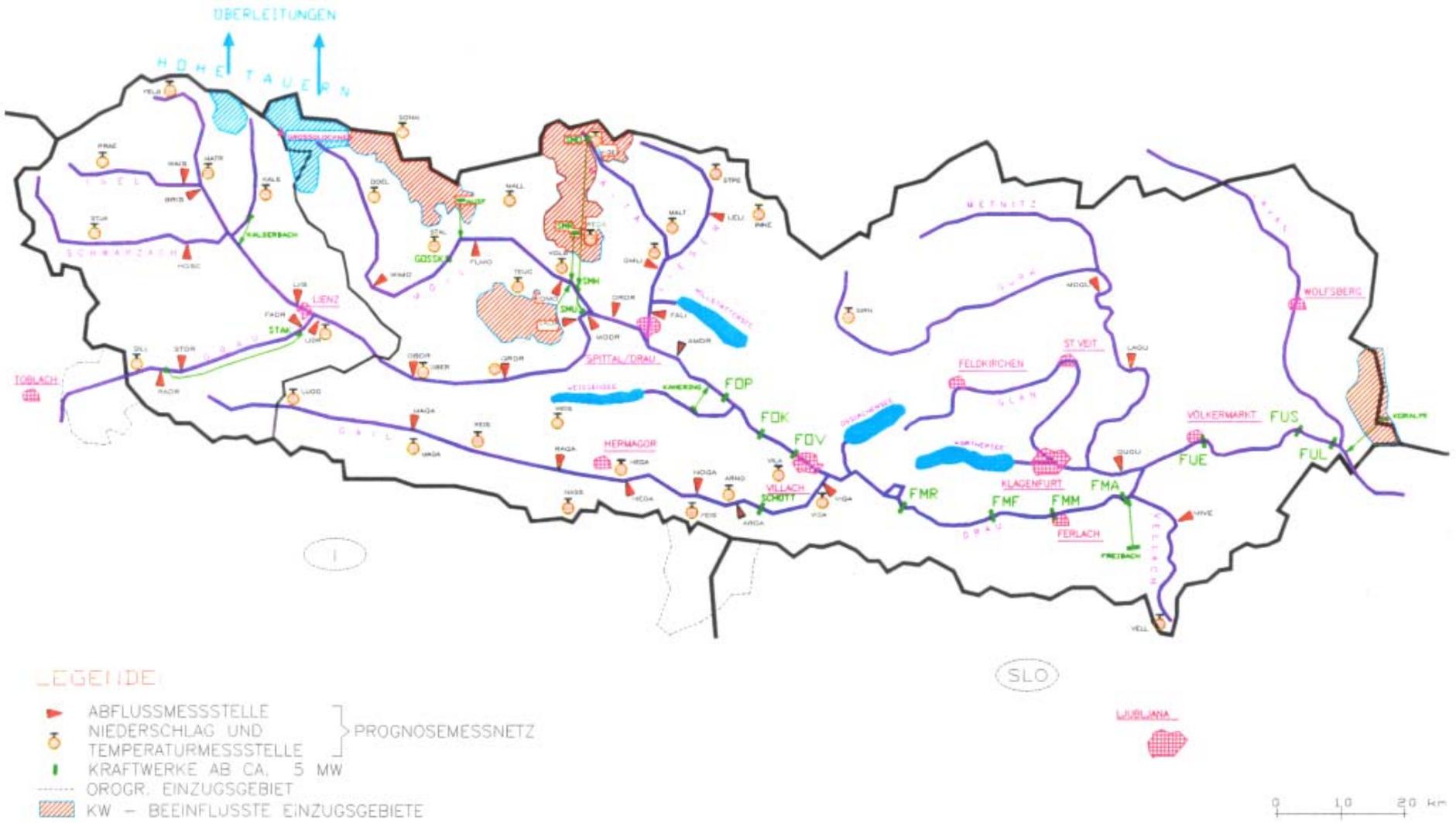


Abb. 3: Messnetz.

3. Heutige Konfiguration des Flussgebietsmodells

Der modulare Aufbau des Flußgebietsmodells, bestehend aus

- Niederschlag-Abflussmodellen mit und ohne Niederschlagsvorhersage,
- Wellenablaufmodellen,
- Wellenablaufmodellen mit Niederschlag-Abflussmodellen für das Zwischeneinzugsgebiet,
- Überlagerungsmodellen

ermöglicht so eine einfache Kombination der einzelnen Modellbausteine.

Diese Aneinanderfügung der einzelnen Modellbausteine erfolgt entsprechend den Anforderungen, die sich aus dem Einzugsgebiet ergeben, um die hydrologischen Prozesse bestmöglich beschreiben zu können. Schwierig ist die Einbindung der Abflüsse aus Speicherkraftwerksanlagen, da diese nicht zwingend mit den Niederschlagsereignissen einhergehen, sondern in den meisten Fällen nach dem Bedarf an elektrischer Energie gesteuert werden. Diese Wellen, die meistens als kantige Trapezwellen auftreten, stören natürlich hydrologische Vorhersageverfahren enorm und sind darüber hinaus in ihrer Größe und ihrem zeitlichen Verlauf auch nicht in ausreichendem Maß vorhersagbar.

Entsprechend der laufenden Betriebserfahrungen mit dem Vorhersagemodell und dem immer besseren Verstehen der hydrologischen Prozesse in den einzelnen Teileinzugsgebieten erfolgte eine laufende Anpassung der Modellkonfiguration. Als Beispiel ist die derzeit gültige Gesamtvariante 99 in der Abb. 6 dargestellt.

4. Beispiele

Das als Beispiel gewählte Ereignis vom Oktober 1998 war das größte Ereignis seit den Katastrophenhochwässern 1965 und 1966, bezogen auf die Drau unterhalb von Villach. Der Scheitelabfluss betrug ca. $1.650 \text{ m}^3/\text{s}$, was einem HQ_8 entspricht. Die Abb. 7 zeigt die Überregnung Westkärntens, mit dem Hauptregen dieses Ereignisses am 7. 10. 1998. Es ist eine gleichmäßige Überregnung zu erkennen, die einen leichten Frontdurchgang von West nach Ost nachvollziehen läßt.

Die in der Abb. 8 dargestellten Prognoseergebnisse für den Pegel Isel/Lienz mit einem Scheitelabfluss von ca. $230 \text{ m}^3/\text{s}$, entsprechend einem HQ_1 , zeigen sehr gute Prognoseergebnisse aus Osttirol, welche eine solide Basis für die Vorhersagen in Sachsenburg bilden.

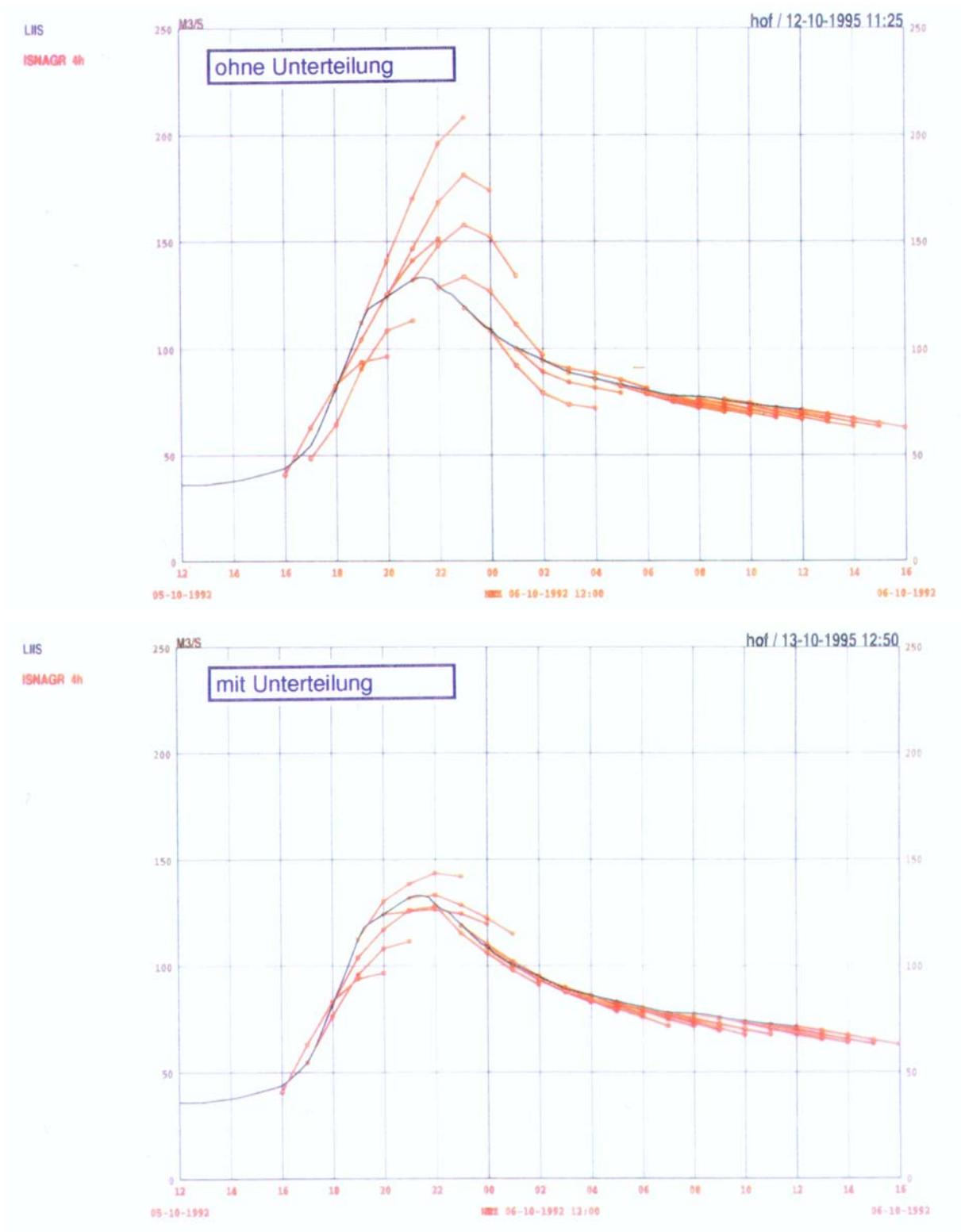


Abb. 4: Verbesserung der Vorhersagen durch Unterteilung des Einzugsgebietes (Lienz / Isel).

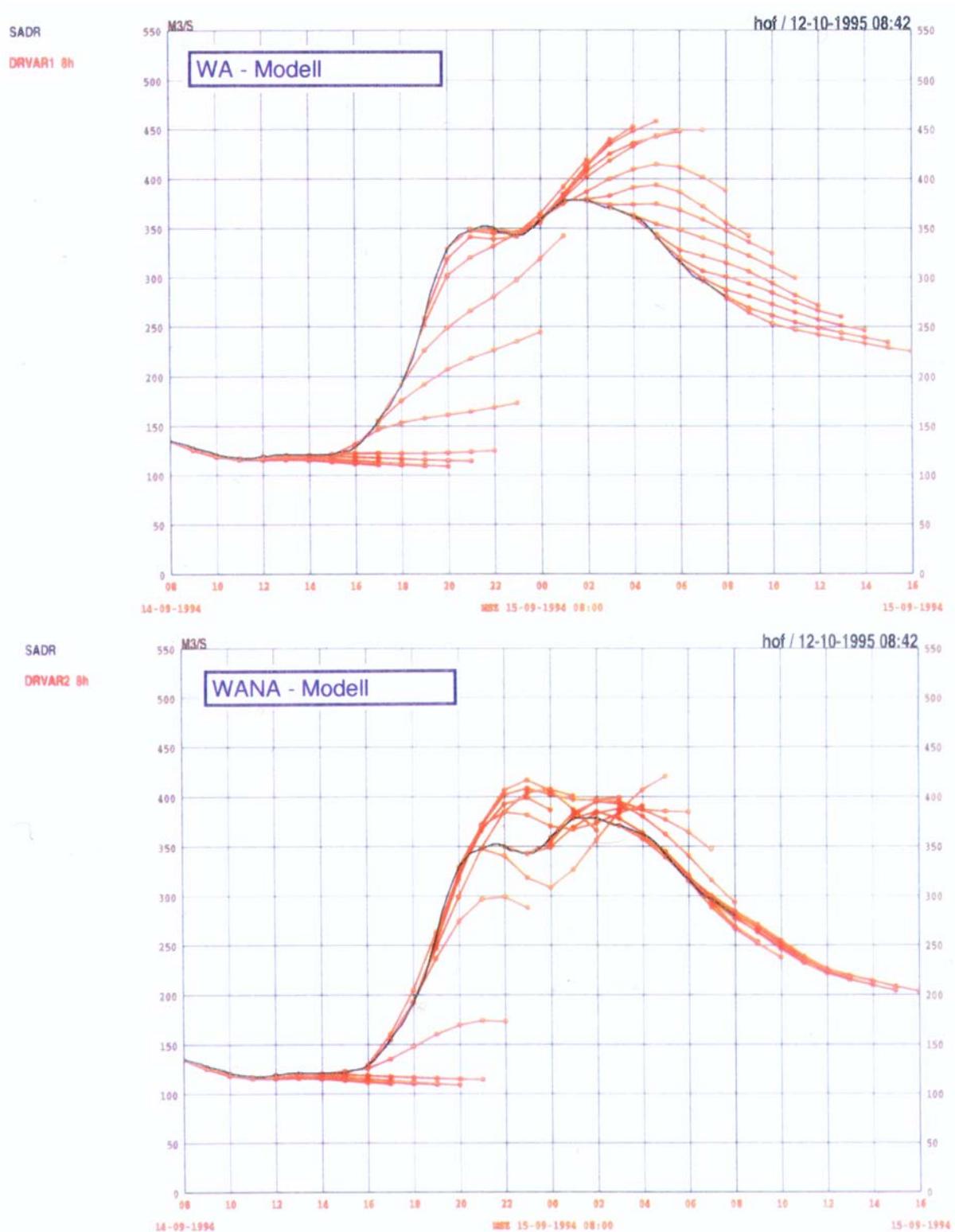


Abb. 5: Verbesserung der Vorhersagen durch Modellierung des Zwischengebietszuflusses (Sachsenburg / Drau).

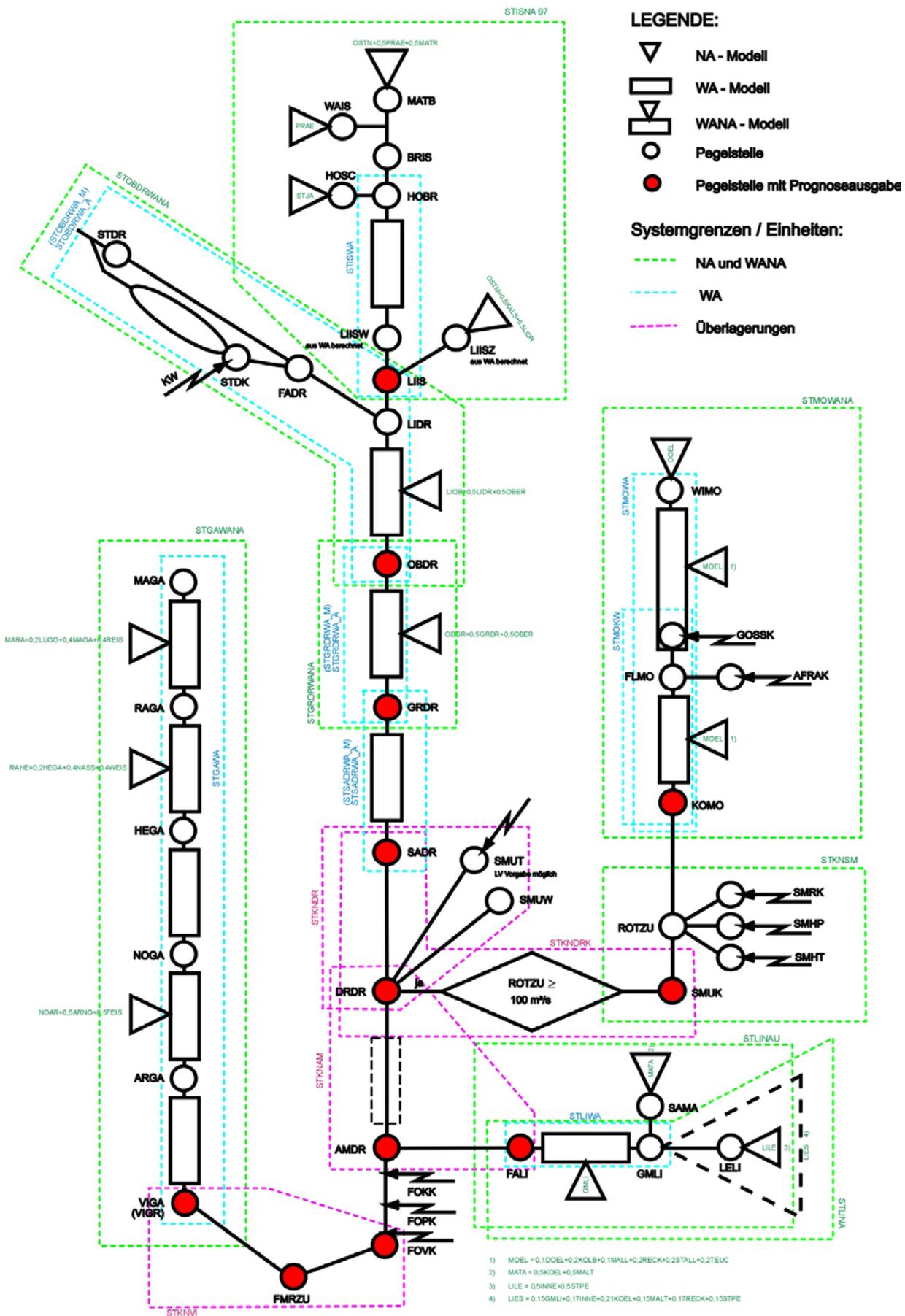


Abb. 6: Gesamtvariante 99.

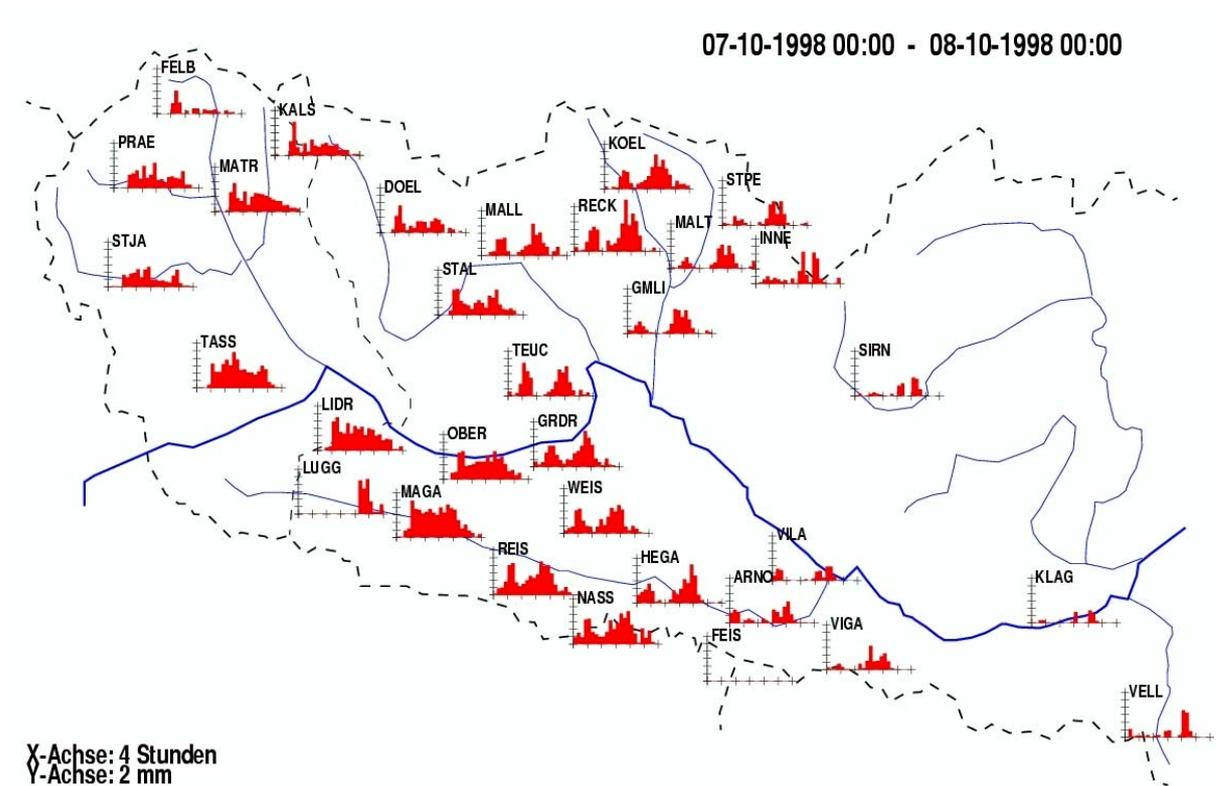


Abb. 7: Synoptische Darstellung des Niederschlagsereignisses vom 7. und 8.10.1998.

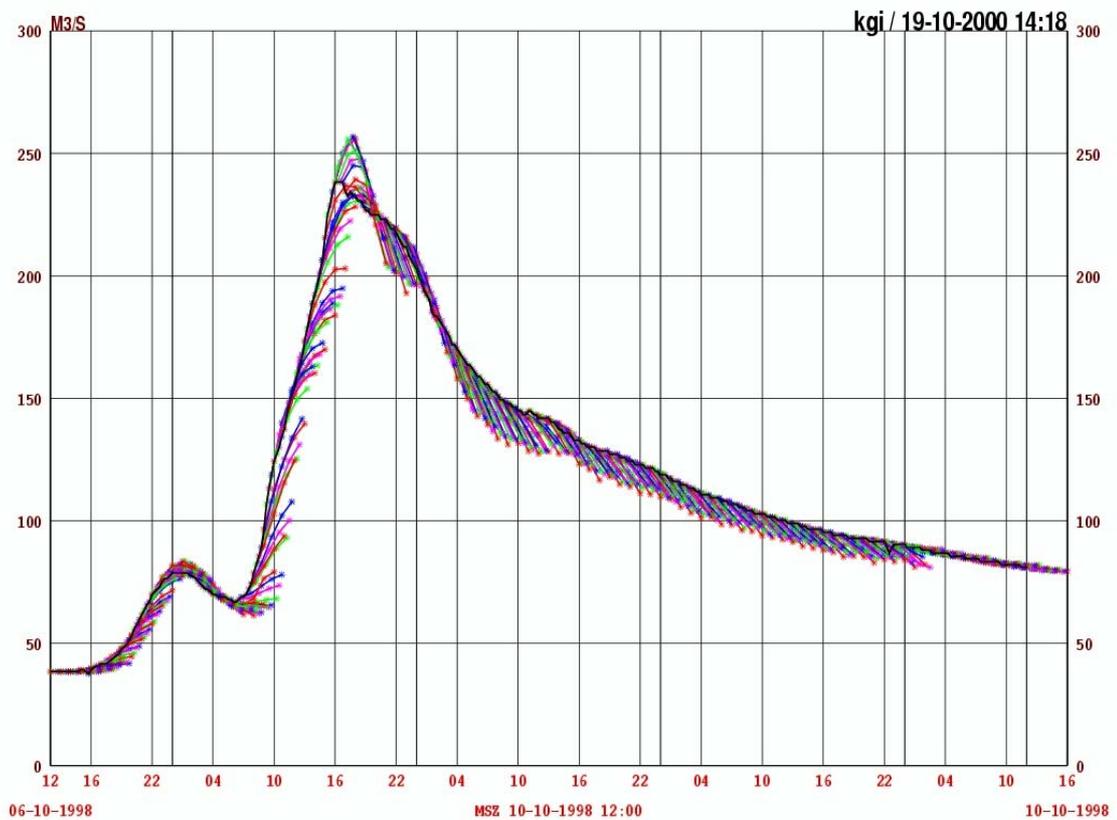


Abb. 8: Prognoseergebnisse Lienz / Isel, 10.10.1998 (ISVAR3 – 4h).

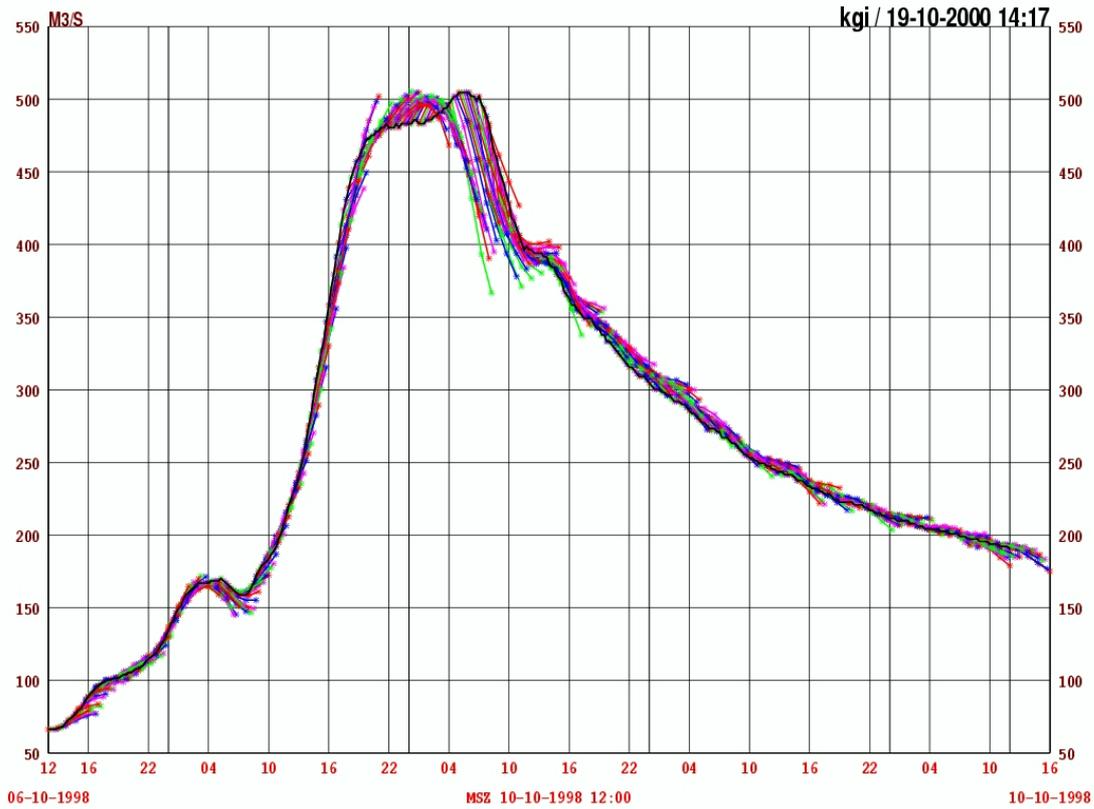


Abb. 9: Prognoseergebnisse Durchfluss in Sachsenburg, 10.10.1998 (DRVAR3 – 4h).

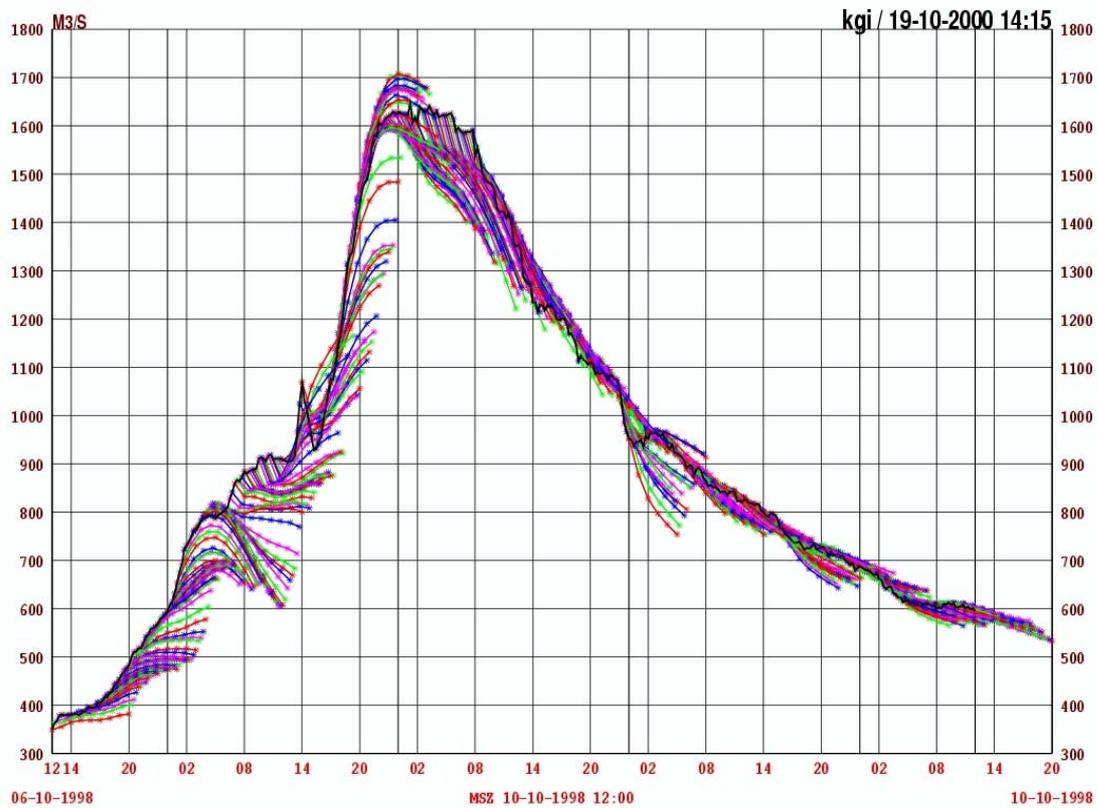


Abb. 10: Prognoseergebnisse Zulauf Rosegg, 10.10.1998 (FMRZUV3 – 4h).

Die Abb. 9 zeigt die Ergebnisse der Vorhersagen für die Welle am Pegel Sachsenburg. Der Scheitelabfluss betrug ca. 500 m³/s, was etwa einem HQ₅ entspricht. Exakte Vorhersagen wurden vor allem für den Bereich von 240 bis 350 m³/s berechnet, was für die Betriebseinschränkung beim KW Malta-Unterstufe von großer Bedeutung war. Auch die Scheitelprognosen erfolgten zufriedenstellend.

Die Abb. 10 zeigt die Prognoseergebnisse für den Zulauf zum KW Rosegg-St. Jakob östlich von Villach. Dieses liegt unterhalb der Einmündung der Gail, dem größten seitlichen Zubringer, in die Drau und bildet damit den Gesamtzufluss zu den Kraftwerksketten an der Mittleren und Unteren Drau. Die Prognoseergebnisse waren erwartungsgemäß gut. Die getroffenen Vorhersagen bildeten eine sehr gute Grundlage für die Einleitung einer Vorabsenkung im Stauraum Rosegg. Auch die Vorhersage des Wellenauslaufs erfolgte mit sehr hoher Genauigkeit, sodass eine gute Grundlage für den Wiederaufstau bei dieser Stauanlage gegeben war.

5. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass auch mit dem besten Vorhersagemodell Abflussereignisse nicht verhindert werden können, aber es mit großer Genauigkeit möglich ist, die Entwicklung von Abflusswellen vorherzusagen. Im besonderen für eine Kraftwerksgesellschaft sind brauchbare Vorhersageberechnungen von großem Interesse, um neben einem geordneten Kraftwerksbetrieb auch die Einhaltung aller Behördenvorschriften sicherzustellen. Das an der Drau im Einsatz befindliche Vorhersagemodell läuft nun seit mehr als 10 Jahren im Online-Betrieb und hat sich mehrfach als unterstützendes Hilfsmittel für die Betriebsführung bewährt.

6. Literaturverzeichnis

Blöschl, G. (1988) Schneeschmelzmodell für ein Einzugsgebiet großer Höhererstreckung als Baustein eines hydrologischen Vorhersagemodells. Beitrag zur XIV. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen. Kiew.

Gutknecht, D. (1977a) Überlegungen zur Anwendung mathematischer Modelle auf die Abflußvorhersage. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 18, S. 223 - 232.

Gutknecht, D. (1977b) Verbesserung der Abflußvorhersage durch Verwendung prognostizierter Regenwerte. IX. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen. Budapest.

Gutknecht, D. (1978) Methoden der hydrologischen Kurzfristvorhersage. Wiener Mitteilungen „Wasser-Abwasser-Gewässer“, Bd. 16. Wien.

Gutknecht, D. (1987) Gesichtspunkte für die Auswahl der Modelle. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 16. Fortbildungslehrgang Hydrologie. Wasserstands- und Abflußvorhersage, Wennigsen/Deister. Bonn.

Gutknecht, D., W. Kugi und F. Nobilis (1997) Flood forecasting model for the alpine drainage basin of the River Drau in Austria, *Destructive Water: Water-Caused Natural*

Disasters – Their Abatement and Control (Proceedings of the Conference held at Anaheim, California, June 1996). IAHS Publikation no. 239.

Gutknecht, D. (1991) On the development of „applicable“ models for flood forecasting. In: Hydrology for the Water Management of Large River Basins (ed. by F. H. M. van de Ven, D. Gutknecht, D. P. Loucks & K. A. Salewicz), (Proc. Vienna Symp., August 1991), 337 - 345. IAHS Publ. no. 201.

Gutknecht, D. (1994) HYFORS - Ein hydrologisches Vorhersage- und Simulationsmodell für Flußgebiete. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ) 139 (9), 386 - 392.

Kirnbauer, R. (1987) Datenkontrolle und Vorhersageverbesserung bei operationellen Vorhersagen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 16. Fortbildungslehrgang Hydrologie. Wasserstands- und Abflußvorhersage, Wennigsen/Deister. Bonn.

Kirnbauer, R. (1988) Ein Ansatz zur Berechnung der Abflußbildung in hydrologischen Vorhersagemodellen. Beitrag zur XIV. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen. Kiew.

Kugi, W. (1988) Entwicklung und Einsatz eines hydrologischen Vorhersagemodells aus der Sicht des Modellanwenders. Beitrag zur XIV. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen. Kiew.

Kugi, W. (1990) Erfahrungsbericht über den Einsatz des Zuflußvorhersagemodells an der Drau anhand praktischer Beispiele des Jahres 1989, Beitrag zur XV. Donauländer-Konferenz, in Warna.

Kugi, W. (1992) Entwicklung und Betrieb eines Echtzeitvorhersagemodells an den Flüssen Drau und Gail in Kärnten, Interprevent in Bern.

Schnatter, S., D. Gutknecht und R. Kirnbauer (1986) A Bayesian Approach to Estimating the parameters of a Hydrological Forecasting System. International Symposium on Probability and Bayesian Statistics. Innsbruck, September 1986. Plenum press New York.

Schnatter, S. (1987) Ein Bayes'sches Verfahren zur Zustandsgrößen- und Parameterschätzung in dynamischen wasserwirtschaftlichen Systemen. DVWK, 3. Wissenschaftliche Tagung Hydrologie und Wasserwirtschaft, „Planung und Betrieb wasserwirtschaftlicher Systeme“ 19. - 20. März 1987 Ruhr-Universität Bochum.

Schnatter, S. (1988) Dynamische Bayes'sche Methoden zur Zustandsgrößen- und Parameterschätzung für hydrologische Vorhersagemodelle. Beitrag zur XIV. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen, Kiew 1988.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Wilhelm Kugi
Austrian Hydro Power, Außenstelle Villach
Badstubenweg 40
9500 VILLACH
E-Mail: Wilhelm.Kugi@verbund.at
Tel. +43 4242 / 5011 - 33733

HOCHWASSERMANAGEMENT IN SALZBURG

Hans Wiesenegger

1. Hydrologische Kurz-Charakteristik

Das Bundesland Salzburg ist Quellgebiet einiger bedeutender österreichischer Flüsse wie zum Beispiel Enns, Mur und Salzach. Nahezu 75 % der Landesfläche entwässern zur Salzach, 13 % fließen zur Mur, 6 % zur Enns, 4 % zur Traun, 2% zum Inn nach Tirol sowie ca. 2 km² aus dem Lungau zur Drau. Die jährliche Gesamtwasserfracht, die aufgrund der geographischen Gegebenheiten aus Salzburg abfließt, beträgt ca. 11 Milliarden m³. Dies entspricht dem ca. 10 fachen des Gesamthaltendes der großen Salzburger Seen (Zellersee, Fuschlsee, Wallersee, Trumerseen, Wolfgangsee).

Die Salzach ist mit einem Gesamteinzugsgebiet von 6728 km² der größte Fluss Salzburgs. Sie entspringt nördlich von Krimml in 2300 m Höhe am Salzachgeier, fließt im Oberlauf (bis Schwarzach) in einer Längstalfurche in west-östlicher Richtung, schwenkt dann im Mittellauf nach Norden und durchbricht bei den „Salzachöfen“ die Nördlichen Kalkhochalpen. Im Unterlauf durchfließt sie das „Salzburger Becken“, anschließend das Alpenvorland und mündet nach rund 225 km im „Becken von Überacker“ auf einer Seehöhe von 390 m in den Inn.

Hydrologisch gesehen zählt die Salzach zu den Gebirgsflüssen mit Gletschereinfluss. Die zahlreichen Zuflüsse aus den Hohen Tauern, „Tauernachen“ genannt, deren Teileinzugsgebiete durchwegs bis in die Gletscherregion des Alpenhauptkammes reichen, prägen sie maßgeblich. Mehrere hochalpine Speicherkraftwerke an den Tauernachen und Laufkraftwerke im Mittel- und Unterlauf beeinflussen den natürlichen Abfluss im Jahresverlauf.

Aufgrund der geographischen Gegebenheiten, der unterschiedlichen Wetterlagen und Überregnung des Einzugsgebietes sind an der Salzach vielfältige Hochwasserentwicklungen möglich. Größere Hochwässer treten vor allem bei Nordweststaulagen und meist im Zeitraum Juli bis September, seltener aber auch im November und Dezember (verbunden mit Schneeschmelze) auf. Nach mehrtägiger (2 – 3 Tage) Überregnung des gesamten Salzacheinzugsgebietes bewirken dann die Tauernachen mit ihren kurzen Reaktionszeiten rasch ansteigende Abflüsse im Oberlauf der Salzach. Lammer, Königseeache, Taugl, Alm, sowie Saalach, mit 1157 km² größter Zubringer der Salzach, liefern im Unterlauf beträchtliche Beiträge zur Hochwasserentwicklung.

In den Sommermonaten Juli und August führen räumlich eng begrenzte Niederschläge (Gewitter) vor allem in den kleinen, meist sehr steilen Einzugsgebieten (Wildbäche) zu Hochwässern.

Die Wasserführung der Salzach aber auch ihrer großen Zubringer schwankt beträchtlich. So beträgt zum Beispiel die Mittelwasserführung (MQ) am Pegel Salzburg (Einzugsgebiet 4426 km²) rund 178 m³/s, das Verhältnis MQ zu Hochwasser HHQ (Reihe 1951 bis 1996) liegt bei 1:12, jenes von Niederwasser NNQ zu HHQ im gleichen Zeitraum bei 1:168.

2. Historische Entwicklung

Die Salzach stand seit jeher in einem Spannungsfeld zwischen ihrer Bedeutung als wichtige Lebensader und der ständigen Bedrohung, die von ihr für den Siedlungsraum der Menschen, die an ihren Ufern wohnten, ausging. Die frühere Residenz- und nunmehrige Landeshauptstadt Salzburg wurde immer wieder von mehr oder minder großen Hochwässern heimgesucht. Von derartigen Katastrophen in früheren Jahrhunderten, beispielsweise 964, 1386, 1572, 1661, 1786 und 1899 (Abb. 1) zeugen alte schriftliche Aufzeichnungen („Salzburger Chronica“ und Hübner’s „Beschreibung der hochfürstlich-erzbischöflichen Haupt- und Residenzstadt Salzburg und ihrer Gegenden, verbunden mit ihrer ältesten Geschichte“) sowie zahlreiche, heute noch sichtbare Hochwassermarken an Gebäuden, Brücken oder sonstigen markanten Punkten.



Abb. 1: Hochwasser 14. September 1899, Blick vom Kapuzinerberg auf Salzach und Festung.

Bereits im Jahre 1820 wurden in Oberndorf regelmäßige Beobachtungen von Salzachhochwässern durchgeführt, ab 1850 in der Stadt Salzburg. Immer wiederkehrende Hochwässer erforderten jedoch auch entsprechende Vorbeugemaßnahmen zur Warnung der Bevölkerung, sowie zum Schutz von öffentlichem und privatem Gut.

Bereits 1899, vier Jahre nach Gründung des Hydrographischen Dienstes und unter dem Eindruck des großen Hochwassers von 1897, wurde von der k.k. Landesregierung in Salzburg am 23. Februar ein „*Provisorisches Regulativ für den Hochwasser-*

nachrichtendienst im Herzogthume Salzburg “ eingeführt (Gesetze und Verordnungen für das Herzogthum Salzburg (1899)).

Die rasche Nachrichtenübermittlung war Ende des 19. Jahrhunderts mit großen Problemen verbunden. Der „Staatstelegraph“, das einzige zur Verfügung stehende Kommunikationsmittel, war oft heillos überlastet, sodass die Hochwasserwelle in den flussabwärts gelegenen Orten des öfteren vor der telegraphischen Nachricht eintraf.

In der Landeshauptstadt wusste man sich jedoch mit anderen, durchaus praktikablen Methoden zu helfen um die Nachricht von einem herannahenden Hochwasser rasch zu verbreiten. In der im Jahre 1900 erlassenen „*Vorschrift für die Hilfeleistung bei Hochwassergefahr in der Stadt Salzburg*“ (Abb. 3) ist folgendes nachzulesen (Scheibl 1900): §3 Abs 2 „Kommt die Hochwassergefahr so nahe, dass deren Eintritt etwa binnen zwei Stunden zu gewärtigen ist, so ist dies durch einen Kanonenschuss von der Festung Hohensalzburg und auch durch Hornsignale in Nonnthal, Mülln und Lehen von der Hauptleitung bekannt geben zu lassen.“

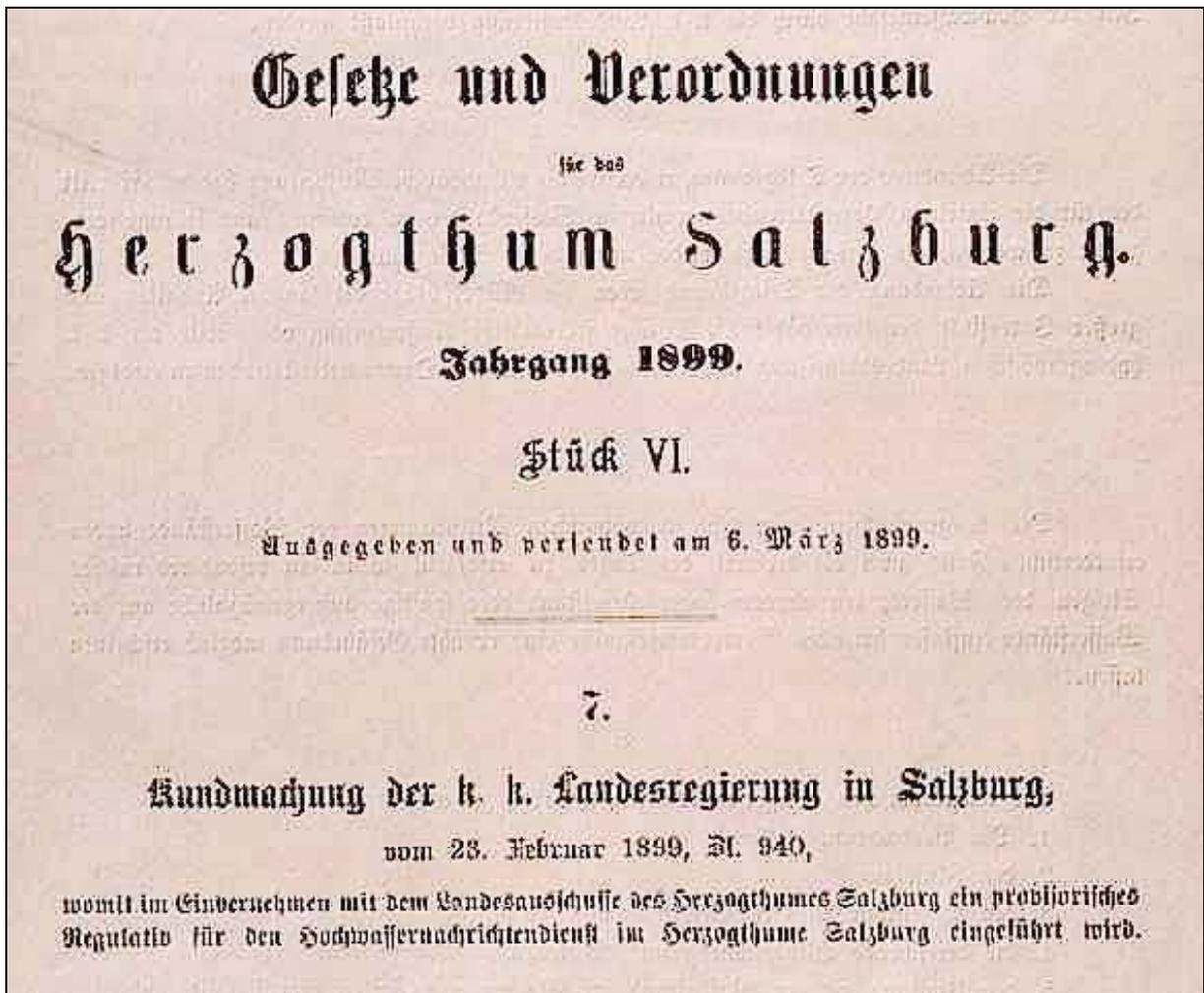


Abb. 2: Provisorisches Regulativ für den Hochwassernachrichtendienst im Herzogthume Salzburg.



Abb. 3 Vorschrift für die Hilfeleistung bei Hochwassergefahr in der Stadt Salzburg.

Als Folge der verheerenden 100 jährlichen Hochwasserkatastrophe des Jahres 1899 erließ die Salzburger Landesregierung im Jahre 1902 eine „*Vorschrift für den Hochwassernachrichtendienst im Einzugsgebiet der Salzach und Saalach*“ (Vorschrift für den Hochwassernachrichten- und Warnungsdienst im Herzogthume Salzburg, 1902). Das in dieser Vorschrift vorgesehene Messnetz berücksichtigte die hydrologischen Eigenheiten des Einzugsgebietes der Salzach schon sehr gut. Im Meldesystem für Hochwassernachrichten wurden auch Unterlieger berücksichtigt und Meldegrenzen für Niederschlag und Wasserstand sowie entsprechende Meldewege festgelegt.

Die Nachrichtenübermittlung erfolgte auf telegraphischem oder telephonischem Weg, für Boten und deren Rekrutierung galten besondere Vorschriften (Vorschrift für den Hochwassernachrichten- und Warnungsdienst im Herzogthume Salzburg (1902)): §10 „In jenen Fällen, in denen die Weiterbeförderung der Hochwassernachrichten durch Boten erfolgt, haben die betreffenden k.k. Behörden oder Gemeinden rechtzeitig geeignete Individuen für die Besorgung dieses Botendienstes ins Auge zu fassen und denselben den mit Rücksicht auf etwa bestehende Inundationen geeignetsten Weg zur Erreichung ihres Zieles vorzuschreiben“.

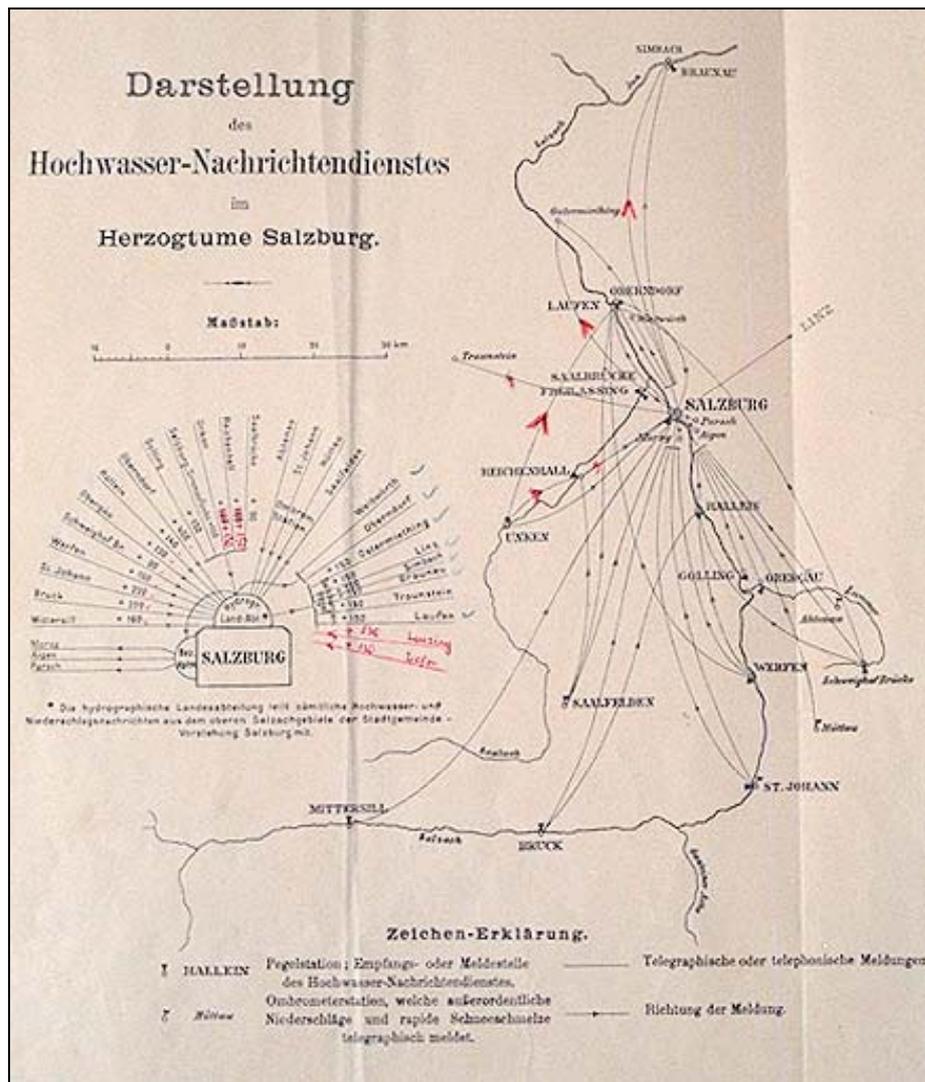


Abb. 4: Vorschrift für den Hochwassernachrichtendienst im Einzugsgebiet der Salzach und Saalach.

Weitere Vorschriften zum Hochwassernachrichtendienst wurden im Jahre 1928 von der Salzburger Landesregierung (Vorschrift für den Hochwassernachrichten- und Warnungsdienst im Bundeslande Salzburg, 1928) erlassen. Dabei dachte man auch schon an die Dokumentation und Erfassung der abgelaufenen Hochwässer: §16 Abs 4 „Sogleich nach Ablauf jeden Hochwassers ist in den überschwemmt gewesenen Gebieten der jeweilig eingetretene Höchstwasserstand möglichst genau zu erheben und diese Höhe an mehreren örtlich getrennten, geeigneten Objekten wie Brücken, Bauten usw. in dauerhafter und leicht auffindbarer Weise unter gleichzeitiger Fixierung des Datums und der Stunde zu markieren.“

Eine wesentliche Rolle im Hochwassernachrichtendienst spielten die Beobachter vor Ort, die bei Überschreiten festgelegter Meldegrenzen für Niederschlag und Wasserstand zu bestimmten festgesetzten Zeiten und bei raschem Anstieg der Hochwasserwelle alle zwei Stunden ihre Werte an die Hydrographische Landesabteilung meldeten. Die gemeldeten Wasserstände wurden per Hand entsprechend graphisch dargestellt und dienten als Basis für die Warnungen der „Unterlieger“.



Abb. 5: Fernübertragener Wasserstandsschreiber.



Abb. 6: Fernübertragene Digitalanzeige.

Später übernahm ein fernübertragener Wasserstandsschreiber (Abb. 5) diese Arbeit und ab 1970 stand eine „moderne Anlage“ mit Fernübertragung und digitaler Wasserstandsübermittlung (Abb. 6) zur Verfügung und leistete gute Dienste bis Ende der Achtzigerjahre.

3. Rechtlicher Rahmen und Aufgabenstellung

Laut § 7 *Hydrographiegesetz* (Bundesgesetzblatt Nr.58 /1979) hat der Landeshauptmann von Salzburg für die Verbreitung von hydrographischen Nachrichten zu sorgen, als dies unter anderem auch für die Abwehr von Gefahren für Leben und Eigentum notwendig ist. Um diesem Auftrag nachkommen zu können, ist die genaue und möglichst weit vorausblickende Kenntnis der Niederschlags- und Abflussentwicklung im Einzugsgebiet der Salzach erforderlich. Diese Aufgabe wird vom Hochwassernachrichten- und Warndienst des Landes Salzburg erledigt. Der Hydrographische Dienst, für die Beobachtung des Wasserkreislaufes im Land Salzburg zuständig, betreibt im Zeitraum Mai bis September sowie November und Dezember einen ständigen Bereitschaftsdienst. Aufgabe dieses Bereitschaftsdienstes ist es, die Gefahr eines drohenden Hochwassers möglichst früh zu erkennen, rechtzeitig Katastrophenhilfsdienste und Betroffene nach vorgegebenem Alarmplan zu informieren, um damit Schäden durch Hochwässer zu vermeiden oder zumindest zu vermindern.

Im Einzugsgebiet der Salzach befinden sich aber auch einige Laufkraftwerke. Diese Kraftwerke müssen laut Wehrbetriebsordnung aufgrund wasserrechtlicher Bescheidauflagen so gesteuert werden, dass keine Verschärfung des Hochwasserabflusses unterhalb der Kraftwerke hervorgerufen wird. Die Wasserspiegel in den Stauräumen müssen daher rechtzeitig vor Erreichen der Abflussspitze entsprechend abgesenkt werden.

4. Hydrologisches Informationssystem (HYDRIS)

Über Jahrzehnte hinweg wurde der Hochwassernachrichtendienst hauptsächlich aufgrund von Erfahrungswerten aus abgelaufenen Hochwässern unter Einbeziehung der Beobachter vor Ort durchgeführt. Veränderungen im Abflussregime der Salzach, welche die bisherigen Erfahrungswerte in Frage stellten, höhere Ansprüche an den Hochwassernachrichtendienst sowie Sachverständigenvorschreibungen im wasserrechtlichen Bewilligungsverfahren für die Kraftwerkskette „Mittlere Salzach“ erforderten die Verwendung neuer Methoden und führten zur Entwicklung und Einführung des *Hydrologischen Informationssystems* HYDRIS (Wiesenegger, 1997; Wiesenegger und Kirchlechner, 1998). HYDRIS wurde an der Technischen Universität Wien Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft als Flussgebietsmodell (Gutknecht, 1994) mit modularem Aufbau entwickelt und für die Praxis als Echtzeit-Vorhersagemodell auf Ereignis- und Flussgebietsbasis (Abb. 8) konzipiert.

Die Abflussvorgänge im Einzugsgebiet wurden durch Bausteine in Form von Niederschlag / Abfluss-, Wellenablauf- und Überlagerungsmodellen nachgebildet, die je nach vorliegender Charakteristik des Flussgebietes und vorliegender Messstellenstruktur zusammengesetzt werden können.

Die Verbund-Tochter Drauconsult, die ein ähnliches Modell bereits mit Erfolg (Kugi, 1990; Schnatter, 1988) verwendet, führte unter Einbeziehung der Erfahrung der künftigen Anwender (HD, TKW und SAFE) die Anpassung an das Einzugsgebiet der

Salzach und Saalach durch (Bachhiesl, 1996). Wesentliche Erweiterung gegenüber dem „Draumodell“ war die Entwicklung eines Modellbausteines zur Nachbildung der behördlich vorgeschriebenen Abstauvorgänge in der Kraftwerkskette „Mittlere Salzach“ (Gutknecht und Sengschmitt, 1995).

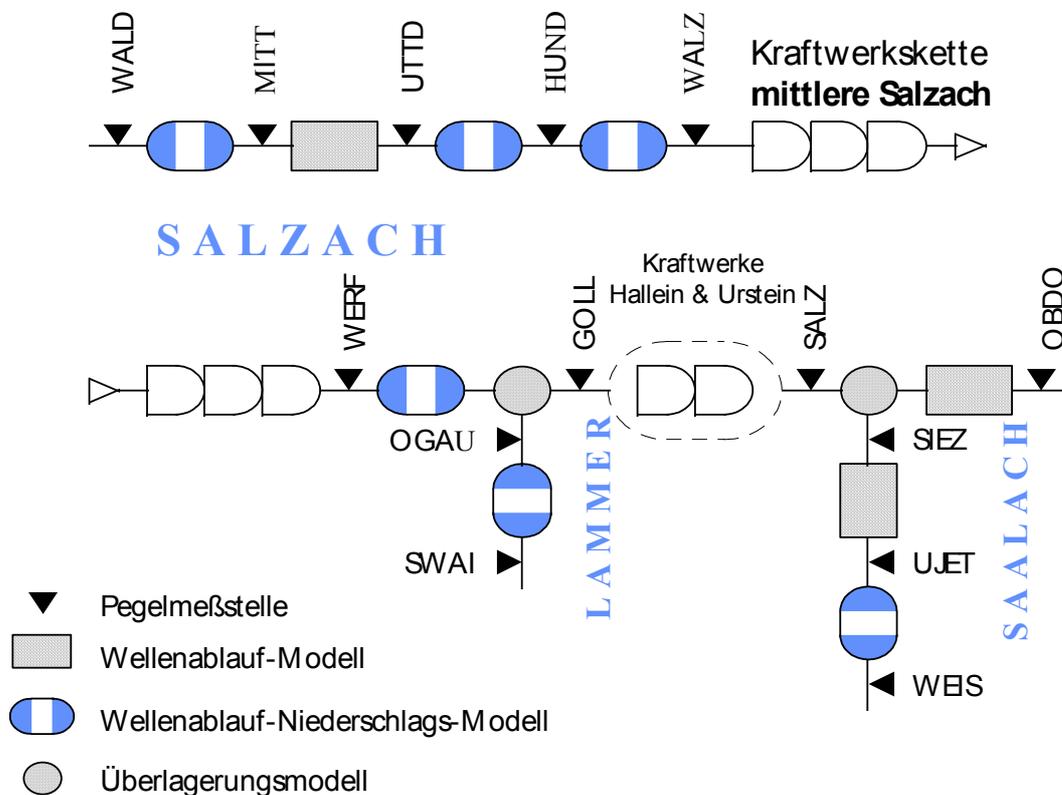


Abb. 7: Schema Flussgebietsmodell.

In das HYDRIS – Messnetz (Abb. 8) wurden aus Kostengründen zahlreiche bestehende meteorologische und hydrologische Messstellen des Hydrographischen Dienstes (HD), der Tauernkraft (TKW), nunmehr Austrian Hydro Power (AHP) und der Salzburger AG für Energiewirtschaft (SAFE), nunmehr Salzburg AG, eingebunden. Messwerte anderer Betreiber (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG, Wasserwirtschaftsamt Traunstein) wurden ebenso mitverwendet.

In der I. Ausbaustufe werden aktuelle Messwerte von 24 hydrometeorologischen Stationen, 15 Durchflussmessstellen und 12 Kraftwerken im 15 min Zyklus aus dem gesamten Salzacheinzugsgebiet über Fernwirk- bzw. Funkeinrichtungen zu einem zentralen Hydrologieserver übertragen, auf Plausibilität geprüft und in einer Datenbank abgelegt. Dort stehen sie als Eingangsgrößen für das Hochwasservorhersagemodell sowie zur aktuellen hydrologischen Beurteilung und weiteren Auswertungen mehreren Anwendern zur Verfügung.

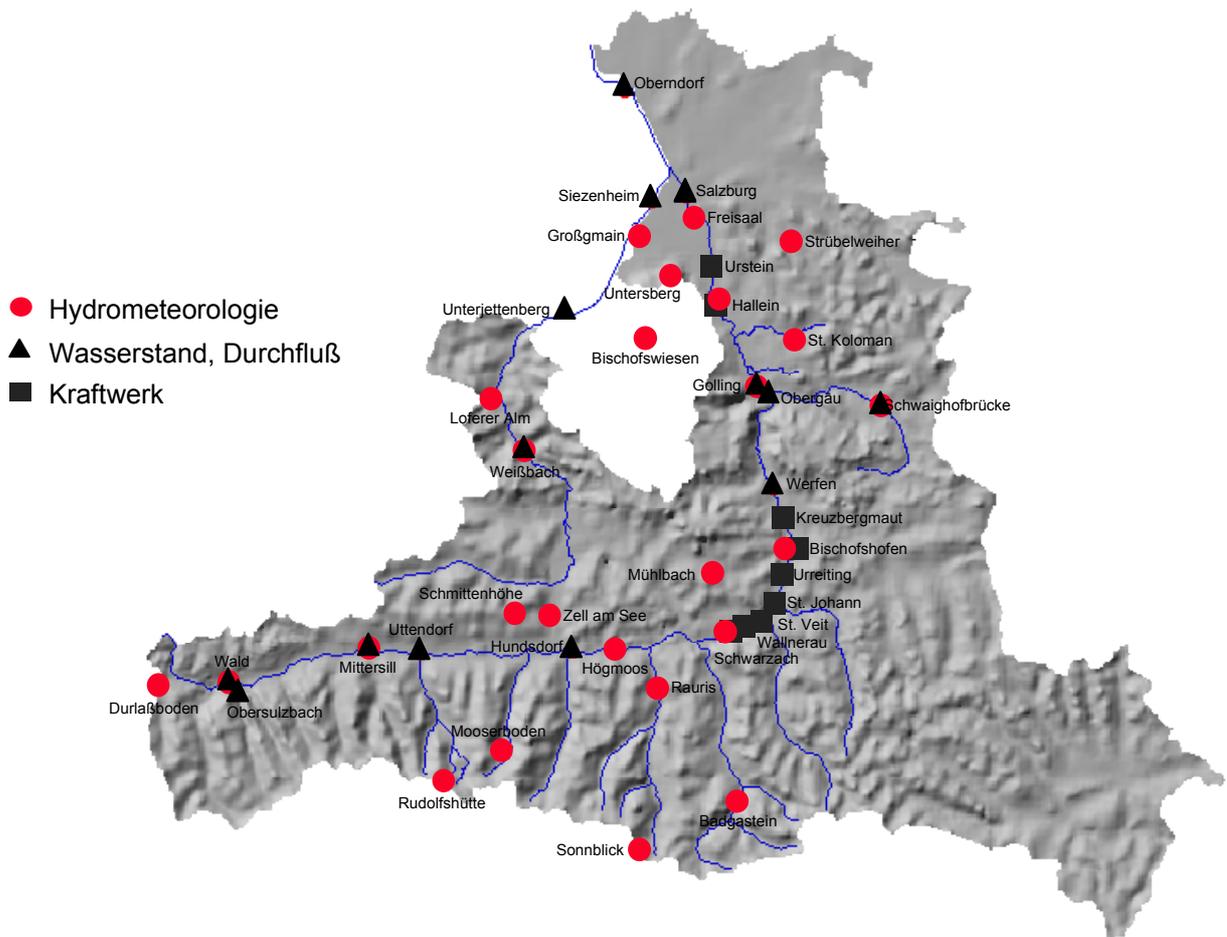


Abb. 8: HYDRIS Messnetz I. Ausbaustufe.

HYDRIS ist seit Frühjahr 1997 im Online-Betrieb und auf mehreren Arbeitsplätzen bei HD, TKW und SAFE installiert. Hochwässer (ab ca. HQ1) an der Salzach und an den Zubringern Lammer und Saalach sollen mit HYDRIS entsprechend berechnet und vorhergesagt werden und Hochwassermanagement im Rahmen der gegebenen Möglichkeiten betrieben werden.

Die Gesamtkosten (Modellentwicklung, Errichtung und Adaptierung von Messstellen, Messwertübertragung, Hardware) betragen für die I. Ausbaustufe 21 Mio ATS (1,53 Mio €, ohne Personalaufwand von HD, TKW und SAFE). Für die II. Ausbaustufe, die vor allem deutliche Verbesserungen der Langzeitvorhersage durch Verwendung von Niederschlagsprognosen bringen soll, sind 8 Mio ATS (0,58 Mio €) vorgesehen. Die Projektkosten wurden ebenso wie die Kosten für Instandsetzung, Instandhaltung und laufender Betrieb zu je einem Drittel von den drei Vertragspartnern, Hydrographischer Dienst (HD), Salzburger AG für Energiewirtschaft (SAFE) und Tauernkraft (TKW) bzw. ihren Rechtsnachfolgern, getragen.

5. Praktisches Hochwassermanagement

5.1 Hochwassermanagement für den Bereich der Kraftwerkskette „Mittlere Salzach“

Im Selbstverständnis der Kraftwerksbetreiber soll gezieltes Hochwassermanagement, das im Spannungsfeld zwischen Nutz- und Schutzansprüchen des Menschen, Schutz der Kraftwerksanlagen und Aufrechterhaltung des Anlagenbetriebes steht, die möglichst schadlose Abfuhr von Hochwässern gewährleisten. Dies kann einerseits durch bauliche Maßnahmen, andererseits durch betriebliche Vorkehrungen erzielt werden.

Die Umsetzung der baulichen Konzepte bringt weitest gehenden Schutz für Siedlungsbereiche und landwirtschaftliche Nutzflächen entlang der Rückstauräume und Flussbereiche unterhalb der Wehranlagen. Die Uferverbauten wirken dabei auch bei großen Hochwässern als regionaler Hochwasserschutz.

Ziel des betrieblichen Hochwassermanagements an der „Mittleren Salzach“ ist es, in Übereinstimmung mit der behördlich vorgeschriebenen Abstauregelung Stauräume rechtzeitig abzusenken, damit keine Verschärfung des Hochwassers (durch etwaige ungünstige Überlagerungen) flussab der Kraftwerkskette eintreten kann.

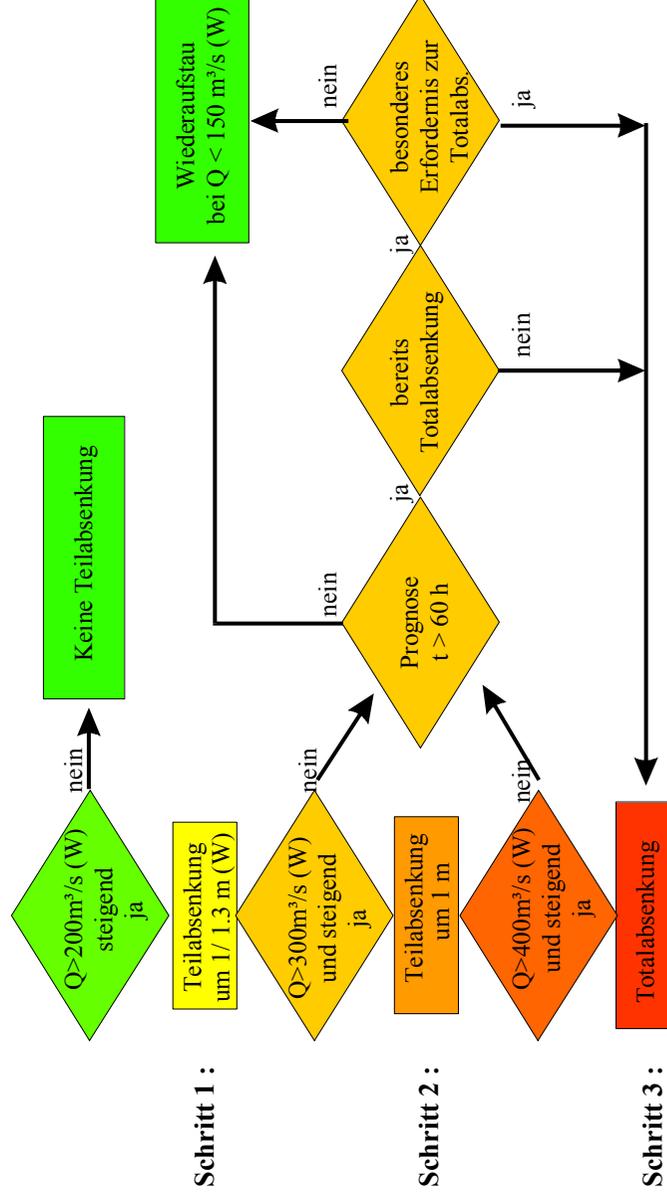


Abb. 9: Ablaufschema Koordinierte Staulegung Mittlere Salzach.

Zur optimalen Steuerung der Kraftwerkskette im Hochwasserfall ist daher die Kenntnis des zu erwartenden Zuflusses flussauf der Kraftwerkskette sowie die Kenntnis der Abflussentwicklung im Unterlauf und an den großen Zubringern erforderlich.

Mit Beginn der Schneeschmelze im Oberlauf der Salzach wird besonderes Augenmerk auf die Abflussentwicklung gelegt. Der diensthabende Mitarbeiter im sogenannten „Lastverteiler Kaprun“, der rund um die Uhr besetzt ist, beobachtet und kontrolliert laufend die Durchflusswerte der Salzachpegel. Die verantwortlichen Hydrologen von HD und TKW sind regelmäßig in Kontakt und erstellen mit HYDRIS laufend Prognosen für den maßgeblichen Pegel Wallnerau / Salzach am Beginn der Kraftwerkskette Mittlere Salzach. Bei Überschreiten eines bestimmten Grenzwertes und anderer definierter Bedingungen (Abb. 9) erfolgt einvernehmlich (Hydrographischer Dienst, Lastverteiler SAFE und Werksgruppenleitung TKW) die Festlegung des Abstaubeginns der Kraftwerkskette „Mittlere Salzach“ in mehreren Schritten. Die Zentralwarte in Kaprun sowie die Hochwasserkoordinatoren von SAFE und TKW werden davon informiert und der Beginn des Abstauvorganges in HYDRIS eingegeben.

HYDRIS berücksichtigt dabei diese zusätzlich abgegebenen Wassermengen bei den Vorhersagenpegeln flussab der Kraftwerkskette durch Verwendung des eigens entwickelten Kraftwerkmoduls. Zum Schutz der Unterlieger wurde dabei die zusätzliche Abgabe aus den Speicherräumen, die durch das Abstauen der Kraftwerkskette verursacht wird, auf maximal 100 m³/s begrenzt.

5.2 Hochwassermanagement im Bereich der Stadt Salzburg

Die Salzach ufert im Stadtgebiet von Salzburg in kleineren Teilbereichen bereits ab einem 30 jährlichen Hochwasser HQ₃₀ aus. Ab einem 60 jährlichen Ereignis HQ₆₀, vergleichbar mit dem Hochwasser 1959, bei dem auch die Autobahnbrücke in Salzburg einstürzte, kommt es zu größeren Überflutungen und bei HQ₁₀₀ (vergleichbar mit dem Ereignis 1899) sind weite Bereiche der Stadt (Lehen, Lieferung, Elisabeth-Vorstadt und Itzling sowie Kleingmain, Nonntal, Josefiaw und Aigen) vom Hochwasser betroffen, wie die Ergebnisse einer detaillierten hydraulischen Untersuchung zeigten. Neben Häusern und anderen Objekten werden auch Verkehrswege (Radwege, Strassen) entlang der Salzach und ältere Fußgängerbrücken über die Salzach bei Hochwasser stark beeinträchtigt und müssen daher rechtzeitig gesperrt werden.

Die rechtzeitige Alarmierung der erforderlichen Einsatzkräfte, Bereitschaftsdienste sowie der unmittelbar betroffenen Bevölkerung ist daher wesentlicher Teil des Hochwassermanagements im Bereich der Stadt Salzburg. Im Zeitraum Anfang Mai bis September bzw. Ende November bis Dezember ist beim Hydrographischen Dienst des Landes Salzburg ein Bereitschaftsdienst zur ständigen Beobachtung der Hochwassersituation eingerichtet, der engen Kontakt mit den Kollegen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) zur Beobachtung der Wetterentwicklung hält. Die Hochwasserwarnzentrale wird bei Erreichen bestimmter Grenzwerte, die unter dem jährlichen Hochwasser (HQ₁) liegen, dauernd, d.h. rund um die Uhr, mit 2 Mann besetzt und liefert Informationen über die zu erwartende Hochwasserentwicklung an die Kollegen des Katastrophenschutzes, die ihrerseits die Einsatzkräfte

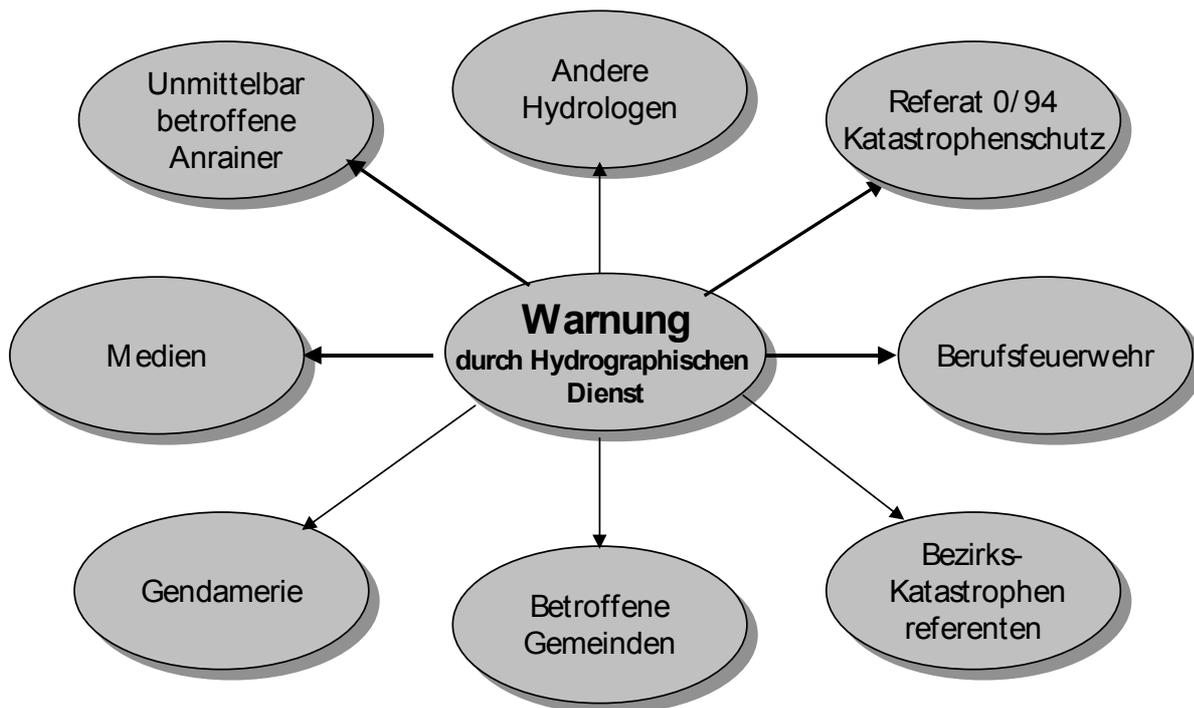


Abb. 10: Schema Informationsfluss Hochwasserwarnung.

(Berufsfeuerwehr, Gendamerie etc.) koordinieren. Unmittelbar gefährdete Personen, die im Alarmplan des Hydrographischen Dienstes aufgelistet sind, werden direkt informiert.

Unter Verwendung der Information aus HYDRIS werden laufend Vorhersagen über die Hochwasserentwicklung und den zu erwartenden Wasserstand der Salzach und ihrer Zubringer in den nächsten 3 – 4 Stunden erstellt. Diese dienen als Entscheidungsgrundlagen der verantwortlichen Katastrophenschutzreferenten zur Einleitung von Maßnahmen und Vorkehrungen im Bereich der Stadt Salzburg. Beispielhaft sind nachfolgend einige Maßnahmen im Rahmen des Hochwassermanagements genannt:

- Rechtzeitige Warnung und Entwarnung von Einsatzkräften (Berufsfeuerwehr, Katastrophenschutz, Magistrat Salzburg)
- Sperre von gefährdeten Brücken und überfluteten Fußgängerunterführungen
- Sperre von Radwegen und Abbau von Abflussbehinderungen (Geländer)
- Rechtzeitiges Schließen („Abschiebern“) von Regenüberläufen des Kanalsystems um den Eintrag von Sand und Schwebstoffen in die Zentralkläranlage von Salzburg zu vermeiden
- Aufbringen von Sandsäcken und anderen Maßnahmen zum mobilen Hochwasserschutz entlang von gefährdeten Uferbereichen
- Räumen von Kellern und Lagerräumen gefährdeter Objekte im Nahbereich der Salzach
- Rechtzeitige Warnung und Evakuierung unmittelbar Betroffener
- Maßnahmen zum Schutz von privatem und öffentlichem Eigentum

6. Literatur

Bachhiesl, M. (1996) Entwicklung eines Hochwasservorhersagemodells für das Einzugsgebiet der Salzach. Beitrag XVIII Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen, Graz.

Gesetze und Verordnungen für das Herzogthum Salzburg (1899), Jahrgang 1899 Stück VI. 7. Kundmachung der k.k. Landesregierung in Salzburg vom 23. Februar 1899, Bl. 940 „Provisorisches Regulativ für den Hochwassernachrichtendienst im Herzogthume Salzburg“.

Gutknecht; D. (1994) HYFORS - Ein hydrologisches Vorhersage- und Simulationsmodell für Flussgebiete, Österreichische Ingenieur - und Architekten-Zeitschrift, 139 Jg., Heft 9.

Gutknecht; D. und D. Sengschmitt (1995) Mathematische Modelle offener Gerinne - Wehrbetrieb - Staulegung. Beitrag zum Seminar Konstruktiver Landschaftswasserbau, Band 17, Seiten 135-153, TU Wien.

Kugi; W. (1990) Erfahrungsbericht über den Einsatz des Zuflussvorhersagemodells an der Drau anhand praktischer Beispiele des Jahres 1989. Beitrag XV. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen, Varna.

Schnatter; S. (1988) Dynamische Bayes'sche Modelle und ihre Anwendung zur hydrologischen Kurzfristvorhersage. 180 Seiten. Dissertation TU Wien.

Vorschrift für den Hochwassernachrichten- und Warnungsdienst im Herzogthume Salzburg (1902), K.k. Landesregierung Salzburg.

Vorschrift für den Hochwassernachrichten- und Warnungsdienst im Bundeslande Salzburg (1928), Landesregierung Salzburg, Buch und Kunstdruckerei Funder und Müller, Salzburg.

Wiesenegger; H (1997) Möglichkeiten der Hochwasservorhersage am Beispiel eines Hochwasserprognosemodells für die Salzach. Beitrag zur 2. ÖWAV Tagung Alpine Schutzwasserwirtschaft, Bad Hofgastein.

Wiesenegger; H. und P. Kirchlechner (1998) HYDRIS Hydrologisches Informations System zur Vorhersage von Hochwässern im Land Salzburg. Beitrag XIX. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen, Osijek.

Scheibl; E (1900) Vorschrift für die Hilfe-Leistung bei Hochwassergefahr in der Stadt Salzburg, Hrsg.: Stadtgemeindevorsteherung Salzburg.

Anschrift des Verfassers:

Dipl. Ing. Hans Wiesenegger
Amt der Salzburger Landesregierung
Fachabteilung Wasserwirtschaft
Referat Hydrographischer Dienst
Michael Pacherstraße 36
5020 Salzburg
Tel. +43 1 662 / 8042 – 0
E-Mail: Hans.Wiesenegger@sbg-land.gv.at

HYDROLOGISCHE PROGNOSEN IN NIEDERÖSTERREICH

Erich David-Labor und Maximilian Heilig

1. Allgemeines

Den Schwerpunkt der hydrologischen Vorhersagetätigkeit in Niederösterreich bildet die Donau. Für die Pegel Ybbs/Donau, Kienstock/Donau, Korneuburg/Donau sowie Willdungsmauer/Donau werden im Hochwasserfall Kurzfristvorhersagen bis zu 12 Stunden erstellt. Zusätzlich erfolgt eine tägliche Wasserstandsvorhersage für die Pegel Kienstock, Korneuburg und Willdungsmauer. Für die großen niederösterreichischen Donauzubringer werden gegenwärtig nur Zwischenvorhersagen berechnet, die als Grundlage für die Vorhersage der Donaupegel dienen. Abb. 1 bietet eine Übersicht über die hydrologische Situation entlang der österreichischen Donaufließstrecke.

Für die Vorhersagen im Hochwasserfall kommt ein aus Niederschlagabflussmodellen und Wellenablaufvorhersagemodellen kombiniertes Modell zum Einsatz. Der ursprüngliche Kern dieses Modells bildet ein auf statistischen Verfahren beruhendes lineares Mehrkaskadenmodell, welches von der TU Wien unter Leitung von Prof. Kresser und Prof. Gutknecht entwickelt wurde. Ende der achtziger Jahre erwies sich infolge von Änderung der Durchflussverhältnisse entlang der Donau infolge des Ausbaues der Kraftwerkskette sowie aufgrund einer deutlich verbesserten Datenverfügbarkeit (automatische Fernübertragung zusätzlicher Pegel und insbesondere Niederschlagsstationen) und der steigenden Rechnerkapazität eine Überarbeitung und Erweiterung des Modells für notwendig. Im Auftrag der niederösterreichischen Landesregierung erfolgte daher von Dr. Heilig eine Überarbeitung, Ergänzung und Neukalibrierung des bestehenden Wellenablaufmodells sowie die Entwicklung von Niederschlagabflussmodellen für die niederösterreichischen Hauptzubringer Enns, Ybbs, Erlauf und Traisen. Die Erfahrungen bei den großen Hochwässern in den neunziger Jahren, deren Schwergewicht wiederholt im niederösterreichischen Donau-einzugsgebiet lag, erforderte weitere Ergänzungen des Vorhersagemodells um zusätzliche Pegel (Opponitz und Erlaufboden sowie weitere Niederschlagsstationen). Für die Erstellung von abgesicherten Vorhersagen über 6 Stunden hinaus (z.B. Anfordernis für mobile Hochwasserschutzanlagen Krems) zeigte sich, dass für Aschach/Donau, Wels/Traun und Steyr/Enns die bestehenden Vorhersagemodelle des HD Oberösterreich zu adaptieren und in die operationelle Vorhersage einzubauen waren. Insbesondere war dies erforderlich, da im niederösterreichischen Raum im Gegensatz zu Oberösterreich Vorhersagen bei wesentlich geringeren Durchflüssen der Donau erstellt werden. Diese Adaptionen sind für die Zwischenvorhersage von Aschach bereits ab 1998 im Einsatz, die Modellerweiterungen für die Traun und die Enns werden ab 2001 im operationellen Betrieb eingesetzt.

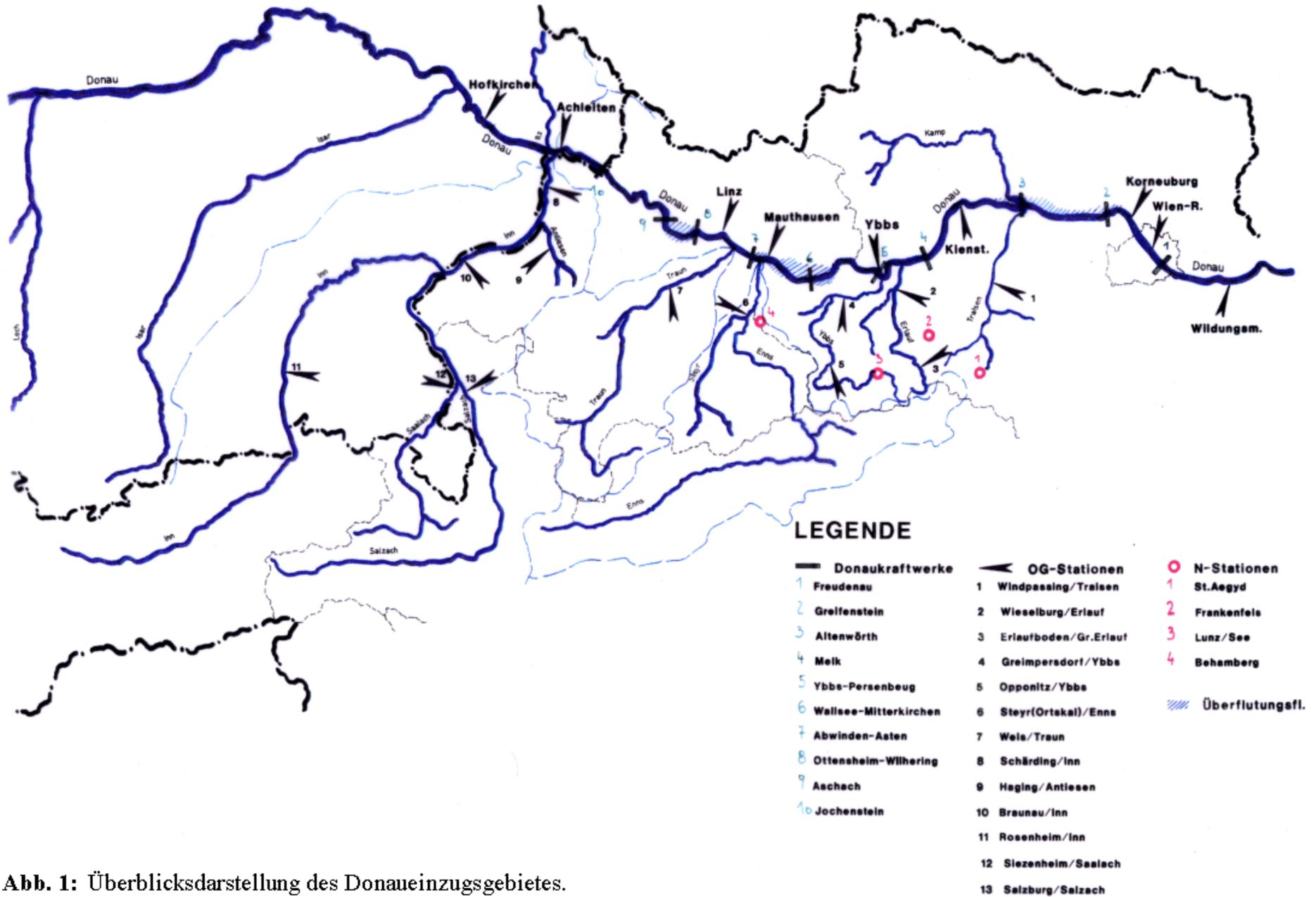


Abb. 1: Überblicksdarstellung des Donaueinzugsgebietes.

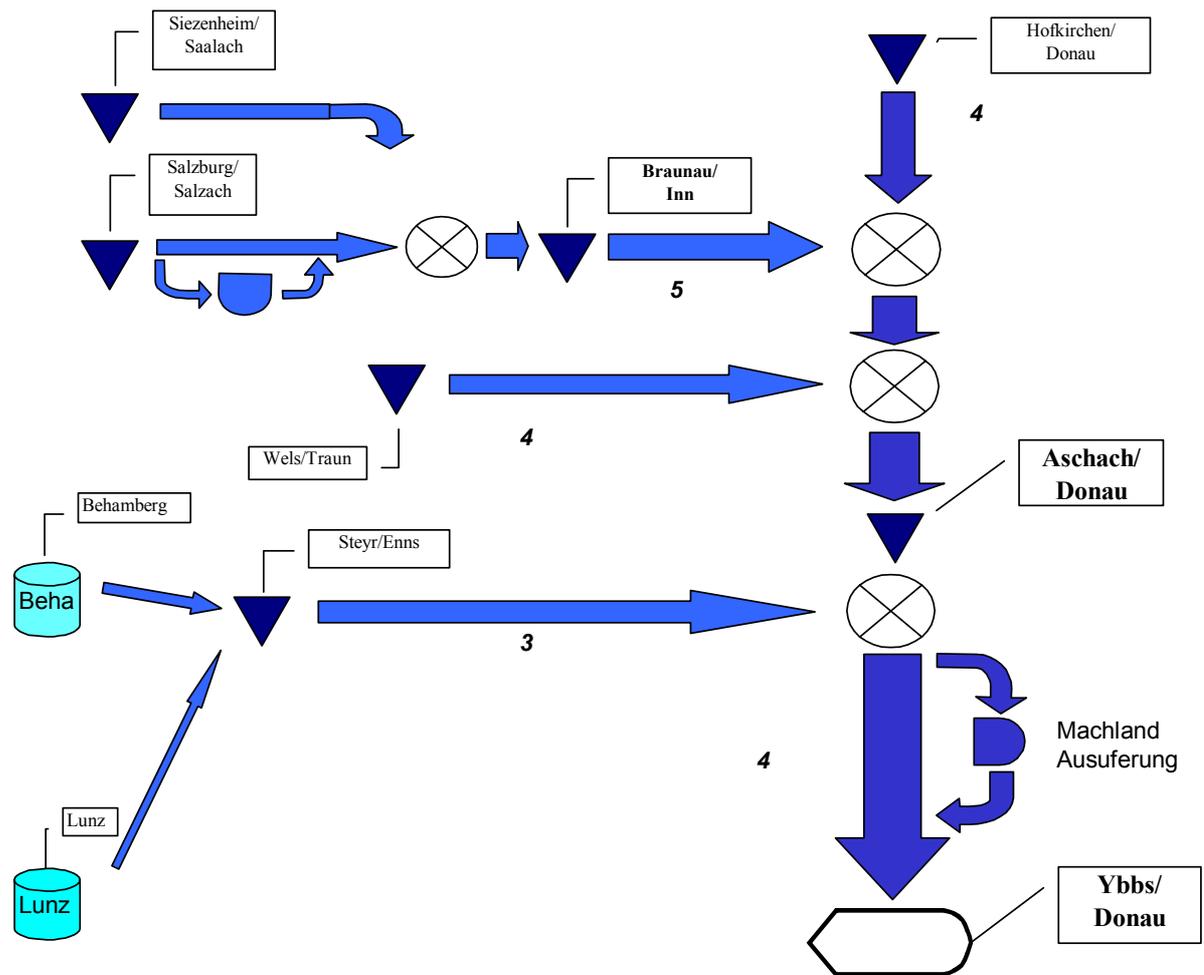


Abb. 2: Flussgebietsmodell Donauhochwasservorhersage (Stand 1998).

Das Modell besteht aus Submodellen für die Einzugsgebiete der Donau die aus einer Kombination von Niederschlagsmodellen und Wellenablaufmodellen bestehen sowie einem Vorhersagemodell für die Donaupegel Ybbs, Kienstock, Korneuburg und Wildungsmauer. Diese Modelle beruhen auf Wellenablaufmodellen bzw. einem Wasserstandsrelationenmodell für den Pegel Wildungsmauer.

2. Niederschlagabflussvorhersage

Die Ergebnisse der Niederschlagabflussvorhersagen dienen als Zwischen- bzw. Eingangsvorhersagen für die Wellenablaufmodelle. Es werden Niederschlagabflussvorhersagen für die Einzugsgebiete laut Tab. 1 berechnet.

Bei den Zwischeneinzugsgebieten kommen WANA Modelle, das sind kombinierte Niederschlagabfluss- und Wellenablaufmodelle zum Einsatz. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt erfolgte die Vorhersage für Steyr/Enns mit einem NA Modell, dessen Ergebnisse mit den Vorhersagen des HD Oberösterreich und der Ennskraftwerke abgeglichen werden.

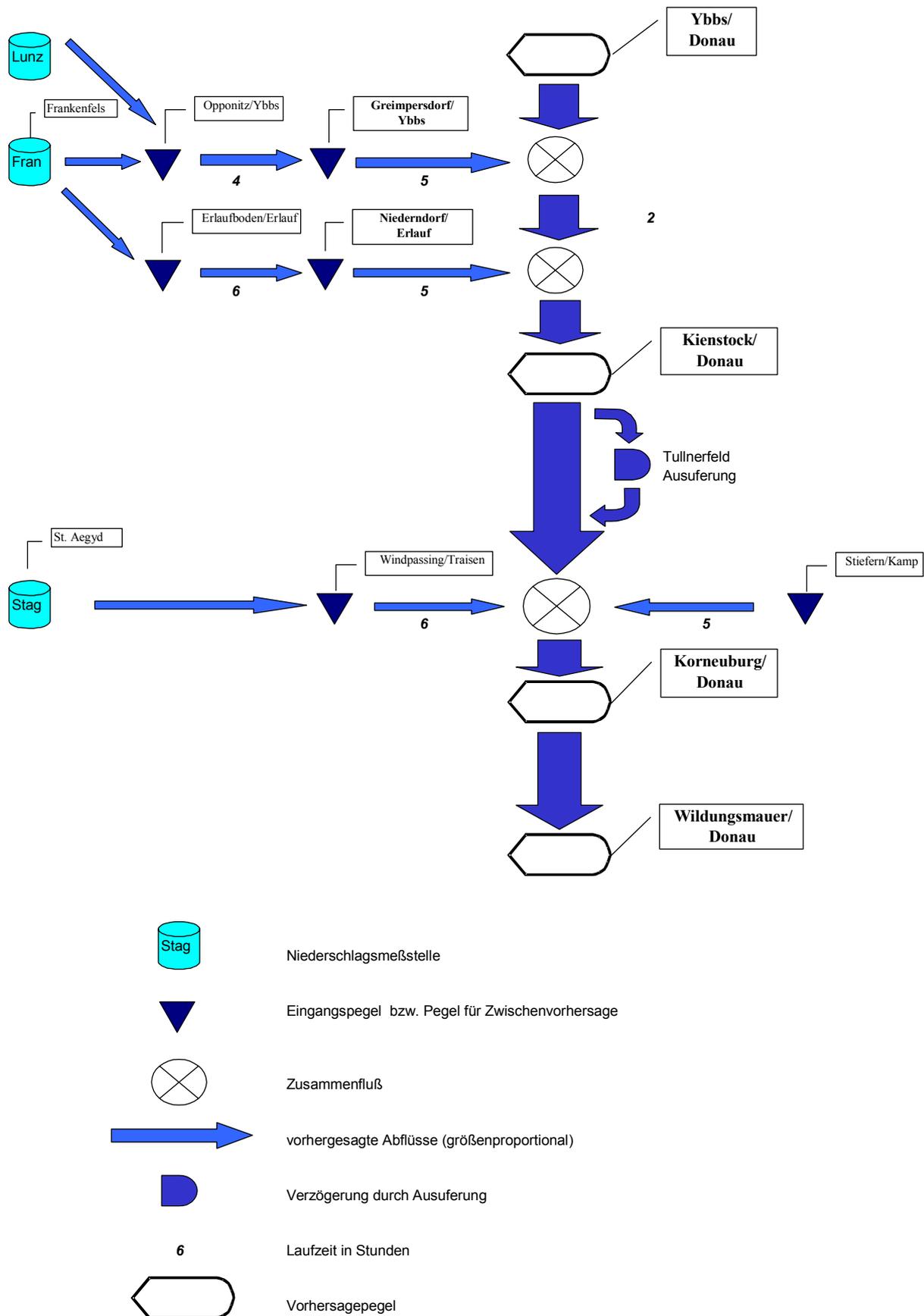


Abb. 3: Flussgebietsmodell Ybbs – Wildungsmauer.

Tab. 1: Einzugsgebiete mit NA-Vorhersagen.

	Fläche (km ²)	
Enns/Steyr	5915,4	(nur bis Jahr 2000)
Ybbs/Greimpersdorf	1116,6	
Erlauf/ Wieselburg	577,5	
Traisen Windpassing	733,3	
Ybbs Opponitz	506,9	
ZEB Ybbs	609,7	
Erlauf Erlaufboden	135,7	
ZEB Erlauf	441,8	

3. Niederschlagsvorhersagemodell

Das Niederschlagsmodell berechnet den Gebietsregen auf der Basis von gegenwärtig 11 Niederschlagsstationen im südlichen Donaeinzugsgebiet mittels Thiessen Polygonen und bietet eine 4 Stunden Vorhersage oder die manuelle Eingabe einer 6 stündigen Vorhersage mit anschließender zeitlicher Aufteilung nach den Niederschlagsverteilungen des DVWK an.

4. Niederschlagabflussmodell

Die Niederschlagabflussmodelle stellen optional die folgenden Verfahren für die Berechnung der Abflussbildung zur Verfügung.

- Horton
- konstanter Abflussbeiwert
- Phi-Index
- dynamischer Abflussbeiwert

Der Startwert der Abflussbeiwertberechnung kann entweder gemäß der Jahreszeit vorgegeben werden (s.u.) oder mittels einer Regressionsfunktion aus den Basisabflüssen abgeschätzt werden. Für die Abflusskonzentration steht das Einheitsganglinienverfahren mit verschiedene, an historischen Hochwässern angepasste Unit Hydrographs, zur Verfügung. Will der Benutzer hier keine eigene Auswahl treffen, so erfolgt eine automatische Vorgabe nach der Jahreszeit oder dem bis zur Vorhersageberechnung gefallenen Niederschlag. Die Abbildungen stellen einen Vergleich der mittleren Vorhersagefehler in % mit und ohne Niederschlag bei zwei Hochwässern dar, deren Ablauf in entlang der niederösterreichischen Donau sehr stark durch die Hochwasserwellen der niederösterreichischen Zubringer geprägt wurde. Die Ergebnisse der Zubringervorhersagen fließen in das Vorhersagemodell für die Donau ein.

5. Die Abflussvorhersage für 12 Zubringer und Donaupegel mittels Wellenablaufmodellen

Die Abflussvorhersage wird für die 12 in Tab. 2 aufgelisteten Pegel an der Donau und ihren Zubringern durchgeführt.

Tab. 2: Vorhersagepegel.

Pegel	Gewässer	Anmerkung
Braunau	Inn	
Aschach	Donau	
Wels	Traun	
Steyr	Enns	(optional NA)
Ybbs	Donau	
Opponitz	Greimpersdorf	(optional NA)
Greimpersdorf	Ybbs	
Wieselburg	Erlauf	
Kienstock	Donau	
Windpassing	Traisen	(optional NA)
Korneuburg	Donau	
Wildungsmauer	Donau	

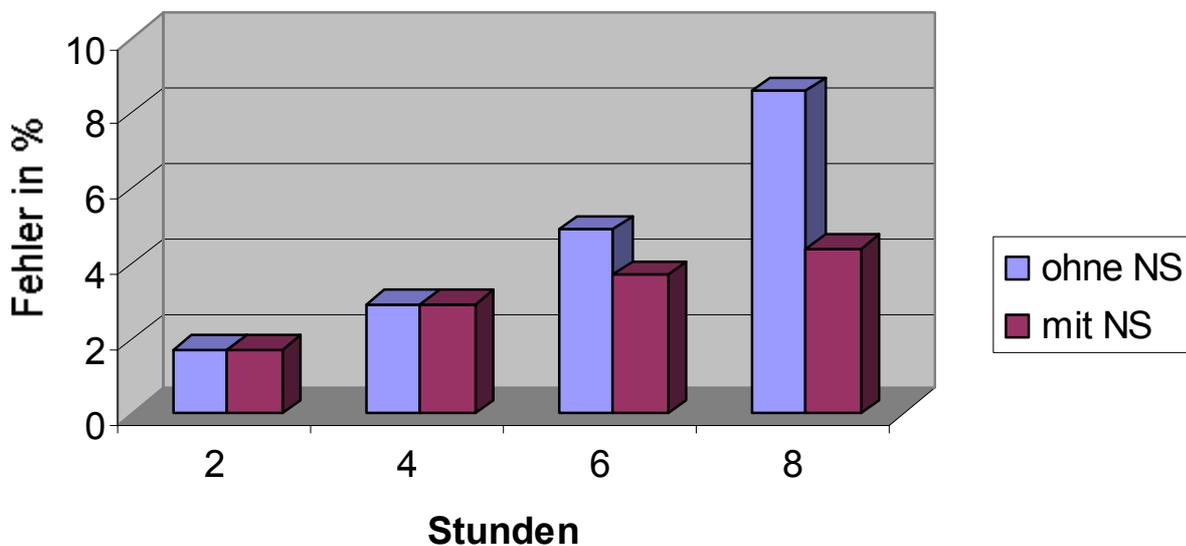
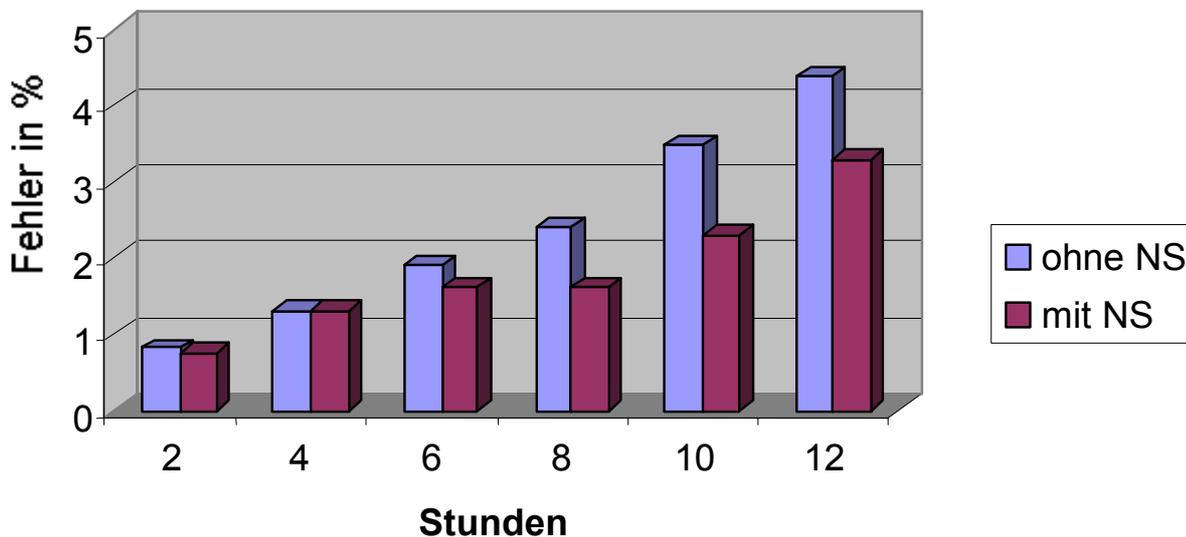


Abb. 4: Vergleich der mittleren Vorhersagefehler in Prozent ohne/mit Niederschlag. oben: Vorhersagevergleich Korneuburg 27.-29.7.1991 unten: Vorhersagevergleich Kienstock 17.-19.5.1991.

Entlang der Fließstrecke der Donau befinden sich einige große Ausuferungsgebiete (Machland, Tullner Au, Klosterneuburger Au) welche die Durchflussverhältnisse in den oberen Bereichen entscheidend beeinflussen. Es kommen daher in Anlehnung an das von der TU Wien entwickelte Modell Mehrkaskadenmodelle zum Einsatz, welche die unterschiedliche Retention bei der Überflutung immer größerer Ausuferungszonen mit unterschiedlichen Parametern berücksichtigen.

Die Laufzeitanalysen erfolgten standardmäßig mit den Kreuzkorrelationsfunktionen. Zur Parameterisierung der Übertragungsfunktionen erwies sich das Verfahren der Ridge Regression der klassischen multiplen Regression bezüglich der Parameterkonsistenz als überlegen.

Für den Pegel Ybbs beträgt der sichere Vorhersagezeitraum etwa 6 Stunden, nach Flutung des Machlandes erhöht er sich auf 10 bis 12 Stunden. Für die Pegel Kienstock und Korneuburg lassen sich bis zu 10 Stunden zuverlässige Vorhersagen erstellen, bei großen Hochwässern mit starken Ausuferungen steigt die hydrologisch abgesicherte Vorhersagefrist auf bis zu 15 Stunden. In ungünstigen Fällen (starker Anstieg, plötzliche Starkregen im nahen Einzugsbereich) können jedoch auch in Kienstock und Korneuburg schon bei den 6 stündigen Vorhersagen unabhängig unwägbarer Kraftwerkseinflüsse Fehler von über 20 cm auftreten.

Generell ist die Vorhersagegenauigkeit am Pegel Kienstock am größten, was mit dem stabilen Pegelprofil und der Entfernung der Kraftwerke zusammenhängt. Die Einbeziehung der Niederschläge und die Erweiterung des Modells um zusätzliche Pegel und Niederschlagsstationen verbesserte insbesondere die über 6 stündigen Vorhersagen.

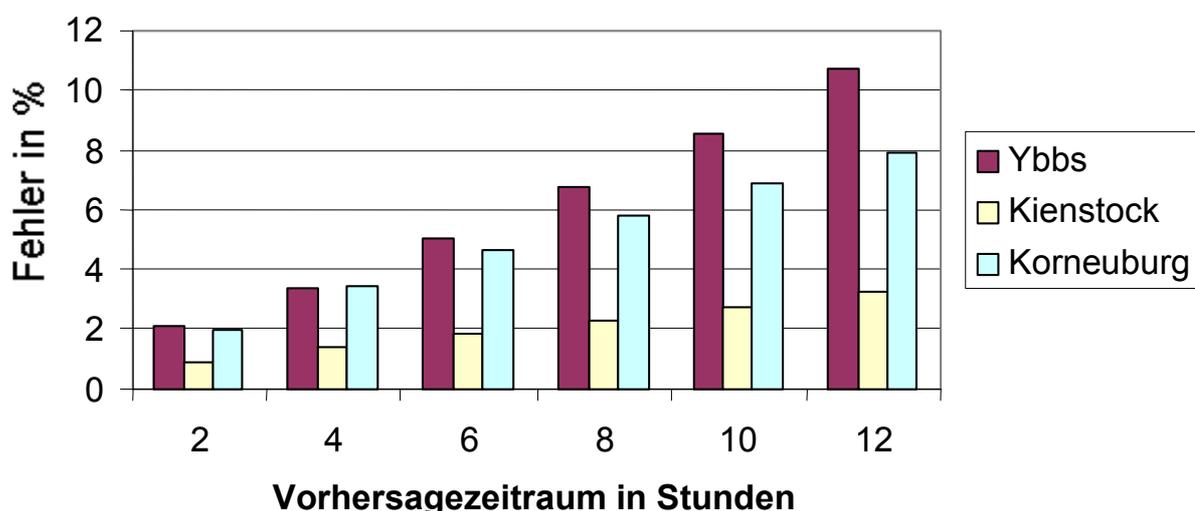


Abb. 5: Mittlerer Vorhersagefehler bei 11 abgelaufenen Hochwässern von 1985 – 2000.

6. Spezielle Probleme bei der Vorhersageerstellung

Als besondere Probleme stellten bei der Erstellung der operationellen Vorhersagen die starken Einflüsse der Kraftwerkskette auf den Wellenablauf heraus. Diese Einflüsse bestehen in Vorabsenkungen und Kappungen der Wellenscheitel (bes. Kraftwerk

Aschach), welche insbesondere im ansteigenden Ast der Welle beziehungsweise bei kleinen Hochwässern zu Vorhersagefehlern führen. Es handelt sich hierbei zumeist um ein Übersteuern des Modells im Anstieg respektive am Scheitel kleiner Hochwasserwellen.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich aus dem Auftreten von kurzfristigen, starken Durchflussschwankungen von bis zu über 500 m³/s und Anstiegen und Abstiegen von bis zu 300m³/s in nur 15 Minuten durch Probleme der Wehrfeldsteuerung bei älteren Kraftwerken. Diese Störungen des Durchflussverlaufes ziehen beträchtliche Vorhersagefehler bis zu 1000m³/s (entspricht ungefähr 1m) bereits bei den Vorhersagen für kurze Vorhersagezeiträume unter 6 Stunden nach sich. Eine teilweise Lösung dieser Problematik konnte darin gefunden werden, die über die natürlichen Abflussschwankungen hinausgehenden Durchflussdifferenzen in eine eigene Kaskade zu legen und damit eine gewisse Dämpfung zu erzielen.

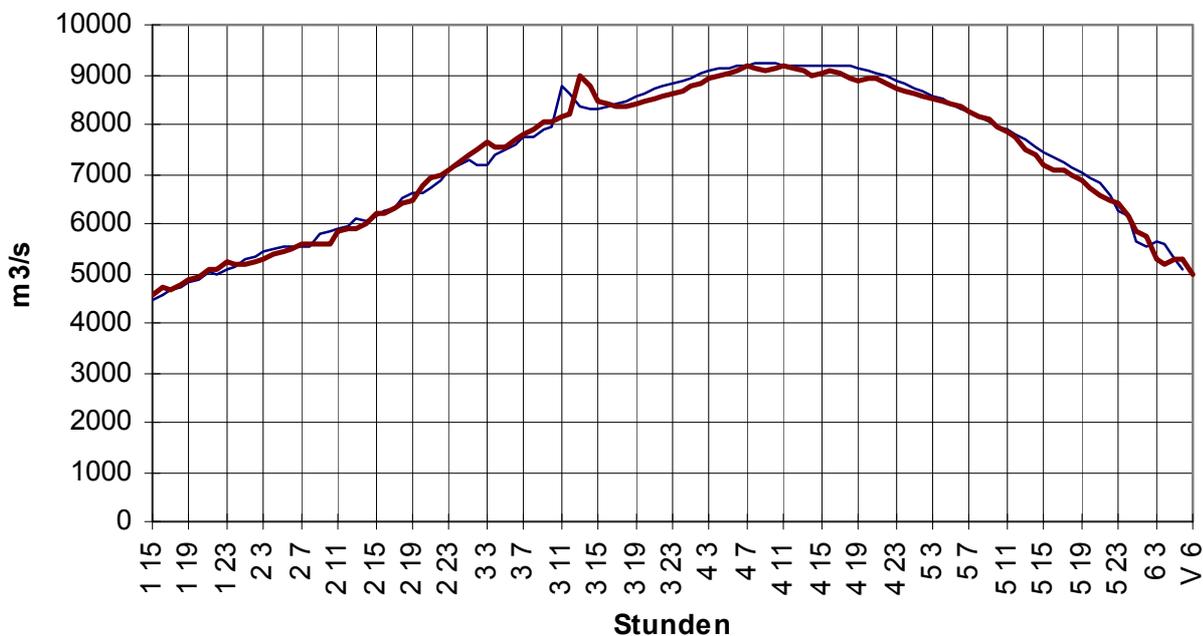


Abb. 6: Durchflüsse und 2 Stunden Vorhersagen am Pegel Ybbs vom 1.8. bis 6.8.1991. Beobachtung: dünne Linie; Vorhersage: dicke Linie. Der Zeitraster in der Abbildung beträgt 4 Stunden.

Niederschläge, die aus dem Nordostsektor kommend, gegen die Laufrichtung ziehen stellen insbesondere wenn sie im Nahbereich der Donau fallen, eine weitere Problemsituation der Vorhersage dar. Im Extremfall (April 1994) können bis zu 1000m³/s aus donaanahen Einzugsgebieten stammen, die einerseits wegen der mangelnden Erfassung mit DFÜ Stationen und andererseits wegen der kurzen Laufzeit der donaanahen Zubringer, den physikalisch abgesicherten Vorhersagezeitraum deutlich herabsetzen. Generell ist die numerische Vorhersage der Niederschläge einer der größten Schwachpunkte der gesamten Hochwasservorhersage, vor allem aber der 24 stündigen Wasserstandsvorhersage. Ein aktuelles Fallbeispiel ist die tägliche Wasserstandsvorhersage vom 28.8.2000, bei der infolge einer falschen Nieder-

schlagsvorhersage (in Westösterreich und Bayern fielen gegen eine Vorhersage von 0mm bis zu 40mm) ein Vorhersagefehler von über 50cm auftrat.

Die Abb. 7 und 8 illustrieren am Beispiel des Hochwassers vom 4. - 8. Juli 1997, wie durch beträchtliche Vorhersagefehler an der Ybbs die Vorhersage von Kienstock beeinträchtigt wird. Es zeigte sich wiederholt, dass in größeren Einzugsgebieten

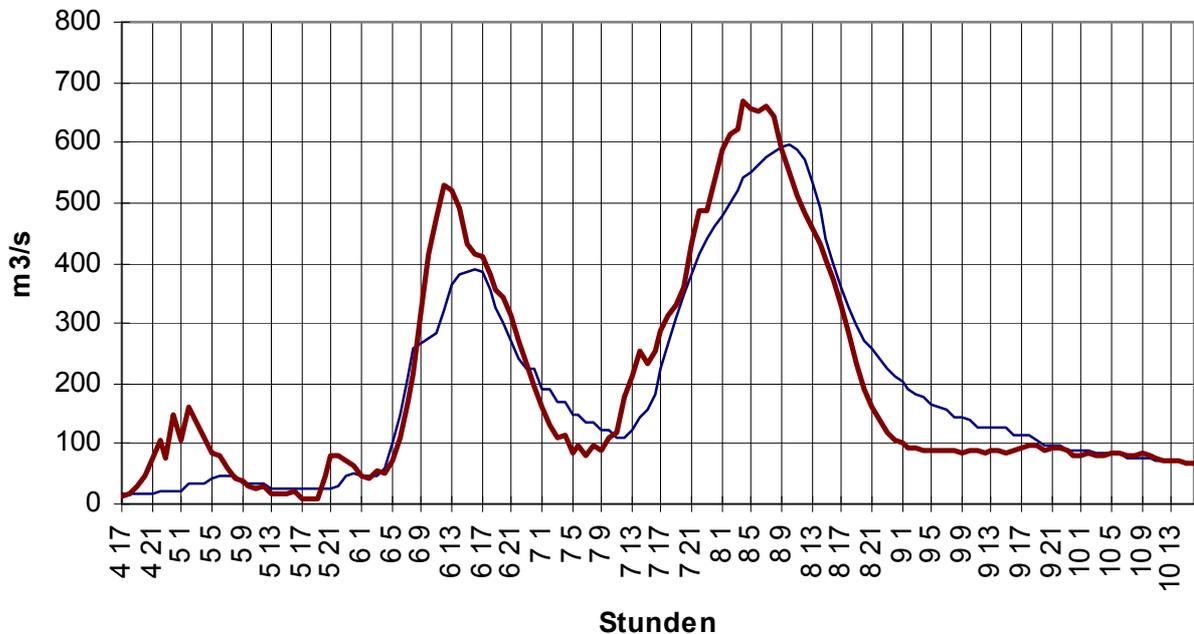


Abb. 7: Durchflüsse und 4 Stunden Vorhersagen am Pegel Amstetten vom 4.7. bis 10.7.1997 (NA-Vorhersage). Beobachtung: dünne Linie; Vorhersage: dicke Linie. Der Zeitraster in der Abbildung beträgt 4 Stunden.

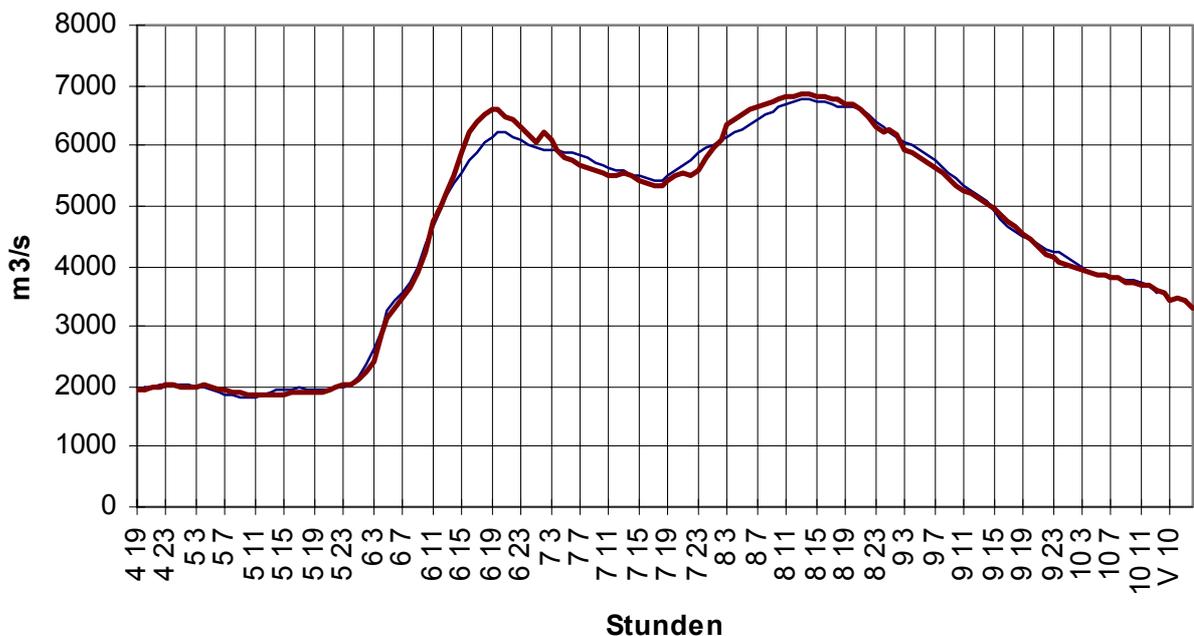


Abb. 8: Durchflüsse und 6 Stunden Vorhersagen am Pegel Kienstock vom 4.7. bis 10.7.1997. Beobachtung: dünne Linie; Vorhersage: dicke Linie. Der Zeitraster in der Abbildung beträgt 4 Stunden.

mit einer Fläche von über 500km² die NA – Vorhersagen große Unsicherheiten aufweisen. Erst der Einsatz von mit Wellenablaufmodellen kombinierten Vorhersagemodellen kann einen Teil dieser Unsicherheit beseitigen.

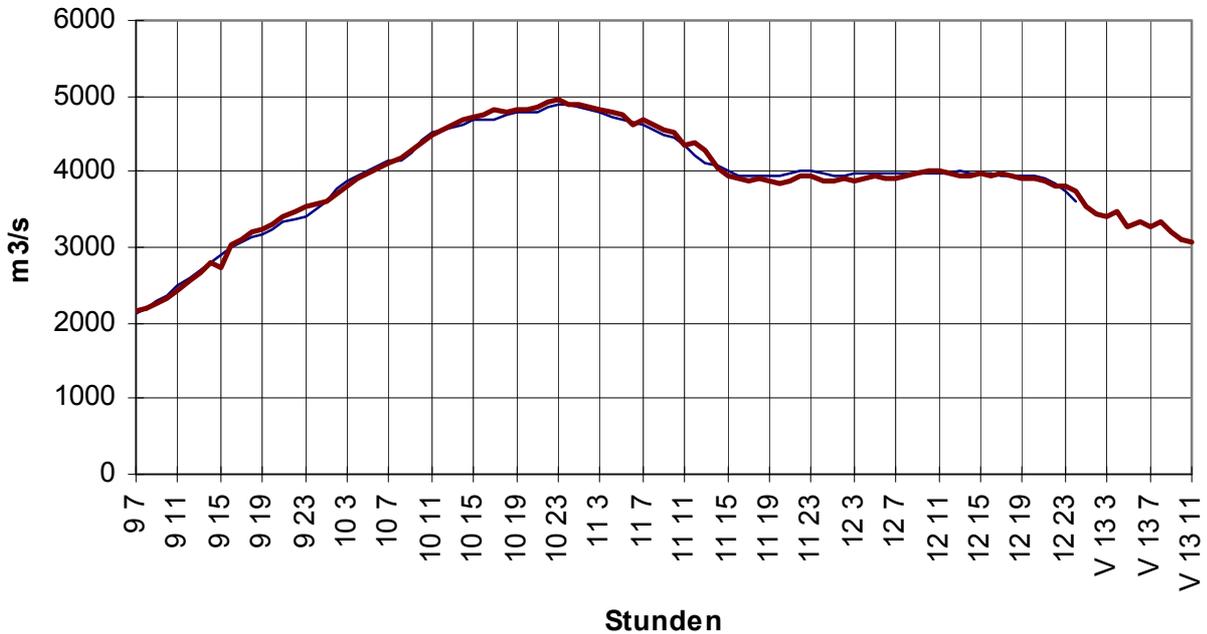


Abb. 9: Durchflüsse und 12 Stunden Vorhersagen am Pegel Kienstock vom 8.3. bis 13.3.2000. Beobachtung: dünne Linie; Vorhersage: dicke Linie. Der Zeitraster in der Abbildung beträgt 4 Stunden.

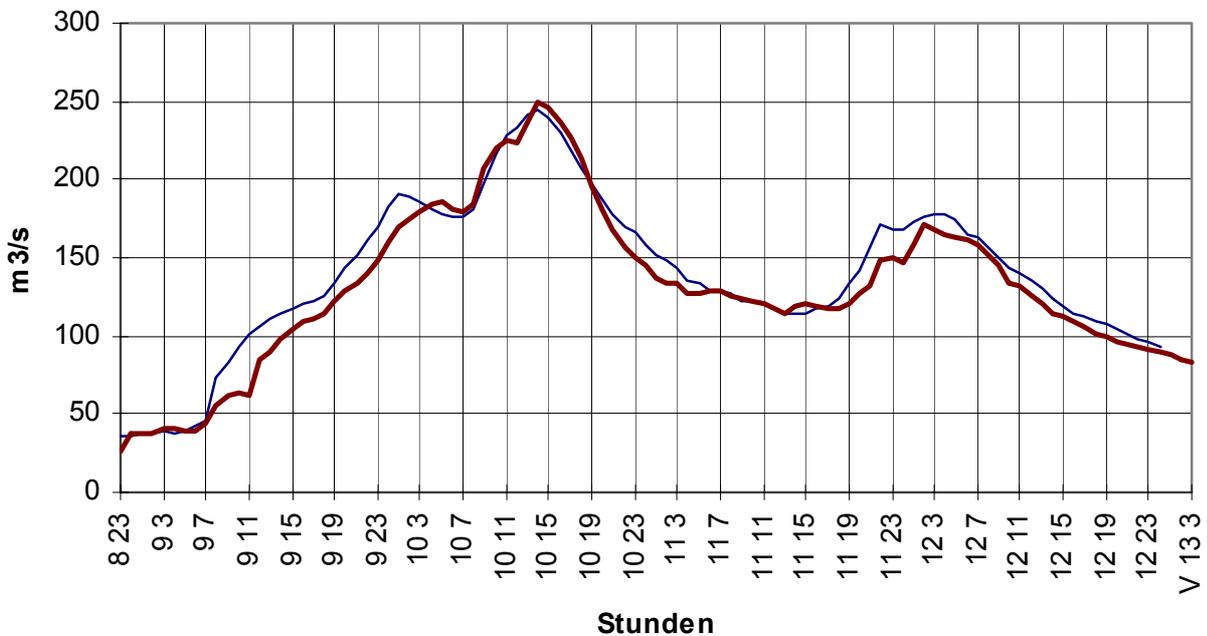


Abb. 10: Durchflüsse und 4 Stunden Vorhersagen am Pegel Amstetten vom 8.3. bis 13.3.2000. Beobachtung: dünne Linie; Vorhersage: dicke Linie. Der Zeitraster in der Abbildung beträgt 4 Stunden.

Die starken Zuflüsse aus den niederösterreichischen Teileinzugsgebieten speziell bei den Hochwässern in den Jahren 1991, 1992 und 1997 (bis zu 2500m³/s stammten aus Niederösterreich!) gaben daher den Ausschlag zu einer Erweiterung des Zubringermodelle um zusätzliche Pegel und Niederschlagsstationen. Die Vorhersagen für Amstetten/Ybbs und Niederndorf/Erlauf erfolgen nun mit WANA Modellen, die eine gegenüber den reinen NA Modellen eine deutlich verbesserte Vorhersagegenauigkeit aufweisen. Die Abbildungen 9 bis 11 veranschaulichen diese Verbesserung und deren Auswirkung auf die Qualität der Vorhersagen am Pegel Kienstock.

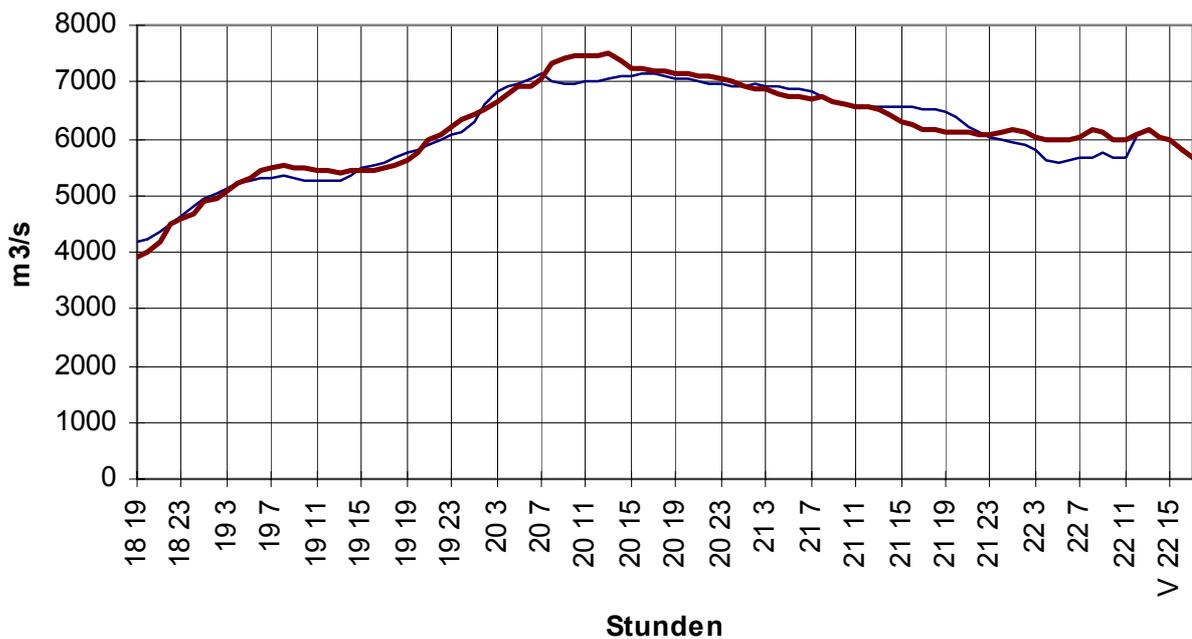


Abb. 11: Durchflüsse und 6 Stunden Vorhersagen am Pegel Korneuburg vom 18.7. bis 22.7.1997. Beobachtung: dünne Linie; Vorhersage: dicke Linie. Der Zeitraster in der Abbildung beträgt 4 Stunden.

Datenausfälle bei sämtlichen Datenfernübertragungseinrichtungen stellen ein generelles Problem der Hochwasservorhersage dar. Die Häufung derartiger Probleme am Beginn der Vorhersagetätigkeit im neuen Amtsgebäude in St. Pölten machten die Anwendung eines automatischen Ergänzungsverfahrens vordringlich. Zwei Verfahren kommen zum Einsatz: kurzfristige Datenlücken in Wasserstands- und Durchflussreihen werden durch eine automatisierte Ergänzung auf der Basis der letzten vorhanden Werte sowie der Tendenzen sowie der Relationen zwischen den Pegeln beim Ausfall von Einzelreihen geschlossen. Die Niederschlagsreihen werden laufend auf ihre Plausibilität überprüft und gegebenenfalls mit einem eingebauten Gebietsregenmodell auf der Grundlage der Daten der funktionierenden Stationen ergänzt.

Am Pegel Korneuburg traten wiederholt Probleme mit W-Q Beziehungen auf, die sich auf das in diesem Donauabschnitt eingesetzte Mehrkaskadenmodell infolge falscher Dotierung der Kaskaden sehr unangenehm auswirkten.

Die gemeinsame Wirkung der angeführten Problemfaktoren hatte bei einigen Hochwässern ein deutliches Übersteuern des Modells im Scheitelpunkt zur Folge. Die Einbeziehung zusätzlicher Pegel und Niederschlagsstationen wirkte bei den letzten Hochwässern bereits dämpfend, die geplante Anwendung von adaptiven Verfahren der Parameterschätzung sollte zusammen mit detaillierten Flussgebietsmodellen der NÖ – Zubringer eine weitere Erhöhung der Treffsicherheit der Vorhersagen und Verlängerung des Vorhersagezeitraumes bewirken.

Anschriften der Verfasser:

Hofrat Dipl.-Ing. Erich David-Labor
Abteilung WA-5 Hydrologie
Landhausplatz 1, 3109 St. Pölten
E-mail: erich.david-labor@noel.gv.at

Dr. Maximilian Heilig
Waldgasse 2
2301 Franzensdorf

HOCHWASSERMANAGEMENT

Wolfram Bors

1. Allgemeines

Ein Donauhochwasser „managen“ zu wollen, also zu steuern und zu beeinflussen, ist reine Utopie. Dies zeigt auch eine Studie der Verbund über mögliche Auswirkungen einer gezielten Steuerung der Kraftwerkskette, wonach bei kleineren Hochwässern Scheitelabsenkungen nur im cm-Bereich möglich scheinen, und das auch nur bei absolut sicheren Zuflussprognosen. Etwa ab einem 10-jährlichen Hochwasser ist wegen der schrittweisen Freigabe der Wehrfelder jegliche Beeinflussung ausgeschlossen.

Auch ein NA-Modell für die Donau ist wegen der Größe und Unterschiedlichkeit des Einzugsgebietes aber auch wegen der Beeinflussung durch Kraftwerke an den Zubringern und der Donau selbst praktisch nicht realisierbar. Sehr wohl arbeiten aber die Hydrographischen Dienste bei kleineren Einzugsgebieten mit solchen Modellen.

Was also kann die Bundeswasserstraßenverwaltung (BWV) und die Wasserstraßendirektion (WSD) zum „Hochwasser-Management“ beitragen?

2. Die Donauhochwasserschutzkonkurrenz (DHK)

Aufgabe der DHK ist die Erhaltung der Hochwasserschutzanlagen in Niederösterreich und Wien, und zwar definitionsgemäß von der Yspermündung bis zur Marchmündung. Beginnend mit Hochwasserdämmen im Bereich Krems, über den Marchfeldschutzdamm bis hin zum Wiener Donaukanal sind sämtliche Anlagen zu betreuen. An der DHK sind die Länder Wien und Niederösterreich sowie die Wasserstraßendirektion als geschäftsführende Stelle beteiligt.

Beim Anstieg eines Hochwassers werden vom Hydrographischen Dienst der Wasserstraßendirektion interne Prognosen erstellt, um den Zeitpunkt der Anordnung des 3-stufigen Hochwasserdienstes (Alarmbereitschaft, kleiner HW-Dienst, großer HW-Dienst) festzulegen und Durchflussmessungen bzw. sonstige hydrographische Erhebungen zu organisieren.

Beim großen HW-Dienst werden 7 Exposituren zwischen Krems und Markthof zwecks Dammüberwachung und Dammverteidigung besetzt. Eine Reihe von Sielen und Hochwasserverschlüssen sind (z.T. unter Einsatz von Baufirmen) zu schließen und der Donaukanal muss entsprechend der Donauwasserführung reguliert werden.

Rund 20 Bedienstete versehen dabei rund um die Uhr Dienst, 2 Bedienstete in der Direktion halten Kontakt zu den Exposituren, nehmen telefonisch Pegelstände entgegen, beobachten den Hochwasserverlauf, informieren sich bei den Hydrographischen Diensten von OÖ, NÖ und MA 45, erstellen interne Prognosen und organisieren – im Einvernehmen mit der Bundeswasserstraßenverwaltung – nötigenfalls die erforderlichen Maßnahmen für die Dammverteidigung.

Das Abwasserpumpwerk Hainburg wird bereits bei einem Wasserstand besetzt und betrieben, der noch weit unter der Alarmgrenze liegt. Vor rd. 2 Jahren wurde auch der HW-Schutz in Hainburg (ehemals Schiebetore) auf ein modernes mobiles System – ähnlich wie in Stein-Krems – umgerüstet.

Die Organe vor Ort halten Kontakt zu den Bezirkshauptmannschaften, den Gemeinden, der Feuerwehr und erforderlichenfalls zum Bundesheer. Hinsichtlich einer Information über Internet ist die Einbindung der wichtigsten österreichischen Donaupegel im Rahmen des ELWIS (Elektronisches Wasserstraßen-Informationssystem der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz/BRD) durch den Hydrographischen Dienst von Niederösterreich in Realisation begriffen (Wasserstandsverlauf der letzten 7 Tage).

3. Wehraufsicht

Die Wasserstraßendirektion ist mit der Wehraufsicht über die österreichischen Donaukraftwerke betraut. Im Normalfall beschränkt sich die Tätigkeit auf die nachträgliche Überprüfung der Einhaltung der Wehrbetriebsordnungen, die für jedes einzelne Kraftwerk per Bescheid von der Obersten Wasserrechtsbehörde (OWRB) im BMLFUW erlassen wurden. Im Hochwasserfall wird der Betrieb der Kraftwerke laufend beobachtet, die Wehrberichte aller Kraftwerke werden periodisch abgerufen und die Organe der Wehraufsicht (Techniker der Wasserstraßenverwaltungen) halten Kontakt zu den einzelnen Kraftwerken. Bei besonderen Vorkommnissen wird der Kontakt zur OWRB hergestellt, da die WSD keine Behörde im Sinne von Anordnungsbefugnissen ist.

Naturgemäß kann auch die Wehraufsicht ein Hochwasser nicht „managen“. Dass man aber bei kleineren Ereignissen durchaus sinnvoll steuern kann, beweist ein Beispiel für das Kraftwerk Wallsee-Mitterkirchen. Die in der Folge dargestellte Vorgangsweise ist zwar nur bis rd. 4500 m³/s wirksam, könnte aber bei anderen Kraftwerken, an anderen Flüssen und unter anderen Bedingungen durchaus auch für höhere Wasserführungen möglich sein.

Grundsätzlich gab es immer schon Probleme mit dem Wendepiegel Au, da dieser unmittelbar stromab des Ennskraftwerkes St. Pantaleon liegt. Bei Schwellbetrieb der Enns wird der Zufluss schlagartig um bis zu 250 m³/s erhöht, wobei der genaue Zeitpunkt der Durchfluss-Steigerung meist nicht bekannt ist. Bei erhöhter Wasserführung liegt der Wasserspiegel am Wendepiegel praktisch an der Staumarke, sodass das Kraftwerk den Durchfluss enorm steigern muss, um den Wendepiegel innerhalb kürzester Zeit wieder unter die Staumarke zu bringen. Das kurzfristige Überfahren des Wendepiegels kann jedoch nicht verhindert werden, da die Durchfluss-Steigerung am Kraftwerk erst mit zeitlicher Verzögerung am Wendepiegel wirksam wird. Dadurch kam es immer wieder zu relativ starken Durchfluss-Schwankungen, die sich über die Kraftwerke Ybbs Persenbeug und Melk bis in die Wachau fortpflanzten und dort ökologisch unerwünschte Pegelschwankungen von bis zu 40 cm hervorriefen.

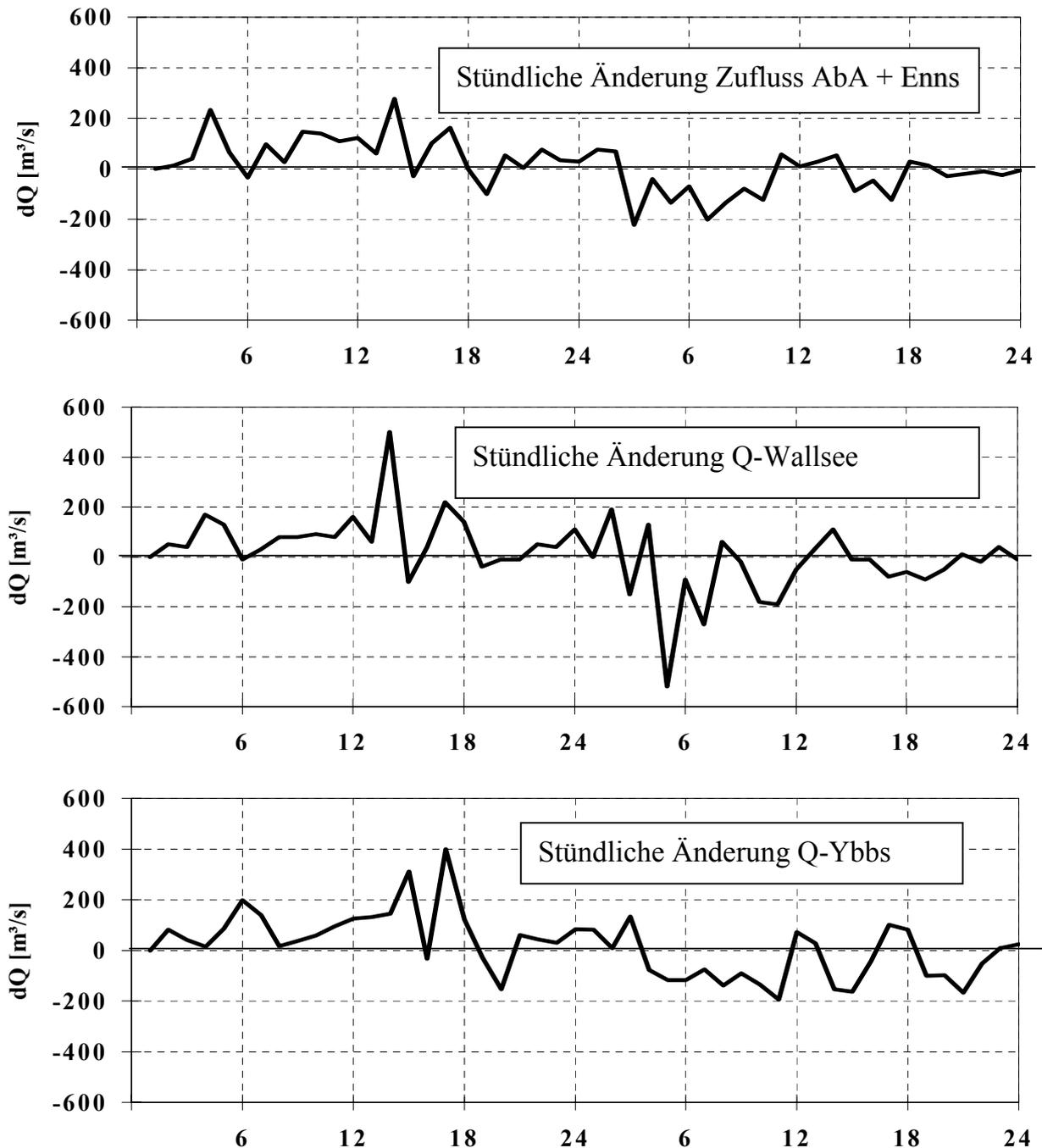


Abb. 1: Aufschaukelung der Zufluss-Schwankungen (Quelle: Verbund AHP).

Am 18. März 1998 lief eine kleine Welle mit einem Scheitelwert von rd. 4000 m^3/s ab. Im ansteigenden Ast der Welle setzte nun bei einem Donaudurchfluss von rd. 3000 m^3/s der Schwellbetrieb der Enns mit rd. 250 m^3/s ein. Das Kraftwerk reagierte darauf mit einer kurzfristigen Durchfluss-Steigerung von rd. 500 m^3/s , was eine starke Aufschaukelung des Durchflussgeschehens bedeutete (siehe Abb. 1).

Angesichts dieser Aufschaukelung ist die WSD an Verbund-AHP mit dem Ziel herangetreten, diesem Phänomen entgegen zu wirken. Es wurden Untersuchungen angeregt, wie eine Dämpfung der Durchfluss-Schwankungen bewirkt werden könnte.

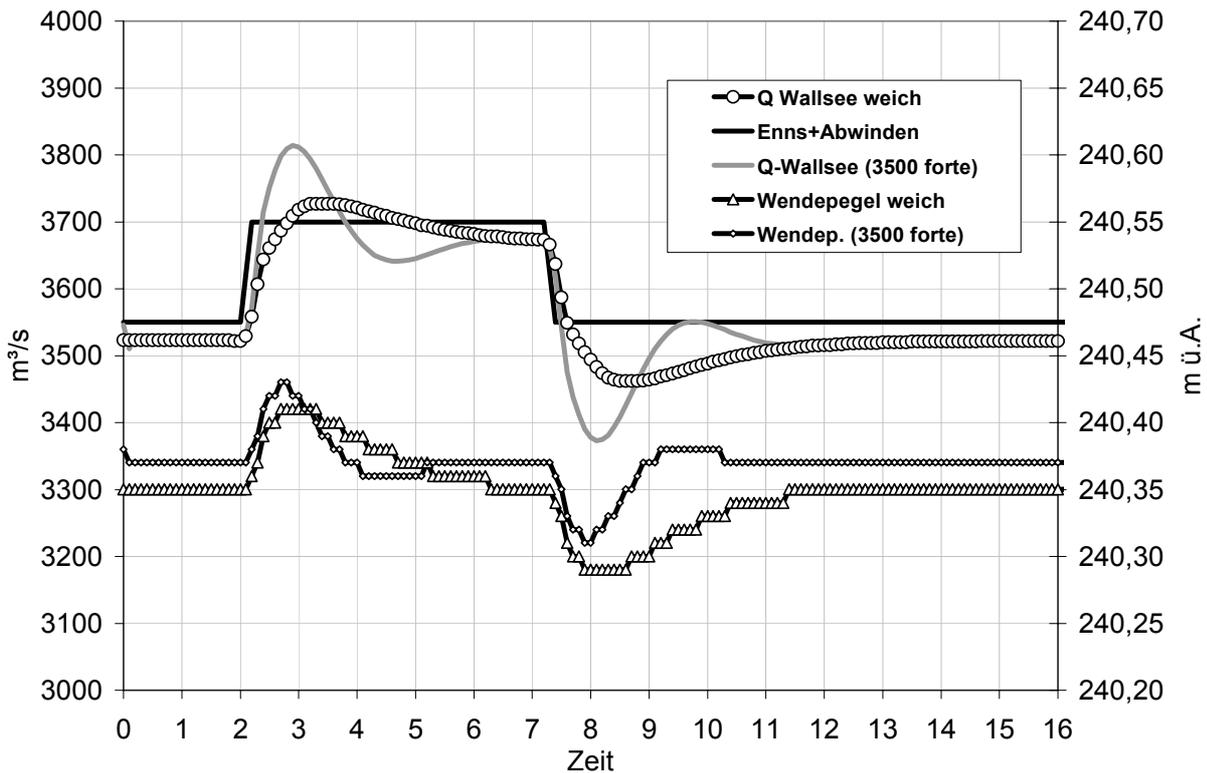


Abb. 2: Auswirkung der Änderung der Wehrbetriebsordnung.

Vorgeschlagen wurde eine Änderung der Wehrbetriebsordnung (WBO), die ein zeitlich und höhenmäßig begrenztes Überfahren des Wendepegels erlauben sollte. Diese Untersuchungen wurden von AHP im Frühjahr 2000 abgeschlossen, mit der WSD und dem Amtssachverständigen der OWRB vorbesprochen und im Juli ein Antrag auf Änderung der WBO eingereicht.

Die geplante Änderung sieht vor, dass der Wendepiegel auf die Dauer von 4 Stunden um bis zu 10 cm überfahren werden darf. Die Durchfluss-Steigerung am Kraftwerk beträgt dabei nur rd. 110 % der Enns-Zufluss-Steigerung im Falle des Schwellbetriebes. Im vorliegenden Beispiel beträgt die Enns-Schwallwelle 150 m³/s, die Durchfluss-Steigerung am Kraftwerk jedoch nur mehr rd. 170 m³/s, wobei der Wendepiegel nach rund 4 Stunden wieder unterschritten wird (siehe Abb. 2).

Es wird erwartet, dass mit dieser Maßnahme eine Entschärfung der Situation hinsichtlich Aufschaukelung von Schwallwellen der Enns erreicht werden kann.

4. Förderungen der Bundeswasserstraßenverwaltung (BWV)

Der BWV (BMVIT - Abt. 21) stehen im Rahmen des Wasserbautenförderungsgesetzes jährlich rd. 400 Mio ATS (29 Mio €) an Fördermitteln für aktiven und passiven Hochwasserschutz zur Verfügung. Beim aktiven Hochwasserschutz handelt es sich vorwiegend um Hochwasserdämme und sonstige Hochwasserschutzanlagen. Dabei werden Studien und generelle Projekte zu 100 % gefördert, Detailprojekte und Bauausführung nach dem Schlüssel 50 % Bund, 30 % Land und 20 % Gemeinden.

Beim passiven Hochwasserschutz handelt es sich beispielsweise um Aussiedlungsprojekte. So wurden im relativ häufig überfluteten Machland-Süd westlich von Ardagger insgesamt ca. 50 Gehöfte geschliffen und 161 Mio ATS (11,7 Mio €) an Förderungen (133 Mio ATS / 9,67 Mio € Förderungszusage, 28 Mio ATS / 2 Mio € bereits angewiesen) für den hochwasserfreien Neubau der Wohn- und Wirtschaftsgebäude zur Verfügung gestellt.

5. Schlussbemerkungen

Wenn für Donauhochwässer auch kein echtes „Management“ im Sinne von Regelung und Steuerung des Wellenablaufes möglich ist, so stehen der Bundeswasserstraßenverwaltung und der Wasserstraßendirektion doch einige Instrumentarien zur Verfügung, um im Rahmen ihrer Möglichkeiten für Hochwasserschutzmaßnahmen sorgen bzw. auf den Kraftwerksbetrieb Einfluss nehmen zu können.

Anschrift des Verfassers

Hofrat Dipl.-Ing. Wolfram Bors
Wasserstraßendirektion
1030 Wien, Hetzgasse 2
E-mail: Wolfram.Bors@wsd.bmwa.gv.at

ÜBERBLICK ÜBER DATEN UND DATENARCHIVE IM HYDROGRAPHISCHEN DIENST FÜR ÖSTERREICH

Reinhold Godina

1. Der Hydrographische Dienst für Österreich

Im Rahmen dieses Beitrages wird auf jene öffentliche Einrichtung eingegangen, die seit mehr als 100 Jahren das größte Messnetz für hydrographische Daten in Österreich betreut, für eine einheitliche Qualität der Daten Sorge trägt und die Veröffentlichung organisiert. Anzumerken ist, dass Hydrographische Daten in Österreich nicht nur vom hydrographischen Dienst beobachtet werden. Kraftwerksgesellschaften, Universitäten und Fremdenverkehrseinrichtungen betreiben gewässerkundliche Einrichtungen, jedoch mit unterschiedlicher Zielsetzung und unterschiedlichen Interessen.

Die Organisation des Hydrographischen Dienstes für Österreich besteht grundsätzlich aus dem Hydrographische Zentralbüro (HZB), den neun Hydrographische Landesdienste, der Hydrographie in der Wasserstraßendirektion und den in den Ländern bestellten Hilfsorganen für die Messstellenbeobachtungen (Abb. 1). Das Hydrographische Zentralbüro ist eine Abteilung der Sektion IV im Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und beschäftigt sich seit seiner Gründung im Jahre 1893 mit der Erhebung des Wasserkreislaufes, der Datenanalyse, des Datenmanagements und der Datenpublikation. Das Hydrographische Jahrbuch ist jedem in diesem Fach tätigen ein Begriff.

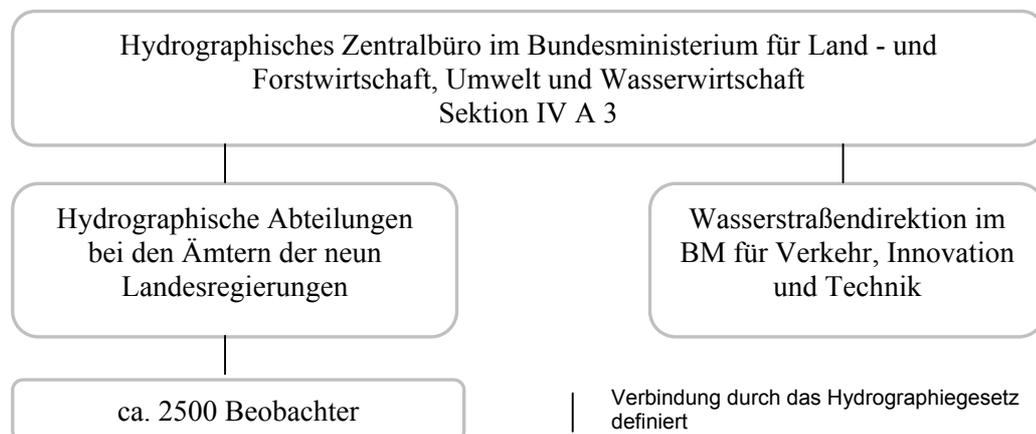


Abb. 1: Organisationsform des Hydrographischen Dienstes für Österreich.

Der Aufgabenbereich des Dienstes ist in 3 Sachgebiete: Niederschlag, Lufttemperatur und Verdunstung (NLV), Oberflächenwasser und Feststoffe (OWF) sowie Unterirdisches Wasser und Quellen (UWQ) unterteilt. Die folgende Tabelle informiert über die Anzahl der in den einzelnen Sachgebieten im Jahrbuch veröffentlichten Messstellen.

Tab. 1: Anzahl der in den einzelnen Sachgebieten im Jahrbuch veröffentlichten Messstellen.

Anzahl	NLV	Anzahl	OWF	Anzahl	UWQ
1250	Niederschlag	760	Wasserstand	2900	Grundwasserstand
900	Schneehöhen	545	Abfluss	350	Grundwassertemperatur
780	Lufttemperatur	210	Wassertemperatur	23	Quellen

2. Einführung der automationsunterstützten Datenverarbeitung

Die steigende Anzahl von Messstellen und immer größere Ansprüche an die Genauigkeit der Daten bei gleichzeitiger Zunahme der anthropogenen Beeinflussungen, die eine wesentlich aufwendigere Bearbeitung der Daten aus fachlichen Gründen erfordern, veranlassten das HZB unter Mitwirkung des Land- und forstwirtschaftlichen Rechenzentrums die automationsunterstützte Datenverarbeitung bereits vor ca. 20 Jahren schrittweise einzuführen. Nur so war es möglich, zusammenfassende Bearbeitungen trotz eingeschränkter personeller Ressourcen wie zum Beispiel die Serie der Beiträge zur Hydrographie Österreichs mit den Zehnjahreszusammenfassungen der Niederschläge einschließlich Schnee, der Lufttemperatur, der Häufigkeiten derselben, der Abflüsse, der Wassertemperatur und auch den fünfbandigen Beitrag über die Grundwasserstände 1948 – 1990 herauszugeben.

Für diese erste Generation der digitalen Datenerfassung im Hydrographischen Dienst wurden Erfassungsprogramme, ein Digitalisierprogramm und ein Auswerteprogramm entwickelt, das auf einer Siemens – Großrechenanlage im LFRZ implementiert wurde. Die Abb. 2 zeigt ein Ablaufschema der Datenbearbeitung mit diesem Programm.

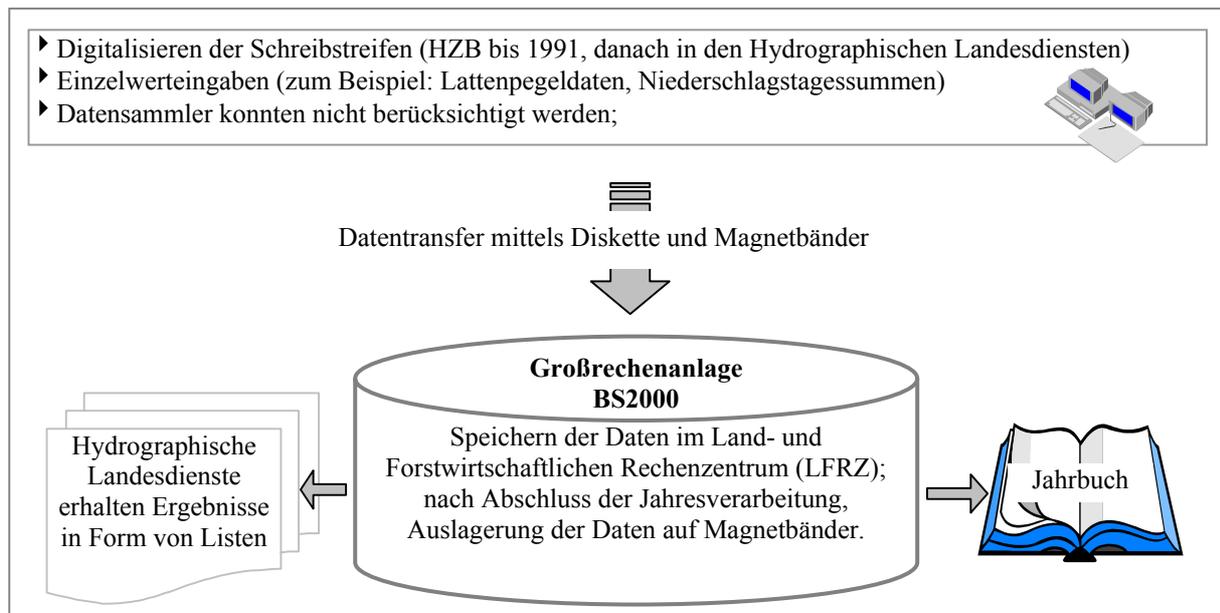


Abb. 2: Schema der zentralen Datenhaltung (1976 - 1996).

3. Das neue Hydrographische Datenmanagement System - HyDaMS

Nach einer Betriebszeit von ca. 15 Jahren entsprach dieses System nicht mehr den Ansprüchen der Benutzer im Hydrographischen Dienst für Österreich. Besonders die zentrale Datenspeicherung im Land- und forstwirtschaftlichen Rechenzentrum (LFRZ) auf Magnetbänder, auf die hydrographische Landesdienste und auch das HZB keinen Zugriff hatten, sowie die eingeschränkten Korrekturmöglichkeiten (nur für das aktuelle Bearbeitungsjahr → daher keine Archivkorrektur möglich !) waren Nachteile, die die Verarbeitung der Daten erschwerten. Die Zeitreihen konnten auch nicht graphisch dargestellt werden.

Das HZB begann deshalb im Jahr 1993 mit der Erstellung der Ausschreibungsunterlagen für ein modernes Informationssystem in dem alle Auswertungen, weitergehende Bearbeitungen, Report und Visualisierungsmöglichkeiten eingebunden werden sollten. Im Juli 1994 erfolgte die Ausschreibung durch das Land- und forstwirtschaftliche Rechenzentrum. Nach einer ausführlichen Evaluierungsphase der 12 eingelangten Angebote erhielt die Fa. Aquaplan, ein Ingenieurbüro aus Aachen, den Zuschlag. Vor allem die rasche Integration von Testdaten in ein bestehendes Visualisierungssystem war ausschlaggebend für die Auswahl dieser Firma.

Weitere chronologische Eckdaten der Programmentwicklung waren:

- 1996: Installation einer Beta – Version im HZB und in den Hydrographischen Landesdiensten (Windows – NT als gemeinsame Betriebssystem – Plattform im Hydrographischen Dienst für Österreich).
- 1997 – 1998: Integration der gesamten LFRZ – Datenbestände (Stammdaten und Zeitreihen) in die HyDaMS – Umgebung; weiter wurden die wesentlichsten Probleme der Software, die vor allem durch die Umstellung des in der Ausschreibung festgelegten Betriebssystems Unix auf Windows – NT hervorgerufen wurden, über Zusatz- und Wartungsverträge bereinigt.
- 1999: Beginn der Datenerfassung und Auswertung für alle Sachgebiete durch die Hydrographischen Landesdienste.
- 2000: das erstes Jahrbuch (1997) wird auf Grundlage der neuen Stammdaten und Zeitreihenverwaltung erstellt.

Die Übernahme der auf Magnetbänder gespeicherten Archivdaten in das neue Informationssystem war mit hohem Aufwand verbunden. Das Ziel war, dass alle Auswertungen im neuen System, das gleiche Ergebnis wie die bereits veröffentlichten Informationen in den Jahrbüchern liefern müssen und dies mit einem völlig neuen Datenmodell.

Das HyDaMS – Zeitreihenmodell unterscheidet sich von dem von 1976 bis 1996 verwendeten dadurch, dass anstatt der äquidistanten Rasterdaten ($\frac{1}{4}$ h, $\frac{1}{2}$ h, 1 h, 2h) nun ereignisabhängige Zeitreihenpolygone verwendet werden (Abb. 3).

Von Anfang an ein großes Fragezeichen war, wie alle Hydrographischen Landesdienste, die wiederum ihre Rechner in den Landesnetzen integriert haben, auf eine

gemeinsame Betriebssystemumgebung gebracht werden können. Die Marktstellung von Microsoft hatte zumindest den Vorteil, das dies mit Windows – NT bewerkstelligt werden konnte.

HyDaMS ist auf allen Servern der Landesdienste implementiert, ebenso die dem Land zugehörigen Stamm- und Zeitreihendaten. Die Messstellen – Stammdaten werden vor Ort in den Landesdiensten gewartet, die Zeitreihen laufend erfasst und geprüft. Nach Abschluss eines Bearbeitungsjahres werden die Daten mit eigens dafür entwickelten Programmen im Land exportiert, mit e-mail in komprimierter Form an das HZB gesandt und dort auf einem eigenen Unix – Server im Bundesrechenzentrum (BRZ) importiert (Abb. 4).

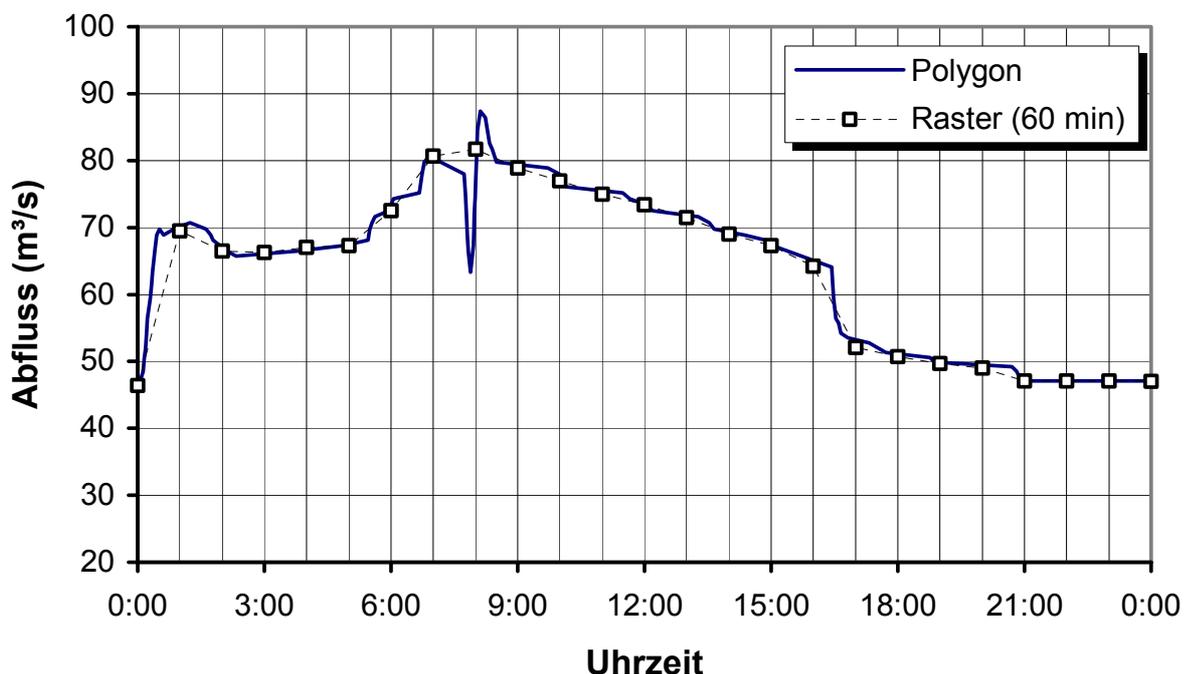


Abb. 3: HyDaMS – Zeitreihenmodell.

In Zukunft ist das HZB bestrebt, die Erfahrungen des BRZ bezüglich EDV – technischer Netzsysteme zu nutzen und das gesamte Programm und die Datenhaltung im Internet zu implementieren. Ein Prototyp des Programms (Aquaweb) wurde bereits erstellt und wird nach Abschluss der ersten Phase weiter verfolgt.

Das Programm HyDaMS gliedert sich grundsätzlich in die Verwaltung der Messstellen Stammdaten und in die Zeitreihenverwaltung. Die Messstellen – Stammdaten sind in Form einer relationale Datenbank organisiert und eindeutig mit den Zeitreihendaten der Messstelle über alle Sachgebiete (NLV, OWF, UWQ) hinweg verbunden. Die Zeitreihen bestehen aus Attributdaten (zum Beispiel: Parameter wie Wasserstand, Abfluss etc., Art des Zeitbezuges, Aussage, Herkunft, Einheit, Fehlertoleranz, Messgenauigkeit, und Verknüpfungsvorschrift) und Wertfunktionen und sind in binären Files gespeichert.

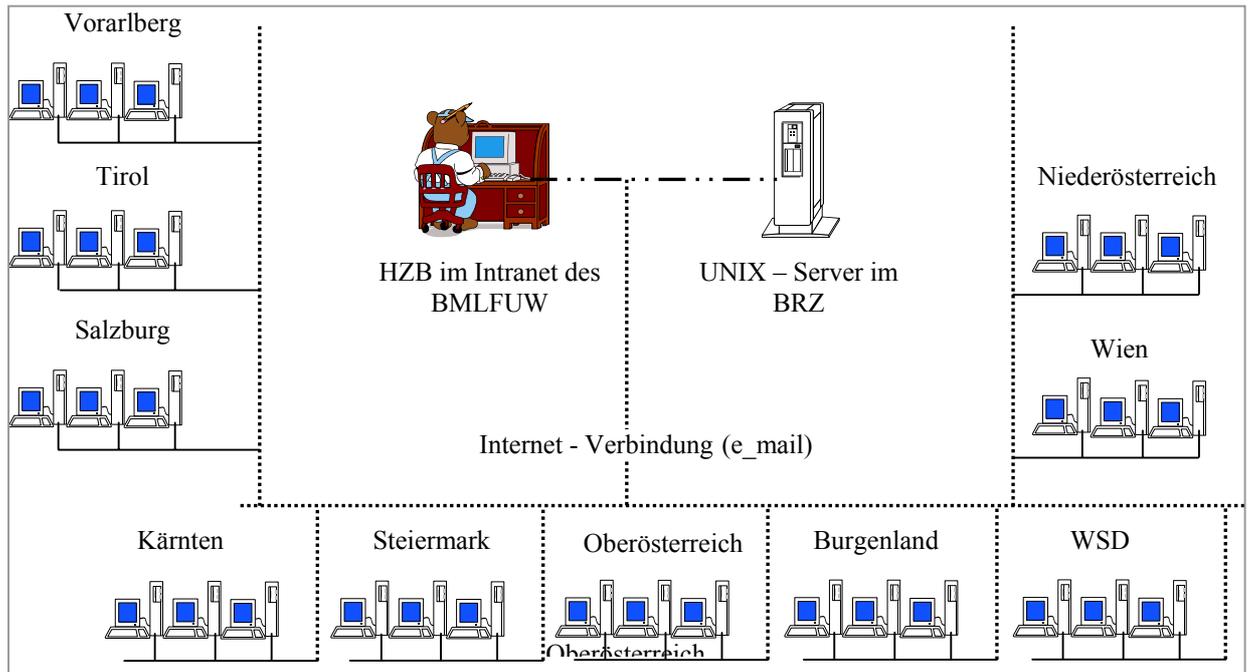


Abb. 4: Netzschema des Hydrographischen Dienstes in Österreich.

Weiter kennzeichnet das Programm folgende Merkmale:

- Integration aller identifizierenden und beschreibenden Attribute in der Zeitreihe;
- Zugriff auf Zeitreihen über Attribute;
- redundanzfreies Vorhalten unterschiedlicher Qualitäten der Zeitreihen;
- inhaltliche Unterscheidung von Zeitreihendaten mit einheitlicher Struktur: kontinuierliche, Intervall- und Momentan-Zeitreihe;
- an alle Zeitreihenwertepaare können Zusatzinformationen geknüpft werden (Texte, Kommentare);
- durch zusätzliche Werkzeuge hat der Benutzer die Möglichkeit, seine graphisch-interaktiven Oberflächen und das Arbeiten mit Zeitreihen in einer einfachen Scriptsprache für den individuellen Gebrauch zu gestalten;
- mit einer über alle Sachgebiete einheitlichen Zeitreihen - Visualisierungs-Oberfläche können die Zeitreihen einfach dargestellt werden;
- zur Datenerfassung wurde eine Vielzahl an Eingabemasken und ein benutzerfreundliches Digitalisierprogramm entwickelt; das System stellt zusätzlich eine Import-Export-Funktion zu verschiedenen Formaten zur Verfügung; die Formate werden beim Importieren selbst erkannt und die Zeitreihe ins System integriert.

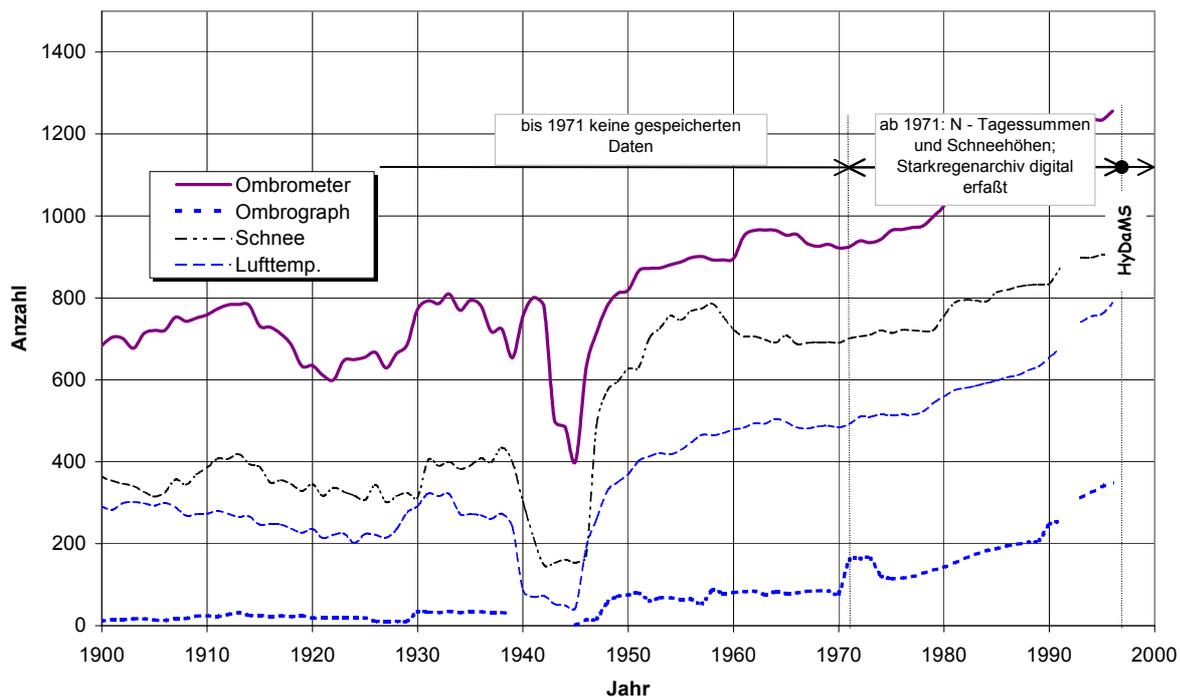


Abb. 5: Entwicklung der Anzahl veröffentlichter Messstellen im Sachgebiet OWF.

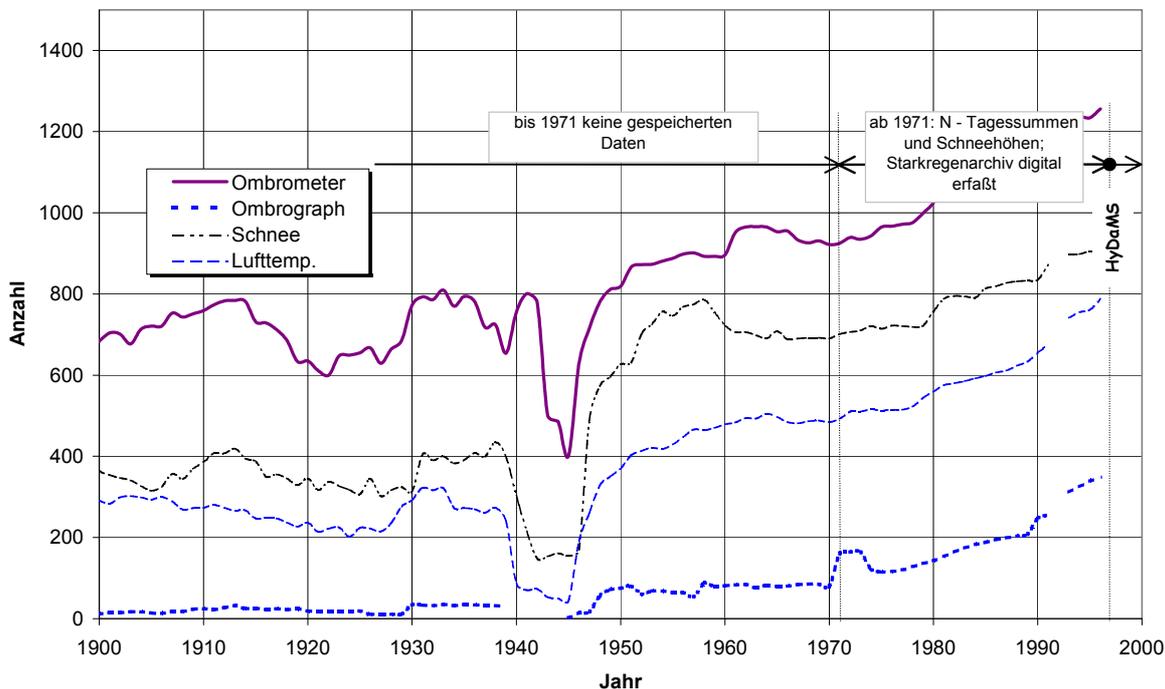


Abb. 6: Entwicklung der Anzahl veröffentlichter Messstellen im Sachgebiet NLV.

4. Das Datenarchiv des Hydrographischen Dienstes

Die Anwender von N/A – Modellen sind vor allem daran interessiert wie man die zur Kalibrierung der Modelle notwendigen hydrographischen Daten erhält. Abb. 5 und 6 zeigen dazu einerseits die Entwicklung der in den Sachgebieten OWF und NLV

veröffentlichten gewässerkundlichen Einrichtungen in den letzten 100 Jahren und geben andererseits einen Hinweis über die Zeiträume der digital gespeicherten Daten. Tab. 2 gibt Auskunft darüber, welche Parameter im Hydrographischen Zentralbüro digital verfügbar sind und angefordert werden können.

Die Daten werden mit einem speziell für den Datenexport aus HyDaMS entwickelten Programmmodul in eine Ascii – Datei ausgelesen. Abb. 7 zeigt als Beispiel eine solche Export – Datei. Am Beginn finden sich umfangreiche Informationen aus den Stammdaten und weiter die Zeitreihen – Informationen.

Tab. 2: Zusammenfassende Beschreibung des Datenarchivs.

Datenart	Zeitraum	weitere Informationen
Niederschlag, Schnee, Neuschnee	1971 - 1997	Niederschlagstagesummen, Schneehöhenwerte mit Neuschneetagesummen
Starkregenarchiv	1971 - 1997	Starkregenereignis: Wert, Tag, Monat
OWF – Wasserstand	1976 - 1997	in Abhängigkeit vom Zeitreihenarchiv in jedem beliebigen Interpolationsintervall (15 min bis Tagesmittelwerte)
Abflüsse (Tagesmittel)	1951 - 1997	Tagesmittelwerte
Abflüsse (kontinuierlich)	1976 - 1997	in jedem beliebigen Interpolationsintervall (15 min bis Tagesmittelwerte)
OWF - Wassertemperatur	1976 - 1997	Tagesmittelwerte
Grundwasserstand und Grundwassertemperatur	1966 - 1997	alle vorliegenden Daten in Abhängigkeit des Messintervalls
Grundwasserstand (Monatsmittel)	1966 - 1997	Monatsmittel

5. Datenweitergabe des Hydrographischen Dienstes für Österreich

Hydrographische Daten sind Daten im Sinne des Umweltinformationsgesetzes, da sie den Zustand der Gewässer, der Luft und des Bodens in quantitativer Hinsicht beschreiben. Daraus wird nach derzeitiger Rechtsauffassung abgeleitet, dass die auf Datenträger gespeicherten Daten ohne Entgelt zur Verfügung gestellt werden können, sofern der Manipulationsaufwand die Kapazität der öffentlichen Einrichtung nicht überschreitet. Spezielle Auswertungen – wie statistische Berechnungen - werden nicht durchgeführt. Das HZB gibt nur Daten von Messstellen des Hydrographischen Dienstes für Österreich weiter und nur in Form der im Hydrographischen Jahrbuch enthaltenen Aussage. Weiter ersucht das HZB im Umgang mit den Daten folgendes einzuhalten:

- Die Daten dürfen nur im Rahmen der genannten Projekte verwendet werden.
- Die Weitergabe der Daten an Dritte ist nicht gestattet.
- Die Datenquelle sowie der Aktualitätsstand ist in dem genannten Projekt anzugeben.

```

HZB-Nummer:                211490
HD-Nummer:                 ow3902
DBMS-Nummer:              6001099
Meßstelle:                Mureck (Schreibpegel)
Gewässer:                 Mur
Dienststelle:             HD-Steiermark
orog.EZG [km²]:           9769.9
Höhe (PNP) [m ü.A.]:     224.23
Geographische Koordinaten:
  gültig seit:            Länge (Grad,Min,Sek):    Breite (Grad,Min,Sek):
    01.01.1964                14 23 42                47 00 04
Abgeleitete Intervallzeitreihe der ZR: Abfluss,K,,,0,A,Z,0
Mittelungsintervall:      1 Tag
Parameter:                Abfluss
Definitionsart:           I
Aussage:                  Mit
Einheit:                  m³/s
Zeitraum:                 01.05.1998 00:00:00 bis 01.06.1998 00:00:00
Der Intervallwert gilt bis zum nächsten Zeitpunkt mit einem Wert oder
Lücke
Werteformat:              wertabh. (Q)
Werte:
01.05.1998 00:00:00      211
02.05.1998 00:00:00      195
03.05.1998 00:00:00      183
04.05.1998 00:00:00      178
05.05.1998 00:00:00      180
06.05.1998 00:00:00      173
07.05.1998 00:00:00      166
.....
25.05.1998 00:00:00      141
26.05.1998 00:00:00      132
27.05.1998 00:00:00      125
28.05.1998 00:00:00      125
29.05.1998 00:00:00      123
30.05.1998 00:00:00      131
31.05.1998 00:00:00      139
01.06.1998 00:00:00      Lücke
    
```

Abb. 7: Beispiel eines ASCII – Datensatzes zur Datenweitergabe.

6. Kosten einer Messstelle des Sachgebietes OWF

Für den Hydrographischen Dienst stellt sich immer wieder die Frage nach der ökonomischen Effizienz der Erfassung, Bearbeitung und Archivierung von hydrographischen Daten. Dies vor allem in Zeiten wirtschaftlicher Restriktionen, wo erforderliche Sparmaßnahmen die Kosten und den Nutzen in allen Bereichen hinterfragen. Selbst wenn die notwendigen Aufwendungen zur Sammlung, Auswertung und weiteren Bearbeitung der Daten noch relativ gut abgrenzbar sind, ist die Festlegung des damit erzielbaren Nutzens meist schwierig und ist in manchen Bereichen überhaupt nicht seriös quantifizierbar.

Am Beispiel einer durchschnittlichen OWF – Messstelle soll das Ergebnis einer Kostenuntersuchung dargestellt werden (Karner und Kugi, 1998):

Nach Angaben des Hydrographischen Zentralbüros betragen die jährlichen Kosten einer Messstelle 51.500,- Schilling (ca. 3740,- €), die sich folgendermaßen zusammensetzen:

- Personal (Bund und Länder, Nettolöhne, Dienstreisen, interne Organisation, projektsbezogene Erstellung von Bemessungsdaten, Datenaufbereitung, Kontrolle und Archivierung): 32.000,-- ÖS (ca. 2300,- €)
- Entschädigungen für lokale Beobachter: 6.000,-- ÖS (ca. 440,- €)
- Sachaufwand für Errichtung, Instandhaltung und beschränkte Modernisierung einschließlich Datenfernübertragung (bei durchschnittlich 20-jähriger Amortisierung): 13.500,-- ÖS (ca. 980,- €)

7. Literatur

Karner C. und W. Kugi (1998) Kosten und Nutzen hydrographischer Daten - Fallbeispiele aus Österreich; Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 77.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.Ing. Reinhold Godina
Hydrographisches Zentralbüro
Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft,
Umwelt und Wasserwirtschaft
Marxergasse 2
1030 Wien
Tel.: ++43 1 / 71100 – 6936
E-mail: reinhold.godina@bmlfuw.gv.at

INNKRAFTWERK LANGKAMPFEN HOCHWASSERPROGNOSEMODELL, DATENVERWALTUNG, DATENAUSTAUSCH

Helmut Schönlaub

Kurzfassung

Das Kraftwerk Langkampfen am Inn im Tiroler Unterland ist seit November 1998 in Betrieb. Durch die Dammerichtung im Staubereich und die Unterwassereintiefung steht nur mehr ca. die Hälfte des ursprünglichen Retentionsraumes von 1,46 Mio. m³ im Einflussbereich des Kraftwerkes für den Hochwasserrückhalt zur Verfügung. Als Ersatz soll im Stauroaum selbst im Rahmen der betrieblichen Möglichkeiten mit Hilfe einer Stauregelung Volumen zum Hochwasserrückhalt bereitgestellt werden. Für diese Stauregelung wird ein mathematisches Hochwasserabflussmodell eingesetzt. Über Datenverwaltung und -austausch wird im folgenden berichtet.

1. Einleitung und Übersicht

Das Kraftwerk Langkampfen schließt die bestehende Kraftwerkskette am Inn zwischen den Staustufen Passau-Ingling und Kirchbichl.

Abb. 1 zeigt eine Projektübersicht und den Standort des Kraftwerkes südwestlich der Stadt Kufstein. Die Fallhöhe der Staustufe beträgt 8,3 m, die Ausbauwassermenge 425 m³/s. Sie wird zu einem Drittel aus der bis zur Stauwurzel des Kraftwerkes Ebbs-Oberaudorf reichenden Unterwassereintiefung, zu zwei Drittel aus dem Aufstau, der bis zum Kraftwerk Kirchbichl reicht, gewonnen.

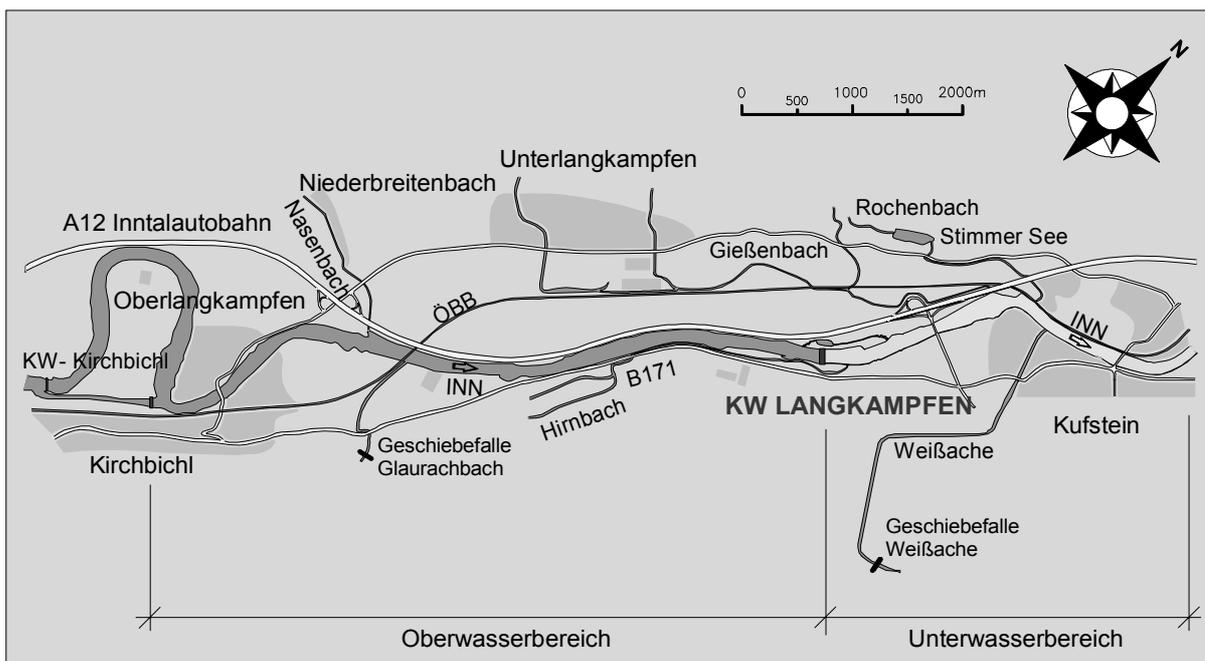


Abb. 1: Übersicht.

In der Tab. 1 (TIWAG 1993) sind die hydrographischen Kenngrößen aus der homogenen Reihe 1981 bis 1991 angeführt. Die angegebenen Werte beziehen sich auf die Wehrstelle Langkampfen. Die Hochwasserstatistik basiert auf der Reihe 1948 bis 1991 des Pegels Kirchbichl/Inn. Die durch die unterschiedlichen Kraftwerkseinflüsse verursachten Inhomogenitäten können im Rahmen der statistischen Grenzen hinreichend genau beschrieben werden. In der Tab. 2 (TIWAG 1993) sind die Ergebnisse dargestellt.

Tab. 1: Hydrographische Kenngrößen.

Benennung gemäß ÖNORM B 2400	Wert	Einheit	Begriffsbestimmung
A_E	9367	km ²	Einzugsgebiet
Inn – km	223,465	km	Innkilometer bei KW-Achse
MQ	293	m ³ /s	Mittlerer Abfluß
NQ	47,2	m ³ /s	Niedrigster Abfluß
MJNQ	69,3	m ³ /s	Mittleres Niederwasser
NQ_T	83,2	m ³ /s	Niedrigstes Tagesmittel
MNQ_T	97,7	m ³ /s	Mittleres niedrigstes Tagesmittel
HHQ	2200	m ³ /s	Höchster Abfluß
MJHQ	1287	m ³ /s	Mittleres Jahreshochwasser

Tab. 2: Hochwasserstatistik.

Mittleres Hochwasser	1160 m ³ /s
Standardabweichung	311 m ³ /s
n – jährliches Hochwasser:	
HQ 2:	1110 m ³ /s
HQ 5:	1385 m ³ /s
HQ 10:	1565 m ³ /s
HQ 20:	1740 m ³ /s
HQ 30:	1840 m ³ /s
HQ 50:	1965 m ³ /s
HQ 100:	2135 m ³ /s
HQ 1000:	2700 m ³ /s

2. Hochwasserprognose

2.1 Stauregelung

Ziel der Stauregelung im Hochwasserfall ist die Zurverfügungstellung von Retentionsvolumen im Stauraum als Ersatz für den durch den Kraftwerksbau verlorengegangenen Retentionsraum im Einflussbereich der Staustufe. Damit soll eine Erhöhung der Hochwasserspitze für die Unterlieger vermieden werden. Es ist vorgesehen, vor Eintreffen des Hochwasserscheitels den Stauspiegel abzusenken und anschließend

während der Zeit des Scheitelabflusses wieder bis maximal auf Stauzielhöhe anzuheben. Diese Vorgangsweise ist in Abb. 2 (TIWAG 1993) am Beispiel der Ganglinie des Hochwasserereignisses vom 6. August 1985 ($Q = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$) an der Wehrstelle Langkampfen dargestellt.

2.2 Prognosemodell

Für die Prognose wird das Programmpaket „INSTAT“ der TIWAG eingesetzt. INSTAT ist ein Flood-Routing-Modell zur rechnerischen Lösung instationärer Abflussvorgänge in offenen Gerinnen. Unter der Vorgabe von Gerinnegeometrie, Verlustbeiwerte und Fixpunkte im Berechnungssystem wird auf Grundlage der Saint-Venant-Differentialgleichungen ein am Systembeginn definierter Hochwasserablauf in sämtlichen Querprofilen des untersuchten Gerinneabschnittes berechnet. Der Gerinneabschnitt für die Prognose der Hochwasserentwicklung am Wehr Langkampfen erstreckt sich vom Pegel Brixlegg / Inn (Fluß km 252,035) bis zur Wehrstelle (Fluß km 223,459). Die Länge beträgt 28,576 km. Die Flussgeometrie ist in diesem Abschnitt mit 55 Flussquerprofilen mit einem mittleren Abstand von ca. 500 m dokumentiert. In Abb. 3 ist der Prognosebereich dargestellt.

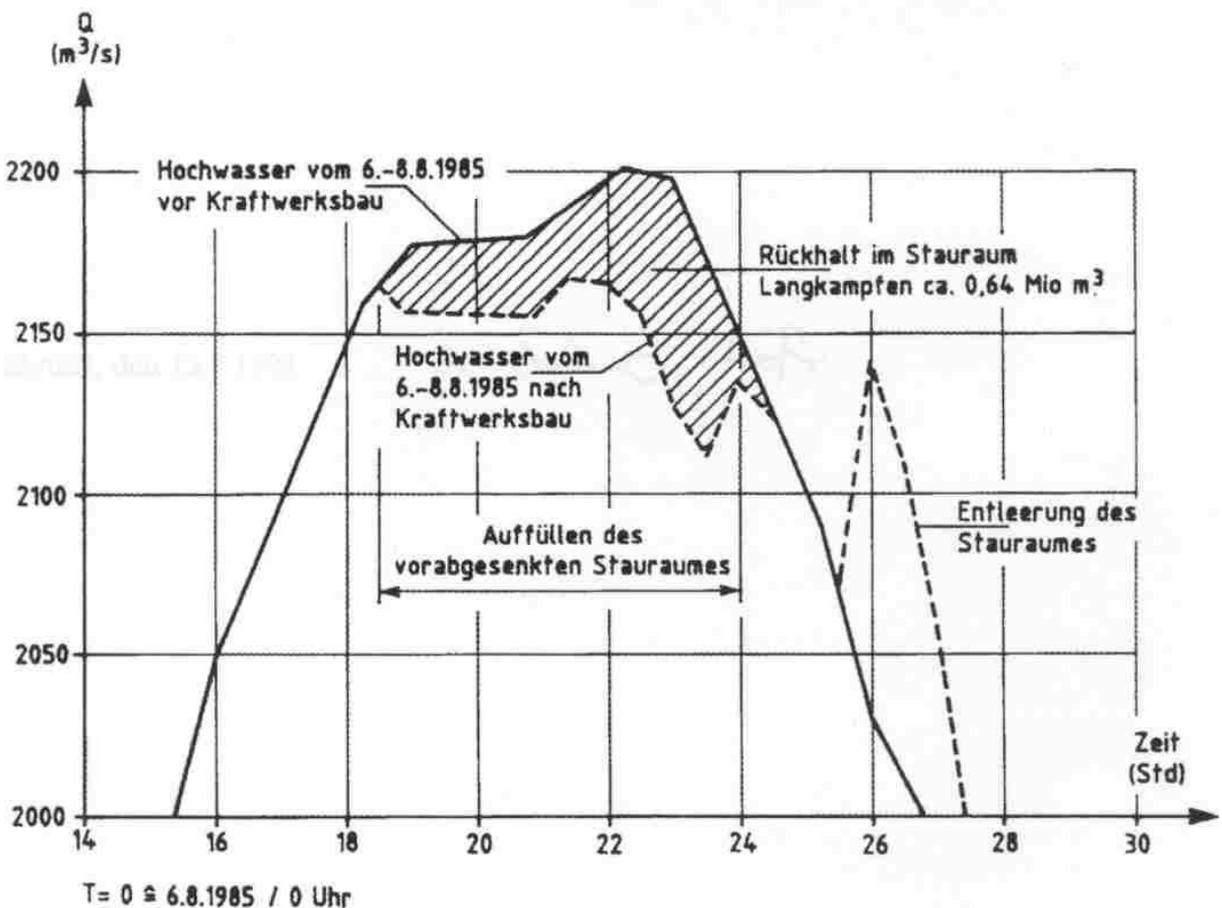


Abb. 2: Stauregelung im Hochwasserfall.

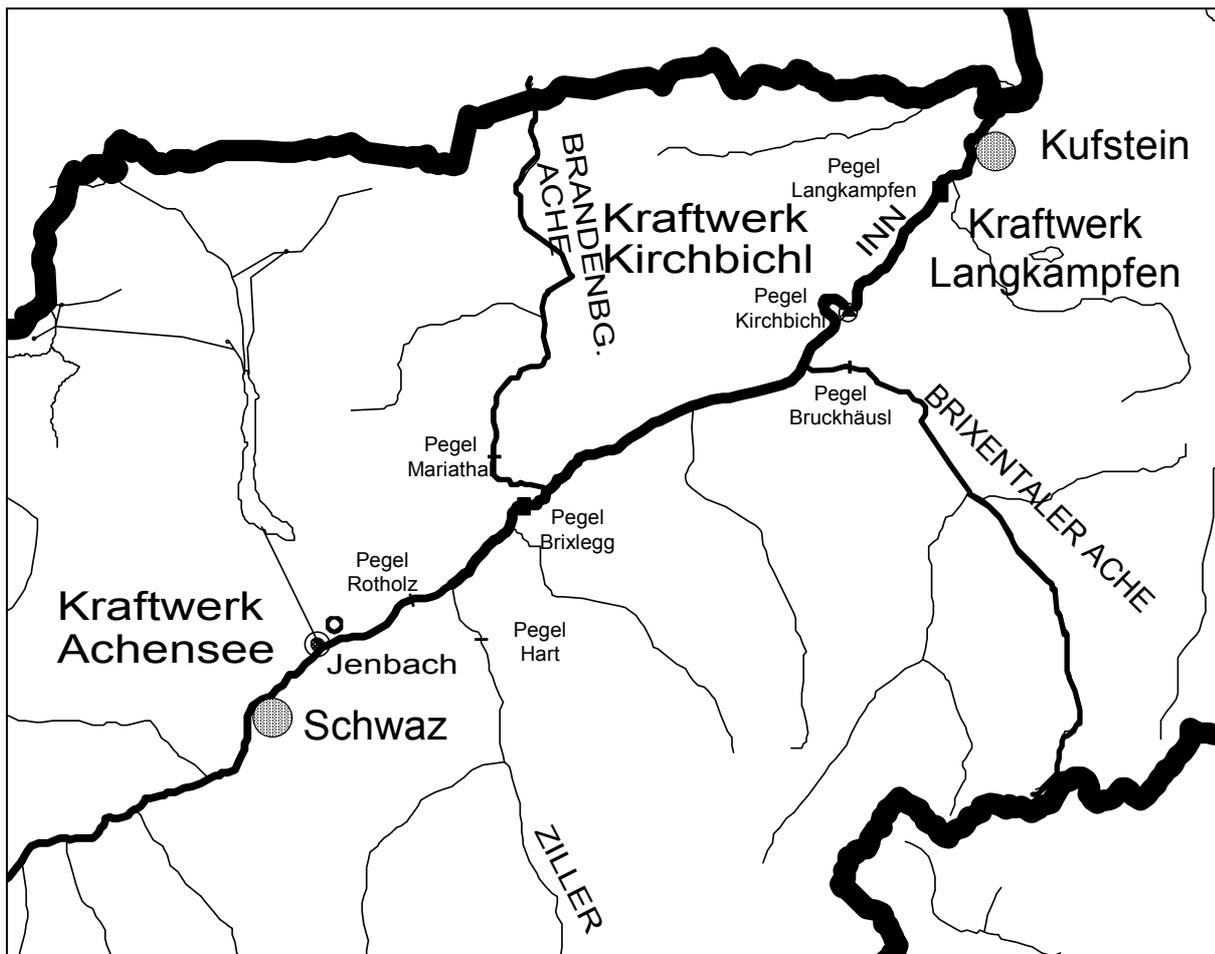


Abb. 3: Hochwasserprognosebereich.

2.3 Datenverwaltung und Datenaustausch

Systemtechnischer Ablauf:

Als Steuerpegel fungiert die Messstelle Brixlegg / Inn. Die Berechnung der Prognose startet bei einem zu erwartenden Hochwasserdurchfluss mit einer Jährlichkeit HQ_{10} ($1565 \text{ m}^3/\text{s}$). Zur Verifikation dazu werden noch die Oberliegerpegel Innsbruck / Inn, Rotholz / Inn und Hart / Ziller beobachtet. Die Zuflüsse aus den großen Zubringern Brandenberger und Brixentaler Ache werden zeitkonform als Knotenzuflüsse in die Berechnung integriert. Weitere Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet können anteilmäßig dem Flussschlauch zugeschlagen werden. Der Pegel Kirchbichl dient zur Kontrolle.

IT- technischer Ablauf:

In Abb. 4 ist die Online-Verbindung von der Erfassung der Wasserstände bei den Pegeln bis zur Hochwasserprognoserechnung schematisch dargestellt.

Der durch einen Geber erfasste Wasserstand wird in einem Fernwirkgerät vor Ort direkt in den physikalischen Parameter umgesetzt. Über redundante Fernwirkknoten in den Kraftwerken wird die Messgröße über dazwischengeschaltete Verteiler (HUB) innerhalb des lokalen Netzwerkes (LAN – Local Area Network) auf Router

übertragen. Im Router erfolgt die Umsetzung vom LAN in das WAN (Wide Area Network). Das WAN ist als Ring aufgebaut. Es besteht aus einem Lichtwellenleiterkabel, das zu einem zwischen den Kraftwerken auf den Hochspannungsmasten der TIWAG-Stromleitungen, zum anderen als Erdkabel geführt wird. Die Übertragung wird durch die Router überwacht.

Da über das WAN alle Kraftwerksdaten der TIWAG übertragen werden (z.B. auch für den Regelbereich Tirol – RBT) werden die hydrologischen Daten in einem Gateway-Server mit dem System SAT 250 (VA-Tech) herausgefiltert und in einer ORACLE-Datenbank abgelegt. Der Gateway besitzt einen Puffer zur Echtzeitdatenabspeicherung über 30 Minuten. Darüberhinaus übernimmt er die Umrechnung auf ¼-Stunden-Mittelwerte. Über eine SQL-Rechnerkopplung werden die Wasserstandsdaten auf die ORACLE-Datenbank des Wasserwirtschaftlichen Informationssystems WISKI^{alpin} (Schönlaub, 1998) übertragen. Im System WISKI^{alpin} werden die Wasserstände über die aktuellen Schlüsselkurven in die Durchflusswerte umgesetzt. Der aktuelle Durchfluss wird über eine ASCII-Schnittstelle an den Prognoserechner weitergegeben. Anschließend kann mit dem Programmsystem INSTAT die Prognoserechnung durchgeführt werden.

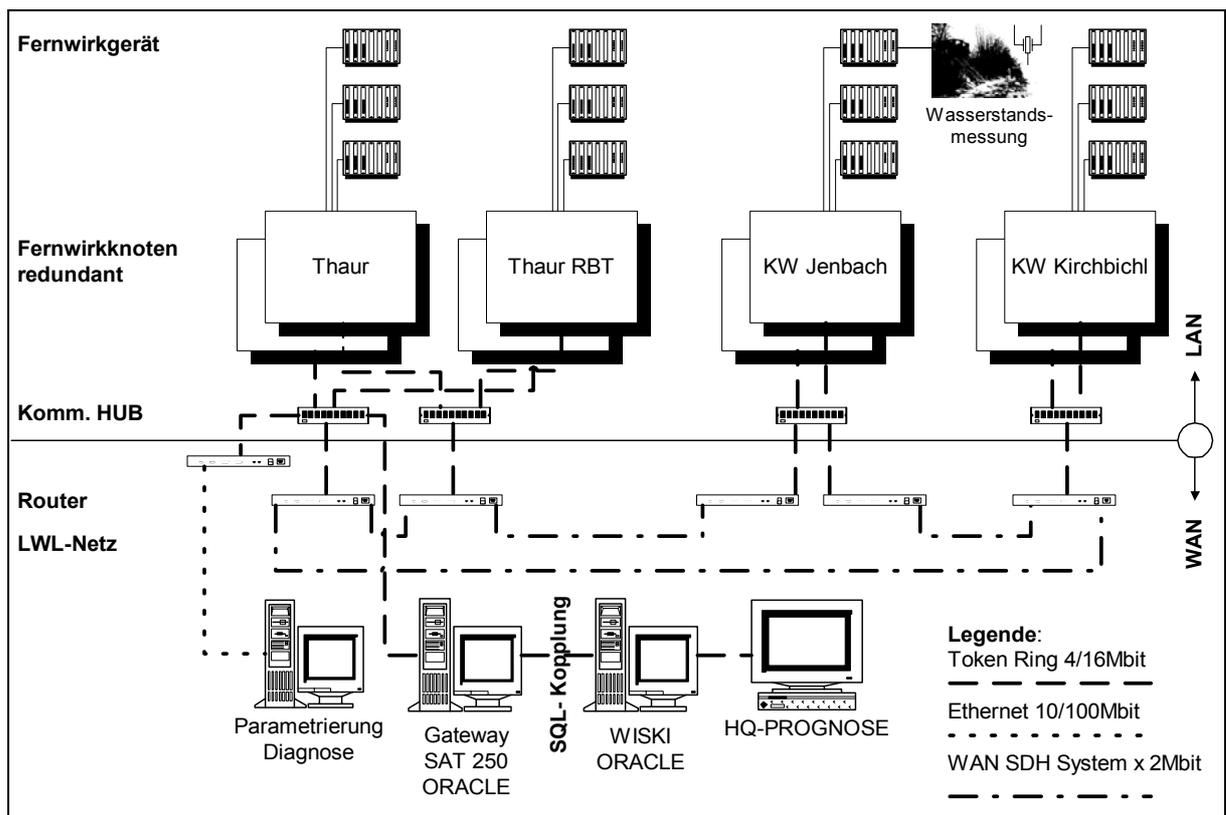


Abb. 4: Netzwerkdiagramm.

Als wichtige Eckpunkte des Systems kann zum einen die direkte Umsetzung in den Fernwirkgeräten der Unterstationen betrachtet werden. Die Parametrierung und Diagnose wird von einem zentralen Server durchgeführt. Eine wichtige Sicherheitskomponente bietet zum zweiten die Übertragung durch redundante Knoten und das Ringnetz des WAN.

3. Literatur

TIWAG (1993) LK 090-016 - Innkraftwerk Langkampfen, Einreichung zur Erlangung der wasserrechtlichen Bewilligung, Technischer Bericht und Planbeilagen.

Schönlaub, H. (1998) WISKIalpin - das neue wasserwirtschaftliche Informationssystem der TIWAG - Tiroler Wasserkraftwerke AG; Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft Nr. 29, Technische Universität Graz.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Schönlaub
TIWAG - Tiroler Wasserkraftwerke AG
Bereich Bautechnik
Eduard-Wallnöfer-Platz 2
6020 Innsbruck
E-mail: helmut.schoenlaub@tiwag.co.at

ZUR ORGANISATION WASSERWIRTSCHAFTLICHER DATEN IM INGENIEURBÜRO

Hans R. Rezabek

1. Allgemeines

Zur Bearbeitung wasserwirtschaftlicher und umweltbezogener Fragestellungen werden durch die GRUPPE WASSER – Ziviltechnikergesellschaft für Wasserwirtschaft GmbH umfangreiche Datenmengen digital verarbeitet, gespeichert und evident gehalten.

Die für die Projektarbeit wesentlichen wasserwirtschaftlichen Daten sind in einem relationalen Datenbanksystem (ORACLE) organisiert. Mit diesem Datenbanksystem werden

- Grundwasserstandsmessstellen und Pegelstellen an Oberflächengewässern
- Bohrstellen
- Niederschlagsmessstellen
- Zeitreihen

verwaltet.

Die im Datenbanksystem verwalteten hydrografischen Informationen entsprechen dem Standard des Hydrografischen Dienstes.

Die wasserwirtschaftliche Datenbank umfasst

- Lageinformationen zur Messstelle (Koordinaten, Flussgebiet, Adresse, Gst.Nr., Vermessung)
- Art der Messstelle (Grundwasser, Oberflächengewässer)
- allgemeine Höheninformationen (m ü.A., Vermessung)
- diverse fremde Bezeichnungen
- Wasserrechte
- Extremwerte
- Zeitreihen (Wasserstände, Abflüsse).

Die geologische Datenbank umfasst außerdem

- Informationen zur Bohrstelle
- Grundwasserstauer und Grundwasserspiegel bei der Errichtung
- Schichtverzeichnis
- Ausbau der Bohrstelle
- Feld- und Laboruntersuchungen.

Die Inhalte der Datenbanken wurden größtenteils im Zuge konkreter Projekte erarbeitet und werden laufend aktuell gehalten und erweitert. Die Datenquellen sind einerseits der Hydrografische Dienst, andererseits private Auftraggeber und eigene Feldmessungen. Für die Bearbeitungen in Wien erfolgt ein regelmäßiger Datenaustausch mit den zuständigen Magistratsabteilungen 45 und 31.

Das wasserwirtschaftliche Datenbanksystem der GRUPPE WASSER ist auf einem Server unter MS Windows abgelegt, die Ein- und Ausgabe erfolgt über Clients mit MS Access-Masken.

Die grafische Weiterverarbeitung der wasserwirtschaftlichen Daten erfolgt mittels Geografischer Informationssysteme (Arc/Info, MGE) sowie mittels eigenentwickelter Softwarepakete (Grundwassersimulationsmodelle, Niederschlag / Abflussmodelle, Ganglinien- und Statistikprogramme).

Zur Frage der Datenqualität ist festzustellen, dass die Grundwasserstandsdaten des Hydrografischen Dienstes eine sehr gute Qualität aufweisen.

Die Güte der Abflussdaten ist nicht nur von der Güte der Abflussmessungen, sondern vor allem von der Güte der Abflussmessstellen (repräsentative Lage, baulicher Zustand) abhängig. Ein besonderes Problem stellt auch der Umstand dar, dass Abflussmessungen im allgemeinen bei niedriger bis mittlerer Wasserführung vorgenommen werden, die wesentlichen Aussagen sich jedoch auf Extremereignisse (HQ) beziehen sollen. Für derartige Untersuchungen ist der Fließzustand zu beachten (Wechsel Strömen – Schießen) und sind Spiegellagenberechnungen über einen längeren Flussabschnitt erforderlich.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Hans Robert Rezabek,
Ingenieurkonsulent für Bauwesen,
gf Gesellschafter der GRUPPE WASSER –
Ziviltechnikergesellschaft für Wasserwirtschaft GmbH,
1040 Wien, Wiedner Hauptstraße 19.
E-mail: h.rezabek@gruppewasser.co.at

DATENVERWALTUNG UND –AUSTAUSCH: BEISPIEL ZAMG (MET AUSTRIA)

Wolfgang Lipa

1. Einführung

Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ist eine Einrichtung des Bundes und untersteht dem Bundesminister für Bildung, Wissenschaft und Kultur. Eine ihrer Hauptaufgaben ist die Führung eines nationalen meteorologischen und geophysikalischen Messnetzes. Des weiteren obliegt der ZAMG die Auswertung, Prüfung und Archivierung der aus diesen Netzen gewonnen Daten, sowie die Bereithaltung der Daten für das staatliche Krisenmanagement und vergleichbare internationale Überwachungseinrichtungen hinsichtlich der Beherrschung von der Natur oder von Menschen ausgelösten Katastrophen.

Dieser Beitrag befasst sich mit dem meteorologischen Messnetz der ZAMG und deren Abbildung in der digitalen Klimadatenbank.

2. Datenquellen der Klimadatenbank der ZAMG

Die meteorologischen Datensätze der Klimadatenbank der ZAMG beinhalten Punktdaten (numerische Werte) und Flächen- bzw. Raumdaten (Images).

Die **Punktdaten** werden aus dem eigenen Messnetz, Meldungen aus dem globalen Telekommunikations Netz (GTS) der WMO (World Meteorological Organisation) und Fremddaten (HZB, Hydrologische Landesdienste) gewonnen und werden mit dem relationalen Datenbank - Management - System SYBASE auf SUN Enterprise E3500 Servern mit je 2GB RAM und je 464 GB Diskarray (Sun StorEdge A3500) zentral in Wien gehalten.

(a) Das eigene Messnetz erfasst

- bodennahe Beobachtungen meteorologischer Parameter über
 - teilautomatische Wetterstationen mit online Anbindung (TAWES)
 - teilautomatische Wetterstationen ohne online Anbindung (TAKLIS)
 - konventionelle Messstellen mit Handmessungen
 - Messstellen der ACG (Austro Control Ges.m.b.H.)
 - Meßstellen des Militärischen Wetterdienstes
- sowie Messungen der freien Atmosphäre
 - mittels Ballonaufstieg

(b) Meldungen aus dem globalen Telekommunikations Netz

- europaweite bodennahe Beobachtungen (Synops)
- europaweite Messungen der freien Atmosphäre (Raso)

(c) Fremddaten

- Übermittlung der Daten per Diskette, e-mail, Hardkopie

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

STATIONSNETZ

- Klimastation
- △ Tellautomatische Klimastation
- Synop- und Klimastation
- ▲ Tellautomatische Klimastation mit automatischer Synopabfrage
- ◻ Tellautomatische Klima- und Synopstation mit händischer Synop eingabe
- Sonnenscheinregistrierung

Stand: 2000

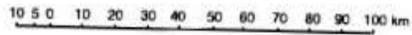


Abb. 1: Stationsnetz der ZAMG.

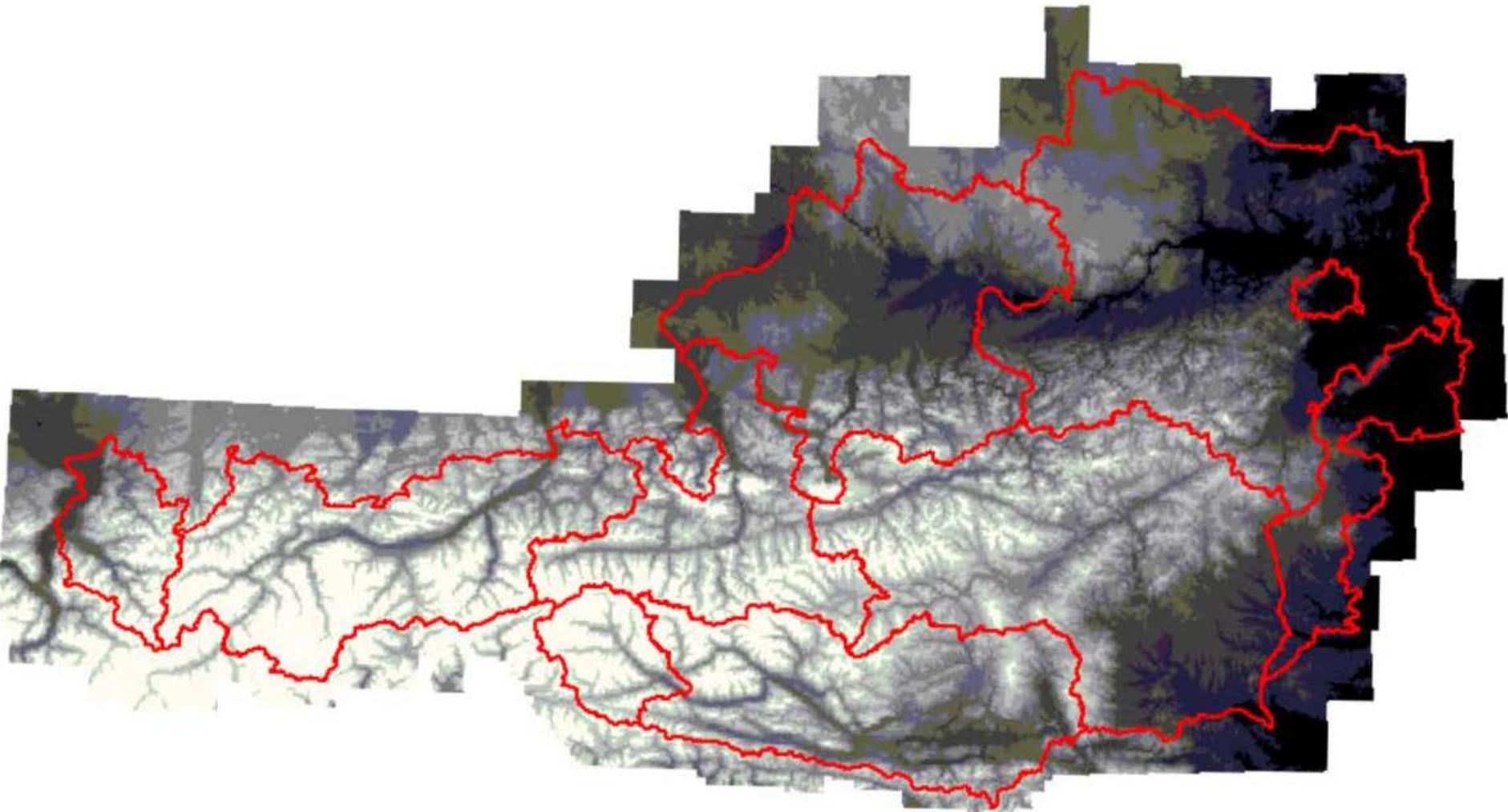


Abb. 2: Das Höhenmodell der ZAMG.

Die **Flächen/Räumlichen Daten** beinhalten klimatologische Auswertung der

- Satellitendaten des METEOSAT 5
- Radardaten der ACG
- ALDIS Blitzdaten
- Produkte des ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts)

und werden teils auf Robotersysteme; auf Windows/NT Servern oder direkt im ECMWF Zentrum gehalten. Flächeninformationen, wie

- Landnutzungskarte Österreichs (ARCS Austrian Research Centers Seibersdorf)
- Höhenmodell der ZAMG
- Austrian - MAP des BEV (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen)

ergänzen die Klimadatenbank der ZAMG.

Meteorologische Parameter

I. Boden, herkömmliche Station, analoge Messung, Registrierung

Standard:

- Lufttemperatur 2 Meter, 5 cm, gemessen
- Luftfeuchte, gemessen
- Niederschlag, gemessen
- Schneedecke, gemessen
- Wind, geschätzt
- Sicht, geschätzt
- Bewölkungsmenge, geschätzt
- besondere Ereignisse wie Nebel, Gewitter, Tau,..

Erweitert:

- Luftdruck
- Feuchttemperatur
- Sonnenscheindauer
- Verdunstung

II. Boden, teilautomatische Station, digital gemessen (TAWES, TAKLIS)

Standard:

- Lufttemperatur 2 Meter, 5 cm
- Luftfeuchte
- Niederschlag, Menge und Dauer
- Wind, zweidimensional
- Sonnenscheindauer
- Erdbodentemperaturen
- Luftdruck



Abb. 3: Beispiel einer herkömmlichen Station (Wetterhütte mit Ombrometer)



Abb. 4: Beispiel einer teilautomatischen Station (Wetterhütte, Windmast, Sonnenscheingeber, Ombrometer)

Erweitert:

- Globalstrahlung
- Diffusstrahlung
- diverse Profile

III. Freie Atmosphäre, Ballonaufstiege

- Lufttemperatur
- Wind, zweidimensional
- Luftdruck
- Luftfeuchte

Zeitliche Auflösung

I. Boden:

Monatswerte: Summen, Mittelwerte, Zahl der Tage mit Ereignissen

Start: 1767 März Lufttemperatur Kremsmünster

Tageswerte: Summen, Mittel, Terminwerte (7,14,19/21 Uhr)

Start: 1872 Jänner Wien Hohe Warte

Stundenwerte: einzelne Parameter

Start: 1880 Sonnenscheindauer Wien Hohe Warte

10 Minutenwerte: nur Rohdaten

Start: 1992 August

Minutenwerte: nur Niederschlag

Start: 1983 Mitte Oktober

II. Freie Atmosphäre:

Zwei mal tägliche Ballonaufstiege ab 1951

III. Flächen/Raumdaten

Meteosat: aktuelle Daten halbstündlich,
archivierte Daten ab 1996/1 6-stündig

3. Zugriffe auf die Klimadatenbank

Punktdaten:

Interne Schnittstellen:

Die Daten sind in Tabellen der SYBASE Datenbanken gespeichert. Daher ist das SQL Interface die einfachste Schnittstelle und Voraussetzung für alle anderen Anwendungen. PC Anwendungen basierend auf EXCEL, ARC/VIEW, ARC-INFO werden über ODBC (Open Data Base Connection) eingebunden. Die in der UNIX Welt laufenden Applikationen verwenden die an der ZAMG entwickelte Schnittstellenbibliothek zalibdb bzw. Scripts basierend auf Unix Shell Umgebung oder Perl. Für den ZAMG Benutzer ergibt sich eine Vielfalt von Zugriffsmöglichkeiten, die einfachste ist jedoch über den ZAMG Intra - Net Server.

Externe Schnittstellen:

Aus Sicherheitsgründen ist kein Zugriff von außen auf das, durch eine Firewall geschützte, innere Rechnersystem der ZAMG erlaubt. Einzelne Partner sind aber ins WAN (Wide Area-Net) der ZAMG integriert (ECMWF, ...). Kundenschnittstellen setzen außerhalb der Firewall der ZAMG auf (ftp, e-mail, eigene Übertragungsschnittstellen, CD-ROM) oder mittels Zugriff auf die ZAMG - Home Page: <http://www.zamg.ac.at/> mit vielen Gratisprodukten wie Monatsübersicht oder aktuellen Daten.

4. Anwendungen

Interne GIS unterstützte Datenprüfung in der ZAMG/Klimaabteilung

Versand von geprüften Daten an Kunden

- täglicher, wöchentlicher, monatlicher Versand per e-mail, ftp, Fax

Ergebnisse, Statistiken für Kunden

- Häufigkeiten, Schwellwertüberschreitungen
- Energiebezogene Abrechnungen wie Heizgradtage, Kühl-Lüftungsstunden, Enthalpie
- Beurteilung von Jährigkeiten des Niederschlags
- allgemeine Gutachtertätigkeiten für Gerichte, Polizei, Private
- Kurortgutachten, Klimatographien

Beispiele für Applikationen der ZAMG/Klimaabteilung für Kunden

- Auswertung der Schlechtwettertage inklusive der GIS Anwendung Schlechtwetterstunden auf Postleitzahlbasis
- ACCESS Datenbank inklusive eines GIS Arbeitsplatzes mit meteorologischen Daten zur Abschätzung von Schadensfällen verursacht durch starkem Wind, Niederschläge und Temperaturen auf Postleitzahlbasis
- Auswertung 10-jähriger extremer Minutenwerte des Niederschlags auf Basis eines GRID -ARC/Info Files mit einer Auflösung eines Österreich weiten Rasters von 500 x 500 Meter.

TAWES Rohdaten (10 Minuten Online Daten)

direkt vom TAWES Zentralrechner zum Kunden:

- COMPUTEL
- Hydrographische Landesdienste Steiermark, Salzburg
- OKA
- ORF

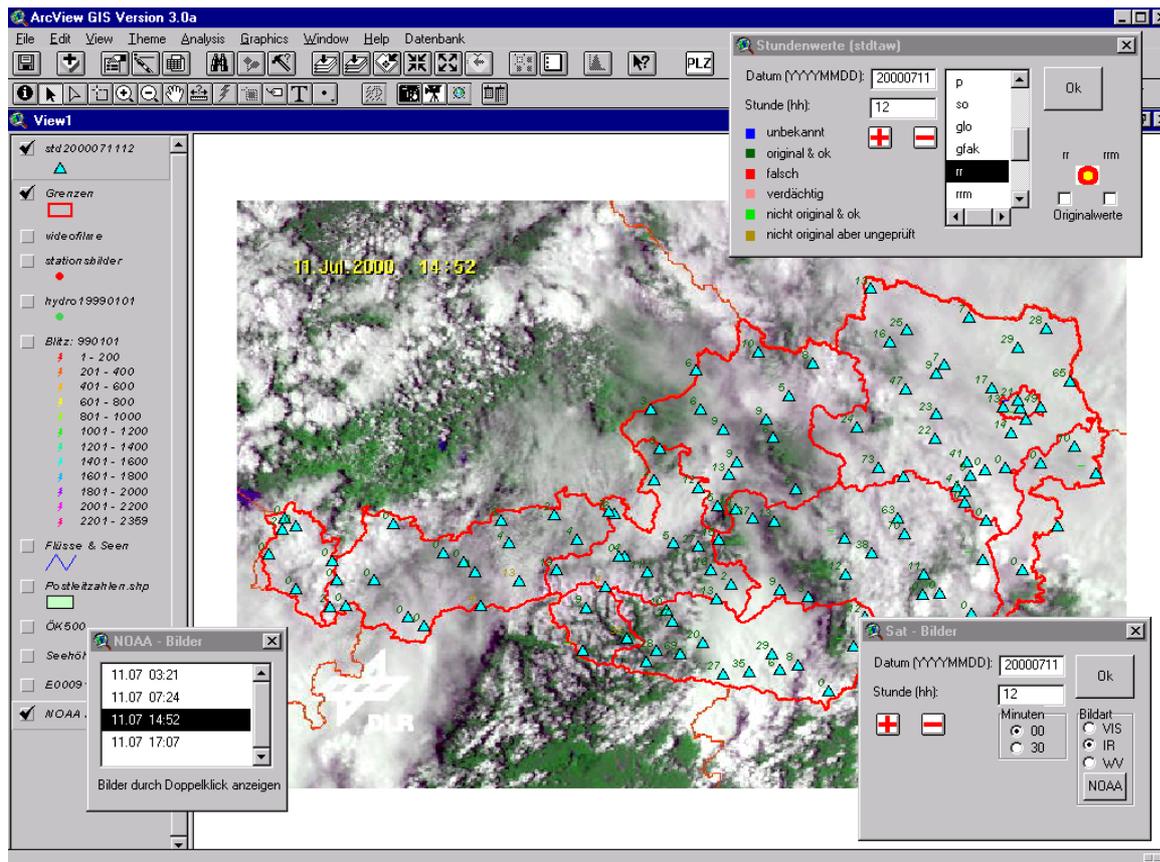


Abb. 5: Beispiel: NOAA Satellit und Stundenwerte des Niederschlags.

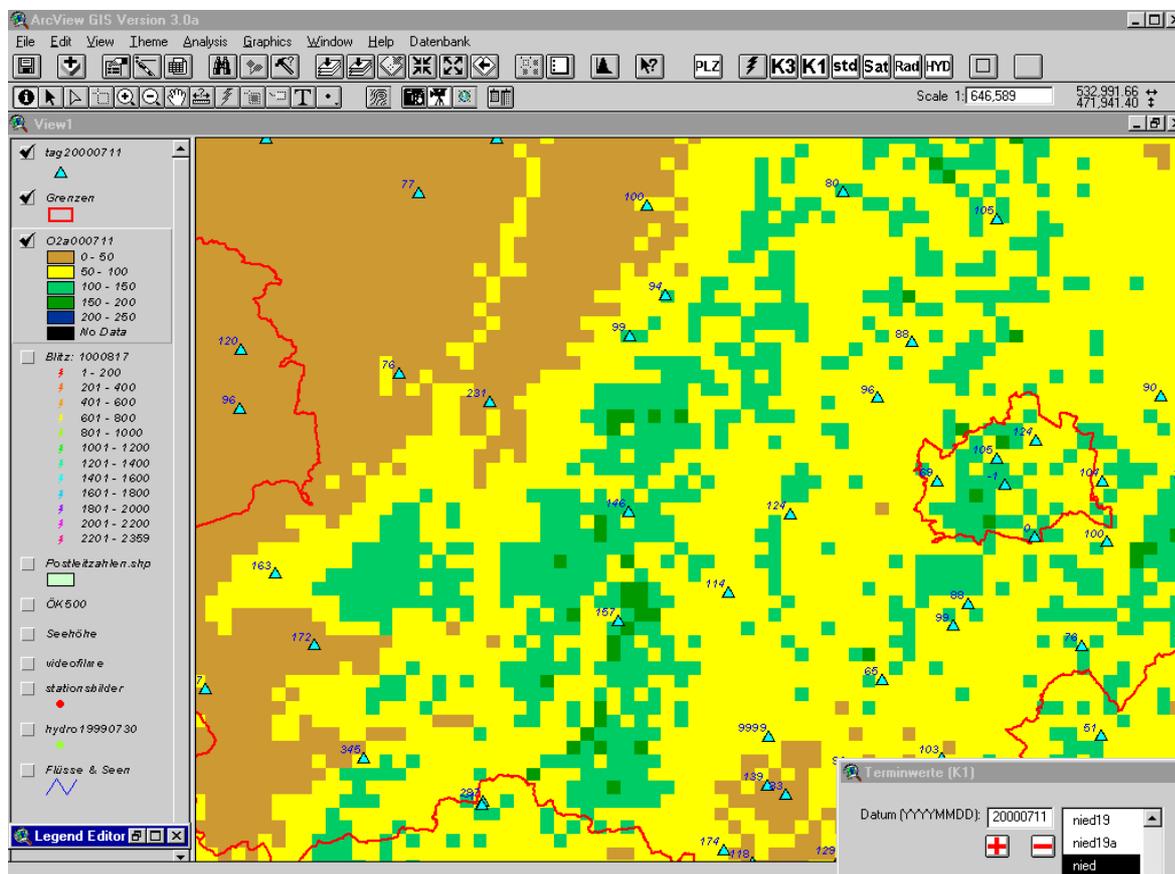


Abb. 6: Beispiel: 24 Stundensummen: Kombiniert RADAR und ZAMG – Meßnetz.

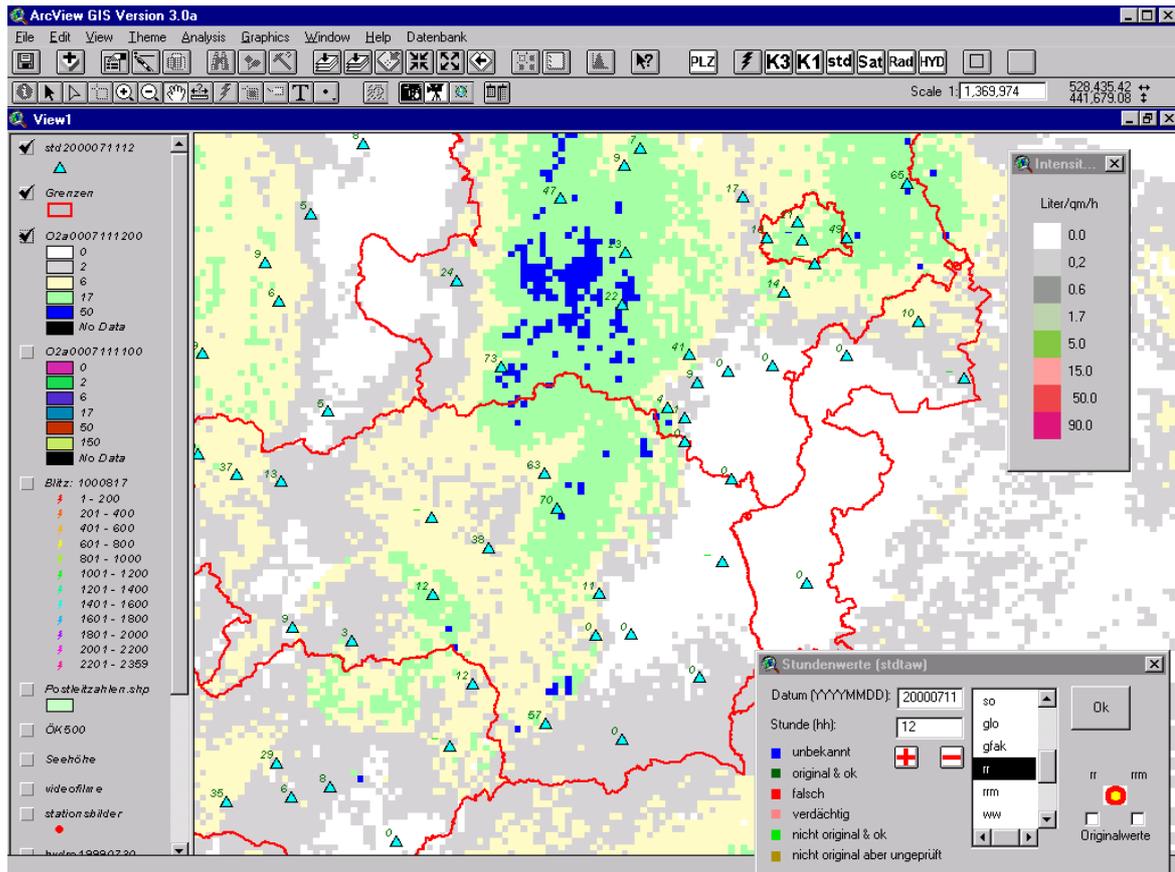


Abb. 7: Beispiel: Stundensumme RADAR – Messnetz.

Anschrift des Verfassers:

Dr. phil. Wolfgang Lipa
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Hohe Warte 38
1190 Wien
Tel.: +43 1 / 360 26 – 2207
E-mail: lipa@zamg.ac.at

METHODEN DER HYDROLOGISCHEN REGIONALISIERUNG IM ZUSAMMENHANG MIT DER NIEDERSCHLAG-ABFLUSSMODELLIERUNG

Günter Blöschl und Ralf Merz

1. Einleitung

Für die Anwendung von Niederschlag-Abflussmodellen sind Eingangsdaten sowie Modellparameter erforderlich. In vielen praktischen Fällen können diese aber nicht direkt aus Messwerten im in Frage stehenden Einzugsgebiet abgeleitet werden, da oft die Datenbasis nur unzureichend ist. Allerdings ist es meist möglich, die erforderlichen Eingangsdaten sowie Modellparameter aus benachbarten Gebieten oder in der Nähe liegenden Messungen durch regionale Übertragung zu bestimmen. Diese regionale Übertragung bezeichnet man als Regionalisierung. Wegen der großen räumlichen Variabilität und Heterogenität von hydrologischen Größen (Blöschl, 1996) sind regionale Übertragungen immer mit ziemlichen Unsicherheiten behaftet, die jedoch bei Wahl einer geeigneten Methode deutlich reduziert werden können. Deshalb kommt methodischen Aspekten bei der Regionalisierung von hydrologischen Größen besondere Bedeutung zu. Diese methodischen Aspekte sind das Thema des vorliegenden Beitrages. Die grundsätzlich im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflussmodellierung zur Verfügung stehenden Methoden werden überblicksweise dargestellt. Hinweise für die Auswahl von Methoden und mögliche Probleme bei deren Anwendung werden gegeben. Schließlich wird die aktuelle Datensituation in Österreich in Hinblick auf die Regionalisierung für die Niederschlag-Abflussmodellierung diskutiert.

Methoden der hydrologischen Regionalisierung im Zusammenhang mit der Bestimmung von Eingangsdaten sowie Modellparametern für die Niederschlag-Abflussmodellierung lassen sich in drei Kategorien einteilen. Zu der ersten zählen Interpolationsmethoden, bei denen Messwerte (z.B. Niederschlag, Bodendaten) an wenigen Punkten innerhalb des Untersuchungsgebietes bekannt sind, aus denen eine geschlossene räumlichen Verteilung zu interpolieren ist. Zu der zweiten zählen Interpolationsmethoden, die Zusatzinformationen verwenden. Im Falle des Niederschlags könnte etwa als Zusatzinformation die Seehöhe verwendet werden. Zu der dritten Kategorie zählen Ähnlichkeitsschlüsse. Dies sind keine formalen Interpolationsmethoden sondern bestehen aus einer räumlichen Übertragung von Daten, meist innerhalb homogener Gebiete. Die Annahmen, die diesen Regionalisierungsmethoden zugrunde liegen, sind besonders dann für das Ergebnis entscheidend, wenn wenige Daten vorhanden sind. Bei der Niederschlag-Abflussmodellierung ist dies oft der Fall, und darum widmet sich dieser Beitrag vor allem den bei den verschiedenen Methoden getroffenen Annahmen.

2. Interpolationsmethoden ohne Zusatzinformation

Bei räumlichen Interpolationsmethoden sind grundsätzlich deterministische und statistische Methoden zu unterscheiden. Während bei den deterministischen Methoden der zu interpolierende Werte unbekannt ist, aber als einzelner Wert existiert, wird bei den statistischen Methoden angenommen dass der zu interpolierende Wert eine Zufallsfunktion ist, also nicht als Einzelwert definiert ist, sondern durch eine statistische Verteilungsfunktion und andere statistische Kenngrößen bestimmt ist. Zu den deterministischen Methoden zählen:

(a) Die Thiessen Methode, die auch "nearest neighbour" Methode genannt wird, wobei jeder interpolierte Wert gleich dem Wert der nächsten Beobachtung gesetzt wird (Abb. 1a). Diese Interpolationsmethode entspricht in der Regel nicht einer zu erwartenden räumlichen Verteilung und ist deshalb nicht zu empfehlen.

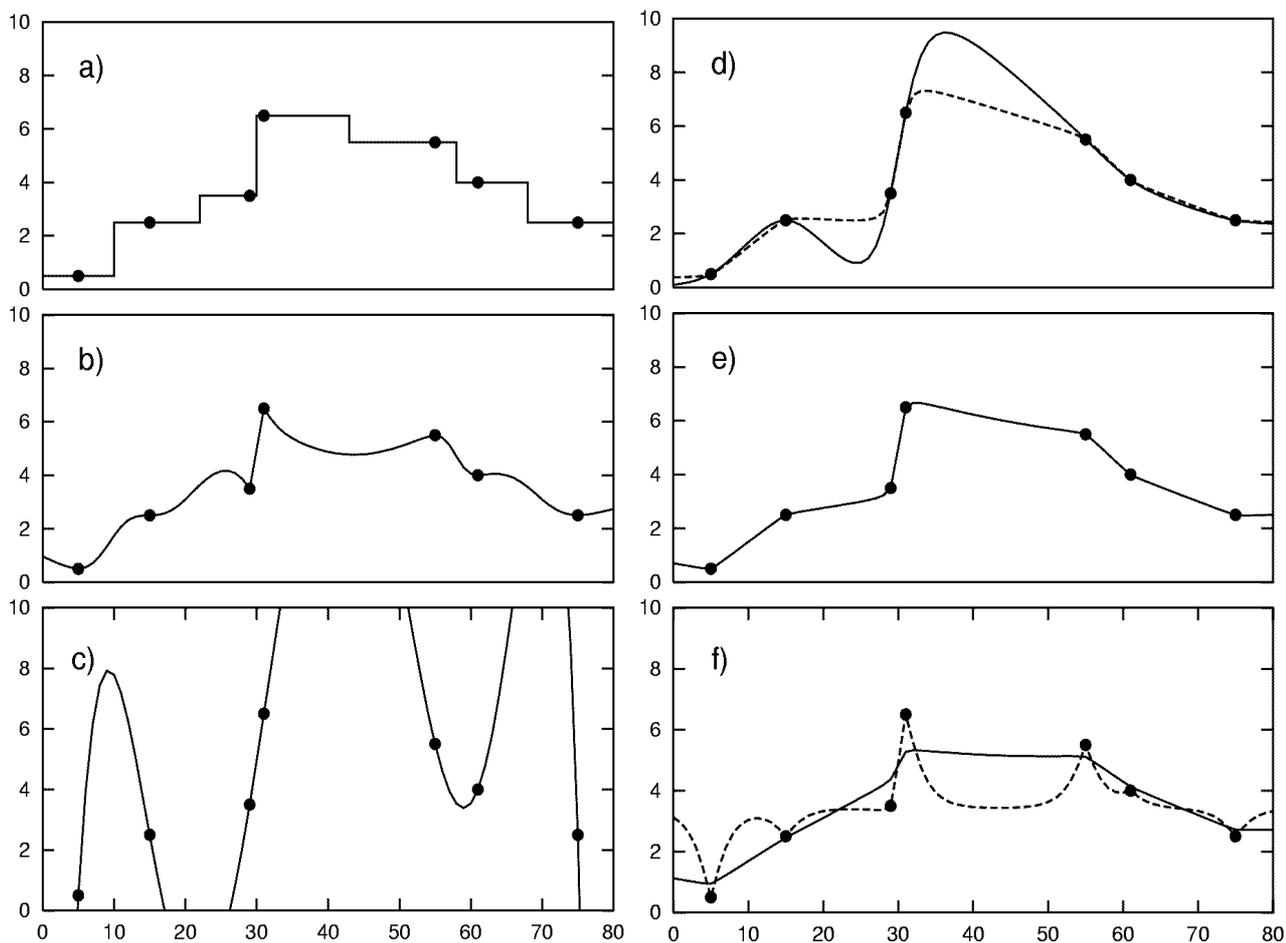


Abb. 1: Vergleich von Interpolationsmethoden für einen Längenschnitt von z.B. Niederschlag. Punkte sind Messungen und Linien sind die Interpolation: (a) Thiessen Methode; (b) Abstandsquadrat gewichtet; (c) Beispiel für "overfitting" mittels Polynom sechster Ordnung; (d) Splines mit unterschiedlichen Parametern; (e) Kriging (Nugget von 0, großer Range); (f) Kriging (durchgezogene Linie: großer Nugget, großer Range; gestrichelte Linie: Nugget von 0, sehr kleiner Range). Aus Blöschl and Grayson (2000).

(b) Eine Methode, bei der jeder interpolierte Werte als gewichtetes Mittel der Messwerte angesetzt wird und das Gewicht indirekt proportional dem Quadrat der Abstände gewählt wird. Diese Methode zeigt oft Artefakte (siehe Abb. 1b), insbesondere wenn nahe Stützstellen deutlich unterschiedliche Werte aufweisen, wie dies bei hydrologischen Größen oft der Fall ist. Diese Interpolationsmethode ist deshalb für die Regionalisierung keinesfalls zu empfehlen.

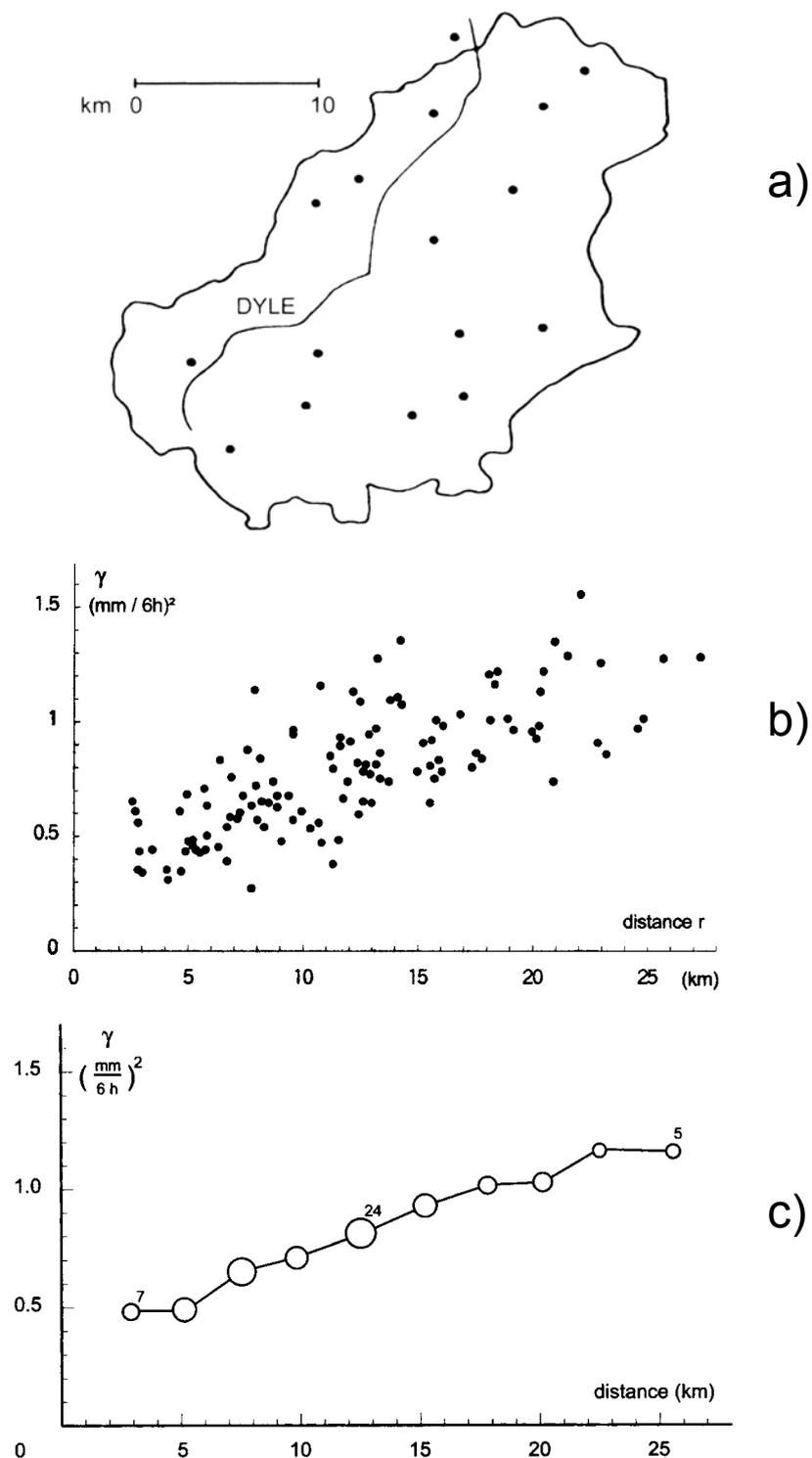


Abb. 2: Definition des Variogramms. Aus Chilès and Delfiner (1999).

(c) Gleitende Polynome, bei denen innerhalb eines Fensters ein Polynom an die Daten angepasst wird. Hier ist die Wahl der Ordnung des Polynoms wichtig. Eine zu geringe Ordnung führt zu glatten Interpolationsflächen, während eine zu große Ordnung zu einem als "overfitting" bezeichneten Effekt führt, wobei zwar die Datenpunkte genau wiedergegeben werden, die Interpolationsflächen jedoch unerwünschte Oszillationen aufweisen (Abb. 1c). Hinweise für die Wahl der Ordnung finden sich in Meijerink et al. (1994).

(d) Splines (insbesondere sog. thin plate splines). Bei dieser Methode wird die Interpolationsfläche aus einer Analogie zur Minimierung der Verformungsenergie einer dünnen Platte (der Interpolationsfläche) bestimmt. Diese Methode ist den zuvor genannten Methoden wegen ihrer Robustheit und dem günstigen Extrapolationsverhalten für viele hydrologische Anwendungen vorzuziehen. Die Glattheit kann dabei durch Wahl eines "Spannungsparameters" (Abb. 1d) vorgegeben werden, der robust aus den Daten geschätzt werden kann (Hutchinson, 1993).

Statistische (stochastische) Interpolationsmethoden sind eine Alternative zu den deterministischen Ansätzen. Dabei wird der berechnete Mittelwert für die Regionalisierung verwendet und die Varianz als Maß für die Güte der Schätzung. Insbesondere haben geostatistische Methoden in der Hydrologie weite Verwendung gefunden (siehe z.B. de Marsily, 1986; Jensen, 1989; Chilès and Delfiner, 1999). Sie basieren auf dem Variogramm, das die Varianz zwischen Punktpaaren mit einem bestimmten Abstand angibt. Abb. 2 zeigt die grundsätzliche Methode der Ermittlung eines Variogramms aus Daten. Abb. 2 oben gibt den Lageplan von Niederschlagsstationen an. Abb. 2 Mitte zeigt die halben quadrierten Differenzen des Ereignisniederschlags $(P_i - P_j)^2$ jeweils eines Stationspaares (i und j) aufgetragen gegen die räumliche Distanz h dieser beiden Stationen. Abb. 2 unten zeigt das Variogramm, das aus der Mittelung der $(P_i - P_j)^2$ für bestimmte Distanzklassen entsteht. Formelmäßig kann somit das aus Daten gewonnene (experimentelle) Variogramm wie folgt angeschrieben werden:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i,j)} (P_i - P_j)^2 \quad (1)$$

wobei, N die Anzahl der Punktpaare in jeder Distanzklasse ist. Der Variogrammwert (als γ bezeichnet) ist bei kleinen Distanzen meist klein, da die Werte bei kleinen Distanzen gut korreliert sind und deshalb die Varianz der Differenzen von Punktpaaren klein ist, doch nimmt der Gammawert mit der Distanz meist zu. Kenngrößen eines Variogramms sind der Sill, Nugget und Range (Abb. 3). Der Sill ist die Varianz aller Werte. Der Nugget ist die Varianz zweier Punkte mit einem sehr kleinen Abstand. Der Nugget kann als Messfehler interpretiert werden und als kleinräumige natürliche Variabilität auf Distanzen kleiner als der kleinste Abstand der Messwerte. Der Range ist die Entfernung, über die eine Korrelation der Variablen besteht. Bei einer geostatistischen Analyse wird zuerst das Variogramm von den Daten abgeleitet (empirisches Variogramm) und eine Ausgleichskurve angepasst (das sogenannte theoretische Variogramm). Diese Anpassung entspricht der Schätzung der statistischen Eigenschaften der Grundgesamtheit (theoretisches Variogramm) aus den

statistischen Eigenschaften der Stichprobe (aus den Daten bestimmtes, empirisches Variogramm). Für das theoretische Variogramm sind unterschiedliche Formen gebräuchlich. Ausgewählt wird die Form, die dem aus den Daten abgeleiteten Variogramm am besten entspricht, oder nach Einschätzung des Hydrologen das Verhalten der Grundgesamtheit am besten widerspiegelt. Ein Beispiel für ein theoretisches Variogramm ist das sog. exponentielle Variogramm (siehe Abb. 3a)

$$\gamma(h) = \sigma_0^2 + (\sigma_\infty^2 - \sigma_0^2) * (1 - e^{-h/\lambda}) \quad (2)$$

wobei σ_0^2 der Nugget, σ_∞^2 der Sill, and λ die Korrelationslänge ist. Das so ermittelte theoretische Variogramm wird dann für die räumliche Interpolation verwendet. Dafür stehen zahlreiche geostatistische Methoden zur Verfügung wie etwa Ordinary Kriging (Chilès and Delfiner, 1999; Deutsch, 1997). Bei nahezu allen diesen Methoden wird angenommen, dass sich der zu interpolierende Wert P^* als gewichtetes Mittel (Linearkombination) der Messwerte darstellen lässt:

$$P^* = \sum_i \lambda_i \cdot P_i \quad (3)$$

Die Gewichte λ_i können aus dem Variogramm und dem Abstand der Messwerte zueinander durch invertieren einer Matrix bestimmt werden (siehe z.B. Isaaks and Srivastava, 1989).

Der Vorteil von geostatistischen Ansätzen wie Kriging im Vergleich zu Splines ist, dass die Varianzen gut interpretierbar sind. Die Glattheit ergibt sich direkt aus dem Variogramm (Abb. 1d,e). Zufällige Messfehler können direkt im Variogramm durch Wahl des Nuggets berücksichtigt werden (Abb. 1e). Diese Vorteile stehen dem Nachteil gegenüber, dass die Bestimmung des Variogramms in der Hydrologie wegen der knappen Datensituation oft mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Abb. 1d,e zeigt Beispiele der Interpolation mit den gleichen Daten aber unterschiedlichen Variogrammen. Abb. 4 zeigt Unsicherheiten bei der Bestimmung des Variogramms, die sich zufolge einer zu geringen Anzahl von Messwerte ergibt. Bei dieser Untersuchung wurde die Bodenfeuchte in einem kleinen Einzugsgebiet in Australien (Western et al., 1998) an einem Tag an 2056 Punkten mit Hilfe von TDR Feuchtesonden gemessen. In der Regel stehen allerdings wesentlich weniger hydrologische Messungen für die Regionalisierung zur Verfügung. Deshalb wurden aus diesen 2056 Messwerten vorerst 44 Messwerte ausgewählt und daraus das Variogramm berechnet.

In einem nächsten Schritt wurden 44 andere Messwerte ausgewählt und wieder daraus das Variogramm berechnet. Dies wurde einige Male wiederholt und die verschiedenen aus einer Stichprobe von jeweils 44 Messwerten berechneten Variogramme sind in Abb. 4 oben dargestellt. Es zeigen sich erhebliche Unterschiede zwischen den Variogrammen. Erhöht man die Anzahl der Messwerte auf 86, 164 bzw. 196 (Abb. 4), werden die Unterschiede zwischen den Variogrammen kleiner und damit werden die Variogramme zuverlässiger. Aus Abb. 4 ist zu erkennen, dass eine Mindestanzahl von etwa 100 Messwerten anzustreben ist.

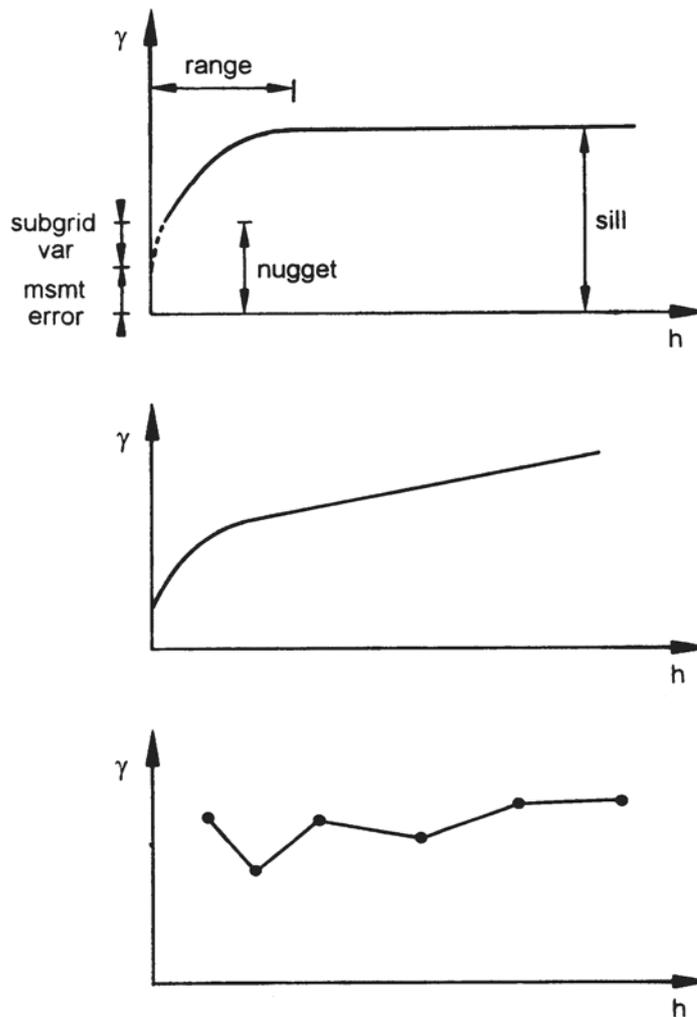


Abb. 3: (a) Variogramm einer stationären Zufallsfunktion (d.h. ohne räumlichen Trend) wobei der Nugget aus der Summe von subgrid (kleinräumiger) Variabilität und Meßfehler besteht; (b) Variogramm einer nicht-stationären Zufallsfunktion (d.h. mit räumlichen Trend); (c) Typisches experimentelles Variogramm für hydrologische Daten mit einem Range von 0 (d.h. keine räumliche Korrelation). Aus Blöschl and Grayson (2000).

Eine weitere häufige angetroffene Schwierigkeiten bei der Regionalisierung hydrologischer Größen mit Hilfe geostatistischer Verfahren sind geringe räumliche Korrelationen der Variablen (Abb. 3c), wobei hier die Messwerte so weit entfernt sind, dass sie keine Korrelationen zeigen (Abb. 3 unten). Ein drittes Problem sind sehr ungleiche Abstände der Stützstellen wie sie oft etwa bei der Interpolation von Querprofilen der Geländehöhe an einem Gewässer auftreten, bei der Interpolation von Niederschlag oder der Interpolation der Bodenfeuchte in einem Tal. Abb. 5 macht das Problem bei ungleichen Stützstellenabständen deutlich. In Abb. 5a ist eine hypothetische räumliche Verteilung von z.B. Bodenfeuchte dargestellt, wobei die dunkleren Schattierung großen Werten entspricht. In Abb. 5b sind drei Profile mit Messungen aus der Verteilung in 5a dargestellt, wobei die großen Kreise großen Messwerten entsprechen. In Abb. 5c ist die interpolierte räumliche Verteilung dargestellt, die auf Basis der Messwerte in Abb. 5b mittels Interpolation gewonnen

wurde. Diese weicht von der ursprünglich angenommenen Verteilung erheblich ab. Abhilfe bei diesen drei angeführten Problemen kann vor allem die Verwendung von Zusatzinformationen schaffen.

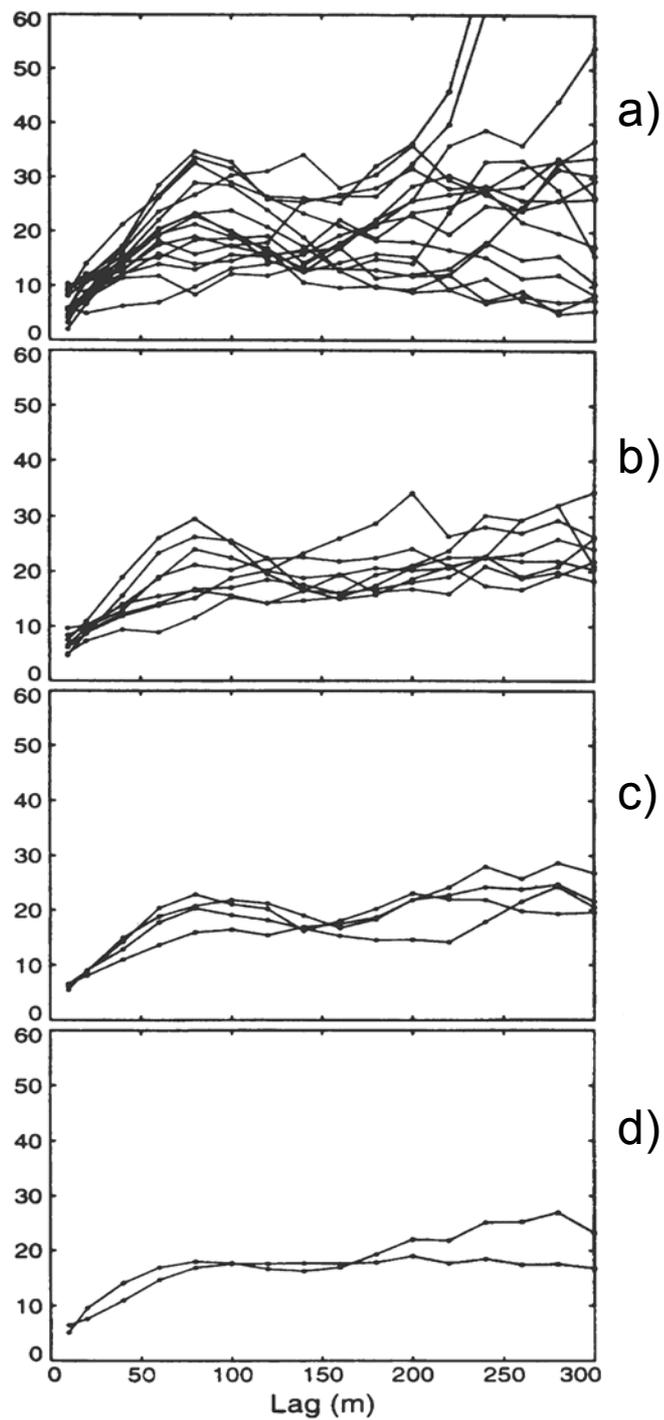


Abb. 4: Unsicherheit bei der Bestimmung des Variogramms. Bodenfeuchte am 2. Mai 1996 im Tarrarragebiet, Australien. Aus Western et al. (1998).

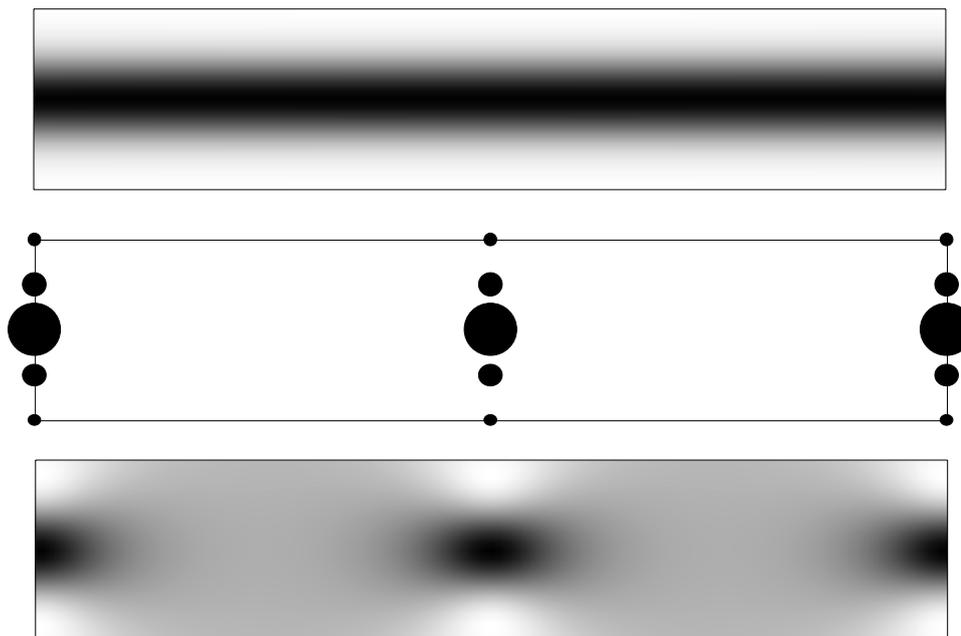


Abb. 5: Probleme die bei der Interpolation auftreten können, wenn die räumlichen Abstände der Messungen ungleichmäßig sind. (a) Hypothetische räumliche Verteilung von z.B. Bodenfeuchte (dunkle Schattierung entspricht großen Werten); (b) Meßwerte (große Kreise entsprechen großen Meßwerten); (c) interpolierte räumliche Verteilung unter Verwendung der Messungen in (b).

3. Interpolation mittels Zusatzinformationen

Für die Hydrologie sind hier besonders zwei Typen von Interpolationsmethoden von Interesse. Die erste wird i.a. als Georegression bezeichnet und besteht darin, in einem ersten Schritt eine Regression der zu interpolierenden Größe (z.B. Niederschlag) mit einer Zusatzvariablen (z.B. Seehöhe) aufzustellen. Mittels der Regressionsgleichung wird dann für alle Punkte, an denen Zusatzinformation vorhanden ist, die Größe (z.B. der Niederschlag) bestimmt. Dann werden die Residuen (Beobachtung minus der aus der Regression bestimmter Wert) räumlich interpoliert und hinzugezählt. Georegression wird z.B. für die räumliche Interpolation des Niederschlages verwendet, wenn eine Seehöhenabhängigkeit zu erwarten ist (siehe z.B. Obled, 1990; Goovaerts, 2000). Ein anderes Beispiel ist die Interpolation der Bodenfeuchte, wenn topographische Kenngrößen wie etwa der topographische Index (siehe Gl. 5) oder Hangexposition als Zusatzinformation verwendet werden (z.B. Western et al., 1999).

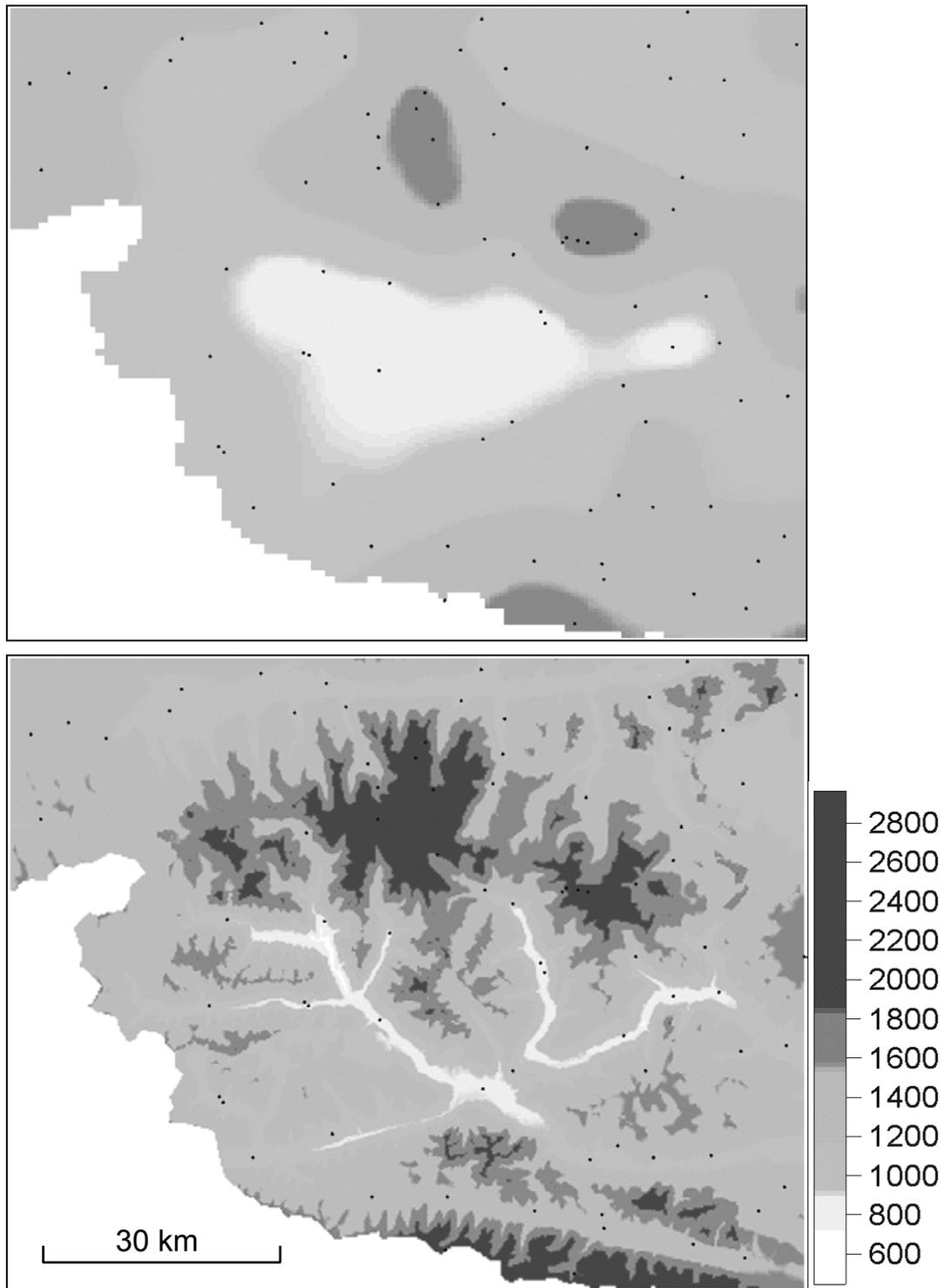


Abb. 6: Ein Beispiel für die Verwendung von Zusatzinformation bei der Regionalisierung: (a) Jahresniederschlag in Österreich interpoliert mit Ordinary Kriging; (b) Jahresniederschlag in Österreich interpoliert mit External Drift Kriging.

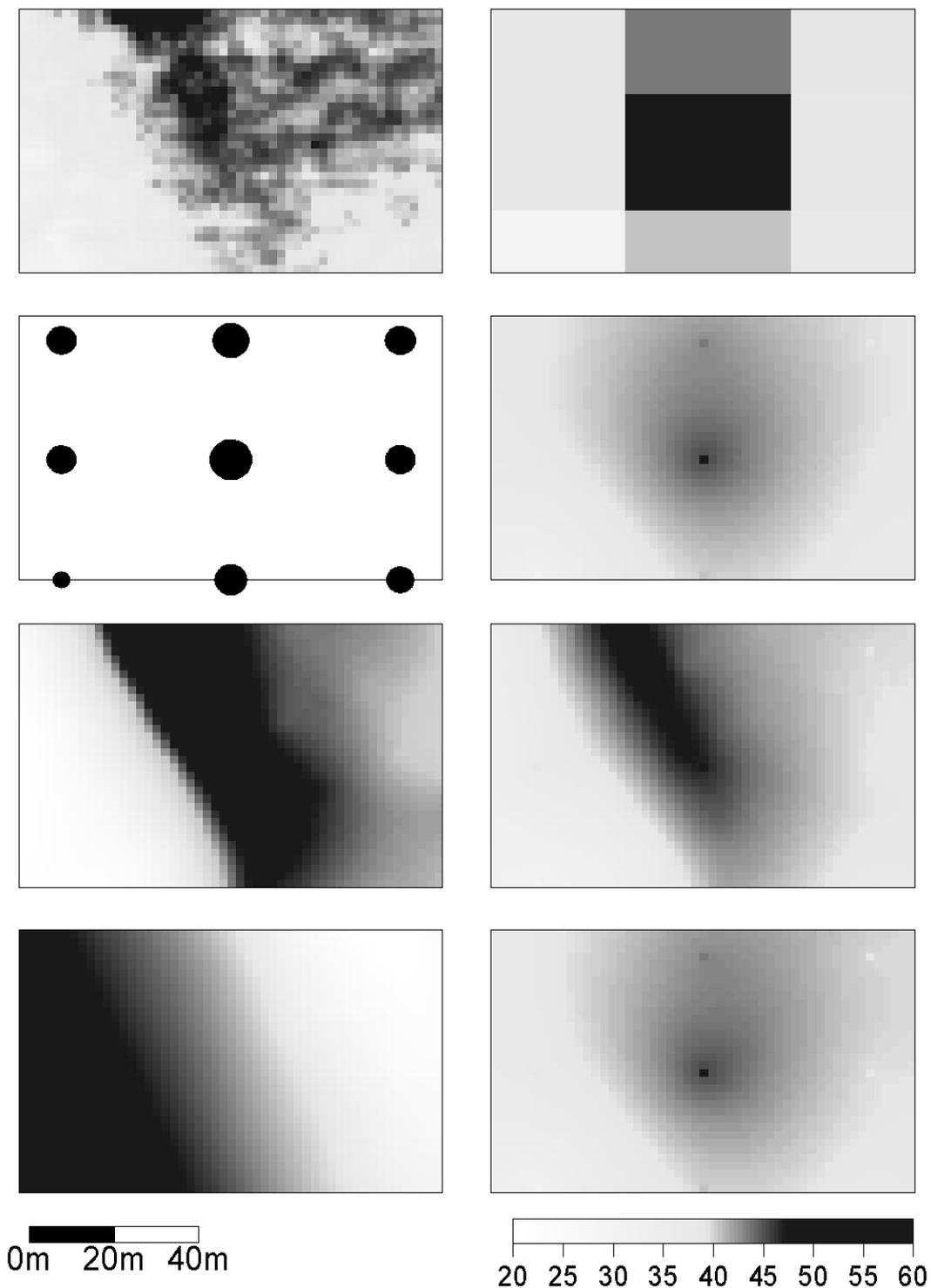
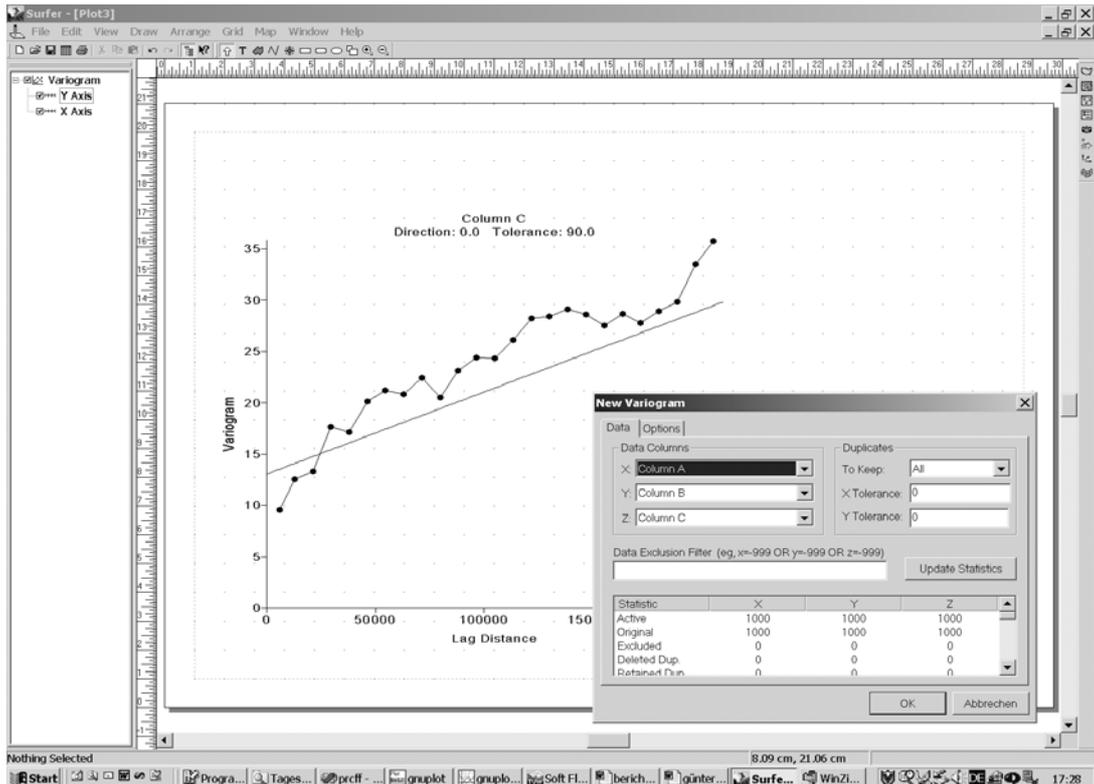
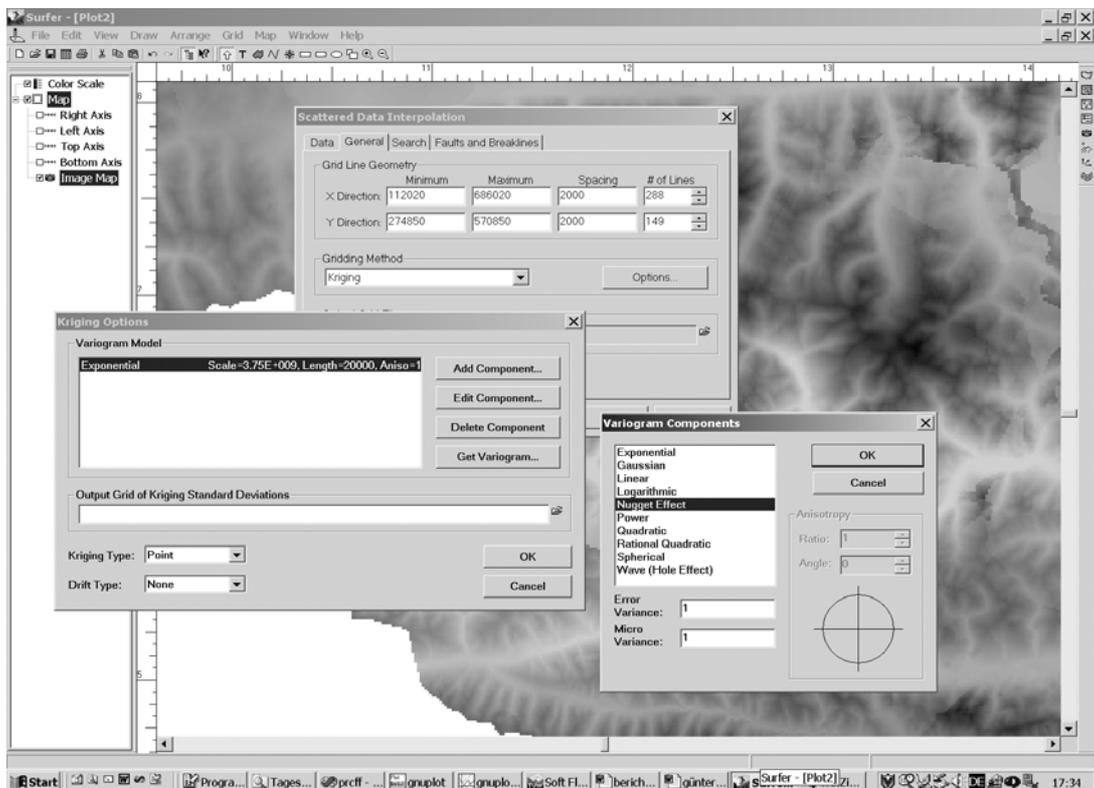


Abb. 7: (a) Gemessene Bodenfeuchte in den obersten 30 cm (Raster von 2 * 2m) auf einer Wiese von 100 * 66 m Fläche am 25. Okt. 1996 (Blöschl and Grayson, 2000). (b) Neun Feuchtwerte (Raster von 40 * 30 m) die dem Muster in (a) entnommen wurden (große Kreise - feucht, kleine Kreise - trocken). (c) Zusatzinformation kombinierter Feuchte-Strahlungsindex. (d) Zusatzinformation Hangorientierungsindex. (e-h) Mit unterschiedlichen Methoden interpolierte Feuchte unter Verwendung der neun Werte aus (b). (e) Thiessen Methode. (f) Ordinary Kriging. (g) External Drift Kriging mit dem kombinierten Feuchte-Strahlungsindex als Zusatzinformation. (h) External Drift Kriging mit dem Hangorientierungsindex als Zusatzinformation. Bodenfeuchte in Volumsprozent (20-60%). Geeignete Zusatzinformation verbessert die Regionalisierung (g), ungeeignete Information jedoch nicht (h).



a)



b)

Abb. 8: Beispiel einer Anwendungssoftware für die räumliche Interpolation: SURFER von Golden Software.

Zu der zweiten Kategorie zählen verschiedene geostatistische Methoden, insbesondere External Drift Kriging und Cokriging, bei der die Korrelationen zwischen der hydrologischen Größe und der Zusatzvariablen verwendet werden (z.B. Goovaerts, 2000). Während bei Cokriging die Korrelationen zwischen der hydrologischen Größe und der Zusatzvariablen direkt durch ein Kovariogramm formuliert wird (z.B. Kupfersberger and Blöschl, 1995), wird beim External Drift Kriging angenommen, dass die Zusatzvariablen perfekt mit der hydrologischen Größe korreliert ist. Dementsprechend wird beim External Drift Kriging die räumliche Struktur der Zusatzvariablen der interpolierten Fläche im Detail aufgeprägt. Ein Beispiel für die Verwendung von Zusatzinformation bei der Regionalisierung des mittleren Jahresniederschlag in Osttirol zeigt Abb. 6. Während die Regionalisierung in Abb. 6a durch Verwendung von Kriging (ohne Zusatzinformation) entstand, wurde bei Abb. 6b die Seehöhe als Zusatzinformation für External Drift Kriging verwendet. Abb. 6b zeigt die Feinstruktur mit geringen Niederschlagswerten in den Tälern und großen Werten in den Hochlagen. Diese räumliche Struktur (Abb. 6b) ist realistischer, als der ohne Zusatzinformation interpolierte Jahresniederschlag (Abb. 6a).

Entscheidend bei allen Interpolationsverfahren, die Zusatzinformationen verwenden, ist die geeignete Wahl der Zusatzvariablen. Während geeignete Variablen die Interpolation verbessern (z.B. Abb. 6), können ungeeignete Variablen die Interpolation sogar verschlechtern (siehe z.B. Blöschl and Grayson, 2000). Die Eignung lässt sich aus Korrelationen und anderen statischen Gegenüberstellungen bestimmen. Auch Expertenwissen, das eine solche Eignung auf Basis vom grundsätzlichen Verhalten hydrologischer Größen ableitet, ist geeignet. Beispiele sind der Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität und Geländeneigung oder der Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und dem topographischen Bodenfeuchteindex (Beven and Kirkby, 1979). Von der Topographie abgeleitete Größen (wie die Seehöhe aber auch topographische Indizes, siehe Moore et al., 1991; Costa-Cabral and Burges, 1994) sowie mittels Fernerkundung bestimmte Größen kommen als Zusatzvariablen besonders in Frage, da sie meist in hoher räumlicher Auflösung vorliegen.

Abb. 7 zeigt ein Beispiel, das verdeutlicht, dass geeignete Zusatzinformation die Regionalisierung verbessert, ungeeigneter Information jedoch nicht. Abb. 7a zeigt die auf einem Raster von 2 * 2m gemessene Bodenfeuchte auf einer Wiese von 100 * 66 m Fläche. Dunkle Werte sind feuchte Flächen, helle Werte sind trockene Flächen. Dieses Muster wird als die richtige Verteilung angesehen. Für die meisten hydrologischen Modellanwendungen liegen die Messwerte jedoch mit einer viel schlechteren Auflösung vor. Deshalb wurden aus diesem Muster neun Messwerte auf einem Raster von 40 * 30 m entnommen (Abb. 7b). Diese neun Werte wurden dann für die Interpolation mit verschiedenen Methoden verwendet. Abb. 7e zeigt die Interpolation mittels Thiessen Methode, Abb. 7f die Interpolation mittels Ordinary Kriging (d.h. ohne Zusatzinformation). In beiden Fällen wird das richtige Muster nicht sehr gut wiedergegeben. Abb. 7g zeigt die Interpolation unter Verwendung geeigneter Zusatzinformation, und Abb. 7h die Interpolation unter Verwendung ungeeigneter Zusatzinformation. Die Verteilung in Abb. 7g ist wesentlich besser als die anderen

Verteilungen, während die Verteilung in Abb. 7h ist genauso schlecht ist wie der Fall, in dem keine Zusatzinformation verwendet wurde (Abb. 7f).

Für die Interpolation hydrologischer Größen mit und ohne Zusatzinformationen stehen zahlreiche Softwarepakete zur Verfügung. Zu diesen zählen Geographische Informationssysteme wie etwa ARC-Info (siehe z.B. DeMers, 2000) oder spezielle Programmsysteme wie etwa GSLIB (Deutsch and Journel, 1997). Ein einfaches und für die räumliche Interpolation sehr geeignetes Softwarepakete ist SURFER (Golden Software, 2001). Ein Beispiel der Softwareoberfläche von SURFER zeigt Abb. 8.

4. Ähnlichkeitsschlüsse

Die oben diskutierten Verfahren der Interpolation mittels Zusatzinformationen können verwendet werden, wenn sowohl Daten der zu interpolierenden Variablen (z.B. Niederschlag) als auch Daten der Zusatzvariablen (z.B. Geländehöhe) im oder in der Nähe des Untersuchungsgebietes vorhanden sind. In vielen Fällen sind nur Daten der Zusatzinformationen vorhanden, und Messungen der eigentlichen (zu regionalisierenden) Variablen stehen nicht zur Verfügung. In diesem Fall werden verschiedene Arten von Ähnlichkeitsschlüssen verwendet. Diese Verfahren können mitunter aus ziemlich komplexen Modellen der regionalen Übertragung bestehen oder aus sehr einfachen qualitativen Analogieschlüssen.

Zu den am häufigsten verwendeten Verfahren der regionalen Übertragung mittels Ähnlichkeitsschlüssen zählen Regressionsansätze zwischen den gesuchten Werten (meist Modellparametern) und breitenverfügbaren Gebietseigenschaften (wie etwa Bodenart und Landnutzung). Dabei werden diese Regressionsbeziehungen oft nicht für das Untersuchungsgebiet aufgestellt sondern aus der Literatur oder aus eigenen Daten in ähnlichen Gebieten übernommen. Zahlreiche Regressionsbeziehungen sind in der Literatur verfügbar, die in speziellen Studien bestimmt wurden. Allerdings ist die Übertragbarkeit für praktische Anwendungen nicht immer gegeben.

Ein wichtiges Beispiel für solche Ansätze sind Pedotransferfunktionen (z.B. Romano and Santini, 1997; Elsenbeer, 2001). Bei Pedotransferfunktionen werden hydraulische Bodeneigenschaften (wie die Saugspannungskurve oder die hydraulische Leitfähigkeit) als Funktion des Bodentyps bzw. Korngrößenverteilung (ausgedrückt als Anteile von Sand, Schluff und Ton) angegeben (Abb. 9). Eine typische Pedotransferfunktion ist (Rawls et al., 1983):

$$\theta(h_i) = a_i + b_i \cdot Sa + c_i \cdot Si + d_i \cdot Cl + e_i \cdot Om \quad (4)$$

Dabei ist θ der volumetrische Wassergehalt (-), h_i ist die Saugspannung (kPa), Sa ist der Gehalt an Sand, Si ist der Gehalt an Schluff, Cl ist der Gehalt an Ton, und Om ist der organische Anteil des Boden (jeweils in %). Typische Parameter dieser Pedotransferfunktion sind in Tabelle 1 angegeben.

Tab. 1: Typische Parameter für die Pedotransferfunktion nach Rawls et al. (1983). Aus Romano and Santini (1997).

h_i (kPa)	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
10	0.4118	-0.0030	0	0.0023	0.0317
100	0.0349	0	0.0014	0.0055	0.0251

Pedotransferfunktionen sind attraktiv, da sie auch für Gebiete ohne hydrologische Messungen leicht anwendbar sind. Insbesondere hat der zunehmende Einsatz von Geographischen Informationssystemen in den letzten Jahren vermehrt zur Verwendung von Pedotransferfunktionen geführt. Leider zeigen Feldstudien oft, dass die Korngrößenverteilung nicht sehr aussagekräftig für die hydraulischen Bodeneigenschaften ist. Makroporen und andere Struktureigenschaften sind oft viel wichtiger. Dies führt dazu, dass oft hydraulische Bodeneigenschaften innerhalb des gleichen Bodentyps genauso variieren wie zwischen verschiedenen Bodentypen (z.B. Warrick et al., 1990; Gessler et al., 1995). Im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflußmodellierung ergeben deshalb Pedotransferfunktionen oft keine sehr genauen Werte. Eine Alternative ist die Verwendung von in ähnlichen Gebieten geeichten Modellparametern von Niederschlag-Abflussmodellen, die durch Analogieschlüsse (siehe unten) räumlich übertragen werden.

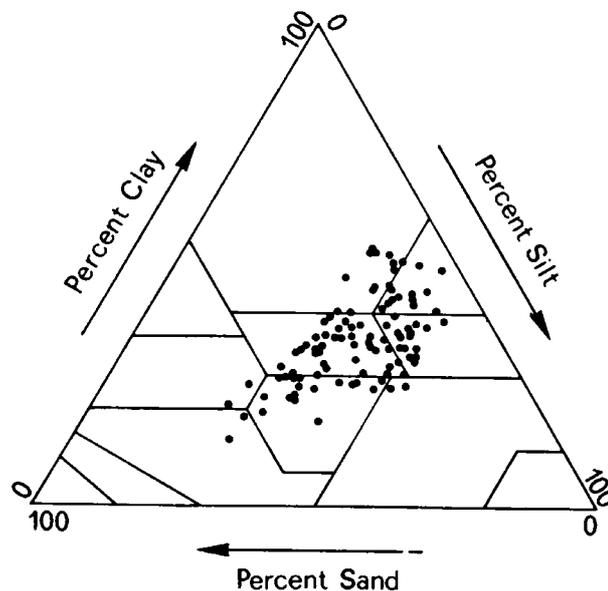


Abb. 9: Definition der Textur (Anteile von Sand, Schluff und Ton) für die Verwendung in Pedotransferfunktionen. Aus Romano and Santini (1997). Jeder Punkt stellt einen Boden dar. Böden mit einem gleichen Tonanteil liegen auf einer horizontalen Linie.

Ein anderes wichtiges Beispiel für Regressionsansätze, die für die Regionalisierung von bei der Niederschlag-Abflußmodellierung verwendeten Modellparametern Anwendung finden, sind Ansätze zur Abschätzung von Ereignisabflussbeiwerten aus

Bodeneigenschaften, Landnutzung und anderen Gebietskenngrößen. Das wohl am häufigsten dafür verwendete Verfahren ist das SCS-CN Verfahren (Soil Conservation Service - Curve Number Verfahren (US-SCS, 1972; DVWK, 1984;), bei dem der Ereignisabflussbeiwert als Funktion des Ereignisniederschlages und einer Kurvennummer angegeben wird. Die Kurvennummer wiederum ist tabelliert für verschiedene Bodeneigenschaften, Landnutzung und Vorbefeuchtung angegeben (z.B. DVWK, 1984). Diese Angaben wurden aus beobachteten Ereignissen in vielen Gebieten mittels Regressionen (oder ähnlichen Gegenüberstellungen) rückgerechnet. Auch bei dem SCS-CN Verfahren (und ähnlichen Ansätzen) gilt, dass sie für Gebiete ohne hydrologische Messungen leicht anwendbar sind und sich für die Verwendung mittels Geographischen Informationssystemen sehr gut eignen. Allerdings passen die tabellierte Standardangaben je nach Region unterschiedlich gut. Deshalb werden Standardwerte manchmal abgeändert, um eine bessere Anpassung an in einer konkreten Region beobachteten Abflussbeiwerten zu erzielen. Eine neuere Arbeit, bei dem eine Rückrechnung unter Verwendung von Abflussmessungen von etwa 100 kleinen Einzugsgebieten im südbayerischen Donaauraum durchgeführt wurde, ist Koehler (1999).

Weitere Modellparameter, die auf Basis von Regressionsbeziehungen regional übertragen werden sind Angaben für die Speicherkonstante von Einzugsgebieten (bzw. der Scheitelverzögerungszeit) als Funktion von Bodeneigenschaften sowie Geländeeigenschaften (z.B. Lutz, 1984), sowie Angaben für die Oberflächenrauigkeit (z.B. n Wert nach Manning) als Funktion des Oberflächeneigenschaften bzw. Landnutzung (z.B. Chow, 1959). Eine wichtige Anwendung sind auch hydrologische Modelle, bei denen die Modellparameter auf Basis der Landnutzung gewählt werden. Bei Wasserbilanzmodellen, besonders für kleine Gebiete, werden Modellparameter für die Verdunstung und Interzeption oft auf Basis von standardisierten Tabellen als Funktion der Landnutzung angesetzt (z.B. Müller und Münch 1997). Auch für größerer Gebiete ist das eine häufige Vorgangsweise, besonders wenn nur wenige hydrologische Daten für die Modelleichung zur Verfügung stehen. Ein Beispiel ist das SLURP –Modell (Kite, 1995), das für die Kanadischen Prärien entwickelt wurde. Bei diesem Modell werden auch Parameter der Abflussbildung und Abflusskonzentration (Abflussbeiwert, Speicherkonstanten) als Funktion der Landnutzung angesetzt. Die Landnutzung wird bei diesem und anderen Modellen durch den Blattflächenindex LAI beschrieben, der als Verhältnis zwischen Blattoberfläche und Geländegrundfläche definiert ist. Werte des Blattflächenindex liegen typischerweise in der Größenordnung von $LAI = 1$ für Wiese und $LAI = 10$ für Nadelwald (z.B. Dingman, 1994).

Zwei Alternativen zu den Regressionsansätzen sind gebräuchlich. Die eine Alternative sind Analogieschlüsse. Sie bestehen aus einer direkten Übertragung von Modellparametern, Bemessungsniederschlägen etc. aus ähnlichen Gebieten. Zentral für diesen Ansatz ist die hydrologische Ähnlichkeit zwischen dem Gebiet, in dem die Daten vorhanden sind und dem Gebiet, für das die Modellparameter oder Eingangsdaten für die Niederschlag-Abflußmodellierung abzuschätzen sind. Oft wird dabei die hydrologische Ähnlichkeit nicht explizit definiert sondern durch

Experteneinschätzung gewählt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die persönliche Erfahrung aus Feldbeobachtungen oder Datenanalysen eingebracht werden kann, und dass verschiedene Faktoren gesamtheitlich berücksichtigt werden können. Ohne die hydrologischen Prozesse im Detail zu kennen, reicht eine korrekte Einschätzung der Ähnlichkeit zweier Gebiete oft aus, sehr zuverlässige Werte abzuschätzen. Diese Methode ergibt deshalb oft genauere Werte als andere Regionalisierungsmethoden. Analogieschlüsse wurden und werden oft in praktischen hydrologischen Anwendungen verwendet. Der Nachteil dieses Ansatzes ist allerdings, dass er nicht leicht automatisiert werden kann, da es schwierig ist, geeignete Ähnlichkeitsmaße zu quantifizieren (siehe z.B. Blöschl and Sivapalan, 1995)

Die zweite Alternative besteht aus einer räumlichen Übertragung mittels Hüllkurven. Derartige Ansätze kommen vor allem für extreme Ereignisse in Frage, etwa für die Bestimmung von Bemessungsniederschlägen oder Bemessungsabflüssen. Die grundlegende Annahme dieses Ansatzes besteht darin, dass eine Region als einigermaßen homogen angenommen wird. Ist ein extremes Ereignis in einem beliebigen Gebiet innerhalb dieser Region zumindest einmal aufgetreten, so kann angenommen werden, dass das Auftreten eines Ereignisses der gleichen Größenordnung auch im Untersuchungsgebiet möglich ist. Der große Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass er datenbasiert ist und tatsächlich beobachtete Ereignisse direkt verwendet werden können. Ein gewisser Nachteil besteht darin, dass die Homogenität einer Region nicht immer mit Sicherheit angegeben werden kann. In gewisser Weise ist die Homogenität einer Region äquivalent mit der hydrologischen Ähnlichkeit der Gebiete im zuvor diskutierten Ansatz der Analogieschlüsse. Ein anderer Nachteil des Hüllkurvenansatzes besteht darin, dass es schwierig ist, eine genaue Jährlichkeit für die regionalisierten Werte anzugeben, da meist von einem Größtereignis innerhalb einer Region ausgegangen wird. Eine Größenordnung der Jährlichkeit kann allerdings mit der Stationsjahr-Methode abgeschätzt werden. Kann angenommen werden, dass das Auftreten von extremen Ereignissen in einer Region statistisch unabhängig ist, so ergibt sich die Jährlichkeit des größten Ereignisses in der Region als das Produkt der Anzahl der Stationen und der mittleren Anzahl der Beobachtungsjahre dieser Stationen. Oft ist bei der Bestimmung von Bemessungswerten eine genaue Angabe der Jährlichkeit nicht notwendig. Deshalb und wegen des datenbasierten Ansatzes ist die Hüllkurvenmethode ein für praktische Anwendungen sehr interessanter Ansatz. Gutknecht et al. (2002) bestimmen extreme Bemessungsniederschläge unterschiedlicher Dauerstufen (30 Minuten bis 9 Stunden) in Österreich mit Hilfe eines Hüllkurvenansatzes und zeigen, dass die mit diesem Verfahren ermittelten Niederschlagsintensitäten für Bemessungszwecke besser geeignet sind als derzeit vorhandene alternative Verfahren (Kreps und Schimpf, 1965).

5. Beispiel: NA-Modellierung und Regionalisierung im UK-Flood Estimation Handbook

Ein ausgezeichnetes Beispiel für die Bestimmung von Eingangsdaten und Modellparametern für die Niederschlag-Abflußmodellierung in Gebieten ohne Direktmessungen ist das UK Flood Estimation Handbook (FEH; Institute of Hydrology, 1999). Bei diesem Handbuch handelt es sich um einen Leitfaden zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen bestimmter Jährlichkeit in Großbritannien. Es ersetzt den Flood Studies Report aus dem Jahr 1975. Das FEH besteht aus fünf Bänden zu den folgenden Themen: Überblick, Niederschlagsstatistik, Hochwasserstatistik, Niederschlag-Abfluss Berechnungen, und Gebietseigenschaften. Methodisch verfolgt das FEH zwei Ansätze, nämlich Hochwasserstatistik (lokal und regional) und Niederschlag-Abfluss Berechnungen. Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die methodischen Grundsätze bei der regionalen Bestimmung von Eingangsdaten und Modellparameter für die Niederschlag-Abflußmodellierung gegeben werden.

Regionalisierung des Bemessungsniederschlags: Für die Niederschlag-Abflussberechnungen sind vorerst Bemessungsniederschläge bestimmter Jährlichkeit und Dauer zu wählen. Im FEH wurde eine Niederschlagsstatistik unter Verwendung von 6000 Stationen mit Tageswerten und 375 Stationen mit Stundenwerten durchgeführt. Eine räumliche Interpolation der Stationswerte von $P_{med}(D)$ (des Medians der maximalen jährlichen Niederschläge bestimmter Dauer D) wurde mittels Georegression durchgeführt (siehe Abschnitt 3 dieses Beitrages). Als Zusatzvariablen wurden dabei die Seehöhe, ein Kontinentalitätsindex (in diesem Fall Abstand von Nordfrankreich), sowie ein Abschattungsindex verwendet. Bei den Zusatzvariablen handelt es sich also ausschließlich um Geländeparameter. Die dimensionslosen Niederschlagswahrscheinlichkeitskurven (d.h. $P^* = P(T, D) / P_{med}(D)$, wobei T die Jährlichkeit ist) wurden ebenfalls regionalisiert. Hier wurde allerdings eine Methode auf Basis von Analogieschlüssen (siehe Abschnitt 4 dieses Beitrages) gewählt. Dabei wurden mehrere Stationen einer homogenen Region zu einem Datenkollektiv zusammengefasst (d.h. gepoolt), wodurch auch Niederschläge größerer Jährlichkeiten zuverlässig bestimmt werden können. Schließlich wurde durch $P(T, D) = P^* \cdot P_{med}(D)$ die Niederschlagshöhe als Funktion von Dauer und Jährlichkeit für zahlreiche Rasterpunkte in Großbritannien berechnet. An diese Werte wurde im FEH nun für jeden Rasterpunkt eine sechsparameterige Funktion angepasst:

$$\ln P = (c \cdot y + d_1) \cdot \ln D + e \cdot y + f \quad \text{für } D < 12\text{h} \quad (5)$$

$$\ln P = \ln P_{12} + (c \cdot y + d_2) \cdot (\ln D - \ln 12) \quad \text{für } 12 < D \leq 48\text{h}$$

$$\ln P = \ln P_{48} + (c \cdot y + d_3) \cdot (\ln D - \ln 48) \quad \text{für } D > 48\text{h}$$

$$\text{mit } y = -\ln(-\ln(1 - 1/T))$$

wobei P die Niederschlagshöhe (mm), D die Niederschlagsdauer (h), T die Jährlichkeit (Jahre) und P_{12} bzw. P_{48} die Niederschlagshöhen für eine Dauer von 12 bzw. 48 Stunden der gleichen Jährlichkeit T sind. Für die Parameter werden 6 Rasterkarten angegeben und daraus lässt sich die Niederschlagshöhe für jeden Punkt in

Großbritannien ablesen. Das FEH empfiehlt also einen datenbasierten Ansatz, der auch für Österreich in abgewandelter Form sinnvoll erscheint.

Für die maßgebende Niederschlagsdauer D wird eine Gleichung als Funktion der Scheitelverzögerungszeit und des mittleren Jahresniederschlags angegeben:

$$D = (1 + SAAR/1000) \cdot t_p \quad (6)$$

wobei $SAAR$ der mittlere jährliche Niederschlag (mm) und t_p die Scheitelverzögerungszeit sind. Für den Fall, dass in einem Gebiet keine Direktmessungen des Abflusses vorliegen, wird im FEH betont, dass die Scheitelverzögerungszeit womöglich aus einem Vergleich mit ähnlichen Gebieten mit Abflussmessungen zu bestimmen ist (d.h. Analogieschlüsse), da bei Verwendung von Regressionsbeziehungen zu Gebietseigenschaften (z.B. Gebietsfläche, Seehöhe etc.) Fehler von t_p im Bereich von mehreren hundert Prozent auftreten können. Diese Aussage ist auch für Österreich gültig (Merz et al., 1999).

Für die Wahl der Jährlichkeit des Niederschlags wird im FEH eine Gleichung als Funktion der gewünschten Jährlichkeit des Abflusses angeführt. Ist beispielsweise eine Jährlichkeit des Abflusses von 100 Jahren gesucht, so ist die Jährlichkeit des Niederschlags mit 140 Jahren zu wählen. Die Beziehung wurde aus umfangreichen Untersuchungen in britischen Einzugsgebieten abgeleitet. Allerdings gelten diese Angaben freilich nur für die im FEH angegebenen Modelle sowie Parameter und für britische Verhältnisse. Die Zuordnung zwischen Jährlichkeit des Niederschlags und Jährlichkeit des Abflusses ist nämlich eine Funktion der Wahl der Modellparameter (z.B. Abflussbeiwert) sowie der Eingangsdaten (z.B. zeitliche Verteilung des Niederschlags innerhalb eines Ereignisses) (siehe z.B. Sivapalan and Blöschl, 1996). Deshalb lassen sich für andere Niederschlag-Abflussmodelle und andere Methoden zur Bestimmung der Eingangsdaten sowie Modellparameter (etwa für österreichische Verhältnisse) keine allgemeingültigen Aussagen über die geeignete Wahl der Jährlichkeit des Niederschlags geben.

Regionalisierung von Modellparametern für das NA-Modell: Das FEH unterscheidet Modellparameter, die die Abflussbildung und die Abflusskonzentration wiedergeben. Die Abflussbildung wird mit einem Abflussbeiwertansatz beschrieben, wobei der Abflussbeiwert PR als Summe eines Beiwertes für die Bodeneigenschaften und eines Beiwertes für die dynamischen Ereigniseigenschaften formuliert wird (SPR bzw. DPR):

$$PR = SPR + DPR \quad (7)$$

Der Beiwert für die Bodeneigenschaften wird als Funktion von Landnutzung und Versiegelung angesetzt und der Beiwert für die dynamischen Eigenschaften wird als Funktion von Bodenfeuchte und Ereignisniederschlagshöhe angesetzt. Je nach Datenlage können diese Beiwerte auf unterschiedliche Weise bestimmt werden. Bei Vorliegen von Abflussmessungen sind diese Beiwerte jedenfalls aus den Abflussdaten rückzurechnen. Liegen keine Direktmessungen des Abflusses vor, so sind die Beiwerte durch Analogieschlüsse aus ähnlichen Gebieten abzuleiten. Nur als letzte Möglichkeit

sind die Beiwerte aus den Gebietseigenschaften zu bestimmen, da diese Beziehungen mit einem großen Streubereich behaftet sind.

Die Abflusskonzentration wird mit einer Einheitsganglinie (Unit Hydrograph) beschrieben. In ähnlicher Weise wie bei der Abflussbildung ist die Einheitsganglinie, je nach Datenlage, auf unterschiedliche Weise zu bestimmen. Bei Vorliegen von Abflussmessungen ist sie jedenfalls aus den Abflussdaten rückzurechnen. Falls nur eine kleine Anzahl von Ereignissen beobachtet wurde, wird empfohlen, die Scheitelverzögerungszeit t_p aus den Abflussdaten zu bestimmen und eine dreiecksförmige Einheitsganglinie anzusetzen. Die Scheitelverzögerungszeit ist nämlich eine weitaus wichtigere Bestimmungsgröße der Ganglinie in Hinblick auf die Simulationsergebnisse des Abflusses als etwa die Schiefe und andere Formparameter der Ganglinie. Liegen keine Direktmessungen des Abflusses vor, so ist die Einheitsganglinie durch Analogieschlüsse aus ähnlichen Gebieten abzuleiten. Nur als letzte Möglichkeit ist sie aus den Gebietseigenschaften zu bestimmen, da diese Beziehungen mit einem großen Streubereich behaftet sind. Eine Bestimmungsgleichung als Funktion der Gebietseigenschaften wird angegeben, doch wird ihre Verwendung nicht empfohlen.

Für österreichische Verhältnisse können zwar die Methoden des FEH nicht direkt übernommen werden, doch ist die grundsätzliche Vorgangsweise auch für Österreich sinnvoll.

6. Datensituation in Österreich

Abschließend wird in diesem Beitrag ein kurzer Überblick über verschiedene breitenverfügbare Daten gegeben, die für die Regionalisierung im Zusammenhang mit der Niederschlag-Abflußmodellierung in Österreich von Interesse sind. Diese können in die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Methoden Eingang finden. Unterschieden werden topographische Datensätze (z.B. Einzugsgebietsgrenzen, Geländeparameter u.ä.), Zusatzinformationen für die Regionalisierung (z.B. Landnutzung und Geologie) sowie hydrologische Daten (Niederschläge, Abfluss etc.).

Topographische Daten: Digitale Einzugsgebietsgrenzen liegen in Österreich für etwa 20 000 natürliche Einzugsgebiete und etwa 800 Pegeleinzugsgebiete vor (Behr, 1996; <http://www.tuwien.ipf.ac.at>). Diese Grenzen wurden auf Basis der ÖK 1:50 000 digitalisiert. Abb. 10 zeigt ein Beispiel einer Pegeleinzugsgebietsgrenze, die in die Austrian MAP importiert wurde. Die Austrian MAP ist ein digitales Kartenwerk des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV, <http://www.bev.gv.at/>) im Maßstab 1:50.000, 1:200.000 etc., das auf der GEOGRID Software von DORNIER GmbH/Daimler Aerospace basiert.

Digitale Höhenmodelle liegen für Österreich mit unterschiedlichen Rasterweiten und Genauigkeiten vor, und auch die Kosten unterscheiden sich wesentlich. Die nachstehenden Kostenangaben gelten für die gesamte Fläche von Österreich. Das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (<http://www.bev.gv.at/>) vertreibt das genaueste Höhenmodell (Rasterweite von 50 m), wobei die Kosten allerdings in der

Größenordnung von EUR 400 000 liegen. Größer ist das von der Nato erhobene Höhenmodell MONA (<http://www.umweltdata.at/>) mit ca. 100 m Rasterweite (Kosten ca. EUR 10 000). Ein Höhenmodell mit 250 m Rasterweite wird am Institut für Photogrammetrie der Technischen Universität Wien (<http://www.tuwien.ipf.ac.at>) angeboten (Kosten ca. EUR 5500). Schließlich stellt der USGS (United States Geological Survey) ein globales digitales Geländemodell (GTOPO30) mit einer Rasterweite von 1 km kostenlos über Internet zur Verfügung (<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html>).

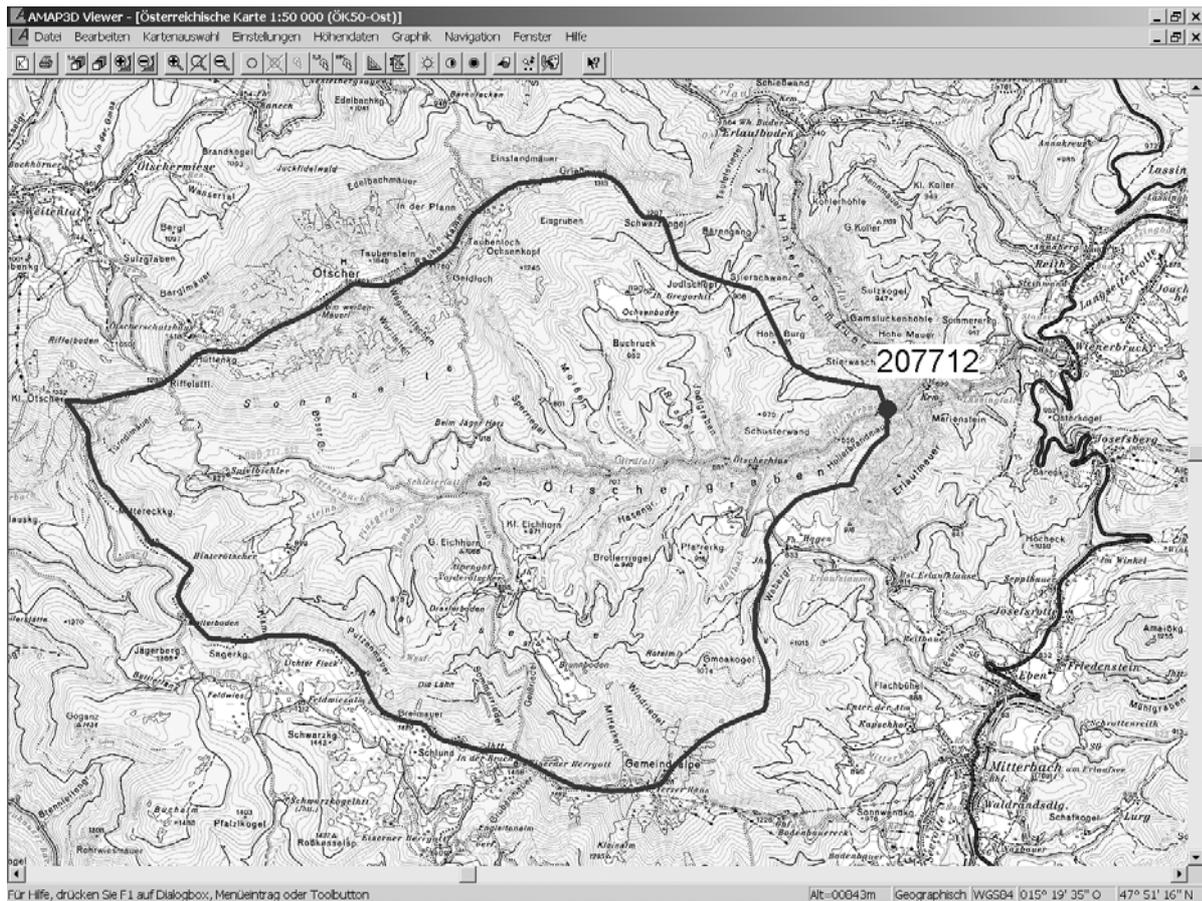


Abb. 10: Beispiel für digitale Karten (Austrian MAP auf Basis der GEOGRID Software) mit eingetragenen Pegeleinzugsgebietsgrenzen.

Eine Reihe von abgeleiteten topographischen Daten sind für die Regionalisierung im Zusammenhang mit der NA-Modellierung von Interesse, wie etwa Indizes für die Gebietsform und die mittlere Neigung (Moore et al., 1991; Merz et al., 2000). Ein weiteres Beispiel ist der weit verbreitete Topographische Bodenfeuchteindex

$$w = \ln(a / \tan(\beta)) \quad (8)$$

wobei a die spezifisch beitragende Fläche (d.h. die oberhalb eines Pixels befindliche Einzugsgebietsfläche geteilt durch die Rasterweite des Pixels) und β die lokale Neigung der Geländeoberfläche bedeuten (Beven and Kirkby, 1979). Studien haben gezeigt, dass der Bodenfeuchteindex manchmal positiv mit dem Feuchtegehalt der

hydrologisch aktiven Bodenzone korreliert ist (Western et al., 1999) und deshalb sollte er für die Regionalisierung von Modellparametern wichtig sein. Allerdings wird dieser Zusammenhang auch oft von anderen Einflussfaktoren überdeckt (Western et al., 1999). Abb. 11 zeigt den Topographische Bodenfeuchteindex für Österreich mit einer Rasterweite von 250m, der mittels des Verfahren von Rieger (1998) aus einem Geländemodell abgeleitet wurde.

Zusatzinformationen für die Regionalisierung: Die räumliche Verteilung der Landnutzung kann aus Satellitenbilddaten mit guter Genauigkeit abgeleitet werden. Für die zeitlichen Änderungen sind die Satellitendaten jedoch zu grob. Ein Datensatz, der die meisten Länder Europas abdeckt, ist die CORINE land cover data base der European Environment Agency, der mit 250m Rasterweite und 44 Klassen gratis verfügbar ist (<http://natlan.eea.eu.int/datasets.htm>). Für einzelne Länder existieren detailliertere Auswertungen: Für Österreich wurden Bilddaten des auf dem amerikanischen Fernerkundungssatelliten Landsat 5 installierten digitalen Aufnahmesystems Thematic Mapper (TM) analysiert (Ecker et al., 1995; <http://www.tuwien.ipf.ac.at>). Der TM scannt einen 180 km breiten Streifen der Erdoberfläche in sieben Spektralkanälen mit einer geometrischen Auflösung von 30 x 30 m pro Pixel. Ecker et al. (1995) verwendete 12 wolkenfreie Szenen zwischen 21.8.1991 und 5.10.1991. Die Auswertung erfolgte dabei vorerst durch eine geometrische Entzerrung der Kanäle 7, 5 und 3 und anschließender Klassifikation mittels Clusteranalyse. Eine Verifikation mittels Orthophotos ergab, dass > 80% der Pixel korrekt klassifiziert wurden. Die derart ermittelten Landnutzungsdaten sind im Raster mit bis zu 25 m Auflösung erhältlich Die Kosten sind von Auflösung und Größe der Bilder abhängig und betragen EUR 30 000 für das gesamte Gebiet von Österreich bei 50m Rasterweite. Abb. 12 zeigt die Landnutzung für Österreich nach dem oben beschriebenen Verfahren. Mittels geographischer Informationssysteme ist es nun leicht möglich, Geländeinformationen und Landnutzungsinformationen zu verschneiden und damit für die hydrologische Modellierung zugänglich zu machen. Abb. 13 zeigt als Beispiele für derartige Auswertungen hypsometrische Kurven und Landnutzungserteilungen für zwei Pegeleinzugsgebiete in Österreich. Das Gebiet Hoheneich liegt im nördlichen Waldviertel und ist überwiegend landwirtschaftlich genutzt während das Gebiet Archkogel im Salzkammergut überwiegend aus Fels und Wald besteht.

Geologische Karten liegen flächendeckend in Österreich nur in Maßstab 1 : 500 000 (Geologische Bundesanstalt, 1998) vor, der für viele hydrologische Fragestellungen eigentlich zu grob ist. Karten im Maßstab 1 : 50 000 sind in Ausarbeitung und teilweise bereits digital verfügbar (Schnabel, 2001; <http://www.geolba.ac.at/>). Für hydrologische Regionalisierungen beinhalten diese Karten wichtige Informationen, wie etwa die räumliche Verteilung quartärer Auflagen. Andere wichtige Bestimmungsstücke, wie etwa die Klüftigkeit des Untergrunds, gehen daraus nicht hervor. Bodenkarten liegen in vielen Ländern nur für ackerbaulich genutzte Gebiete vor und auch diese Karten wurden meist unter dem Gesichtspunkt des landwirtschaftlichen Ertrages und nicht so sehr unter hydrologischen Aspekten erstellt. Eine Ausnahme

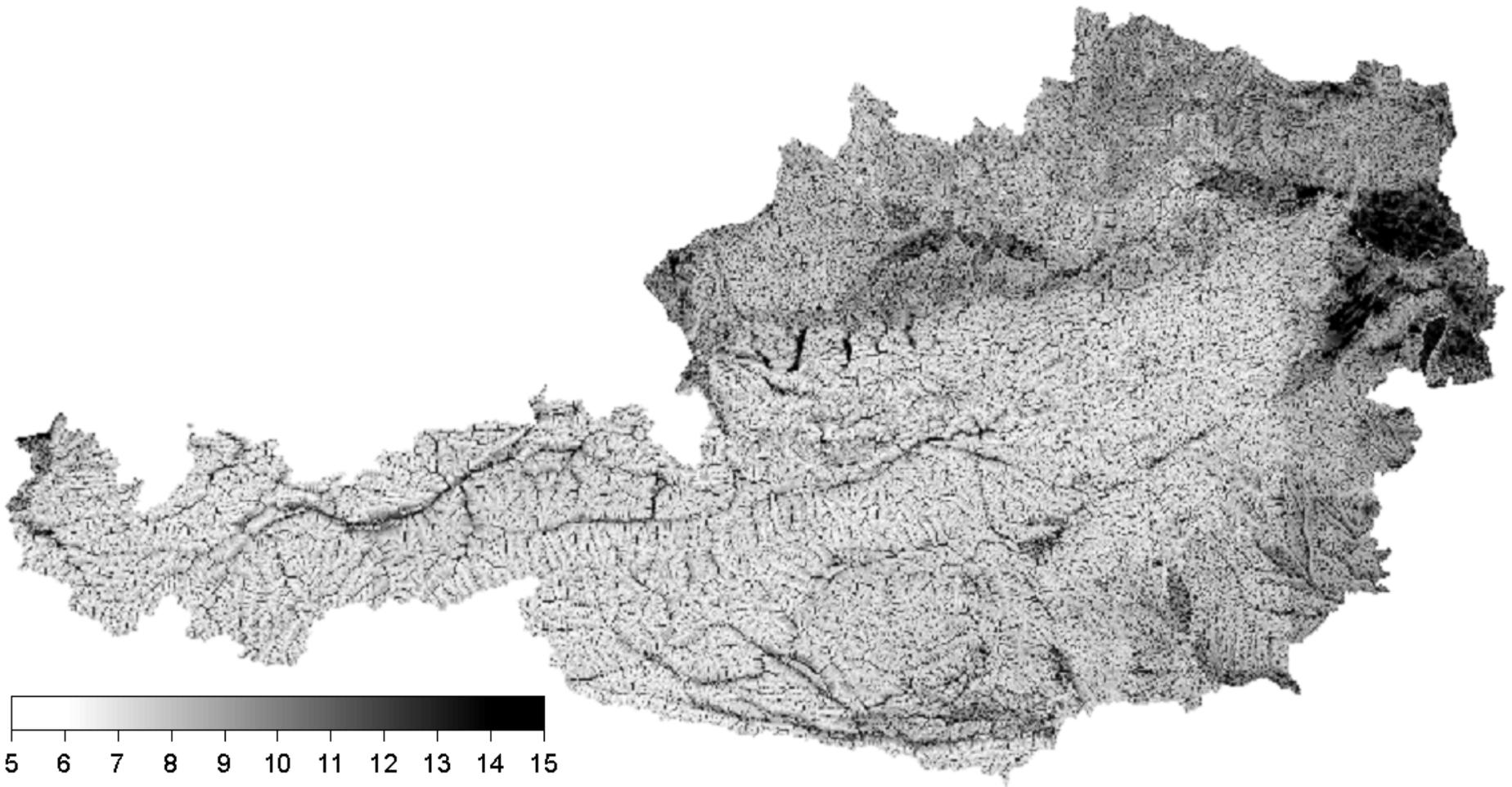


Abb. 11: Topographischer Bodenfeuchteindex $\ln(a / \tan(\beta))$ für Österreich abgeleitet aus Geländeinformation. Die Rasterweite beträgt 250m. Aus Rieger (1999).

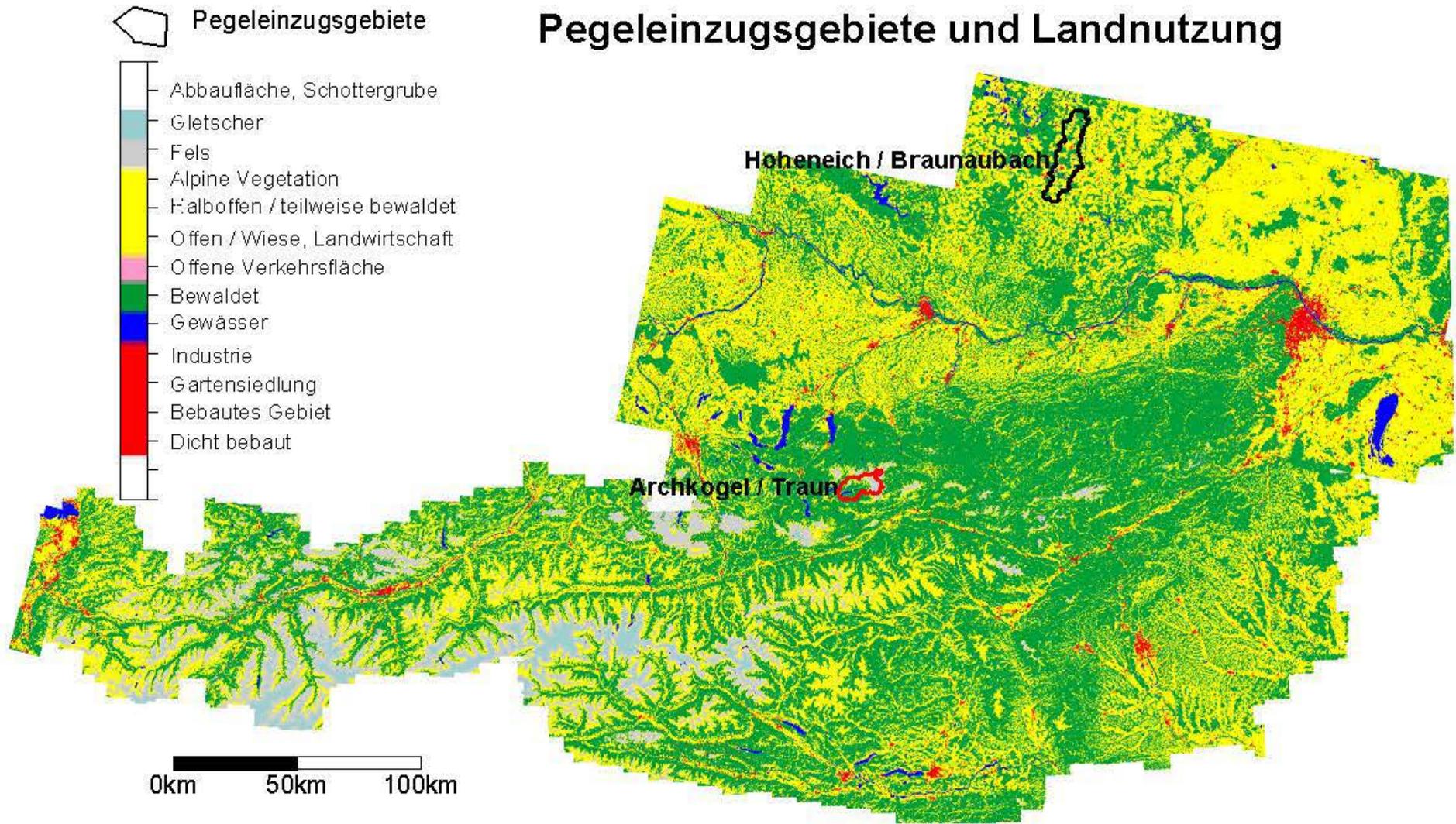


Abb. 12: Landnutzungsklassen abgeleitet aus Landsat TM Satellitendaten für Österreich. Aus Ecker et al. (1995).

bildet Großbritannien, wo eine flächendeckende hydrologische Bodenkarte vorliegt (Hydrology of soil types, Boorman, 1995). Für Teile Österreichs wurden Karten der Bodenform im Maßstab 1 : 25 000 vom Bundesamt für Bodenforschung publiziert, wobei eine digitale Erfassung in Arbeit ist (ÖBG, 2001). Flächendeckend liegen Bodeninformationen derzeit nur im Maßstab 1: 750 000 vor (Fink et al., 1979), die für die meisten hydrologische Modellanwendungen nicht geeignet ist.

Hoheneich - Pegelinzugsgebiete - Archkogel

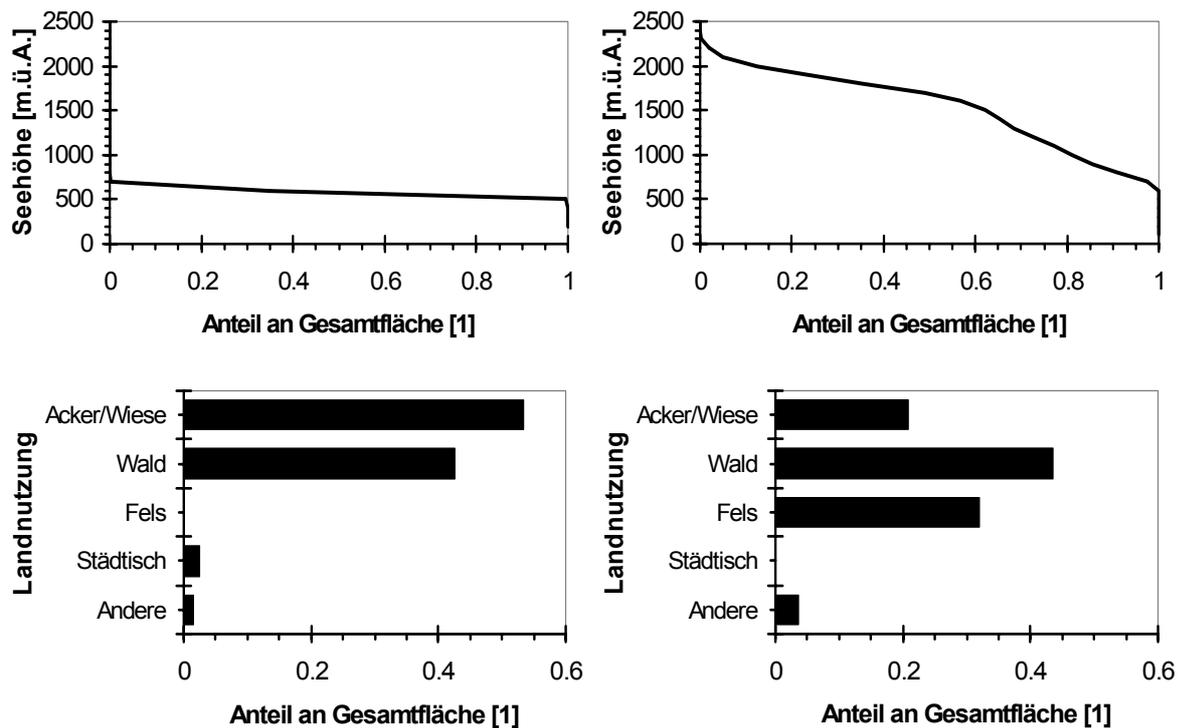


Abb. 13: Auswertungen von Hypsometrischen Kurven und Landnutzung für zwei Pegelinzugsgebiete in Österreich.

Hydrologische Daten, die für die Regionalisierung bzw. hydrologische Modellierung von Interesse sind, werden in Österreich vor allen vom Hydrographischen Zentralbüro im Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft sowie den hydrographischen Dienststellen der Länder erhoben (siehe z.B. Schreiber, 1994). Ein Teil davon wird jährlich im Hydrographischen Jahrbuch publiziert. Tagesniederschläge für ca. 1100 Niederschlagsstationen (davon ca. 250 Schreibgeräte mit zeitlich höherer Auflösung) liegen teilweise seit 1900, digital aber erst seit 1971 vor. Ergänzend werden Starkniederschläge für ausgewählte Stationen, unterschieden nach Dauerstufen publiziert (siehe z.B. Gutknecht und Watzinger, 1996). Mittlere Tageswerte des Abflusses sind digital ebenfalls seit 1971 vorhanden (ca. 850 Stationen). Schreibstreifen des Wasserstandes, aus denen Abflüsse mit höherer zeitlicher Auflösung abgeleitet werden könnten, liegen zwar für die meisten Pegel vor,

wurden aber bisher nur vereinzelt mit höherer zeitlicher Auflösung ausgewertet. Für die Niederschlag-Abflußmodellierung in kleinen bis mittleren Einzugsgebieten sind Tageswerte des Abflusses für die Simulation der Wasserbilanz oft ausreichen, für die Simulation von Hochwässern ist meist eine höhere zeitliche Auflösung als ein Tag erforderlich. Deshalb müssen in der Praxis bei konkreten Simulationsprojekten meist Schreibstreifen digitalisiert werden. Ergänzend zu den kontinuierlichen Werten des Abflusses liegen die Jahreshöchsthochwässer (Momentanwerte), teilweise seit 1951, vor. Für ca. 3500 Messstellen werden Monatsmittelwerte des Grundwasserstandes publiziert. Metainformationen wie Pegelnulldpunkt, der gewählte Pegelschlüssel (Wasserstands-Durchfluss - Beziehung) und die Koordinaten der Stationen sind ebenfalls erhältlich.

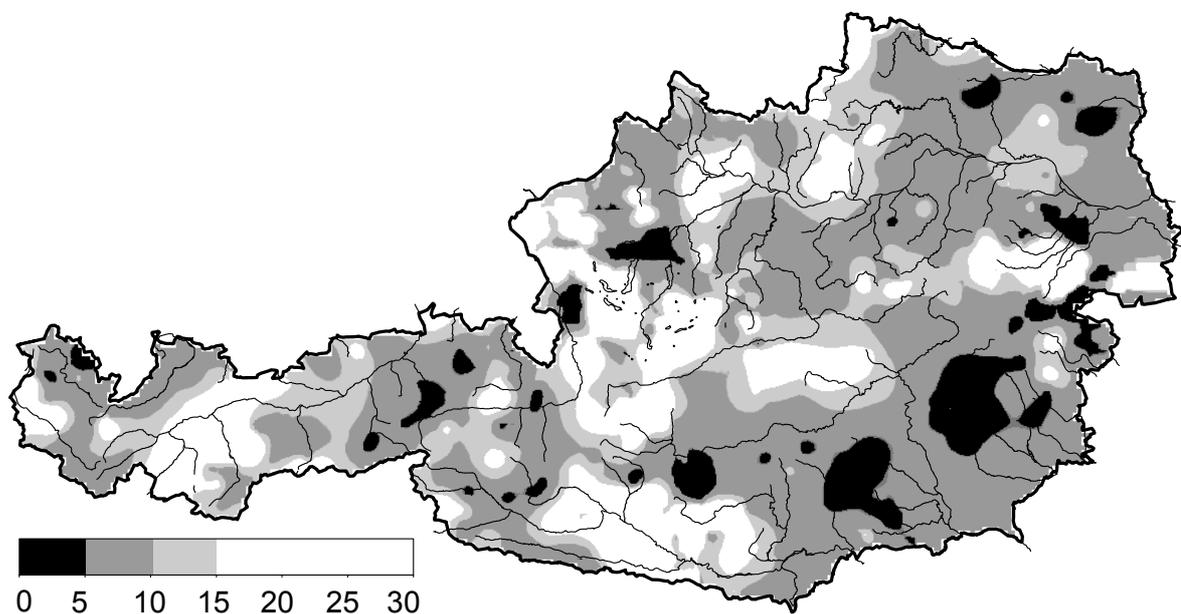


Abb. 14 Mittlere Konzentrationszeit (Stunden) für Pegelzugsgebiete in Österreich berechnet aus dem Verhältnis von Scheitelabfluß und mittlerem Tagesabfluß an dem selben Tag für die Jahreshochwässer 1971-97. Aus Blöschl et al. (2000).

Regionale Auswertungen, die für die Niederschlag-Abflußmodellierung von Interesse sind, wurden in Österreich bisher nur vereinzelt durchgeführt. Ein Beispiel für eine derartige Auswertung zeigt Abb. 14, in der Angaben zur Abflusssdynamik von Hochwässern regional dargestellt sind. Da Einzelanalysen der Abflusssdynamik in der Regel Abflusssdaten mit einer zeitlichen Auflösung von mindestens einer Stunde erfordern, wurde bei den Abb. 14 zugrundeliegenden Analysen ein alternativer Weg beschritten, bei dem für das größte Hochwasser in jedem Jahr das Verhältnis zwischen Scheitelabfluß und dem mittleren Tagesabfluß an diesem Tag berechnet wurde. Beide Werte liegen wie erwähnt für alle Pegel Österreichs für viele Jahre digital vor. Dieses Verhältnis ist ein summarischer Wert für die Gebietsreaktion einerseits und die Niederschlagsdauer andererseits. Gebiete mit einer kurzen Reaktionszeit haben einen großen Verhältniswert und Gebiete mit einer langsamen Reaktion haben einen kleinen Verhältniswert. Ein kurzes Regenereignis ergibt einen großen Verhältniswert und ein

längeres Ereignis führt in der Regel zu einem kleinen Wert nahe eins. Aus diesem Verhältnis wurde unter Zugrundelegung einer normierten Standardganglinienform die Konzentrationszeit (oder Scheitelanstiegszeit) rückgerechnet (Merz et al., 1999). Abb. 14 lässt erkennen, dass die Gebiete in der Steiermark, im Osten / Südosten des Bundesgebietes besonders kurze Konzentrationszeiten zeigen. In diesen Gebieten führen heftige, kurze Gewitter oft zu den Jahreshochwässern. Lange Konzentrationszeiten treten etwa im durch Seen geprägten Salzkammergut und im durch Grundwassereinfluss geprägten südlichen Wiener Becken südlich von Wien auf.

Abschließend ist zu bemerken, dass ein wichtiger Datenaspekt für die Niederschlag-Abflußmodellierung in Österreich und vielen anderen Ländern die Beurteilung der anthropogenen Beeinflussungen der Fließgewässer ist. Beeinflussungen können etwa zufolge Zu-, Ab- und Überleitungen im Zusammenhang mit Speichern und Kraftwerken, Retention durch Hochwasserrückhaltebecken sowie Flussregulierungen auftreten (siehe z.B. Blöschl et al., 2000). Bei der hydrologischen Modellierung ist man in der Regel bemüht, das natürliche hydrologische Verhalten wiederzugeben. Dies erfolgt am besten dadurch, dass die anthropogenen Beeinflussungen explizit aus den Daten rückgerechnet werden und ein naturähnlicher Datensatz erzeugt wird, der für die Modellierung verwendet wird. Die anthropogenen Beeinflussungen werden dann explizit als Modellteil zusätzlich eingeführt.

7. Literatur

Behr, O. (1996) Digitale Erfassung und Anwendung abflussrelevanter topographischer Information. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, 48, 53-61.

Beven, K. J. and M. J. Kirkby, (1979) A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24, 43-69.

Blöschl, G. (1996) Scale and Scaling in Hydrology (Habilitationsschrift). Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer. Band 132. Technical University of Vienna. 346pp.

Blöschl, G. and R. Grayson (2000) Spatial observations and interpolation. Chapter 2 in R. Grayson and G. Blöschl (Eds.) *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 17-50.

Blöschl, G. and M. Sivapalan, (1995) Scale issues in hydrological modelling - a review, *Hydrol. Processes*, 9, 251-290.

Blöschl, G., U. Piöck-Ellena, und R. Merz, (2000) Abflußtypen-Klassifizierung als Basis für die Regionalisierung von Hochwässern. Endbericht, Österreichische Akademie der Wissenschaften (HÖ-12). Februar 2000. Institut für Hydraulik, TU-Wien.

Boorman, D. B., J. M. Hollis and A. Lily (1995) Hydrology of soil types: a hydrologically based classification of the soils of the United Kingdom. Institute of Hydrology report #126, Institute of Hydrology, Wallingford.

- Chilès, J.-P. and P. Delfiner (1999) *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. Wiley, New York, 695pp.
- Chow, V.T (1959) *Open-channel hydraulics*, McGraw Hill, New York.
- Costa-Cabral, M. C. and S. J. Burges, (1994) Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resour. Res.*, 30, 1681-1692.
- de Marsily, G. (1986) *Quantitative Hydrogeology*, Academic Press, San Diego, 440 pp.
- DeMers, M. N. (2000) *Fundamental of Geographic Information Systems*. John Wiley & Sons, New York, 498pp.
- Deutsch, C. V. and A. G. Journel, (1997) *GSLIB, Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York, Oxford, 384 pp.
- Dingman, S. L. (1994) *Physical Hydrology*, Macmillan, New York, 575 pp.
- DVWK (1984) *Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau: Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II, Synthese. Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 113*, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- Ecker, R., R. Kalliany, und K. Steinnocher (1995) Fernerkundungsdaten für die Planung eines Mobilfunknetzes. *Österr. Zeitschr. f. Vermessung und Geoinformation*, 83. Jahrgang, Heft 1+2, 14-25.
- Elsenbeer, H. (2001) Pedotransfer functions in hydrology. *J. Hydrology Special Issue*, 251, 3-4, pp. 121-220.
- Fink, J., R. Walder und W. Rerych (1979) *Österreich-Atlas. 6. Lieferung - Bodenkarte Österreichs 1: 750 000*. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Freytag and Berndt, Wien.
- Geologische Bundesanstalt (1998) *Metallogenetische Karte 1:500.000 auf CD-ROM*. GBA, FA-ADV, Wien.
- Gessler, P. E, I. D. Moore, N. J. McKenzie and P. J. Ryan, (1995) Soil landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *Int. J. Geogr. Inf. Sys.* 9 (4), 421-432.
- Golden Software (2001) Golden Software, Inc., 809 14th Street, Golden, Colorado 80401-1866, U.S.A.; www.goldensoftware.com.
- Goovaerts P., (2000) Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, *J. Hydrology* (228) 1-2, pp. 113-129.
- Gutknecht, D. und A. Watzinger, (1996) *Aufbereitung und Basisanalyse der Starkregendaten aus den Hydrographischen Jahrbüchern 1948-1993*. Institut für Hydraulik Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Technische Universität Wien, Wien.

- Gutknecht, D., R. Merz und G. Blöschl (2002) Bemessungsniederschläge für die Niederschlag-Abflussmodellierung. In Vorbereitung.
- Hutchinson, M. F. (1993) On thin plate splines and kriging. In: M.E.Tarter and M.D.Lock (eds), Computing Science and Statistics Vol.25, Interface Foundation of North America, University of California, Berkeley, 55-62.
- Institute of Hydrology (1999) Flood Estimation Handbook. 5 Bände. Hrsg vom Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Isaaks, E. H. and R. M. Srivastava, (1989) An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, 561 pp.
- Jensen, H. (1989) Räumliche Interpolation der Stundenwerte von Niederschlag, Temperatur und Schneehöhe. Zürcher Geographische Schriften 35. Geographisches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. 70 pp.
- Kite, G. W. (1995) The SLURP model. In: Singh, V. P. (Ed.) Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 521-562.
- Koehler, G. (1999) Regionalisierung von Hochwasserabflüssen für kleine Einzugsgebiete im südlichen Donaugebiet Bayerns. In: G. Koehler (Hrsg.) Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete. Schriftenreihe des Fachgebiets Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, no 9, 165-178.
- Kreps, H. und H. Schimpf (1965) Starkregen und Starkregenstatistik. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 42.
- Kupfersberger, H. and G. Blöschl, (1995) Estimating aquifer transmissivities - on the value of auxiliary data. *J. Hydrology*, 165, 85-99.
- Lutz, W. (1984) Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Dissertation, TU-Karlsruhe, 235 pp.
- Meijerink, A. M. J., H. A. M. Brouwer, C. M. Mannaerts and C. R. Valenzuela, (1994) Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Rep. Nr. 23, Enschede, 243pp.
- Merz, R., G. Blöschl und U. Piock-Ellena (1999) Zur Anwendbarkeit des Gradex-Verfahrens in Österreich, *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, 51, Heft 11/12, pp. 291-305.
- Merz, R., U. Piock-Ellena, G. Blöschl, R. Kirnbauer, (2000) Skalierungsprobleme bei der Regionalisierung von Hochwässern. Endbericht, Österreichische Akademie der Wissenschaften (HÖ-18). Oktober 2000. Institut für Hydraulik, TU-Wien.
- Moore, I. D., R. B. Grayson, and A. R. Ladson, (1991) Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol. Processes*, 5, 3-30.

- Müller, G. und A. Münch, (1997) Wasserhaushaltsmodellierung in Einzugsgebieten des Fest- und Lockergesteins mit dem Modell AKWA-M. Tagungsband „Modellierung in der Hydrologie“, Dresden, 191-200.
- ÖBG (2001) Bodenaufnahmesysteme in Österreich. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft. Heft 62.
- Obled, Ch. (1990) Hydrological modeling in regions of rugged relief. In: Lang, H. and Musy, A. (Eds.) Hydrology in Mountainous Regions. I-Hydrological Measurements; the Water Cycle (Proc. Lausanne Symp., Aug. 1990). IAHS Publ. 193, 599- 613.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek and N. Miller, (1983) Green-Ampt infiltration parameters from soils data, *J. Hydraul. Eng.* 109, 62-70.
- Rieger, W. (1998) A phenomenon-based approach to upslope contributing area and depressions in DEMs. *Hydrol. Processes*, 12, 857-872.
- Romano, N. and A. Santini, (1997) Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. *J. Hydrology* 202, 137-157.
- Schnabel, W. (2001) Die geologische Landesaufnahme Österreichs: Stand und Planung am Beginn des neuen Jahrhunderts. In: Hrsg. G.W. Mandl. Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt 2001 in Neuberg an der Mürz, 3.-7. September 2001, Geologische Bundesanstalt, Wien, pp. 9-16.
- Schreiber, H. (1994) Der Hydrographische Dienst in Österreich. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft* 46, 3/4, 43-50.
- Sivapalan, M. and G. Blöschl (1996) Scaling and regionalisation of runoff response based on derived flood frequency. Endbericht and den Fonds zu Förderung der Wissenschaftlichen Forschung, Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, TU-Wien.
- US-SCS (1972) National Engineering Handbook Section 4 Hydrology. US Department of Agriculture.
- Warrick, A. W., R. Zhang, M. M. Moody and D. E. Myers, (1990) Kriging versus alternative interpolators: errors and sensitivity to model inputs. In: K. Roth et al. (Editors), Field-scale water and solute flux in soils. Birkhäuser Verlag, Basel, pp. 157-164.
- Western, A. W., G. Blöschl and R. B. Grayson (1998) Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment. *J. Hydrology*, 205, pp. 20-37.
- Western, A.W., R. B. Grayson, G. Blöschl, G. R. Willgoose and T. A. McMahon, (1999) Observed spatial organisation of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Res. Research*, 35(3): 797-810.

Anschrift der Verfasser:

Ao.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl

Dipl. Ing. Ralf Merz

Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft

Technische Universität Wien

Karlsplatz 13/223, A-1040 Wien

Tel: +43 1 58801 22315 Fax: +43 1 58801 22399

E-mail: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

BEMESSUNGSNIEDERSCHLÄGE AUF DER FLÄCHE FÜR KURZE DAUERSTUFEN ($D \leq 12$ STUNDEN) MIT INADÄQUATEN DATEN*)

Peter Lorenz und Georg Skoda

Zusammenfassung

Wie im Projekt ÖKOSTRA gezeigt wurde, lässt sich Niederschlag aus partiellen Serien mit einem einfachen funktionellen Ansatz als Funktion von Dauerstufe und Wiederkehrzeit darstellen. Man erzielt mit lediglich *vier* Parametern gute Erfolge. An Orten mit langjähriger Niederschlagsbeobachtung ist die jeweilige Koeffizientenberechnung mittels statistischer Anpassung und damit die Berechnung von Bemessungsniederschlägen trivial.

Um die Informationslücken, die in datenarmen Regionen bestehen, zu schließen, nutzen wir die Fähigkeiten eines meteorologischen Vorhersagemodells für konvektive Niederschläge. Dieses Modell besitzt eine horizontale Auflösung von ca. 1,5 km mal 1,5 km und berücksichtigt vor allem topographische Einflüsse unterschiedlicher Größenordnungen auf den Niederschlagsprozess. Es ist im Rahmen des Programmes IDNDR (Forschungsprojekt der Österreichischen Akademie der Wissenschaften) zwischen 1991 und 1997 entwickelt worden und an der ZAMG per April 1997 für den praktischen Dienst implementiert worden. Im Rahmen der Modellphysik zulässige, als „extrem“ angenommene Anfangs- und Randwerte (Labile Luftschichtung, hohe Einstrahlung, hohe Luftfeuchtigkeit, geeignete zeitliche Tendenzen dieser Größen, etc.) produzieren Modellniederschläge verschiedener Intensität und Andauer. Diese Werte sind in den Regionen mit langen Beobachtungsreihen mit den gemessenen Werten zu kalibrieren. Die meteorologischen Startbedingungen werden so gewählt, dass die simulierten mit den beobachteten Niederschlagswerten für wenigstens zwei Dauerstufen und zwei Wiederkehrzeiten möglichst gut übereinstimmen. Für diese festgelegten Dauerstufen und Wiederkehrzeiten ist damit das gesamte Niederschlagsfeld flächendeckend bekannt. Mit den gleichzeitig bekannten Topographie-Daten wird eine Polynom-Regression, welche die Seehöhenabhängigkeit konvektiver Niederschläge beschreibt, durchgeführt. Aus praktischen Gründen werden diese Niederschlagsfelder im Gebiet zwischen 45 - 50,5 Grad N und von 9 - 18 Grad E geglättet: Die Ergebnisse repräsentieren Schätzwerte innerhalb von Quasi-Rechtecken der Größe 1/12 Grad longitudinal und 1/20 Grad meridional. Die erforderliche Koeffizientenberechnung kann nun überall durchgeführt werden.

Diese stehen bei Vorgabe kurzer Dauerstufen und beliebiger Wiederkehrzeiten als Eingangsgrößen in die eingangs gewählte Formel für Bemessungsniederschläge zur Verfügung. Alle Programmalgorithmen und erforderlichen Parameterdateien sind am Rechnersystem des Hydrographischen Zentralbüros installiert.

*) Leicht veränderter Abdruck von: Lorenz und Skoda (2001) Bemessungsniederschläge kurzer Dauerstufen ($D \leq 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten. Mitt. Hydr. Dienst in Österr. Nr. 80, S. 1-24.

Zuletzt wird die Berechnung von Bemessungsniederschlägen anhand von einigen Beispielen dokumentiert.

1. Problemstellung

Bemessungswerte des Niederschlags können zur Lösung der verschiedensten wasserwirtschaftlichen Fragestellungen herangezogen werden.

Der Niederschlag ist das Ergebnis komplexer physikalischer Prozesse in der Atmosphäre. Seine deterministische raum-zeitliche Modellierung unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden atmosphärischen Vorgänge ist, vor allem auch wegen der im Prozess inhärenten Wechselwirkungen aus verschiedenen Skalen, sehr kompliziert. Davon zeugt die Vielfalt entwickelter Verfahren und Methoden sowie deren unterschiedliche Erfolge in der Praxis.

Der vom DVWK initiierte Begriff des „maximierten Gebietsniederschlags“ (MGN) gestattet Aussagen über einen „vermutlich größten Abfluss“ (DVWK, 1997). Die genaue Kenntnis von Niederschlagsmengen auf der Fläche ist für viele ingenieurhydrologische Aufgaben von fundamentaler Bedeutung. Derartige Bemessungswerte sind dabei auch für niedrige Wiederkehrzeiten von Interesse.

Das in den letzten 25 Jahren angefallene Material, geänderte Methoden in der Auswertung und in der Datenverarbeitung sowie neue statistische Ansätze, machten Neubearbeitungen notwendig. In Anlehnung einer erfolgreichen Neubehandlung des Themas beim Referat Hydrometeorologie im Deutschen Wetterdienst (Deutscher Wetterdienst, 1990; DVWK, 1991) hat der Leiter des Referates IV A 3b (BMLF), Nobilis, im Jahre 1990 ein als ÖKOSTRA-93 bezeichnetes Projekt initiiert, auf dessen Ergebnisse die vorliegende Studie anknüpft (ÖKOSTRA-93, 1992; Skoda, 1993; Mischkulnig, 1995).

Gleichzeitig hat sich die Verfügbarkeit und Güte meteorologischer Kurzfrist-Vorhersagemodelle in den letzten Jahren deutlich verbessert (Haiden und Pichler, 1997; Jacob and Podzun, 1997; Skoda, 1997; Bresseur, 1998). Auch physikalische Vorhersagemodelle für konvektive Niederschläge mit kurzer Andauer haben in den letzten Jahren ein beachtenswertes Güteniveau erreicht. Es erscheint daher naheliegend, die Komponente Niederschlagsbeobachtung mit der Komponente simulierter Modellwert zu verbinden (Skoda und Nobilis, 1999).

Gesucht werden im folgenden objektive Prozeduren, welche *Bemessungsniederschläge* für kurze Dauerstufen ($D < 12$ Stunden) und bei beliebiger Wiederkehrzeit liefern. Bevorzugtes Interesse besteht an Ergebnissen aus Regionen mit spärlichen Messdaten, wie etwa aus Bergregionen.

2. Die Ermittlung des Bemessungsniederschlags aus inadäquaten Daten

Die vorliegende Studie schließt an die Überlegungen und Vorgaben der im Rahmen von ÖKOSTRA erarbeiteten Vorgangsweise an. Daher ist es zweckmäßig, zunächst alle Möglichkeiten zu prüfen, Messdaten, aufbereitetes Material oder bereits in die

Datenbank aufgenommene digitalisierte Niederschlagswerte aus dem jeweiligen Einzugsgebiet zu nutzen. Wenn die erforderlichen Voraussetzungen erfüllt sind, kann nach den Richtlinien von ÖKOSTRA (Skoda, 1993) der für die gewünschte Dauerstufe D und die gewählte Wiederkehrzeit T die Höhe des zugehörigen Bemessungsniederschlags hN ermittelt werden.

Bei der Bearbeitung kleiner Einzugsgebiete bzw. im alpinen Gelände werden die erforderlichen Beobachtungsdaten häufig fehlen. Auch im Flachland weist das Feld zeitlich hochaufgelöster Daten gebietsweise noch Lücken auf. Wir werden somit in der Praxis im Regelfall mit inadäquaten Daten konfrontiert. Unter diesen Voraussetzungen erscheint es sinnvoll, die gesuchten Niederschlagswerte aus räumlich hochauflösenden meteorologischen Modellen zu entnehmen.

Die Autoren empfehlen, die folgenden Gl. (2), (4), (5.1), (5.2) und (11.1) bis (13) in einigen Jahren neu zu bewerten, sobald weiterentwickelte meteorologische Modelle für konvektive Niederschläge verfügbar sein werden.

2.1 Meteorologisches Modell

Die Berechnungen erfolgen hier mittels eines im Rahmen des Programmes IDNDR (Forschungsprojekt der Österreichischen Akademie der Wissenschaften) zwischen 1991 und 1997 entwickelten und an der ZAMG per April 1997 implementierten Modells zur Vorhersage von konvektiven Niederschlägen. Da man sich innerhalb der warmen Jahreszeit für kurze Dauerstufen ($D < 12$ Stunden) interessiert, werden die Berechnungen an dieser Stelle nicht mit dem bei Lorenz und Skoda (1998) eingesetzten Modell für stratiforme und Aufgleitniederschläge durchzuführen sein. Ein weiteres instationäres, orographisch-konvektives Modell (OKM) übernimmt die Berechnungen (Haiden und Pichler, 1997). Wesentlich bei der Berechnung konvektiver Niederschläge ist die Erfassung der Klumpenbildung in den Niederschlagsfeldern sowie eine möglichst genaue Kenntnis der Seehöhenabhängigkeit. Letztere kann nun nicht mehr durch einen klimatologischen Ansatz, wie er durch Gl. (4) in Lorenz und Skoda (1998) vorgeschlagen wurde, befriedigt werden. Für eine explizite Berechnung ist die geeignete Auflösung der digitalen Geländedaten in hoher Auflösung notwendig. Es ist nicht der Punktwert von Anstieg und Höhenlage, sondern deren Mittel über ein größeres Gebiet für die orographische Niederschlagsverstärkung entscheidend. Die Geländehöhen, die im Modell OKM in einer Auflösung von etwa 1,5 km verwendet werden, wurden ihrerseits durch Mittelung der Daten eines digitalen Geländemodells sehr hoher Auflösung gewonnen. Der eigentliche Modellbereich, in dem gerechnet wird, reicht von 9 - 18 Grad östlicher Länge und von 45 - 50,5 Grad nördlicher Breite. Grundsätzlich beträgt die Auflösung von OKM 1/80 Grad meridional (ca. 1,38 km) und 1/48 Grad longitudinal (ca. 1,55 km).

Das zeitabhängige Modell OKM berechnet den lokalen orographisch-thermischen Antrieb konvektiver Wolken- und Niederschlagsbildung über komplexem Gelände. Es kann auf beliebig steile und hohe Topographie angewandt werden, da die Topographie im Modell in eine „Basistopographie“ und eine „relative Topographie“ zerlegt wird. Die Basistopographie entspricht dem Gebirgsrumpf und kann als gedachte

Verbindungsfläche zwischen den Talböden der größeren Täler oder auch als „untere Einhüllende“ der Topographie angesehen werden.

Die maximalen Neigungen der Basistopographie sind bedeutend geringer als die der gesamten Topographie. Das erlaubt die Verwendung eines lokal eindimensionalen Mischungsschicht-Ansatzes zur Modellierung des Grenzschichtaufbaues, wobei das „Hineinragen“ der relativen Topographie in die Grenzschicht, das sich z.B. in Form des Volumseffekts auswirkt, explizit berücksichtigt wird.

Startpunkt der täglichen Modellrechnung ist aus praktischen Gründen 00 Uhr UTC, da für diesen Zeitpunkt Radiosondendaten (Wien, Budapest, Budweis, Prag, München, Payerne, Udine und Zagreb) zur Verfügung stehen. Zur Initialisierung werden die vorliegenden Beobachtungen der Radiosondenaufstiege und der im Rechengebiet befindlichen Synopstationen verwendet. Zuerst werden die 00 UTC Radiosondenprofile von Temperatur und Taupunkt horizontal interpoliert. In einem nächsten Schritt werden die um 00 UTC beobachteten Temperatur- und Taupunktwerte jener Stationen, die in Talniveau liegen, verarbeitet. Sie werden unter Berücksichtigung ihrer Höhenlage interpoliert und für eine entsprechende Korrektur der bodennahen Temperatur- und Feuchteverhältnisse verwendet. In einem dritten Schritt wird berechnet, welche Werte die so gewonnenen dreidimensionalen Anfangsfelder von Temperatur und Feuchte an den Bergstationen liefern. Aus den Differenzen zu den tatsächlich gemessenen Werten werden dreidimensionale Korrekturfelder erstellt. Zur Berücksichtigung der synoptisch-skaligen Advektionsprozesse in der freien Atmosphäre während des Vorhersagezeitraumes werden zusätzlich Vorhersagen des ECMWF-Modells (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF) für Wind, Temperatur, Feuchte sowie Vertikalgeschwindigkeit eingebunden.

Diese horizontal interpolierten Werte von Temperatur und Taupunkt stellen den Anfangszustand der Modellatmosphäre dar. Der Zeitraum zwischen 00 Uhr UTC und Sonnenaufgang wird gesondert behandelt, da nächtliche Abkühlung der Grenzschicht explizit berücksichtigt wird. Die effektive langwellige Ausstrahlung in diesem Zeitraum wird als Funktion der bodennahen Werte von Temperatur und Taupunkt parametrisiert. In Kombination mit den beobachteten morgendlichen Minimumtemperaturen an den synoptischen Stationen kann damit die Dicke der abgekühlten Schicht abgeschätzt werden. Das ursprüngliche vertikale Temperaturprofil kann dadurch in den untersten Niveaus der Energiebilanz entsprechend modifiziert werden.

Sobald die Strahlungsbilanz positiv wird, beginnt das Wachstum der konvektiven Grenzschicht und die Erwärmung der Talatmosphäre. Die Aufteilung in Flüsse fühlbarer und latenter Wärme wird durch vorgegebene Werte des Bowen-Verhältnisses (abhängig von der Oberflächenart) gesteuert. Höhenlage und Exposition werden bei diesen Berechnungen explizit berücksichtigt.

Das Anwachsen der konvektiven Grenzschicht wird mittels Mischungsschicht-Ansatz berechnet, wobei Vermischungen an der Obergrenze der Schicht durch thermische und scherungsinduzierte Turbulenz in einfacher Form berücksichtigt wird. Für die zeitliche

Integration ist ein Zeitschritt von einer halben Stunde ausreichend, da ein semi-analytisches Verfahren verwendet wird. Fühlbarer Wärmefluss, der von Hangstücken oberhalb der momentanen Obergrenze der konvektiven Grenzschicht ausgeht, erwärmt die entsprechende Schicht der Talatmosphäre. Falls dadurch ein überadiabatischer Temperaturgradient entsteht, wird die Erwärmung auf höher gelegene Schichten so umverteilt, dass der trockenadiabatische Gradient nicht überschritten wird. In der beschriebenen Weise werden die mesoskaligen Verteilungen folgender Größen in Halbstundenschritten berechnet: Höhe der Mischungsschicht, Temperatur der Mischungsschicht, Inversionsstärke an der Obergrenze der Mischungsschicht, Wasserdampf-Mischungsverhältnis in der Mischungsschicht, kumulative Erwärmung der Talatmosphäre oberhalb der Mischungsschicht. Aus diesen Größen werden die für die Vorhersage konvektiver Aktivität benötigten Parameter wie die Höhe des ‚cumulus condensation level‘ oder des orographisch modifizierten Showalter-Index als Feldverteilungen berechnet.

Die eigentliche Berechnung des konvektiven Niederschlags beruht auf einer Superposition der Niederschläge aus einzelnen, lokal ausgelösten, idealisierten konvektiven Zellen. Die Abhängigkeit der Isolinienverteilung von der Verlagerungsgeschwindigkeit und -richtung der Zelle und ihrer Lebensdauer wird explizit modelliert. Es wird angenommen, dass jede ausgelöste Zelle in einem mit ihr mitbewegten Bezugssystem eine charakteristische räumliche und zeitliche Niederschlagsverteilung produziert, die durch mehrere (im OKM für jede auftretende Zelle individuell berechnete) Parameter (Zeitpunkt der Niederschlagsauslösung, Höhe z_{LCL} der Niederschlagsauslösung, maximaler Aufwind, maximale Niederschlagsrate, Lebensdauer-Parameter eines konvektiven Niederschlagskomplexes, Verlagerungsgeschwindigkeit, Verlagerungsrichtung) gesteuert wird. Die Niederschlagsrate einer Zelle wird als radialsymmetrisch normalverteilt und zeitlich exponentiell abfallend angenommen. Die Bewegung der Zelle wird aus dem massengewichteten mittleren Windvektor im Höhenbereich 1 bis 6 km berechnet. Das dafür verwendete Windfeld wird aus linearer räumlicher und zeitlicher Interpolation der Prognosefelder des ECMWF-Modells erhalten. Die Niederschlagsrate einer Zelle wird als radialsymmetrisch normalverteilt und zeitlich exponentiell abfallend angenommen. Um die kumulative Niederschlagsverteilung im unbewegten System zu erhalten, muss unter Berücksichtigung der Zellenbewegung zeitlich integriert werden. Die verschiedenen Parameter, die den Zellenniederschlag steuern, werden im OKM für jede auftretende Zelle individuell berechnet. Der Zeitpunkt der Niederschlagsauslösung wird aus der Temperatur der Cumulus-Tops in der Höhe z_{TOP} und der Cumulus-Vertikalerstreckung abgeschätzt. Es wird angenommen, dass Niederschlagsbildung in einem Cumulus oder Cumulus-Cluster dann einsetzt, wenn er über das Niveau der -10 °C Isotherme hinauswächst und gleichzeitig mindestens 2000 m Vertikalerstreckung aufweist.

Die maximale Niederschlagsrate P_{max} ist diejenige, die zum Zeitpunkt der Zellenauslösung im Zentrum der Zelle herrscht. Sie wird durch vertikale Integration der feuchtadiabatischen Kondensationsrate

$$P_{\max} = \sum_{z=z_{LCL}}^{z=z_{TOP}} w(z)_z \cdot \rho(z)_z \cdot \left(-\frac{\delta r_s}{\delta z} \right)_z \quad (1)$$

abgeschätzt. Dabei ist $w(z)$ das im „open parcel“-Modell berechnete Vertikalgeschwindigkeitsprofil, $\rho(z)$ ein mittleres Dichteprofil und $\delta r_s(z)/\delta z$ die Abnahme des Sättigungsmischungsverhältnisses mit zunehmender Höhe bei feuchtadiabatischer Hebung.

Die Bestimmung der Lebensdauer eines konvektiven Niederschlagskomplexes ist äußerst schwierig, da eine ganze Reihe von Faktoren, die auf nicht-lineare Weise zusammenwirken, eine Rolle spielen. Ergebnisse numerischer Gewittermodelle deuten auf eine Korrelation zwischen Gewittertyp und -lebensdauer einerseits und einer geeignet gewählten Richardson-Zahl (Verhältnis Labilitätsenergie zur kinetischen Energie der Windscherung) andererseits hin. Demnach muss für das Auftreten langlebiger Gewitter eine gewisse Balance der genannten Energieformen gefunden werden. Die Lebensdauer kann unter geeigneten Bedingungen jedenfalls mehrere Stunden betragen, was bei geringem mittleren Wind zu entsprechend hohen Punktniederschlägen führt.

Bei lokal begrenzten Starkniederschlagsereignissen aus Gewitterzellen darf die Kombination aus Tageszeit und synoptischem Antrieb nicht vernachlässigt werden: Die synoptisch-skalige zeitliche Änderung von Temperatur und Feuchte in der freien Atmosphäre wird den entsprechenden Prognosefeldern des ECMWF in räumlich und zeitlich linearer Interpolation entnommen. Die zwischen zwei OKM-Zeitschritten sich ergebenden Differenzen von Temperatur und Feuchte im ECMWF-Feld werden als dreidimensionale Felder zu den im OKM berechneten Werten addiert.

Bei der Interpretation sowohl von beobachteten als auch modellierten konvektiven Niederschlägen ist es zweckmäßig, zwischen maximalen Punktwerten und Gebietsmittelwerten zu unterscheiden. Das OKM liefert für jeden Termin zwei Niederschlagsfelder, die in dieser Weise zu interpretieren sind. Wir interessieren uns im folgenden ausschließlich für das Feld der Maximalniederschläge (P_{\max}): Es gibt für jeden Punkt an, welche Niederschlagsmengen dort in dem Fall, daß Gewitterzellen mit ihrem Kern genau über den Punkt ziehen, zu erwarten sind. P_{\max} stellt somit auf der Modellfläche mit Pixelgrößen von ca. 1,5 km x 1,5 km eine Art Maximalabschätzung dar.

Weitere Informationen zum Modell OKM sind den einschlägigen IDNDR-Projektberichten zu entnehmen (unter anderem dem abschließenden Bericht zu Phase VII (1997), Haiden und Pichler, 1997).

2.2 Simulation konvektiver Niederschläge bei vorgegebener Wiederkehrzeit

Zunächst wurden alle während des Sommers 1997 aufgetretenen Starkniederschläge mit konvektivem Charakter ausgefiltert und deren synoptische Ursachen ermittelt. Insbesondere wurden für eine meteorologische Rangordnung (Klassifikation) die zu den relevanten Terminen beobachteten Radiosondenaufstiege bezüglich Labilität, Energieinhalt, Temperatur und Feuchtigkeit herangezogen.

Um typische, konvektive Niederschläge auf synoptischem Weg zu berechnen, wurde mit der Anfang 1998 gültigen Modellversion von OKM eine große Zahl von Testläufen durchgeführt (Haiden, 1998). Es wurde darauf geachtet, Ereignisse nahe dem obersten, noch beobachtbaren Intensitätsbereich zu simulieren. Die Intensitäten noch weiter zu steigern erschien nicht zweckmäßig, weil die zugrunde liegende Modellphysik dafür nicht konzipiert ist. Die Modellergebnisse wurden auf dem Umweg modifizierter Start-Annahmen an die Auswertergebnisse aus Regionen mit langen Beobachtungsreihen angepasst (Haiden et al., 1991; Hammer, 1993; Mischkulnig, 1995; Watzinger und Gutknecht, 1996). Damit ist sichergestellt, dass das meteorologische Modell idente Resultate mit der Beobachtung liefert. Fehlbeträge an den Beobachtungsstellen durch Messfehler (Auer, 1992; Skoda, 1993d; Auer et al., 2000; Ungersböck, 2000) wurden mittels einer generellen Anhebung im Ausmaß von 5% berücksichtigt. Am Ende kristallisierten sich *physikalische Anfangsbedingungen* heraus, welche im OKM für Österreich bei den Dauerstufen *2 Stunden* bzw. *4 Stunden* einen mutmaßlichen *dreißigjähriger* und *fünfundsiebzigjähriger Niederschlag* P_{max} lieferten.

Der an jedem Gitterpunkt unter obigen Vorgaben berechnete Niederschlag P_{max} wird mit den gleichzeitig bekannten Topographiedaten in Beziehung gebracht:

Die Ergebnisse der Korrelationsrechnung zwischen konvektivem Niederschlag und Topographie umfassen dasselbe Gebiet wie in Lorenz und Skoda (1998). Die Koeffizienten einer Polynom-Regression $F(z)$, welche die Höhenabhängigkeit beschreibt sowie das Feld z_{min} werden abgespeichert.

$$F(z) = c_0 + c_1z + c_2z^2 + c_3z^3 \quad (2)$$

mit z als Geländehöhe in km und z_{min} als minimale Geländehöhe aller Korrelationen innerhalb eines Quadrates von 50 km Seitenlänge. Um eine sinnvolle räumliche Glättung in den Feldern der Koeffizienten herzustellen, wurde versucht, das ursprüngliche Niederschlagsfeld mittels der Regression (2) wieder herzustellen: Diejenige räumlich-gleitende Mittelungsfläche, welche das Ausgangsfeld mittels Varianzerklärung bestmöglich beschreibt, wurde gesucht: Als ein für Österreich brauchbarer Durchschnittswert ergab sich ein Quadrat mit 50 km Seitenlänge (Haiden, 1997, 1998).

Das Verfahren, Intensitäten konvektiver Niederschläge „flächenbezogen“ anstelle von „punktbezogen“ anzugeben, hat sich bewährt (Huff, 1994).

Alle Rechenergebnisse wurden auf das bei Lorenz und Skoda (1998) verwendete gröbere Gitter (1/12 Grad longitudinal, 1/20 Grad meridional; ca. 5 km x 5 km) übertragen, um eventuelle Verknüpfungen mit den dort angestellten Überlegungen zu erleichtern: So wurde zu Kontrollzwecken aus letzterem Modell unter anderem für die Dauerstufe *720 Stunden* ein *dreißigjähriger Niederschlag* P_{max} berechnet.

2.3 Koeffizientenbestimmung

Wir setzen im folgenden voraus, dass die im Rahmen von ÖKOSTRA für partielle Serien gefundenen Zusammenhänge zwischen Niederschlagsmenge, Andauer und Eintrittswahrscheinlichkeit in ihrer einfachsten mathematischen Form für das ganze Bundesgebiet Gültigkeit haben:

Im Programmpaket DRA (Digitalisierung und Regenauswertung) wird die Niederschlagshöhe hN als Funktion der Dauerstufe D und der Wiederkehrzeit T für partielle Serien in der Form

$$hN(D, T) = u(D) + w(D) \ln T \quad (3)$$

ausgedrückt. Für die einfach-logarithmische Gestalt von $u(D)$ und $w(D)$, in der Form

$$u(D) = a_u + b_u \ln D \quad \text{und} \quad w(D) = a_w + b_w \ln D \quad (4.1)$$

werden die Anpassungskonstanten a_u , b_u , a_w und b_w gemäß dem nachfolgend beschriebenen Verfahren am Gitter (1,5 km x 1,5 km) berechnet (siehe Gl. 4.2.1 bis 4.2.7), räumlich übergreifend geglättet und an den Koordinaten des gewählten Rechengitters (Maschenweite ca. 5 km x 5 km) gespeichert. Die Anpassungskonstanten charakterisieren das konvektive Niederschlagsverhalten und ersetzen die Niederschlagsmessungen.

Der im Vorschlag DRA gleichfalls zu berechnende doppelt-logarithmische Ansatz für u und w kann ebenfalls leicht berechnet werden.

Über die Abhängigkeit von u und w von der Dauerstufe D wurde an anderer Stelle ausführlich berichtet (Hammer, 1993). Um die dort erwähnte Schwachstelle zu umgehen, haben wir zusätzlich einen Potenzansatz in der Form

$$u(D) = a_u D^{b_u} \quad \text{und} \quad w(D) = a_w D^{b_w} \quad (4.2)$$

versucht. Es ist nicht möglich, eine Präferenz zwischen (4.1) und (4.2) anzugeben.

Wir berechnen **R1** und **R3** aus dem meteorologischen Modell OKM:

$$\text{Gl. (4.2.1): } hN(T=75, D=2) \quad \rightarrow \quad \mathbf{R1} = u(2) + w(2) \ln 75 = \textit{gegeben}$$

$$\text{Gl. (4.2.3): } hN(T=30, D=2) \quad \rightarrow \quad \mathbf{R3} = u(2) + w(2) \ln 30 = \mathbf{R1} / \textit{Datei T75_T30}$$

Die *Datei T75_T30* beschreibt den Unterschied, welcher durch die veränderte Jährlichkeit T eintritt.

Anschließend bestimmt man aus den Gl. (4.2.1) und (4.2.3) zuerst den Wert $w(2)$, sodann den Wert $u(2)$:

$$\rightarrow \quad hN(T, D=2) = u(2) + w(2) \ln T, \text{ mit } T \text{ beliebig,}$$

wobei

$$\rightarrow \quad u(2) = a_u(2)^{b_u} \text{ sowie } w(2) = a_w(2)^{b_w}$$

Analog wird für **R2** und **R4** verfahren:

$$\text{Gl. (4.2.2): } hN(T=75, D=4) \quad \rightarrow \quad \mathbf{R2} = u(4) + w(4) \ln 75 = \mathbf{R1} \cdot \textit{Datei D4_D2_T75}$$

$$\text{Gl. (4.2.4): } hN(T=30, D=4) \quad \rightarrow \quad \mathbf{R4} = u(4) + w(4) \ln 30 = \mathbf{R3} \cdot \textit{Datei D4_D2_T30}$$

Die Dateien D4_D2_T75 und D4_D2_T30 beschreiben die Unterschiede, welche im meteorologischen Modell durch veränderte Andauern D entstehen.

Anschließend bestimmt man aus Gl. (4.2.2) und (4.2.4) die Werte $w(4)$ und $u(4)$:

$$\rightarrow hN(T, D=4) = u(4) + w(4) \ln T, \text{ mit } T \text{ beliebig,}$$

wobei

$$\rightarrow u(4) = au(4)bu \text{ sowie } w(4) = aw(4)bw.$$

Aus $u(2)$ mit $u(4)$ folgt au und bu sowie mit $w(2)$ und $w(4)$ folgt aw und bw .

Wie sich anhand einer Berechnung von Niederschlagswerten mit Gl. 4.2.1 – 4.2.4 zeigt, ist der Gültigkeitsbereich der Koeffizienten au , aw und bu , bw innerhalb der Dauerstufen 2 bis 4 Stunden am besten gewährleistet. Bei kleiner gewählten Dauerstufen, etwa ab $D < 1$ Stunde, treten punktuell unrealistische Ergebnisse auf. Man ist daher gezwungen, für die Dauerstufen unter 2 Stunden weitere Stützstellen vorzugeben ($R5$ wird direkt aus dem meteorologischen Modell OKM entnommen; $R6$ wird nach Anwendung eines Reduktionsfaktors für Niederschläge, F , erhalten, der im Modell OKM einer Lebensdauer von Gewitterzellen zwischen 20 und 30 Minuten äquivalent ist):

$$\text{Gl. (4.2.5): } hN(T=75, D=1) \rightarrow R5 = u(1) + w(1) \ln 75 = R1 / \text{Datei D4_D2_T75}$$

$$\text{Gl. (4.2.6): } hN(T=75, D=0,25) \rightarrow R6 = u(0,25) + w(0,25) \ln 75 = R5 \cdot F,$$

mit

$$F = 0,15 (R5_{\max} - R5) / (R5_{\max} - R5_{\min}) + 0,5,$$

wobei

$R5_{\max}$: Größter auftretender Wert im Feld $R5$,

$R5_{\min}$: Kleinster auftretender Wert im Feld $R5$.

Als Randwert für sehr kurze Dauerstufen bewährt sich

$$\text{Gl. (4.2.7): } hN(T=75, D=0,083) \rightarrow R7 = R6 \cdot 0,6$$

Abschließend wird ein Glättungsalgorithmus (Regression) über die volle Andauer von D (= 12 Stunden) durchgeführt und als Endergebnis abgespeichert.

Damit ist die gewünschte Niederschlagsmenge $hN(D, T)$ bestimmbar. Es bleibt noch zu bedenken, dass die abgeleiteten Koeffizienten nur im Rahmen jener Zeiträume Gültigkeit haben, in denen die Voraussetzungen des OKM Gültigkeit haben. Das war für die Dauerstufe D bis maximal ein halber Tag und für die Wiederkehrzeit T höchstens 100 Jahre. Es gibt in der Literatur mehrere Hinweise, dass die *Überschreitungswahrscheinlichkeit* P sehr hoher Niederschlagsextreme, also über den Gültigkeitsbereich üblicher GEV-Ansätze hinaus, durch eine Potenzfunktion mit dem Exponenten q_s dargestellt werden kann. q_s ist Parameter eines sogenannten SOC-Ereignisses (self-organized critical event; Bak et al., 1988): Dieses Phänomen tritt in Zeitreihen mit divergierenden Momenten höherer Ordnung auf, was als direkte Konsequenz der Multifraktalität des Niederschlagsprozesses anzusehen ist (Schertzer et al., 1997; Schertzer et al., 1998). Die Bestimmung derartiger (mutmaßlich universeller) Größen kann nur aus langen Beobachtungsreihen mit hoher Auflösung gewonnen werden. Allfällige Veränderungen im Niederschlagsklima vergrößern den Unsicherheitsbereich. Zur Zeit dürfte ein Wert um 5,2 für den Parameter q_s angezeigt

sein (Hubert, 1996; Pandey et al., 1998; Tessier et al., 1993; 1996). Da sich der Kehrwert der betrachteten Kenngröße *Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit* P [Jahr^{-1}] durch die Wiederkehrzeit T [Jahre] ausdrücken lässt, stellt man leicht eine Proportionalität sehr extremer Niederschläge mit der Wiederkehrzeit T her: Exzessive Niederschlagsmengen wachsen bei steigender Wiederkehrzeit mit $T^{1/qs}$, also mit etwa $T^{0,19}$ an.

Sollte nun eine Bemessung mit einer Wiederkehrzeit von $T > 100$ [Jahre] erwünscht sein, berechnet man gemäß Gl. (3) $hN(D, T=100)$ und bildet **für $T > 100$ Jahre** optional

$$hN(D, T > 100) = \frac{hN(D, T = 100)}{4,6} \cdot \ln T \quad (5.1)$$

oder

$$hN(D, T > 100) = \frac{hN(D, T = 100)}{2,4} \cdot T^{0,19} \quad (5.2)$$

Zuletzt ist obiges Ergebnis mit der einhüllenden Rekordkurve (Jennings, 1950; Marx, 1969; Wiesner, 1970; Hubert, 1996; Stadelbacher, 1998; Schindler, 2000)

$$hN_{REKORD} = 50,54D^{0,5}, \quad (6)$$

mit hN [mm], D [Minuten], $T \rightarrow \infty$ zu vergleichen und darauf zu achten, dass die Bedingung (7)

$$hN(D, T > 100) \leq hN_{REKORD} \quad (7)$$

immer erfüllt bleibt.

2.4 Fläche des Einzugsgebietes und kritische Dauerstufe

Unter der Konzentrationszeit D_k versteht man die Zeit, welche nach Beginn des Niederschlagsereignisses verstreicht, bis alle Punkte eines Einzugsgebietes zum Abfluss an der tiefsten Stelle beitragen. Die allgemeine Idee dahinter ist, dass der stärkste Abfluss am Endpegel erreicht wird, sobald auch Niederschlag vom am weitesten entfernten Geländepunkt die Messstelle erreicht.

In der Literatur findet man zahlreiche Formeln zur Bestimmung von D_k , die in ausgewählten geographischen Regionen mit Beobachtungen kalibriert wurden (Sokolov et al., 1976; Blöschl, 1996): Die einfachste Beziehung betrachtet nur den Einfluss der Fläche des Einzugsgebietes A [km^2] in Form einer Potenzfunktion (Pilgrim, 1987). Weil es sich in unseren Fallstudien (siehe Kapitel 3) offenbar um kleine Einzugsgebiete mit einheitlich alpinem Charakter handelt, ist das bei der durchgeführten Regression errechnete Bestimmtheitsmaß mit $R^2 = 0,98$ - zunächst unerwartet - sehr hoch. Die zugehörige Näherungsbeziehung für die kritische Dauerstufe D_k [Minuten] für A [km^2] lautet:

$$D_k = 8,55A^{0,63} \quad (8)$$

Allgemein ist D_k als ein Verhältnis von L/V darstellbar, mit L [km] als Länge des Hauptabflusses im Einzugsgebiet und V [$m \text{ sec}^{-1}$] als einer charakteristischen Abflussgeschwindigkeit innerhalb des Einzugsgebietes mit der Fläche A [km^2]. Weite Verbreitung hat nach australischem Vorbild die Bransby-Williams-Formel (Linsley et al., 1975; Pilgrim, 1987) gefunden:

$$D_k = 58L A^{-0,1} S^{-0,2} \quad (9)$$

Letztere erfordert die manchmal sehr aufwendige Bestimmung des Parameters S [$m \text{ km}^{-1}$], der die „Hangneigung gleicher Flächen“ (equal area slope) im Einzugsgebiet des Hauptabflusses - und damit V - charakterisiert. Auf der Suche nach einem einfacheren, rasch nachvollziehbaren Verfahren, haben wir uns für folgende Vorgangsweise entschieden:

Man bestimme die größte Seehöendifferenz im Einzugsgebiet (ΔH [m]; höchster Punkt des gesamten Einzugsgebietes - wobei die Gebietsgrenzen einzuschließen sind - minus der Seehöhe der im Einzugsgebiet am niedrigsten gelegenen Pegelmessstelle). Der Bezug der Fläche zur Hangneigung wird über die Größe L [km] hergestellt, wobei die Relation der gesuchten Längen-Flächenbeziehung, beziehungsweise deren fraktale Dimension, u.a. bei Robert und Roy (1990) besprochen wird. Wir verwenden die Näherung nach Rosso et al. (1991):

$$L = 1,27 A^{0,6} \quad (10)$$

S [$m \text{ km}^{-1}$] wird somit durch $(\Delta H/L)$ ersetzt; die Werte von ΔH und S der Fallbeispiele findet man in Tab. 1.

Die kritische Dauerstufe D_k [Minuten] wird somit als Funktion der maximalen Höhendifferenz ΔH [m] und der Gebietsfläche A [km^2] abschätzbar. Die Gl. einer optimierten Anpassung an die Daten der vorgegebenen Fallbeispiele (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,86$) lautet:

$$D_k = \frac{58L}{A^{0,1} 1,34 S^{0,32}} \quad (11.1)$$

oder

$$D_k = 59,34 \cdot A^{0,692} \cdot (\Delta H)^{-0,32} \quad (11.2)$$

Die für D_k [Minuten] errechneten Werte sind gleichfalls in *Tabelle 1*, aufgenommen. Es wird empfohlen, grundsätzlich die Ansätze (11.1) oder (11.2) demjenigen aus Gl. (8) vorzuziehen. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die erforderliche genaue, österreichweite Berechnung der Koeffizienten noch ausständig ist.

2.5 Räumliche Abminderung

Reduktionsverfahren in Abhängigkeit von der Flächenausdehnung des Niederschlags haben in jüngster Zeit Blöschl (1996) sowie Mattern (1996) ausführlich diskutiert. Die sogenannten Flächenreduktionsfaktoren des Niederschlags hängen von der Andauer D , der Wiederkehrzeit T des Niederschlagsereignisses, der betrachteten Fläche A und

ganz entscheidend von einem räumlichen Korrelationsabstand ab. Letzterer kann unter anderem aus der Varianzreduktion im Niederschlagsfeld, welche mit zunehmender Flächengröße im allgemeinen eintritt, abgeschätzt werden. Detaillierte Studien liegen nur für wenige Regionen vor. In topographisch unruhigem Gelände zeigen sich vor allem bei den höheren Dauerstufen starke Anisotropien.

Bei der Behandlung konvektiver Niederschlagsereignisse über kleinen Einzugsgebieten ist man in der glücklichen Lage, sich noch im „flachen Teil“ der Abminderungskurve zu befinden. Damit fallen etwaige Fehler noch nicht ins Gewicht. Mattern, 1996 gibt für die Dauerstufen 5 Minuten bis 24 Stunden Koeffizienten einer Polynomregression 4. Grades der Niederschlagsabminderungskurven (berechnet aus Abminderungsfaktoren des Niederschlags in verschiedener (radialer) Entfernung vom Niederschlagszentrum) für die Region Salzkammergut an. Diese Beziehung lässt sich auch als Funktion der Fläche darstellen. Die Autoren zweifeln, ob sich diese in einer Region errechneten Koeffizienten österreichweit übertragen lassen. Es wird vorgeschlagen, auf einen in der Literatur häufig anzutreffenden Ansatz zurückzugreifen:

Der mittlere Niederschlag P [mm] eines Starkniederschlagsereignisses in Abhängigkeit von der Niederschlagsfläche A [km²], bezogen auf ein Niederschlagsmaximum am Gitterpunkt P_{max} [mm] folgt für vorgegebene Dauerstufe D [min] und Wiederkehrzeit T [Jahre] in allgemeiner Form

$$P = P_{max}^{-kA^n}, \quad (12)$$

wobei k und n empirisch zu bestimmende Parameter sind. Wir entscheiden uns für eine „sanfte Reduktion“, indem wir für k und n aus den in der Literatur angegebenen Intervallen (Court, 1961; Foufoula-Georgiou et al., 1990) eher die niedrigen Werte auswählen:

$$k = 0,19D^{-0,56} \quad \text{und} \quad n = 0,5. \quad (13)$$

Diese Annahme ist bei Vorliegen überwiegend kleiner Einzugsgebiete berechtigt.

Alle Programmalgorithmen und erforderlichen Parameterdateien sind am Rechner-system des Hydrographischen Zentralbüros installiert.

Achtung: P_{max} repräsentiert in der praktischen Anwendung einen extremen Niederschlagswert, der als ein räumlich geglätteter Hüllwert in einer Fläche mit Pixelgröße von ca. 5 km x 5 km anzusehen ist. P_{max} stimmt im allgemeinen *nicht* mit dem gesuchten Punkt-Wert an einer aus dem Pixel ausgewählten Niederschlagsmessstelle überein.

3. Anwendungen

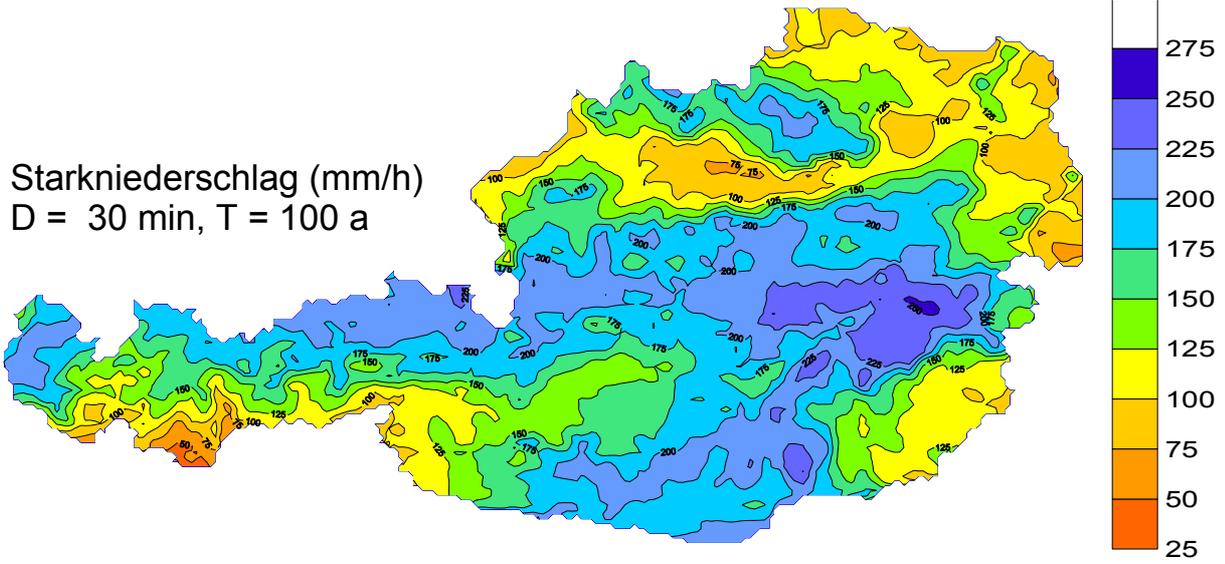
Nachstehende Tabelle enthält die in Punkt 2.4 definierten Kenngrößen für die Speicher bzw. Sperren Gstins, Hochalmsee, Radlsee, Mühldorfsee, Hierzmann, Pack und Langmann.

Tab 1: Kenngrößen für Speicher: A [km²], ΔH [m], S [m km⁻¹] = (ΔH/L) sowie D_k [Minuten] nach Gl. (11.2) (linke Spalte) und beobachtet (rechte Spalte)

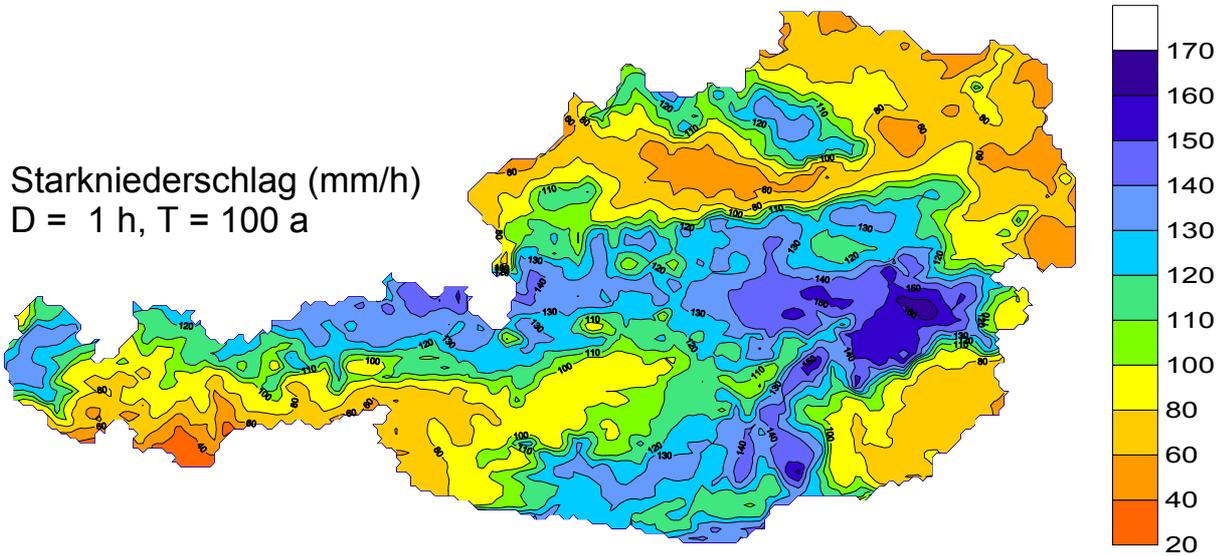
	A [km ²]	ΔH [m]	S = ΔH/L [m km ⁻¹]	D _k [Minuten]
Gstins	177,00	2119	74,74	183,9 2 – 3 Stunden
Hochalmsee	1,60	565	336,30	10,8..... 10 – 15 Minuten
Radlsee	1,77	564	315,08	11,6..... 10 – 15 Minuten
Mühldorfersee	2,44	503	231,80	15,0..... 10 – 15 Minuten
Hierzmann	162,40	970	36,03	222,5..... 4 Stunden
Pack	61,70	488	32,38	141,9..... 2 – 3 Stunden
Langmann	174,60	970	34,50	233,9..... 4 Stunden

Als weitere Beispiele sind im Anschluss 6 Starkniederschlagskarten ausgewählter Dauerstufen (Wiederkehrzeiten $T = 100$) für Österreich dargestellt. Diese zeigen die Intensität konvektiver Niederschläge in flächenbezogener Darstellung (Huff, 1994). Ein den Karten entnommener Niederschlagswert tritt innerhalb eines Gebietes von ca. 5 km x 5 km „punktuell“ wenigstens an einer Stelle auf. Weil extreme Niederschlagsereignisse mit dem konventionellen Stationsnetz im allgemeinen nur mangelhaft erfasst werden, kann die flächenrelevante Betrachtungsweise – insbesondere bei Wiederkehrzeiten ($T < 10$) – beim Datenvergleich mit ausgewählten Niederschlagsmessstellen regional zu deutlich höheren Werten als bisher gewohnt führen (Lovejoy et al., 1986).

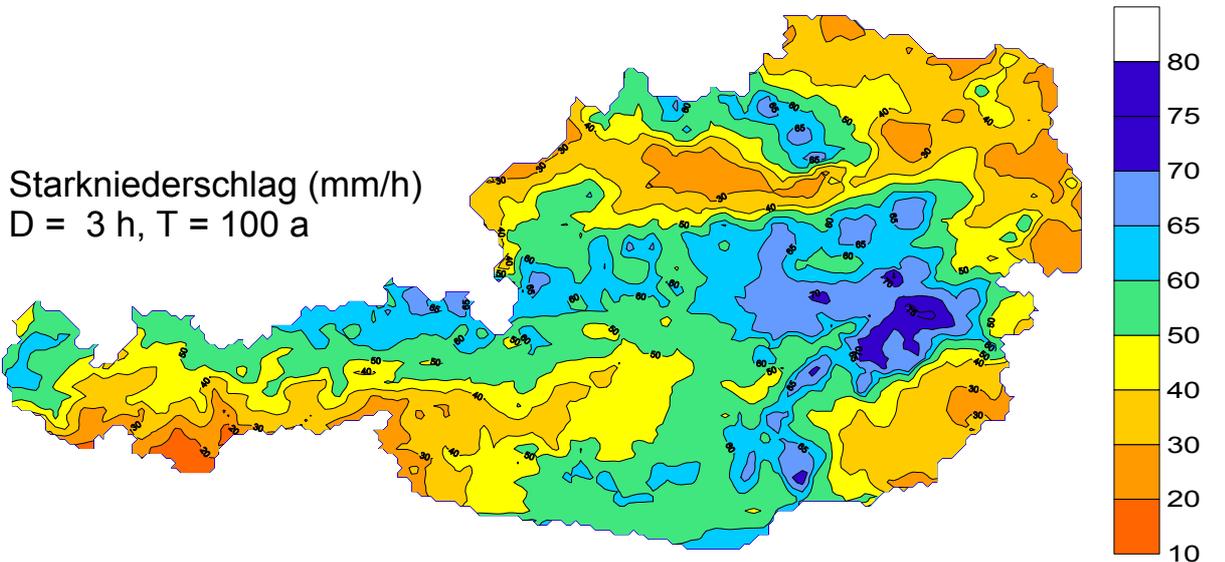
Starkniederschlag (mm/h)
D = 30 min, T = 100 a



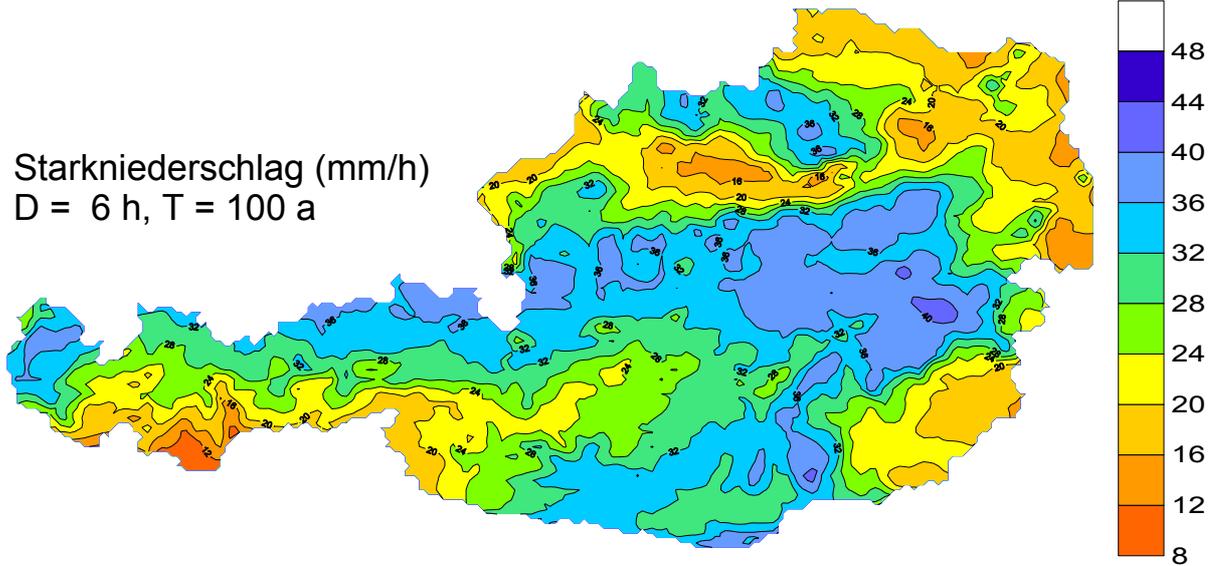
Starkniederschlag (mm/h)
D = 1 h, T = 100 a



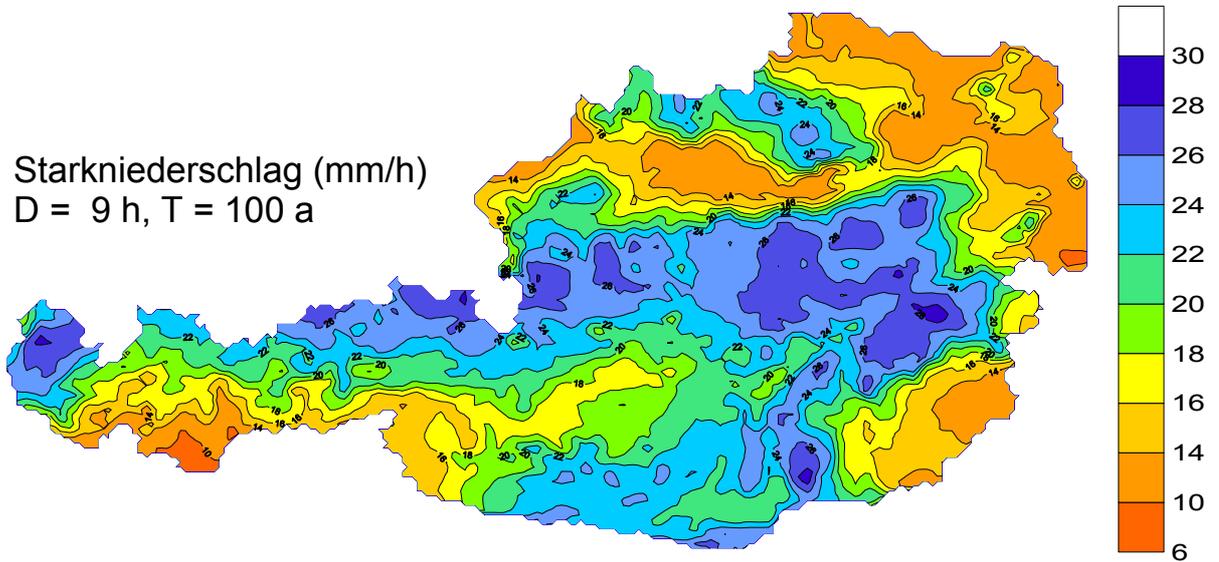
Starkniederschlag (mm/h)
D = 3 h, T = 100 a



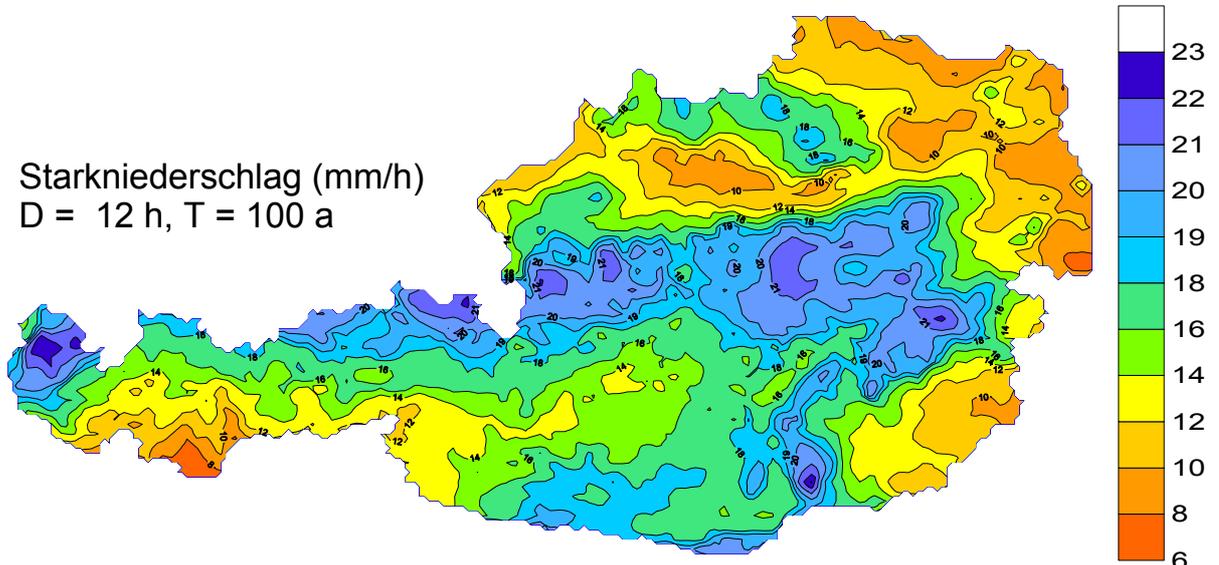
Starkniederschlag (mm/h)
D = 6 h, T = 100 a



Starkniederschlag (mm/h)
D = 9 h, T = 100 a



Starkniederschlag (mm/h)
D = 12 h, T = 100 a



4. Literatur

Amt der NÖ Landesregierung; Gruppe Wasser, Abteilung Hydrologie (1998) Bemessungsabfluß (§ 4, aus: Leitlinien – Entwässerung von Straßen), St. Pölten.

Auer, I. (1992) Ergebnisse der Niederschlagsmessungen am Sonnblick-Observatorium. Ein Vergleich verschiedener Meßmethoden. 88.-89. Jb. d. Sonnblickvereines f. d. J. 1990 -1991, 49 - 53, Wien,.

Auer, I., R. Potzmann und W. Schöner (2000) Welchen Beitrag leisten Totalisatoren für die Klimaforschung im Hochgebirge? 96.-97. Jb. d. Sonnblickvereines f. d. J. 1998 - 1999, 22 - 30, Wien.

Bak, P., Tang, C., and K. Weissenfeld (1988) Self-organized criticality. *Phys. Rev. A, Gen. Phys.*, 38, 364 - 374.

Bárdossy, A. (1993) Estimation of extreme regional precipitation under climate change. In: Engineering Risk and Reliability in a Changing Physical Environment. Nato Advanced Study Institute. Deauville, France.

Binark, A. M. (1979) Simultane Niederschlagsgenerierung an mehreren Stationen eines Einzugsgebietes. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, III, Nr. 16, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

Brasseur, O. (1998): Simulation of extreme phenomena over Belgium using a three-dimensional mesoscale model. From: 2nd European Conference on Applied Climatology. Österr. Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, Heft 19, CD-ROM, Wien.

Blöschl, G. (1996) Scale and Scaling in Hydrology. Especially: § 4.: Scaling components of the hydrologic cycle, 165 - 234. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer. Band 132, 346 Seiten, Wien.

Court, A. (1961) Area-depth rainfall formulas. *J. Geophys. Res.*, 66, 1823 - 1831.

Deutscher Wetterdienst (1990) Starkniederschlagshöhen für die Bundesrepublik Deutschland. KOSTRA 87 - Abschlußbericht. Offenbach/Main.

DVWK (1991) Starkniederschläge in der Bundesrepublik Deutschland. Erläuterungen und Ergänzungen zu KOSTRA. DVWK-Schriften 97/1991, Paul Parey, Hamburg und Berlin.

DVWK (1997): Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland. DVWK-Mitteilungen 29, 112 Seiten, Essen.

Dyck, S., U. Koch und G. Peschke (1971) Simulation von Starkniederschlägen zur Erzeugung langer Reihen von Jahreshochwasserabflüssen. *Wasserwirtschaft – Wassertechnik*, 21, 3, 98 - 103.

Fleckseder, H. (Ed.) (1994) Generelle Entwässerungsplanung im Siedlungsraum. Wiener Mitteilungen: Wasser - Abwasser - Gewässer, Band 121, Wien.

Foufoula-Georgiou, E. and L.L. Wilson (1990) In search of regularities in extreme rainstorms. *J. Geophys. Res.*, 95, 2061 - 2072.

- Fritzer, H. (1983) Quantitative Oberflächenwasserbeseitigung im Straßenbau. BM für Bauten und Technik. Straßenforschung, Heft 215, 1 - 48.
- Gutknecht, D. (1977) Ein Computermodell zur Erzeugung einer Folge von Regenereignissen. Forschungsbericht Nr. 1, TU-Wien, Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft. Wien.
- Guttorp, P. (1996) Stochastic modeling of rainfall. From: IMA-Volume in Mathematics and its Applications, vol. 79: Environmental Studies - Mathematical, Computational, and Statistical Analysis, 171 - 187. Springer-Verlag New York.
- Haberlandt, U. (1996) Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlags für Schmutzfrachtberechnungen. Inst. für Wasserbau der Univ. Stuttgart, Mitteilungen, Heft 88.
- Haiden, T., P. Kahlig, M. Kerschbaum und F. Nobilis (1989) Zum Einfluß der Orographie auf den vermutlich größten Niederschlag. Mitt. Hydr. Dienst in Österr., 61, 62 - 72.
- Haiden, T., P. Kahlig und M. Kerschbaum (1991) Forschungen zu meteorologisch relevanten Parametern im Hinblick auf den vermutlich größten Abfluß (PMF). Forschungsbericht im Auftrag des BMLF, Sektion IV, 77 Seiten, Wien.
- Haiden, T., M. Kerschbaum, P. Kahlig, and F. Nobilis (1992) A refined model of the influence of orography on the mesoscale distribution of extreme precipitation. Hydrol. Sci. J., 37, 417 - 427.
- Haiden, T. (1994) Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung. Teil IV: Niederschlagsinterpolation unter Berücksichtigung orographischer Effekte. Mitt. Hydr. Dienst in Österr. 72, 47-62.
- Haiden, T. (1997, 1998) Persönliche Mitteilung. Wien.
- Haiden, T. und R. Pichler (1997) IDNDR - Mesoskaliges Kurzfrist-Vorhersagemodell. Projektteil: Analytisch-numerische Simulation extremer Niederschlagsereignisse im mesoskaligen Bereich. Aus: Skoda, G. (Ed.): IDNDR-Tätigkeitsberichte zu den Phasen I bis VII (1991 bis 1997), Abschließender Bericht zu Phase VII. IMG Wien.
- Hammer, N. (1993) Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung. Teil III: Optimierungsverfahren zur Erstellung von Regenhöhenlinien und Regenspendenlinien. Mitt. Hydr. Dienst in Österr. 69, 43 - 58.
- Hauck, E. (1983) Berechnungsmethoden zur Bestimmung des „vermutlich größten Niederschlages“. (PMP). Kapitel II. Aus: Beiträge zur Wahl des Bemessungshochwassers und zum „vermutlich größten Niederschlag“. DVWK-Schriften Nr. 62. Verlag Parey, Hamburg und Berlin.
- Hauck, E. (1983) Arbeitsanleitung für die Ermittlung des „vermutlich größten Niederschlages“ (PMP) mit Anwendungsbeispielen. Kapitel III. Aus: Beiträge zur Wahl des Bemessungshochwassers und zum „vermutlich größten Niederschlag“. DVWK-Schriften Nr. 62. Verlag Parey, Hamburg und Berlin.

- Hubert, P. (1996) Fractals et multifractals appliqués a l'étude de la variabilité temporelle des précipitations. International Hydrology Series: R.A. Feddes (Ed.): Space and Time Scale Variability and Interdependencies in *Hydrological Processes*, 175 - 181.
- Huff, F. A. (1994) Record-breaking microstorm system supports new rainfall frequency estimates in Illinois. *Bull. AMS*, 75, 7, 1223 - 1226.
- Jacob, D. and R. Podzun (1997) Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorol. Atmos. Phys.* 63, 119 - 129.
- Jennings, A. H. (1950) Worlds greatest observed point rainfalls. *Monthly Weather Rev.* 78, 4.
- Kreps, H. (1958) Über die Ermittlung der wahrscheinlichen Wiederkehr von Naturereignissen. *Mitt. Hydr. Dienst in Österr.* 21.
- Kreps, H. und H. Schimpf (1965) Starkregen und Starkregenstatistik. Mit zahlreichen Beilagen und Karten. *Mitt. Hydr. Dienst in Österr.* 42, 1 - 44.
- Lecher, K. (1982) Ingenieurhydrologie. § 6 aus: Taschenbuch der Wasserwirtschaft. 6. Aufl., Verlag Paul Parey, Hamburg.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A., and J.L.H. Paulhus (1975) *Hydrology for Engineers*. 2nd edtn., McGraw-Hill, New York.
- Lorenz, P. und G. Skoda (1997) Ermittlung von Flächenmitteln des Niederschlags aus punktuellen Messungen. Forschungsbericht beim BMLF, Abt. IV A 3.
- Lorenz, P. and G. Skoda (1998) Aerea means of precipitation calculated from isolated measurements. 2nd European Conference On Applied Climatology (ECAC 98), 19 to 23 Oct. 1998, Vienna. *Österr. Beiträge zu Meteorologie und Geophysik*, Heft 19, CD-ROM, Wien,.
- Lorenz, P. und G. Skoda (1999) Ermittlung von Flächenmitteln des Niederschlages aus punktuellen Messungen. *Mitt. Hydr. Dienst in Österr.* 78, 47-65.
- Lorenz, P. und G. Skoda (2000) Bemessungsniederschläge kurzer Dauerstufen ($D \leq 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten. *Mitt. Hydr. Dienst in Österr.*
- Lovejoy, S., D. Schertzer, and P. Ladoy (1986) Fractal characterization of inhomogeneous geophysical measuring networks. *Nature* 319, 43 - 44.
- Marx, S. (1969) Über die extremsten Niederschlagsmengen auf der Erde. *Z. für Meteorologie* 21,.
- Mattern, M. (1996) Räumliche Abminderung von Starkniederschlägen. Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien. 166 Seiten, Wien.
- Mischkulnig, O. (1995) Starkregenauswertungen aus dem Salzkammergut gemäß ÖKOSTRA. Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien. 241 Seiten, Wien.

ÖKOSTRA-93 (1992) Österreichische koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und Auswertung. Heft 3: Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung. Forschungsbericht, BMLF, Wien.

Österreichisches Normungsinstitut (1990) ÖN B 2.500 - Begriffsnorm, Abwassertechnik. Wien.

Österreichisches Normungsinstitut (1999) ÖN B 2.506-1 - Regenwassersickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen - Anwendung, Bemessung, Bau und Betrieb; § 5.1.1.: Bemessungsregen. Wien.

ÖWAV (Österreichischer Abwasser- und Abfallwirtschaftsverband) (1990) ÖWAV-Regelblatt „Generelle Entwässerungsplanung“. Wien.

Pandey, G., S. Lovejoy, D. Schertzer (1998) Multifractal analysis of daily river flows including extremes for basins of five to two million square kilometers, one day to 75 years. *Journ. Hydrology* 208, 62 - 81.

Pilgrim, D.H. (1987) Australian Rainfall and Runoff: A guide to flood estimation, Volume 1. Revised edition. Institution of Engineers Australia. Barton, A.C.T.

Reinhold, F. (1940) Regenspenden in Deutschland. Archiv für Wasserwirtschaft Nr.56, Berlin,.

Robert, A. and A.G. Roy (1990) On the fractal interpretation of the main-stream length-drainage area relationship. *Water Resources Res.* 26, 839 - 842.

Rosso, R., Bacchi, B., and P. La Barbera (1991) Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks. *Water Resources Res.* 27, 381 - 387.

Sackl, B. (1994) Ermittlung von Hochwasser-Bemessungsganglinien in beobachteten und unbeobachteten Einzugsgebieten. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Band 13, TU-Graz.

Schertzer, D. and S. Lovejoy (1997) Universal multifractals do exist! *J. Applied Meteorol.*, 36, 1296 - 1303.

Schertzer, D. and S. Lovejoy (1998) The multifractal phase transition route to self-organized criticality. *Phys. Rep.*, in press.

Schimpf, H. (1970) Untersuchungen über das Auftreten beachtlicher Niederschläge in Österreich. *Österr. Wasserwirtschaft* 22, 121 - 125.

Schimpf, H. (1970) Untersuchungen über das Auftreten beachtlicher Niederschläge in Österreich. *Mitt. Hydr. Zentralbüro* 61, 12.

Schindler, H. (2000) Fehlerquellen bei der Behandlung von physikalischen Problemen mittels Dimensionsanalyse. Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien.

Schmidt, Th. (1997) Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland. DVWK-Mitteilungen 29, 112 Seiten, Bonn.

- Skoda, G. (1993a) Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung. Projektbericht. Mitt. Hydr. Dienst in Österr. 69, 26 - 28.
- Skoda, G. (1993b) Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung. I: Erste Erfahrungen mit ÖKOSTRA-93. Mitt. Hydr. Dienst in Österr. 69, 29 - 32.
- Skoda, G. (1993c) Eine optimierte Starkniederschlagsauswertung. II: Digitalisierung und Regenauswertung. Das Programmpaket DRA. Mitt. Hydr. Dienst in Österr. 69, 33 - 42.
- Skoda, G. (1993d) Fehler der Niederschlagsmessung. Teil I einer Pilotstudie. Ausführliches Literaturverzeichnis. BMLF, Wien.
- Skoda, G. (1993e) Möglichkeiten der Bestimmung der Höhenabhängigkeit des Niederschlags. Teil II einer Pilotstudie. Ausführliches Literaturverzeichnis. BMLF, Wien.
- Skoda, G. (Ed.) (1997) IDNDR-Tätigkeitsberichte zu den Phasen I bis VII (1991 - 1997). Abschließender Bericht zu Phase VII. IMG Wien.
- Skoda, G. und F. Nobilis (1999) Schätzung maximaler Niederschläge in Österreich. Tagungsband, DVWK: ‚Extreme Naturereignisse: Niederschlag – Abfluß‘. München, Januar 1999.
- Sokolov, A.A., Rantz, S.E., and M. Roche (1976) Floodflow computation: methods compiled from world experience. Unesco Press, Paris.
- Stadelbacher, K. (1998) Anwendungsmöglichkeiten der Dimensionsanalyse auf meteorologische Fragestellungen. § 6.3.: Extremniederschlag. Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien.
- Strauss, P., K. Auerswald, E. Klaghofer und W.E.H. Blum (1995) Erosivität von Niederschlägen: Ein Vergleich Österreich – Bayern. Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung 36, 1 – 5.
- Strauss, P., Konecny, F., and W.E.H. Blum (1996) rainfall generation procedure for the EUROpean Soil Erosion Model. EUROSEM-Projektbericht 1996, BOKU, Wien.
- Stubenvoll, H. (1993) Analyse der zeitlichen Struktur von Niederschlagsereignissen auf der Grundlage zeitvariabler Datenaufzeichnung. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Band 10, I: 1 – 103, TU-Graz.
- Svensson, C. and P.R. Rakhecha (1998) Estimation of Probable Maximum Precipitation for dams in the Hongru river catchment, China. Theor. Appl. Climatol. 59, 79 - 91.
- Tessier, Y., Lovejoy, S., and D. Schertzer (1993) Universal multifractals: theory and observations for rain and clouds. *J. Appl. Meteor.*, 32 (2), 223 - 250.
- Tessier, Y., Lovejoy, S., Hubert, P., Schertzer, D., and S. Pecknold (1996) Multifractal analysis and modeling of rainfall and river flows and scaling, causal transfer functions. *J. Geophys. Res.*, 101 (D 21), 26427 - 26440.

Ungersböck, M. (2000) Korrektur des systematischen Fehlers weltweiter, synoptischer Niederschlagsmessungen. Diplomarbeit am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Wien,.

Wiesner, C.J. (1970) Hydrometeorology. Chapman and Hall Ltd., London.

World Meteorological Organization (WMO) (1986) Manual for estimation of probable maximum precipitation. Operational Hydrology, Rep. 1 (WMO No. 332), WMO, Geneva.

Watzinger, A. und D. Gutknecht (1996) Aufbereitung und Basisanalyse der Starkregendaten aus den Hydrographischen Jahrbüchern 1948 - 1993. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, TU-Wien.

Willems, W. (1993) Saisonale Niederschlagsvorhersage auf Basis eines stochastischen Modells für tägliche Niederschläge. Dissertation, Materialien zur Ostafrika-Forschung, Heft 10, Trier.

Wussow, G. (1922) Untere Grenze dichter Regenfälle. Met. Z. 39, 173 - 180.

Zeyringer, Th. (1993) Untersuchung des räumlichen Verhaltens von Niederschlagsereignissen auf zeitvariabler Datengrundlage. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Band 10, II: 1 - 271. TU-Graz.

Anschriften der Verfasser:

OR Dipl.-Ing. Peter Lorenz
Hydrographisches Zentralbüro
Marxergasse 2
A - 1030 Wien
E-mail: Peter.Lorenz@bmlfuw.gv.at

a.o.Univ.-Prof. Dr. Georg Skoda
Institut für Meteorologie und Geophysik
der Universität Wien
Hohe Warte 38
A - 1190 Wien
E-mail: georg.skoda@univie.ac.at

DIE BEDEUTUNG DES BODENS IM ZUSAMMENHANG MIT DER HYDROLOGISCHEN REGIONALISIERUNG

Raphaelae Löhmannsröben

1. Einleitung und Zielsetzung

Der Boden nimmt im hydrologischen Geschehen eine herausragende Bedeutung ein. Seine Eigenschaften wie Körnung, Struktur, Porenvolumen, Horizontabfolge, Profilmächtigkeit und Hydromorphie bestimmen, welche Anteile des Niederschlags infiltrieren, oberflächlich oder oberflächennah abfließen, gespeichert werden oder in die Tiefe versickern (Hartge, 1978; Herrmann, 1977). Zurecht wird diese oberste Schicht der Erdoberfläche daher auch als „Herzstück“ (Forster, 1994), „Schlüsselstelle“ (Gutknecht, 1996) oder „Schaltstelle“ (Kirnbauer und Steidl, 1995) für den Wasserhaushalt, bzw. das hydrologische Modell angesehen.

Bei dieser Bedeutung des Bodens ist es eigentlich verwunderlich, dass er erst so spät Eingang in hydrologische Berechnungen gefunden hat. So wurden bei den rein statistischen Verfahren Bodeninformationen noch völlig vernachlässigt. Gefördert durch die gestiegenen Rechenkapazitäten der EDV und durch die Möglichkeiten der Geographischen Informationssysteme ist diese Vernachlässigung aber inzwischen Modellen gewichen, die genaueste Nachbildungen der verschiedenen Abflussprozesse im Boden anstreben. (Eine gute Übersicht über Untersuchungen und Verfahren bieten Gutknecht, 1996, Kirnbauer et al., 2000 und Scherrer, 1997). Unter den Aspekten des methodischen Aufwandes und der Flächenrepräsentanz der Ergebnisse erweisen sich die Prozessmodelle aber oft als problematisch.

Im Hinblick auf eine räumliche Einordnung und Übertragbarkeit von Ergebnissen stellt dieser Beitrag daher die Überlegung in den Mittelpunkt, bei hydrologischen Modellen von dem auszugehen, was eine flächenhafte Übertragung ermöglicht, nämlich der Bodenkarte und den darin enthaltenen Informationen „Bodentyp“ und „Bodenart“. Die Zielsetzung besteht darin, zu veranschaulichen, wieviel hydrologisch verwertbare Informationen dieses Mittel enthält und wie sich diese Informationen ableiten lassen.

2. Die Bodenkarte als Schlüssel zur Regionalisierung

Im Hinblick auf die hier behandelte Fragestellung muß vorausgeschickt werden, daß nur groß- bis mittelmaßstäbige Bodenkarten hinreichend genaue Informationen zur Verfügung stellen können, also Karten im Maßstab 1:5.000 bis maximal 1:25.000. Bezüglich deren Verfügbarkeit s. auch Kap. 3.

2.1 Der Karteninhalt „Bodentyp“ als hydrologische Kompaktinformation

Bodentypen sind Ergebnisse aus der Verwitterung bestimmter Ausgangsgesteine, von Vegetationstypen und deren Streu, der Arbeit von Bodenorganismen sowie der Einflüsse von Klima, Zeit und Mensch. Der Vielzahl Einfluss nehmender Faktoren

entsprechend entwickeln sich unterschiedlichste Bodentypen, erkennbar an charakteristischen Horizontabfolgen. Diese Einflussvielfalt hat darüber hinaus zur Folge, dass es sich beim „Bodentyp“ um einen hoch komplexen und integrierten Parameter handelt.

Im folgenden soll zunächst anhand der Interpretation einiger Bodenprofile unter den Aspekten Infiltration, Oberflächenabfluss, Speicherkapazität und Verhalten bei unterschiedlicher Ausgangsfeuchte beispielhaft veranschaulicht werden, wieviel hydrologische Informationen dieser Parameter beinhaltet. Im Anschluss daran wird aufgezeigt, dass sich gerade wegen seiner Komplexität bestimmte hydrologische Eigenschaften gut zuordnen lassen.



Abb. 1: Braunerde mit ausgeprägter Krümelstruktur.



Abb. 2: Terra Fusca, mit typischer quellfähiger Subpolyederstruktur.

2.1.1 Beispiele für die hydrologische Aussagekraft von Bodentypen

Abb. 1 zeigt eine *Braunerde*. Erkennbar ist ein tiefgründiges Profil, das Fehlen jeglicher Staunässe und eine durchgehend locker krümelige Struktur von hoher Stabilität mit ausgewogenem Verhältnis von schnell wasserleitenden Grobporen und speicherfähigen Mittel- und Feinporen, d.h.

- dieser Boden lässt eine sehr gute Infiltration und keinen Oberflächenabfluss erwarten,
- auf Grund der Mächtigkeit des Profiles und des ausgewogenen Porenverhältnisses weist er eine sehr hohe Speicherkapazität auf und
- durch die stabile Krümelstruktur mit ausreichend Grobporen ist auch nach Vorniederschlägen noch eine hohe Infiltrationskapazität zu erwarten.

Abb. 2 zeigt das ebenfalls sehr mächtige und speicherfähige Profil einer *Terra fusca*. Auch hier ist kein Anzeichen von Staunässe zu erkennen. In seiner hydrologischen



Abb. 3: Hanggley, mit typischen Oxidationsmerkmalen im Go-Horizont.

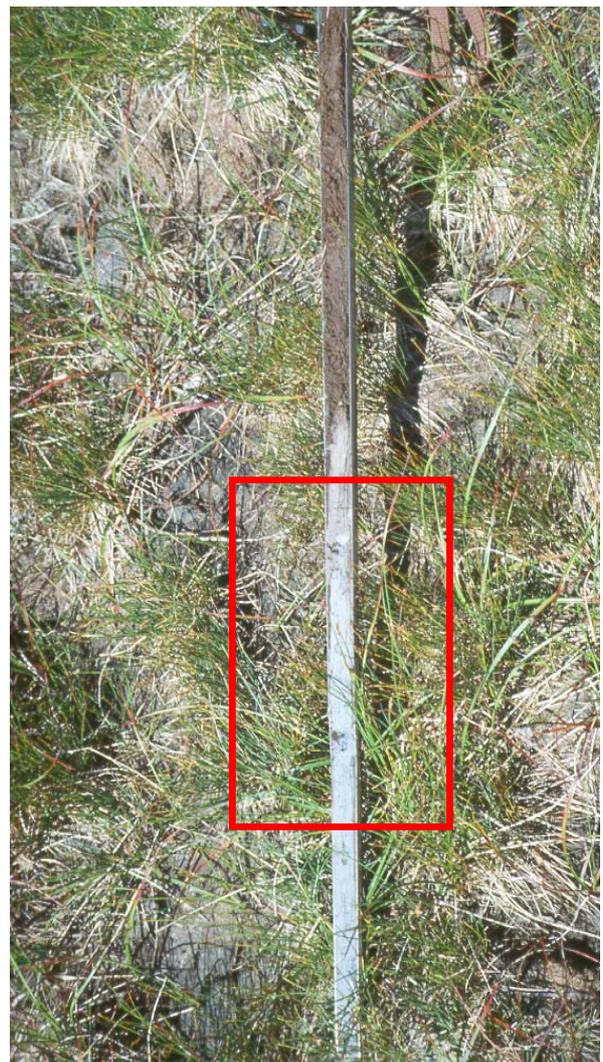


Abb. 4: Nasshanggley, mit ausschließlichen Reduktionsmerkmalen.

Wirksamkeit ist dieser Boden jedoch nicht so konstant einzustufen wie der zuvor behandelte. Typisch für eine Terra fusca ist die Subpolyeder-Struktur, ein Gefüge, das in Abhängigkeit von vorausgehender Trockenheit sehr stark schrumpfen und ausgeprägte Makroporen bilden und nach einer regenreichen Periode sehr stark quellen kann, d.h.

- im ersten Fall ist die Infiltration hoch und ein Oberflächenabfluss findet nicht oder nur gering statt, wohingegen
- im zweiten Fall die Infiltration durch den Verlust der Grobporen deutlich herabgesetzt ist und sich der Oberflächenabfluss deutlich erhöht, insbesondere bei Niederschlägen mit hoher Intensität.

In Abb. 3 ist ein *Hanggley* dargestellt. Bei diesem Bodentyp lässt sich auf Grund seiner hydromorphen Prägung bereits ableiten, dass der Retentionsraum dieses Bodens eingeschränkt ist, da diese Färbung auf weitestgehende Wassersättigung zurückzuführen ist. D.h. die Speicherkapazität ist generell gering und der Oberflächenabfluss hoch,



Abb. 5: Rendzina auf undurchlässigem, kompakten Fels.



Abb. 6: Rendzina auf durchlässigem Hangschutt.

- beide können aber in ihrer Höhe schwanken, was durch die typische Rostfleckung im Go-Horizont signalisiert wird. Nach längeren Trockenphasen kein ein Teil dieses Profiles zur Wasseraufnahme bereit stehen.

Der *Nasshanggley* in Abb. 4 hingegen zeigt durch seine durchgehend blaue Färbung und anmoorige Humusauflage an, dass an diesem Standort ein annähernd konstant hoher Wassergehalt im Profil vorliegt,

- d.h. immer mit extrem hohen Oberflächenabflüssen zu rechnen ist.

Das Profil der *Rendzina* in Abb. 5 ist durch eine lockere Humusauflage, aber auch durch eine ausgeprägte Flachgründigkeit gekennzeichnet, d.h.

- Niederschläge können aufgrund der Humusauflage leicht infiltrieren und
- es tritt kein oder kaum Oberflächenabfluss auf.
- Durch die geringe Speicherkapazität des flachgründigen Profiles und auf Grund des dichten, kaum geklüfteten Untergrundes lässt dieser Standort jedoch einen starken Interflow erwarten.

Vergleicht man das vorherige Profil mit der *Rendzina* in Abb. 6, so fällt die völlig andere Beschaffenheit des Untergrundes auf. Der lockere, grusige Hangschutt, dem dieser Boden aufliegt, ermöglicht in diesem Fall die Tiefenversickerung eindringender Niederschläge.

2.1.2 Quantifizierung hydrologischer Wirkungen von Bodentypen mittels Beregnungsversuchen

Die zuvor vorgenommene rein qualitative hydrologische Interpretation auf der Grundlage der speziellen Phänotypen verschiedener Bodenprofile lässt sich mit Hilfe von Beregnungsversuchen quantitativ untermauern. Die Auswertung von ca. 400 standardisierten Beregnungsversuchen auf alpinen Standorten mit künstlichen Starkregen hat gezeigt, dass sich gerade dem komplexen Parameter „Bodentyp“ sehr gut bestimmte Abflussverhalten zuordnen lassen (Löhmannsröben, 1999).

Bei den in Abb 7. gezeigten Werten handelt es sich um eine idealisierte Darstellung von Durchschnittswerten, die in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren zum Teil große Schwankungsbreiten aufweisen können (Löhmannsröben, 1999). Diese Streubreiten lassen sich jedoch stark reduzieren bei Berücksichtigung der Faktoren

- Nutzungsüberprägung, wie Verdichtung, Humusverlust oder Profilverkürzung,
- vorausgehende Witterung, insbesondere bei schrumpf- und quellfähigen sowie hydromorphen Böden und
- Vegetationstyp, wenn er differenziert nach Feuchtestufen angesprochen wird.

Bei Berücksichtigung dieser Faktoren lässt sich eine sehr gute Einschätzung eines Standortes hinsichtlich der Höhe des auf ihm stattfindenden Oberflächenabflusses vornehmen.

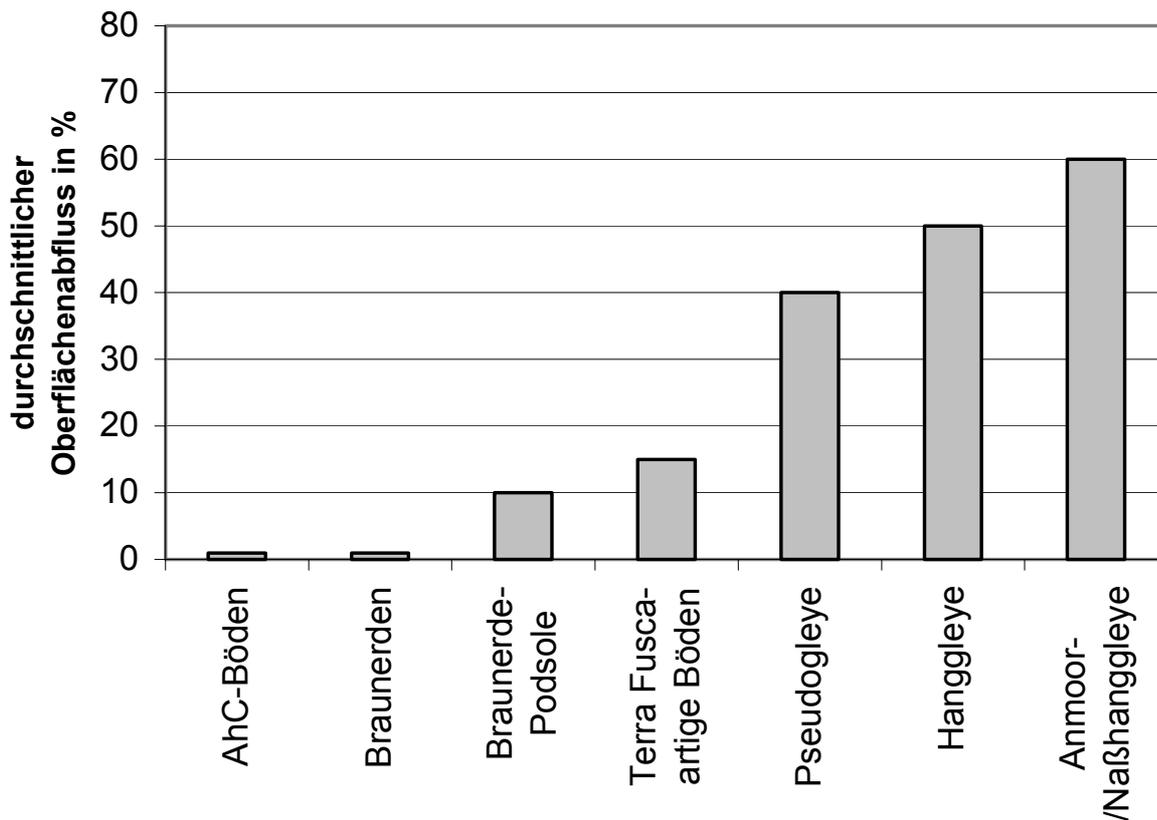


Abb. 7: Der Oberflächenabfluss bei Starkregen in Abhängigkeit von verschiedenen Bodentypen.

Keine Abhängigkeit in der Höhe des Oberflächenabflusses zeigt sich hingegen zu den Faktoren Hangneigung und Bodenart. Vergleichbare Ergebnisse finden sich in den Arbeiten von Kirnbauer und Steidl (1995), Markart et al. (1997) und Scherrer (1997).

2.1.3 Ableitung von Karten zum Oberflächenabfluss

Auf der Grundlage der zuvor genannten Ergebnisse lassen sich Bodentypen hinsichtlich ihrer Bereitschaft zur Bildung von Oberflächenabfluss klassifizieren und Bodenkarten mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) in Oberflächenabflusskarten umwandeln (Bunza et al., 1996). Die Abb. 8 und 9 zeigen Ausschnitte einer Bodenkarte und einer daraus abgeleiteten Oberflächenabflusskarte aus einem Wildbacheinzugsgebiet des bayerischen Alpenraums. Die Möglichkeiten des GIS erlauben in dem Zusammenhang auch die Simulation von geänderten Umweltbedingungen, indem man zum Beispiel die Faktoren Nutzung oder Vorfeuchte variiert, was im Hinblick auf Prognosen und Schutzmaßnahmen in der Wasserwirtschaft eine wichtige Information darstellt (Bunza et al., 1996).

2.2 Der Karteninhalt „Bodenart“ als wichtige hydrologische Zusatzinformation

Da für das Abflussgeschehen im Gewässer nicht nur der Oberflächenabfluss eine Rolle spielt, kann die zuvor dargestellte Information im Hinblick auf eine Abflussmodellierung nicht ausreichen. Besonders auf den Flächen ohne oder mit geringem Oberflächenabfluss stellt sich die Frage, was dort mit dem infiltrierenden Niederschlag passiert? Kann er von der Bodenmatrix aufgenommen und gespeichert werden oder ist dort der Boden so durchlässig, dass er das Wasser in die Tiefe versickern lässt oder trifft er auf dichte Horizonte, die einen Interflow erwarten lassen? Während sich der Faktor „Bodenart“ allein nicht zur Abflusskategorisierung eignet, wie die Beregnungsversuche zeigen, erweist er sich im Hinblick auf die Beantwortung dieser Fragen als wichtige Ergänzung. Durch eine Klassifikation der Bodenarten nach ihrer Durchlässigkeit und ihrer Speicherfähigkeit lassen sich die abflussschwachen Flächen eines Einzugsgebietes hydrologisch wesentlich differenzierter ansprechen.

2.3 Die Synthese von Bodentyp und Bodenart zur „hydrologischen Standort-eigenschaft“

Ergänzt man die Klassifikation von Bodentypen hinsichtlich des Oberflächenabflusses und die Einteilung von Bodenarten nach ihrer Durchlässigkeit und Speicherkapazität noch durch eine Einteilung der Bodentypen nach ihrer Mächtigkeit und nach potentiellen Stauhorizonten im Profil, so lassen sich mit Hilfe Geographischer Informationssysteme folgende „Hydrotöpfe“ mit komplexen hydrologischen Standortinformationen für ein Einzugsgebiet ausweisen (Löhmannsröben, 1998): Flächen mit

- hoher bis sehr hoher Durchlässigkeit (kein oder kaum Oberflächenabfluss und kaum Niederschlagsrückhalt),
- hoher bis sehr hoher Niederschlagsretention (kein oder kaum Oberflächenabfluss)
- mäßiger bis geringer Niederschlagsretention,
- hohem bis sehr hohem Oberflächenabfluss (Oberflächenabfluss dominant, Niederschlagsretention unbedeutend) und
- Bereitschaft zu Tiefenversickerung oder Interflow.

Die Gegenüberstellung von drei Einzugsgebieten aus den bayerischen Alpen veranschaulicht die hydrologische Aussagekraft derart klassifizierter Gebiete (die Darstellungen beziehen sich auf die Bedingung „mittlere Ausgangsfeuchte“):

Beim Einzugsgebiet des Scheuenbachs (Abb. 10) handelt es sich um ein Gebiet, in dem Flächen mit hohen und sehr hohen Oberflächenabflüssen dominieren, d.h. hier ist mit sehr schnell auftretenden und sehr hohen Abflussspitzen zu rechnen. Im Gebiet des Alpbachs (Abb. 11) ist ein großer Flächenanteil mit hoher Retentionsfähigkeit vorhanden. Hier ist nach einem Niederschlagsereignis mit einer wesentlich schwächeren Reaktion des Baches zu rechnen, d.h. die Abflussspitze wird später und wesentlich gedämpfter auftreten. Abb. 12 zeigt ein Gebiet mit hohem Flächenanteil sehr durchlässiger Flächen. In großen Bereichen ist hier jedoch auch ein Interflow

angezeigt, d.h. auch hier wird nach einem Niederschlag eine ausgeprägte Abflussspitze auftreten, die im Vergleich zum Gebiet in Abb. 10 aber etwas verzögert sein wird, da sie nicht durch Oberflächen-, sondern Zwischenabfluss bedingt wird.

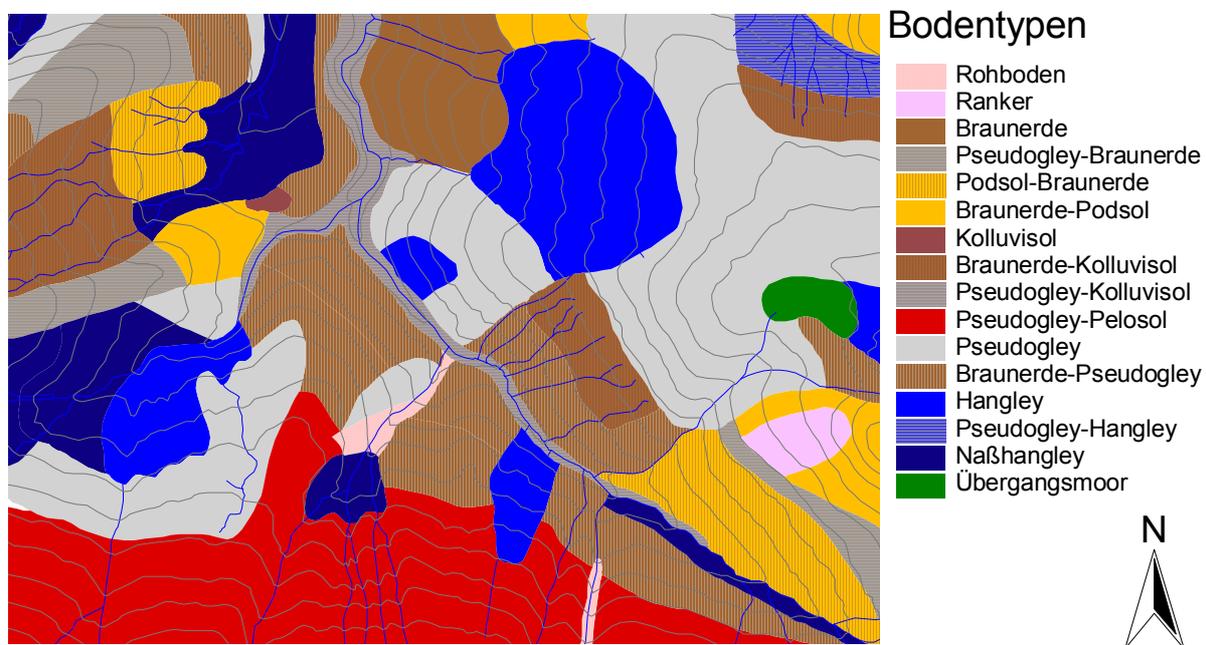


Abb. 8: Ausschnitt aus einer Bodenkarte.

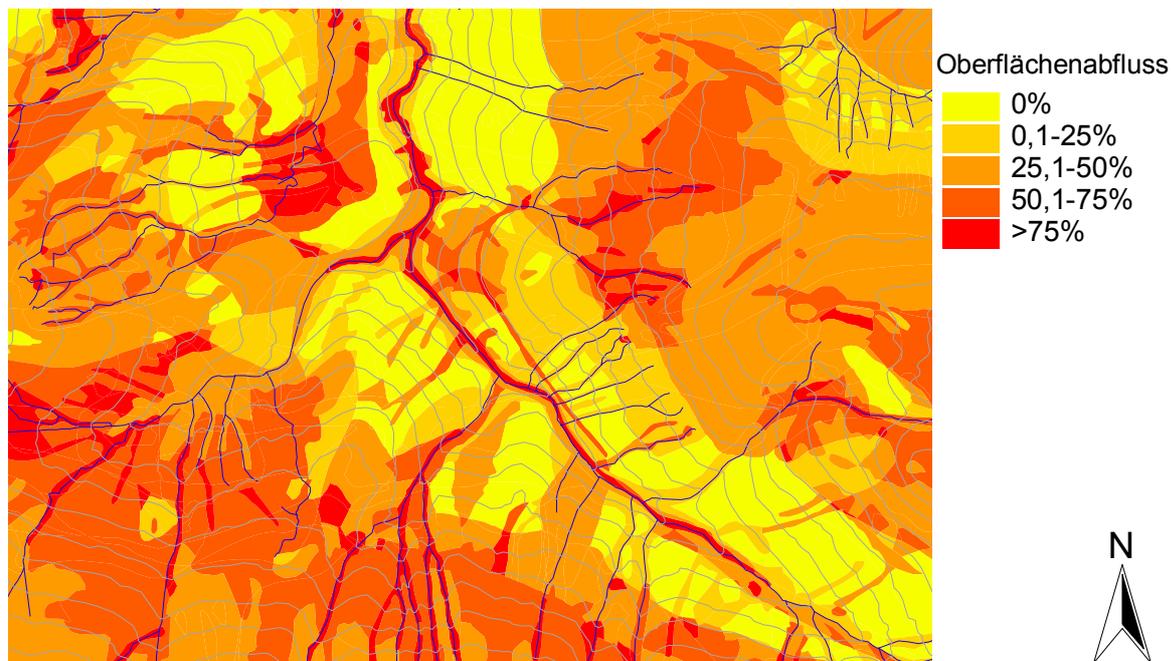


Abb. 9: Ausschnitt aus einer abgeleiteten Karte zum Oberflächenabfluss.

2.4 Wichtige Ergänzungsinformationen

Auf die Einbeziehung der Vegetation und des Nutzungseinflusses in die Einteilung eines Geländes hinsichtlich seiner Bereitschaft zur Bildung von Oberflächenabfluss wurde bereits in Kap. 2.1.2 hingewiesen. An dieser Stelle muss noch angeführt werden, dass für eine hinreichende Beschreibung der Wasserbewegung im Hang noch die Geologie mit einbezogen werden muss (siehe auch Gutknecht 1996). Hier bietet sich ein vergleichsweises Vorgehen, also die Klassifikation von Gesteinstypen und Hang- und Verwitterungsschuttdecken hinsichtlich ihrer Klüftigkeit und Durchlässigkeit an (Löhmannsröben et al., 1998).

3. Einbeziehung von Bodenkarten in die Niederschlag-Abfluss-Modellierung – derzeitiger Stand und Ausblick

So naheliegend die Einarbeitung von Informationen aus Bodenkarten vom fachlichem Standpunkt ist, so weit ist die Praxis noch davon entfernt. Ein sehr viel versprechender Ansatz existiert jedoch in der Schweiz, wo flächenhafte bodenkundliche Informationen in Form der Ausweisung sogenannter „Abflusstypen“ Eingang in die Praxis der hydrologischen Modellierung finden (Naef et al., 1994, Scherrer, 1997). Hier beruht die Modellierung auf einer Flächenbewertung, die in ihren Grundzügen der in Kap. 2.3 geschilderten ähnelt.

Die Diskussion im Rahmen des Seminars zeigte in eindrucksvoller Weise, wie groß das Interesse an der bodenkundlichen Information, wie schwierig aber auch ihre Beschaffung ist. Das Hauptproblem liegt im Fehlen entsprechender Unterlagen. In den wenigsten Fällen kann auf ein systematisches Kartenwerk im entsprechenden Maßstab zurückgegriffen werden, wenn auch in Bayern derzeit an der Erstellung von Konzeptbodenkarten im Maßstab 1:25.000 gearbeitet wird. Das Fehlen dieser Unterlage ist umso bedauerlicher, als sie zahlreichen Institutionen, wie Land- und Forstwirtschaft, Naturschutz und Landschaftsplanung und eben der Wassergüte- und mengenwirtschaft von Nutzen wäre.

Die eigens durchgeführte Bodenkartierung für ein Niederschlag-Abfluss-Modell scheint in der Praxis aus Kostengründen indiskutabel. Dennoch sollte auf gebietsbezogene Bodeninformationen nicht völlig verzichtet werden, insbesondere, wenn es um so aktuelle und wichtige Themen wie Hochwasserschutz geht. Um bei fehlenden Bodenkarten dennoch nicht völlig auf diese wichtigen Informationen verzichten zu müssen, wurde für die wasserwirtschaftliche Praxis in Bayern eine Geländeanleitung entwickelt, die in kompakter Form boden- und vegetationskundliche Merkmale beschreibt und erklärt. Mit ihrer Hilfe ist eine Einschätzung eines Geländes hinsichtlich hydrologisch relevanter Flächen möglich (Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft, 2000).

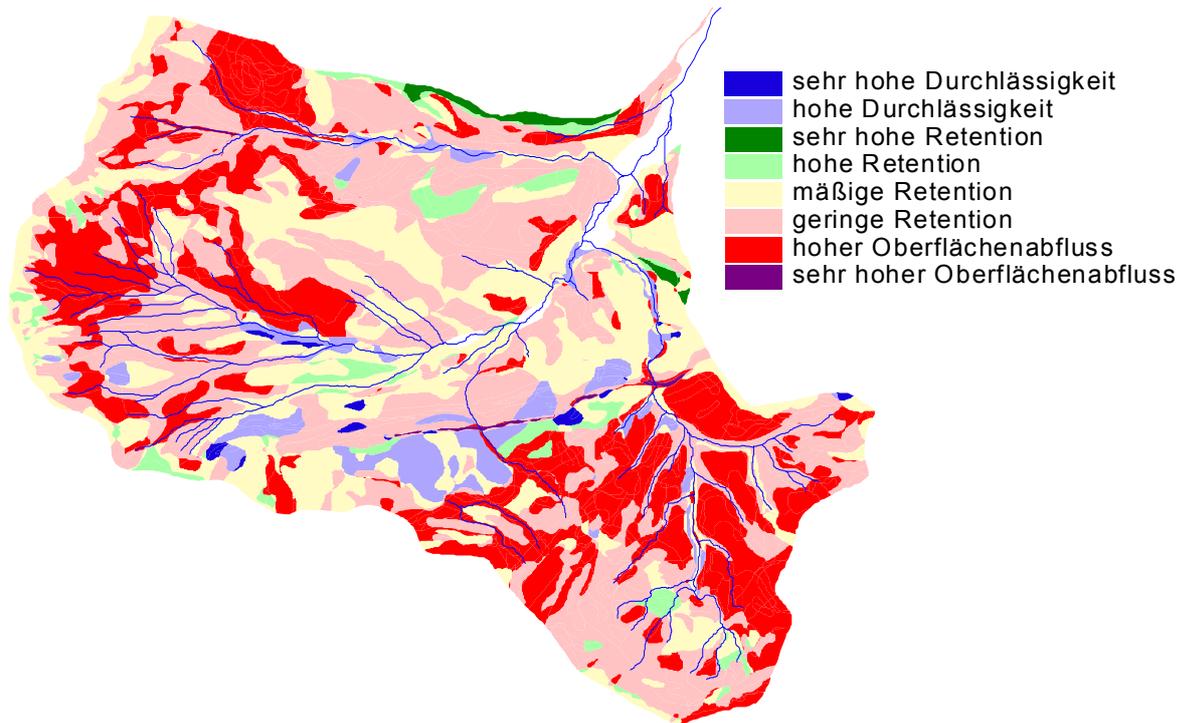


Abb. 10: Hydrologische Standorteigenschaften im Einzugsgebiet Scheuenbach.

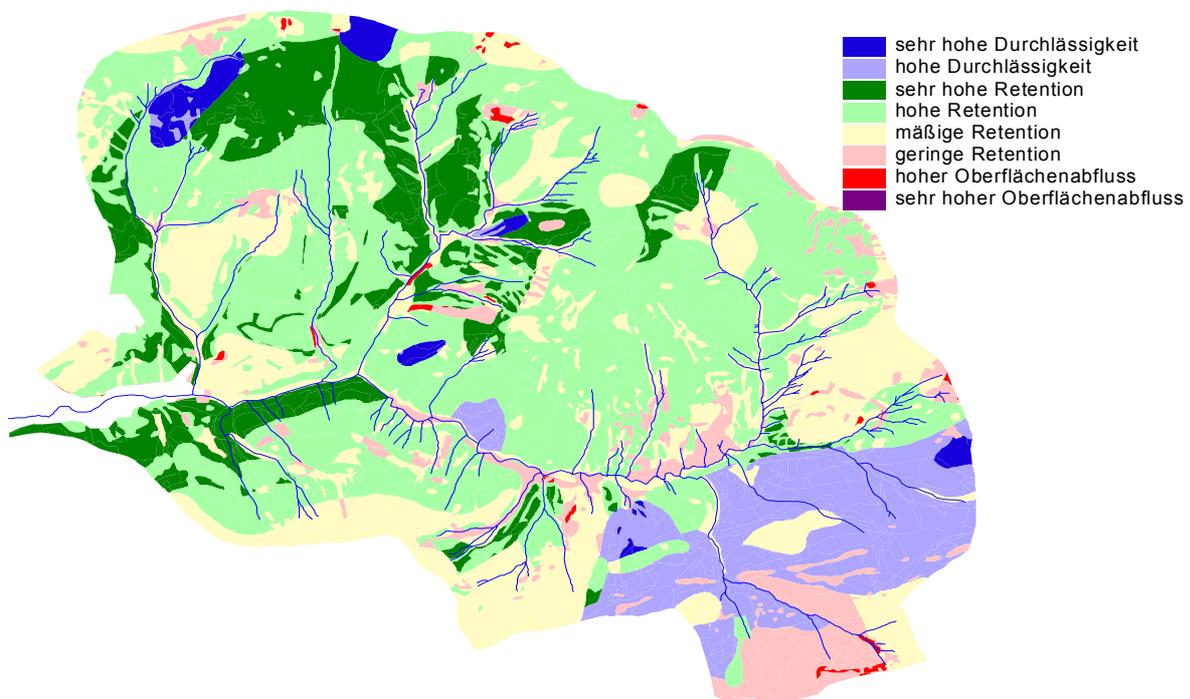


Abb. 11: Hydrologische Standorteigenschaften im Einzugsgebiet Alpbach.

Hydrologische Standorteigenschaften im Einzugsgebiet Gaisalpbach

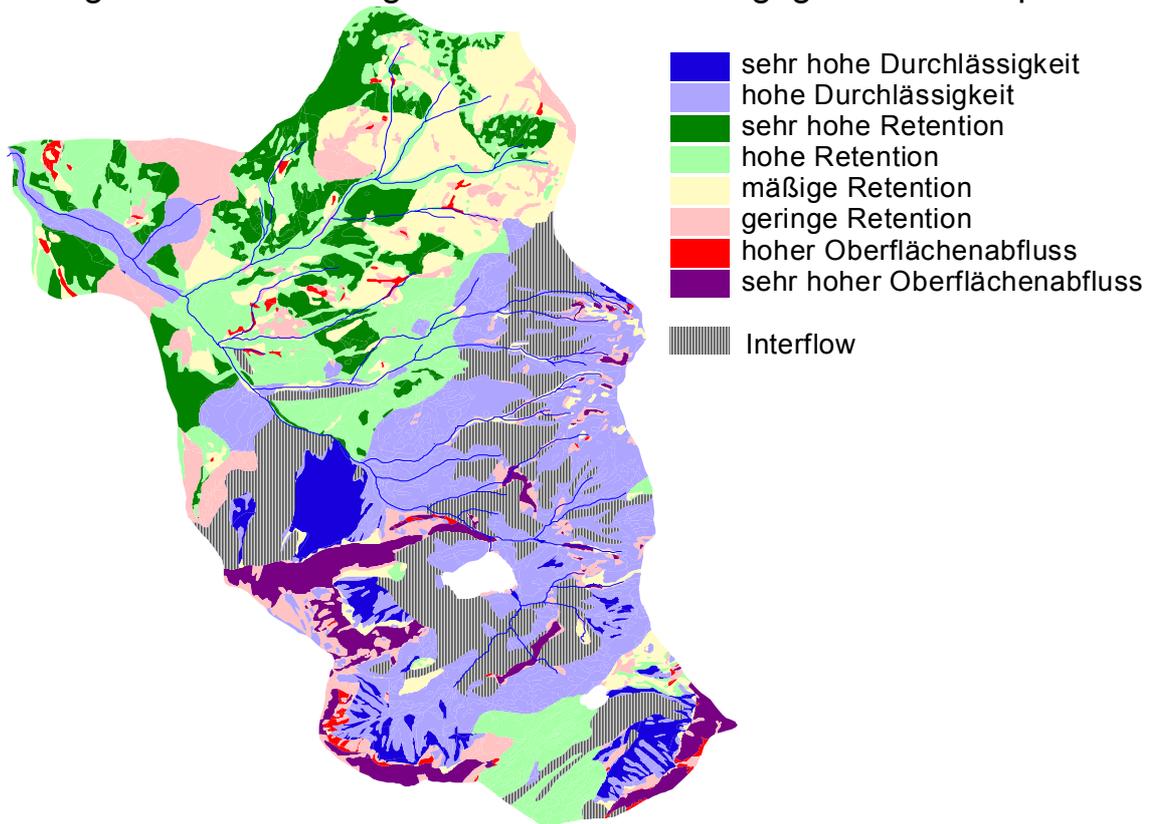


Abb. 12: Hydrologische Standorteigenschaften im Einzugsgebiet Gaisalpbach.

4. Zusammenfassung

Im Anschluss an eine kurze Darstellung des Bedeutungswandels, den der Boden in der hydrologischen Modellierung durchgemacht hat, konzentriert sich dieser Beitrag auf die Gewinnung flächenhaft übertragbarer bodenkundlicher Aussagen für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Als Schlüssel für diese Eingangsdaten wird die groß- bis mittelmaßstäbige Bodenkarte und die darin enthaltenen Informationen über Bodentypen und Bodenarten angesehen.

Auf eine hydrologische Interpretation verschiedener Bodenprofile unter den Aspekten Infiltration, Oberflächenabfluss, Speicherkapazität und Verhalten bei unterschiedlicher Ausgangsfeuchte folgt deren Quantifizierung anhand von Ergebnissen aus Beregnungsversuchen, mit deren Hilfe sich Karten zum Oberflächenabfluss ableiten lassen.

Im nächsten Schritt wird erläutert, wie sich die Aussage dieser Karte durch die zweite in der Bodenkarte enthaltene Information, die Bodenart, erweitern läßt. Es folgt die Synthese von klassifizierten Bodentypen und Bodenarten zur komplexen Aussage „Hydrologischer Standorteigenschaften“. Anhand von drei Beispielen werden die Aussagemöglichkeiten einer solchen Einzugsgebietscharakterisierung dargestellt. Auf die notwendige Ergänzung dieser Aussagen durch eine Einbeziehung des geologischen Untergrundes wird hingewiesen.

Abschließend wird kurz die Diskrepanz zwischen erwünschtem und derzeit stattfindendem Einsatz bodenkundlicher Daten in die hydrologische Modellierung diskutiert.

5. Literatur

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2000) Geländeanleitung zur Abschätzung des Abfluss- und Abtragsgeschehens in Wildbacheinzugsgebieten. Materialien d. Bayer. Landesamtes f. Wasserwirtschaft (Hrsg.). Nr. 87. München.

Bunza, G., P. Jürging, R. Löhmannsröben, Th. Schauer und R. Ziegler (1996) Abfluss- und Abtragsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten. Grundlagen zum integralen Wildbachschutz. Schriftenr. d. Bayer. Landesamtes f. Wasserwirtschaft (Hrsg.). H. 27. München.

Forster, F. (1994) Die Simulation hydrologischer Prozesse mit dem Modell BROOK – eine Analyse. Hydrologie kleiner Einzugsgebiete. Gedenkschrift Hans M. Keller. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz. Nr. 35. Hrsg. SGHL. S. 195-208.

Gutknecht, D. (1996) Abflusentstehung an Hängen – Beobachtungen und Konzeptionen. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*. Jg. 48. H. 5/6. S. 134-144.

Hartge, K. H. (1978) Einführung in die Bodenphysik. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart.

Herrmann, R. (1977) Einführung in die Hydrologie. B. G. Teubner. Stuttgart.

Kirnbauer, R. und R. Steidl (1995) Abflusentstehung auf unterschiedlichen Böden. *Wasser und Boden*. Jg. 47. H. 8. S. 17-21.

Kirnbauer, R., H. Lang und F. Forster (2000) Hydrologische Forschungsgebiete – Informationsquellen für Wissenschaft und Praxis. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*. Jg. 52. H. 5/6. S. 87-94.

Löhmannsröben, R. (1998) Ableitung und Bedeutung hydrologischer Standorteigenschaften in Wildbacheinzugsgebieten. Informationsberichte d. Bayer. Landesamtes f. Wasserwirtschaft (Hrsg.). H. 2. S. 27-40.

Löhmannsröben, R. (1999) Die Analyse von Abflussprozessen und ihr Zusammenhang mit beschleunigten Abtragsprozessen im Gebirge. Relief, Boden, Paläoklima. 14. Gebr. Bornträger. Berlin, Stuttgart. S. 129-148.

Löhmannsröben, R., O. Altfeld, G. Bunza, M. Eidt, A. Fischer, P. Jürging, Th. Schauer und R. Ziegler (1998) Abschlußbericht zum Entwicklungsvorhaben „Umsetzung des Integralen Wildbachschutzkonzeptes in die Planung - Leitfaden zum Integralen Wildbachschutz“. Unveröffentl. Bericht d. Bayer. Landesamtes f. Wasserwirtschaft. München.

Markart, G., B. Kohl und P. Zanetti (1997) Oberflächenabfluss bei Starkregen – Abflussbildung auf Wald-, Weide- und Feuchteflächen (am Beispiel der Schesabürserberg, Vorarlberg). *Centralblatt f. d. ges. Forstwesen*. Jg. 114. H. 2/3. S. 123-144.

Naef, F., J. Trösch, P. Horat und S. Scherrer (1994) Das Hochwasser vom 16.7.1993 in Spreitenbach. Rekonstruktion des Ereignisses, Abschätzung der Wiederkehrperiode, Vergleich mit dem 100jährigen Hochwasser. VAW Zürich. Unveröfftl. Ber. Nr. 4071/50.

Scherrer, S. (1997) Abflussbildung bei Starkniederschlägen – Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mittlgn. VAW Zürich. H. 147.

Anschrift der Verfasserin:

Dipl.-Geogr. Raphaela Löhmannsröben
Büro PROALPIN
Franz-Marc-Str. 34
D-82404 Sindelsdorf
E-mail: proalpin@t-online.de

SOFTWAREEINSATZ BEI DER NA-MODELLIERUNG UND „STANDARD“ NA MODELLE

Frederick M. Cate

Kurzfassung

Der Einsatz von NA-Modellen in Österreich ist weitverbreitet. Es werden in Zukunft, nicht zuletzt auf Grund der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie, viele weitere Anwendungsbereiche dazukommen. Für den Ingenieur wird sich die Frage stellen, welche Softwarepakete für die gestellten Aufgaben am besten geeignet sind. Um einen möglichst hohen, einheitlichen Stand der Technik und der Anwendung in Österreich zu erreichen, wird die Entwicklung von „Standard“-NA-Modelle auf Grundlage bestehender Softwarepakete angeregt.

1. Aufgaben für NA-Modellierungen

Die derzeit häufigsten Aufgaben für NA-Modellierungen in der österreichischen Wasserwirtschaft sind:

- HW-Prognose
- Dimensionierung von Rückhaltmaßnahmen
- Abflussuntersuchungen im Rahmen von Schutzwasserwirtschaftlichen Grundsatzkonzepten (Flussgebietsuntersuchungen)
- Fragestellungen im Zusammenhang mit der Wasserkraft

In Zukunft werden weitere Aufgaben dazukommen:

- Anschlaglinien bestimmen (in Verbindung mit 2-D Modellen)
- Einzugsgebietsmanagement
 - Analyse des Gesamtwirkungssystems (Systemanalyse), auch unter Einbeziehung von historischen Ereignissen
 - Erkennen des Einflusses von Einzelmaßnahmen und Maßnahmenbündel auf das System
 - Optimierung von Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel
- Nachweis über die Veränderung der Abflussverhältnisse bei neuen Widmungen (Grünland in Bauland) sowie bei größeren Bauvorhaben (z.B. Einkaufszentren, Wohnanlagen, Industriebauten, Verkehrsbauten, ...)

Die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie wird auch einen größeren Einsatz von NA-Modellierungen fordern. Die EU-Kommission ist derzeit bestrebt, im Rahmen von Forschungsvorhaben Modelle für die ganzheitliche Wasserwirtschaft sowohl in den großen Flussgebieten (Donau, Rhein, Elbe, ...) als auch auf Ebene der „sub-basins“ (Teileinzugsgebiete) zu entwickeln. Sollte Österreich weiterhin eine bedeutende Rolle bei der europäischen Wasserwirtschaft spielen, muss rasch eine Entscheidung über die nationale Strategie in diesen Fragen gefällt werden.

2. Ingenieurmäßiger Einsatz von NA-Modellierung

Es sind zahlreiche NA-Modelle weltweit im Einsatz. Die Forschung in diesem Zusammenhang ist sehr rege, da noch viele Fragen zu untersuchen sind. Somit ist eine pragmatische Unterscheidung zwischen dem „wissenschaftlichen“ Einsatz und dem „ingenieurmäßigen“ Einsatz zu treffen. Die Grenzen sind sehr unscharf und jedes „ingenieurmäßig“ einsetzbare Modell muss eine wissenschaftliche Grundlage haben.

In diesem Beitrag beschränke ich mich auf Überlegungen zu den „ingenieurmäßigen“ Einsatz. Hier geht es in erster Linie (bei den derzeitigen Aufgaben der NA-Modellierung in Österreich) um Modelle für sehr kurzfristige Ereignisse, meistens einzelne Hochwässer. Die Fragen der Wasserkraft nehmen eine Sonderstellung ein, die im weiteren auch nicht behandelt werden.

Um die Aufgaben ingenieurmäßig zu erfüllen, sind adäquate Anforderungen an NA-Modelle zu stellen, wie z.B.:

- Das Modell muss Parameter verwenden, für die die Grundlagen relativ leicht verfügbar bzw. zu erarbeiten sein müssen, wie z.B.:
 - Niederschlag (zeitliche und räumliche Verteilung, Vorregen)
 - Vorregen, Bodensättigung (Anfangsbedingungen für die Abflussbildung)
 - Bodenkennwerte
 - Bodennutzung
 - Geländedaten
 - Zustand des Gewässernetzes (Dichte, Gewässermorphologie, Regulierungsgrad, ...)
- Parameter für das Modell muss annähernd eindeutig aus den Grundlagen ableitbar sein
- Schnelles Rechnen der NA- und der Flood Routing Routinen (u.a. damit rasch mehrere Fälle bzw. Alternativen gerechnet werden können).
- Übersichtliche Darstellung der Ergebnisse (sowohl tabellarisch als auch graphisch)
- Flexible Eingabe und Ausgabe von Daten (Datenbankstrukturen kompatibel mit gängigen Tabellenkalkulationen, Datenbanken bzw. Graphikprogrammen)
- Kalibrierungsmöglichkeit anhand beobachteter NA-Ereignissen (sh. auch Grundlagen)
- Optimierung und Variationen sollen einfach, rasch und übersichtlich durchführbar sein
- Erkennbarkeit von Zusammenhängen im System muß einfach und übersichtlich möglich sein (Systemanalysekapazität)

Weitere Anforderungen, die nicht unmittelbar die Rechenoperationen betreffen, jedoch für die Einsetzbarkeit eines Softwarepakets wichtig sind:

- Benutzeroberfläche muss möglichst logisch und übersichtlich sein
- Anschaffungskosten im angemessenen Verhältnis zu den Einsatzmöglichkeiten (z.B. Anzahl der relevanten Projekte)
- Erlernbarkeit muss weitgehend im Selbststudium der Dokumentation möglich sein
- Verfügbarkeit von Schulungen zu angemessenen Preisen (Kurse)

Die Untersuchung der Hochwasserverhältnisse in einem Einzugsgebiet erfordert den kombinierten Einsatz von Modelle über die Abflussbildung (NA-Modell im eigenen Sinn) und Modelle über den Hochwasserwellenablauf in den einzelnen Gewässerabschnitten (Flood-Routing Modelle). Die üblichen Flood-Routing Modelle erfordern Parameter, die meistens nur sehr umständlich aus Beobachtungen ableitbar sind. Der Vorwurf, hier „manipulieren“ zu können, um erwünschte Ergebnisse zu erhalten, steht im Raum.

Ein relativ neuer Ansatz ist die Verwendung von „2-D Modellen“ für die Berechnung der Hochwasserwellenveränderung in einzelnen Flussabschnitten. Diese Modelle erfordern eine ausreichend dichte und genaue Vermessung des Flussabschnittes. Derzeit sind die Kosten für adäquate Vermessungen relativ hoch. Somit ist bei kleinräumigen Untersuchungen der Einsatz von 2-D Modellen vorzuziehen. Bei größeren Untersuchungsgebieten wäre ein „Mischverfahren“ denkbar, mit 2-D-Modellen bei bestimmten, kritischen Bereichen (z.B. Siedlungsgebiete, hochwirksame Retentionsräume) und Flood-Routing bei den weniger problematischen Bereichen.

3. „Standard“ NA-Modelle für Österreich

Die Verwendung des NA-Programm Pakets HEC-HMS in den USA als defacto „Standard“-Programm beruht auf die Tatsache, dass das HEC-HMS für alle unentgeltlich verfügbar ist und sehr flexibel ist. Daraus resultiert eine weite Verbreitung, große Interesse an der Weiterentwicklung und eine Vielfalt an Kurse und Handbücher.

Meine Ausbildung bezüglich HEC-HMS (Kurse in USA und Österreich) haben mir die Vorteile eines „Standard“-Modells vor Augen geführt:

- Gemeinsame Grundlage für die Beurteilung von Maßnahmen, da Fachabteilung, Projektant, Hydrographischer Dienst und Amtssachverständiger mit dem gleichen Verfahren arbeiten können bzw. damit vertraut sind.
- Bei großer Stückzahl könnten die Kosten für die Anschaffung minimiert werden.
- Die Kosten für Einschulungen und Unterlagen wären infolge der weiten Verbreitung billiger.

- Die Anpassung an österreichische Verhältnisse (z.B. durch Untersuchungen zur Bestimmung von Parameter, Festlegung von Bemessungsregen, etc.) wären gezielt durchführbar und hätten einen hohen Multiplikatoreffekt. Das „Return on Investment“ wäre sehr hoch.
- Bei Weiterentwicklung des Programmes könnte man auf einen großen internationalen und nationalen Erfahrungsschatz zurückgreifen.

Als „Standard“-Modelle kommen Programme in Frage, die den o.a. Anforderungen für den ingenieurmäßigen Einsatz erfüllen und weiters

- fachlich dem Stand der Technik entsprechend,
- anwenderfreundlich,
- kostengünstig sowohl in der Anschaffung, als auch in der Programmpflege (technische Hilfe, Nachrüstung, etc.),
- rasch erlernbar und anwendbar,
- für möglichst viele Problemstellungen anwendbar,
- für die hydrologischen Verhältnisse in Österreich geeignet,
- EDV-technisch flexibel und kompatibel (mit gängiger Software wie z.B. Excel, AutoCAD, ArcInfo, ...),
- mit metrischen Einheiten (SI) einsetzbar,

sind.

Es ist durchaus denkbar, dass 2 oder 3 Programme als „Standard“-Modelle in Frage kommen. Auf Grund des derzeitigen Marktüberblicks kommen augenscheinlich 3 Programme in Frage:

- HEC-HMS (U.S.A.)
- HEC-WMS (U.S.A.)
- IHW Modell (Karlsruhe)

Die ersten zwei Programmpakete sind Weiterentwicklungen von HEC-1, ein bewährtes jedoch technisch überholtes Programmpaket mit weiterer internationaler Verbreitung. Diese verfügbaren Programme haben sicherlich Vor- und Nachteile, vor allem im Hinblick auf ihren Einsatz in Österreich. Es ist weiters nicht auszuschließen, dass es andere geeignete Modelle gibt.

Eine mögliche Vorgangsweise zur Festlegung von „Standard“-Modelle wäre:

- Zielfestlegung für „Standard“ Modelle
- Untersuchung vorhandener Programme hinsichtlich der Eignung als Grundlage für das Standardprogramm, Auswahl von den drei besten Programmen
- Vorstellung der besten Programme im Rahmen eines Workshops unter Teilnahme von Experten, die große Erfahrung mit dem jeweiligen Programm haben

- Erprobung der besten Programme in Modelleinzugsgebieten
- Entscheidung für ein oder zwei „Standard“-Programme.
- Verhandlung hinsichtlich Kosten, Anwenderrechte, Programmpflege und technische Hilfe (Hotline)
- Anpassung des Programms an hydrologische Verhältnisse in Österreich durch gezielte Untersuchungen hinsichtlich z.B. Parameter, Bemessungsregen, etc.
- Erstellung eines deutschsprachigen Handbuches und einer Anwenderanleitung für Österreich (Parameter, Bemessungsregen, ...)
- Erstellung eines Schulungsprogrammes
- Vorstellung des Standardprogrammes bei den Fachleuten im Rahmen von Regionalworkshops
- Durchführung von Schulungen

Meine bisherigen Erfahrungen basieren auf dem Einsatz des HPIC Modells (Malzer) und der HEC-HMS Software vom Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corp of Engineers. Es wäre sinnvoll, die verfügbaren NA-Softwarepakete miteinander möglichst transparent zu vergleichen. Auf Grund dieses Vergleichs sollte entschieden werden, welche Softwarepakete (2-3) als „Standard“ Modelle weiterzuentwickeln sind.

Ein Vergleich könnte in etwa so aussehen:

Tab. 1: Vergleich zwischen HPIC und HEC-HMS.

Modell:	HPIC	HEC-HMS
Grundlagen	3	3
Parameter	3	3
Schnelles Rechnen	4	1
GIS-Fähigkeit	(-)	3
Darstellung graphisch	1	2
Darstellung tabellarisch	4	1
Dateneingabe	3	1
Datenausgabe	3	1
Datenverwaltung	4	1
Kalibrierung	2	2
Optimierung	4	1
Systemanalyse	1	3
Flexibilität (Kompatibilität)	5	1
Benutzeroberfläche	5	1
Anschaffungskosten	(-)	1
Updates	(-)	1
Erlernbarkeit	(-)	2
Kurse	(-)	2

4. Weitere Entwicklungsmöglichkeiten bei der Anwendung von „Standard“ NA-Modellen

Die Wahl eines oder mehrerer „Standard“-NA Modelle wurde die Berücksichtigung an spezifischen europäischen bzw. österreichischen Verhältnisse wesentlich erleichtert. Da nicht ein gesamtes Programmpaket zu erarbeiten wäre, sondern nur besondere „Sub-Pakete“, könnte der Zeit- als auch der Kostenaufwand optimiert werden. Es können nicht nur die Weiterentwicklungen des Programmherstellers übernehmen werden, sondern es ist auch die Bekanntgabe von eigenen Erfahrungen und die Formulierung von eigenen Wünschen an den Programmentwickler möglich.

In Österreich könnte die Entwicklung in enger Kooperation zwischen Universitäten, Hydrographischen Dienst und Anwender erfolgen, wobei es sinnvoll wäre, ein eher konstantes „Projekt“-Team zu etablieren. Noch wird die Wasserwirtschaft vorwiegend durch öffentliche Mittel finanziert und es wäre ein optimaler Einsatz dieser Mittel anzustreben. Nur wenn die „Standard“-Modelle für sehr viele Anwendungsbereiche und von entsprechend vielen Anwendern eingesetzt werden, ist eine wesentliche Verbesserung der wasserwirtschaftlichen Grundlagen und Vorhaben zu erzielen. Eine ganz wesentliche Verbesserung wäre ein besseres Verständnis für die Zusammenhänge im Einzugsgebiet bei der Entstehung von Hochwässer und bei der Ermittlung der Wasserbilanz.

Alternativ dazu könnte eine private Entwicklung mit Finanzierung über Erlöse stattfinden. Infolge der derzeitigen Marktsituation ist es fraglich, ob diese Entwicklungskosten über den Markt hereingebracht werden können. Wahrscheinlich würde es zu einer Konzentration der Anbieter von NA-Modellen kommen (Universitäten, spezialisierte Büros). Diese Entwicklung würde in Widerspruch zu dem Ziel stehen, eine weite Verbreitung der „Standard“-Modelle zu erreichen um die o.a. wasserwirtschaftlichen und gesellschaftspolitischen Vorteile zu realisieren. Dennoch werden Spezialanwendungen immer das Reservat von Spezialisten bleiben.

Somit erscheint mir der Einsatz der öffentlichen Hand bei der Erarbeitung von „Standard“-NA Modelle unerlässlich. Diese „Standard“-Modelle müssen im wesentlichen unentgeltlich verfügbar sein und die Beiträge der Anwender für die Weiterentwicklung ebenso unentgeltlich sein. Diese Art von Partnerschaft hat sich in den U.S.A. hervorragend bewährt.

5. Zusammenfassung

Aus Sicht des Anwenders im Ingenieurwesen sind bestimmte aufgaben-bezogene Anforderungen an die jeweiligen Softwarepakete zu stellen. Neben der "hydrologisch-wissenschaftlichen" Qualität eines Programms sind die wirtschaftlichen Faktoren ausschlaggebend für die Entscheidung über den Einsatz eines bestimmten Softwarepakets. Da einerseits die Anforderungen an die Aussagekraft der Ergebnisse größer und die Einsatzbereiche mehr werden, andererseits die Kostenproblematik

immer "enger" wird, muss möglichst rasch ein neuer Weg in Österreich eingeschlagen werden. Kein zukunftsweisender Weg führt an die Entscheidung über "Standard"-NA-Modelle und gezielte Grundlagenerarbeitung vorbei.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Frederick Michael Cate
Zivilingenieur für Kulturtechnik und Wasserwirtschaft
Rainergasse 4/2
A-1040 Wien
Tel +43 1 / 506 70 - 80
Fax +43 1 / 506 70 - 83
E-mail: cate@axis.at

MARKTÜBERBLICK UND BEISPIELE - SOFTWARE FÜR DIE NA-MODELLIERUNG

Ralf Merz und Günter Blöschl

1. Überblick

In den folgenden Tabellen wurden die Eckdaten von neun bekannten Softwarepaketen für die Niederschlag-Abfluss Modellierung zusammengestellt. Die Softwarepakete IHW und WMS sind Ereignismodelle, während NASIM, HBV, MMS, TOPMODEL, TOPOG, SLURP und IHACRES kontinuierliche Wasserbilanzmodelle sind. Jedes der Softwarepakete besitzt bestimmte Vorteile. IHW, WMS, NASIM und HBV sind für Ingenieuranwendungen geeignet, während die anderen Pakete meist für wissenschaftliche Anwendungen eingesetzt werden. Das IHW Paket ist einfach zu erlernen und beinhaltet die für die meisten Ingenieuranwendungen notwendigen Routinen. WMS besitzt den Vorteil, räumliche Daten zu verwenden, ist jedoch für US amerikanische Verhältnisse zugeschnitten. NASIM ist ein umfangreiches Paket mit GIS Schnittstellen, allerdings bedarf es einer längeren Einlernphase. HBV ist ein einfach zu bedienendes und bewährtes Wasserbilanzmodell. MMS ist ein umfangreiches modulares System, das für Benutzer mit guten Programmierkenntnissen geeignet ist. TOPMODEL verwendet digitale Geländeinformation und wird für wissenschaftliche Fragestellungen verwendet. TOPOG ist ähnlich, doch wesentlich detaillierter und umfangreicher. SLURP ist ein einfaches Modell auf Basis von Landnutzungsinformation und ist für große flache Gebiete geeignet. IHACRES ist ein Black Box Modell mit einer geringen Anzahl von Parametern, das effizient geeicht werden kann. Zu jedem der Softwarepakete sind zwei charakteristische Screendumps abgebildet, die einen Anhaltspunkt über die Benutzeroberfläche geben.

Ein Vergleich einiger diesen Softwarepaketen zugrundeliegenden Niederschlag-Abfluss Modelle ist Øverland und Kleeberg (1992) zu entnehmen. Zahlreiche weitere Niederschlag-Abfluss Modelle und Computerprogramme sind in Singh (1995) und Singh and Frevert (2001a, b) beschrieben. Die meisten dieser Modelle sind allerdings vor allem für wissenschaftliche Zwecke geeignet und in geringerem Ausmaß für Ingenieuranwendungen. Zu den beiden letztgenannten Publikationen sind die Computerprogramme auf CD beim Verlag erhältlich. Eine Web Page mit zusätzlicher Software für die NA Modellierung befindet sich auf:

<http://www.mindspring.com/~rbwinston/surf.htm>

In der Zeitschrift *Environmental Modelling and Software* erscheinen in unregelmäßiger Folge Beschreibungen von Softwarepaketen, die für die Niederschlag-Abfluss Modellierung geeignet sind.

2. Tabellen



IHW- Softwarepaket für Hydrologie und Wasserwirtschaft

Modell	IHW-Softwarepaket für Hydrologie und Wasserwirtschaft
Autor	Jürgen Ihringer, IWK, Universität Karlsruhe
Vertrieb	s.o. (ihringer@iwk.uka.de)
WWW-Adresse	http://www.uni-karlsruhe.de/~iwk
Umfang des Softwarepakets	NA-Modell, Flußgebietsmodell, diverse Statistikprogramme
NA-Modell: - Ereignis/kontin. - Flächengliederung - Konzept/Black-Box	Ereignismodell Einzelgebiete und Flußgebietsmodell Konzeptmodell, Black-Box Modell
Einzugsgebiete	Natürliche Einzugsgebiete, Speicher
Betriebssystem	Basierend auf DOS, lauffähig auf allen Windowsversionen
Oberfläche	Menuegesteuerte Oberfläche (DOS)
Grafik	Vorhanden, HPGL-Format
Ausgabe	Ergebnisse in ASCII-Dateien, Grafik in HPGL (Konvertierungsprogramme vorhanden)
Schnittstellen zu kommerz. Software	Nein
Dokumentation/Hilfe	Handbuch, Hot Line
Ingenieuranwendungen	Ja
Preis	EUR 800 inkl. Handbuch, Update: EUR 400
Sonstiges	Version 5 (Windows-Version in einigen Monaten, z.B. verbesserte Grafikausgabe)

Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft
Universität Karlsruhe (TH)

I H W

Softwarepaket
HOCHWASSERANALYSE
Version: 4.00

Welche Aufgaben sollen bearbeitet werden:

<p>Datenauswertung</p> <p>Statistik HW-Ereignisse</p>	<p>Bemessungswerte</p> <p>Einzelgebiete Flußgebietsmodell</p>
------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------

C:\WINNT\System32\CMD.exe

Bearbeitung von: **Ereignisdaten** Zeitschritt : .25 Std.
File mit den Daten: DEMO-D\DEMO.REG

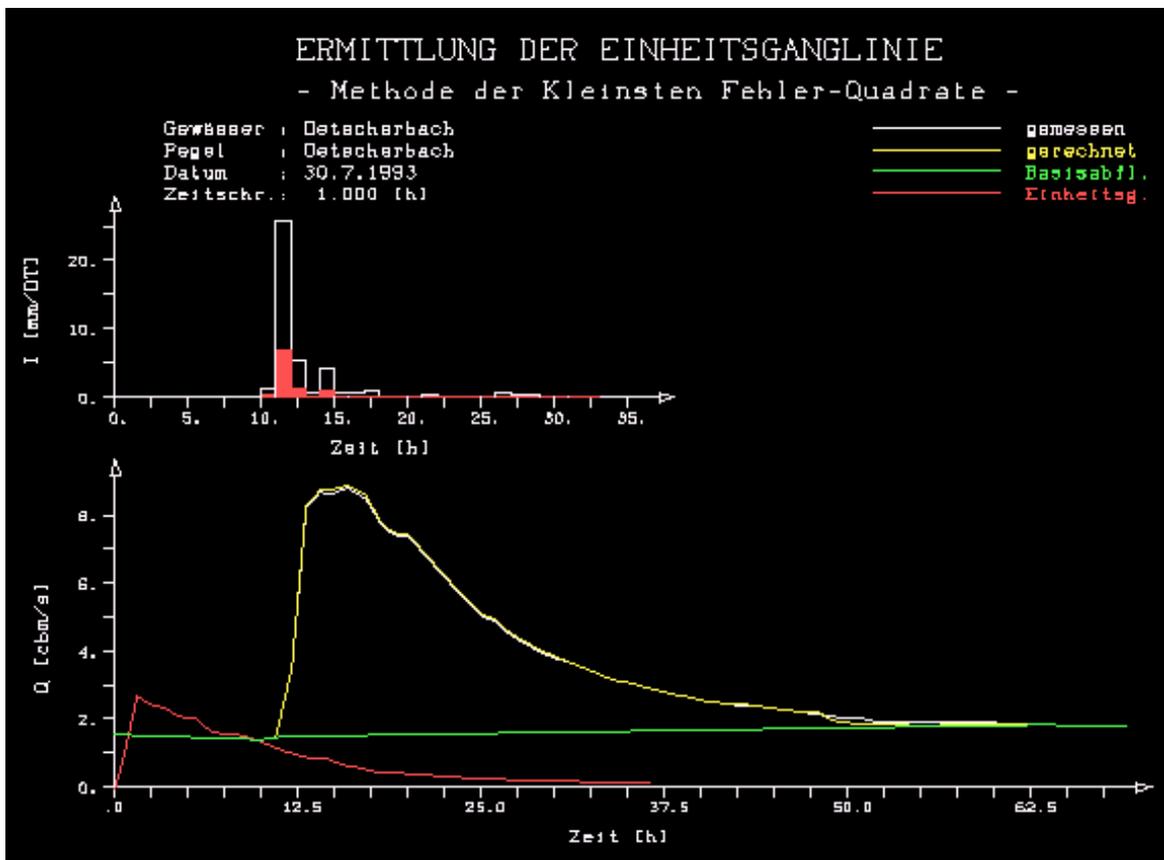
1 Progr

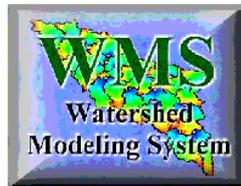
Bezeichnung: Ereignisdaten für Beispielgebiet
Knoten: 1 **HRB-A**

Anzahl der Ordinaten : 0 normiert Ereignisdaten für den Landabfluß

<p>< 0: kein Niederschlag = 0: normierte Verteilung</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-top: 5px;"> <p>zeitlicher Verlauf des Abflußbeiwertes</p> <p>1 : zeitlich konstant 2 : PHI-Index Verfahren 3 : exponent. Verlauf 4 : Verlauf über Lutz-Verfahren</p> </div>	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">Anfangsverlust [mm]</td> <td style="width: 50%; text-align: right;">.00</td> </tr> <tr> <td>Abflußbeiwert [-]</td> <td style="text-align: right;">.360</td> </tr> <tr> <td>zeitl. Verlauf</td> <td style="text-align: right;">1</td> </tr> <tr> <td>Monat des Ereignisses</td> <td style="text-align: right;">5</td> </tr> <tr> <td>Faktor für UMAX-Lutz</td> <td style="text-align: right;">1.000</td> </tr> </table>	Anfangsverlust [mm]	.00	Abflußbeiwert [-]	.360	zeitl. Verlauf	1	Monat des Ereignisses	5	Faktor für UMAX-Lutz	1.000
Anfangsverlust [mm]	.00										
Abflußbeiwert [-]	.360										
zeitl. Verlauf	1										
Monat des Ereignisses	5										
Faktor für UMAX-Lutz	1.000										

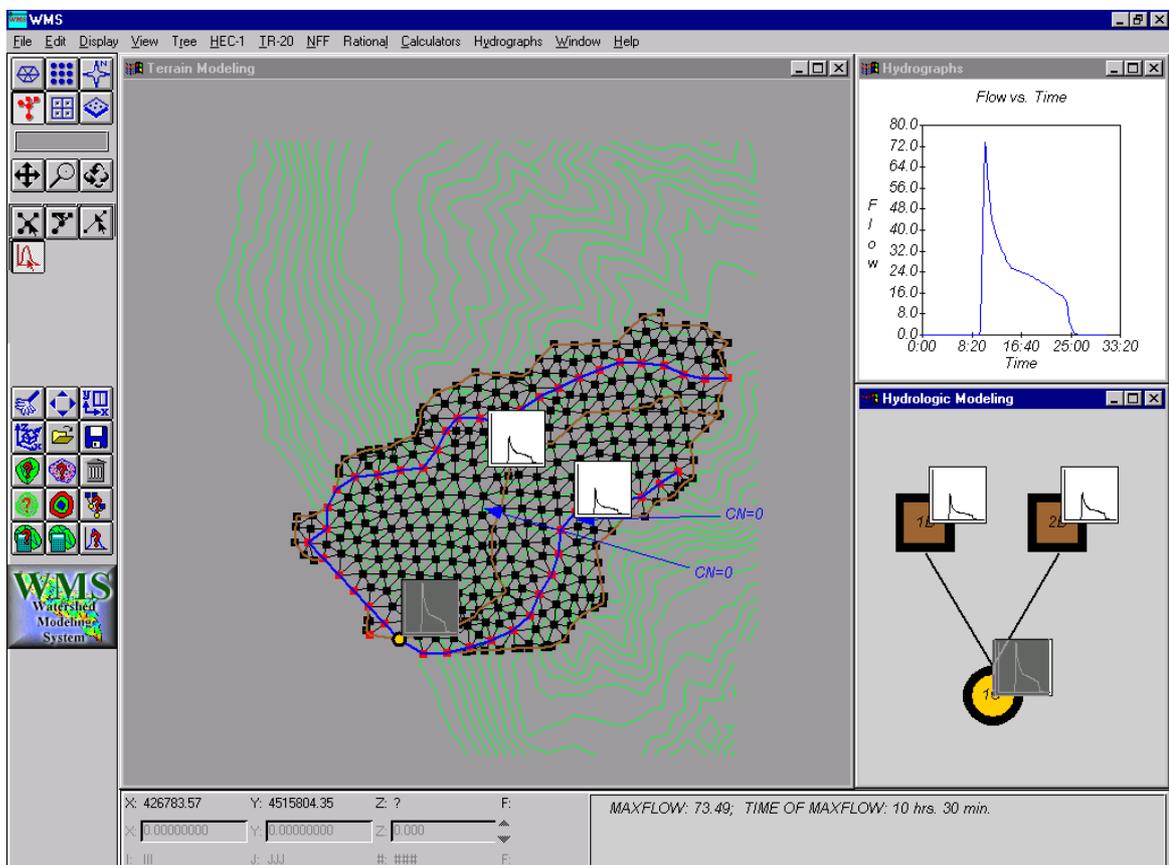
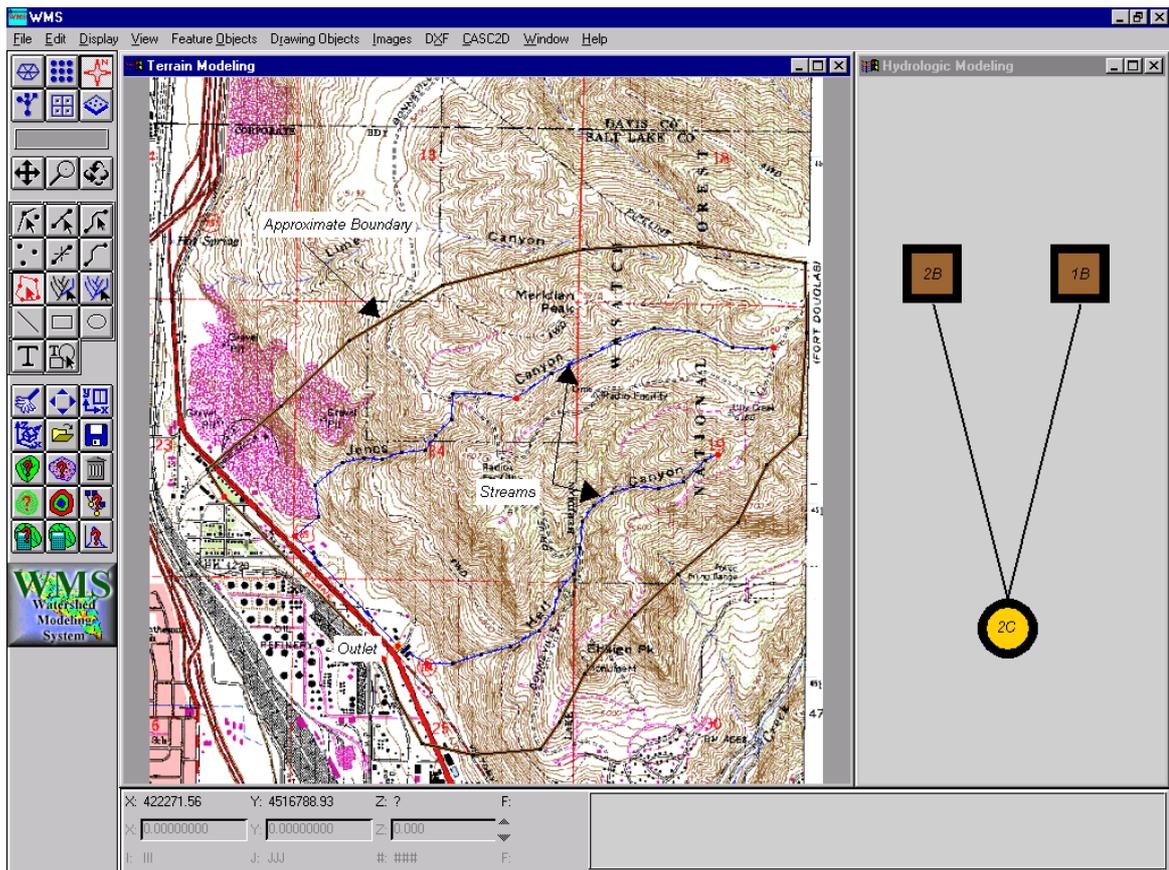
1 Ende





WMS - Watershed Modelling System mit HEC-1

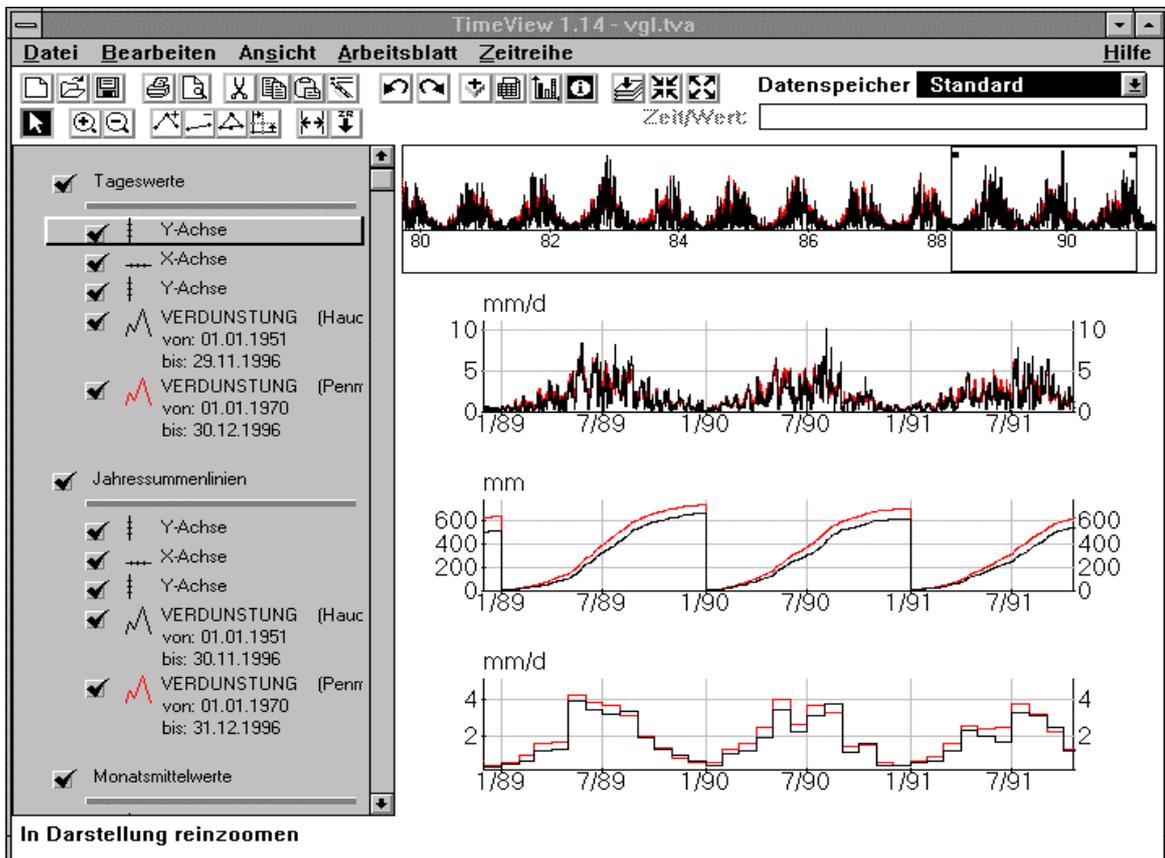
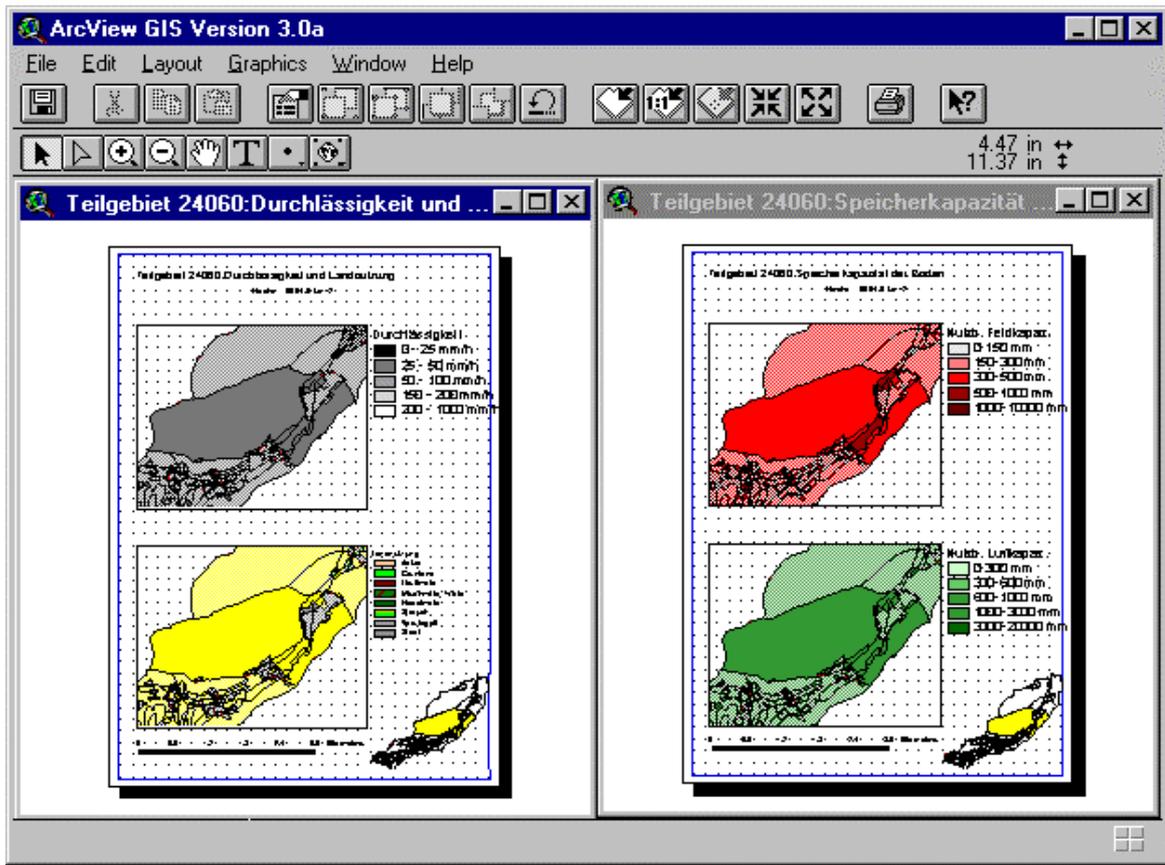
Modell	WMS - Watershed Modelling System mit HEC-1
Autor	WMS: Brigham Young University, U.S.A.C.Engineers HEC-1: Hydrologic Engineering Center
Vertrieb	Scientific Software Group (info@scissoftware.com, http://www.scissoftware.com)
WWW-Adresse	http://www.ground-water-models.com/products/wms_overview/wms_overview.html
Umfang des Softwarepakets	NA-Modelle (HEC1,TR-20, Rational Method, NFF, Geländeanalyse, CN-Werte; etc)
NA-Modell: - Ereignis/kontin. - Flächengliederung - Konzept/Black-Box	Ereignismodell Flußgebietsmodell Konzeptmodell
Einzugsgebiete	Natürliche und städtische Einzugsgebiete
Betriebssystem	Windows 95/98/NT/2000, UNIX
Oberfläche	Menuegesteuerte Oberfläche (Windows)
Grafik	Vorhanden
Ausgabe	Ergebnisse in ASCII-Dateien, Grafik in DXF, TIFF
Schnittstellen zu kommerz. Software	ARC/INFO, ArcView
Dokumentation/Hilfe	Handbuch, Online
Ingenieuranwendungen	Ja
Preis	\$1600
Sonstiges	





NASIM - Niederschlag-Abfluß-Modell

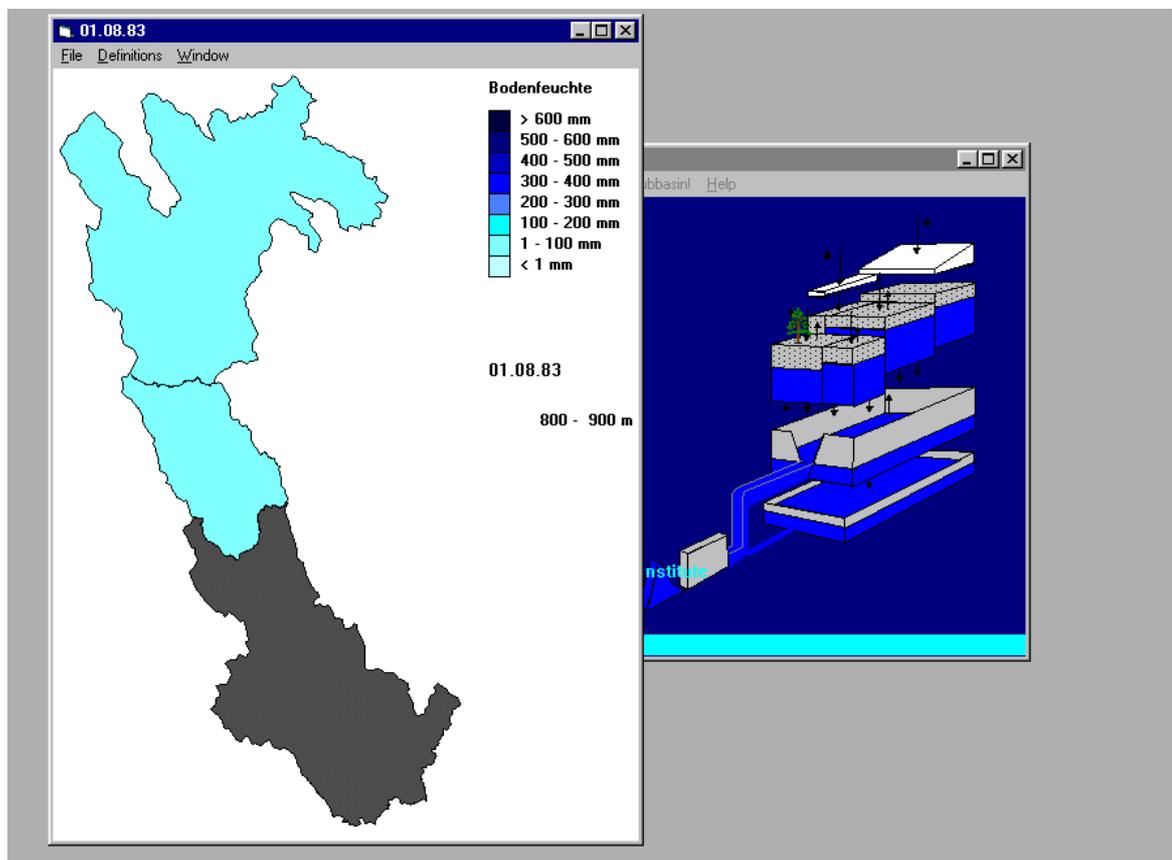
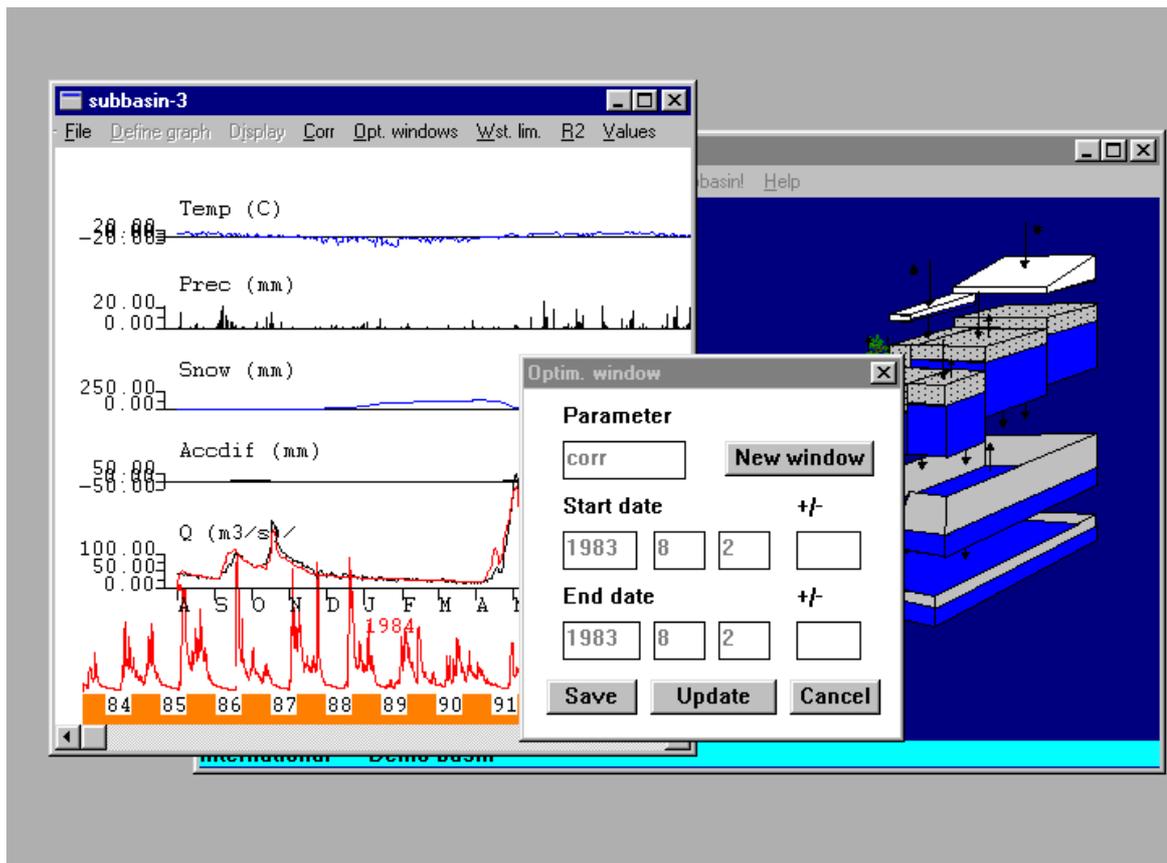
Modell	NASIM - Niederschlag-Abfluß-Modell
Autor	HYDROTEC Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen
Vertrieb	s.o. (mail@hydrotec.de)
WWW-Adresse	http://www.hydrotec.de/html/softnasim.htm
Umfang des Softwarepakets	NA-Modell und Zusatzprogramme (z.B. ArcView Extensions)
NA-Modell: - Ereignis/kontin. - Flächengliederung - Konzept/Black-Box	Wasserbilanzmodell (kontinuierlich) Flußgebietsmodell (flächendetailliert) Konzeptmodell
Einzugsgebiete	Natürliche und städtische Einzugsgebiete, Speicher
Betriebssystem	Windows 95/98/NT/2000, SUN (UNIX)
Oberfläche	Menuegesteuerte Oberfläche (Windows)
Grafik	Vorhanden
Ausgabe	Diverse Formate
Schnittstellen zu kommerz. Software	ArcView / ARC/INFO
Dokumentation/Hilfe	Handbuch, Online
Ingenieuranwendungen	Ja
Preis	Windows 95/98, NT4.0 EUR 9.500,-- SUN (UNIX) EUR 14.250,-- Etwa 10 Zusatzprogramme auf Anfrage
Sonstiges	





Integrated Hydrological Modelling System - HBV

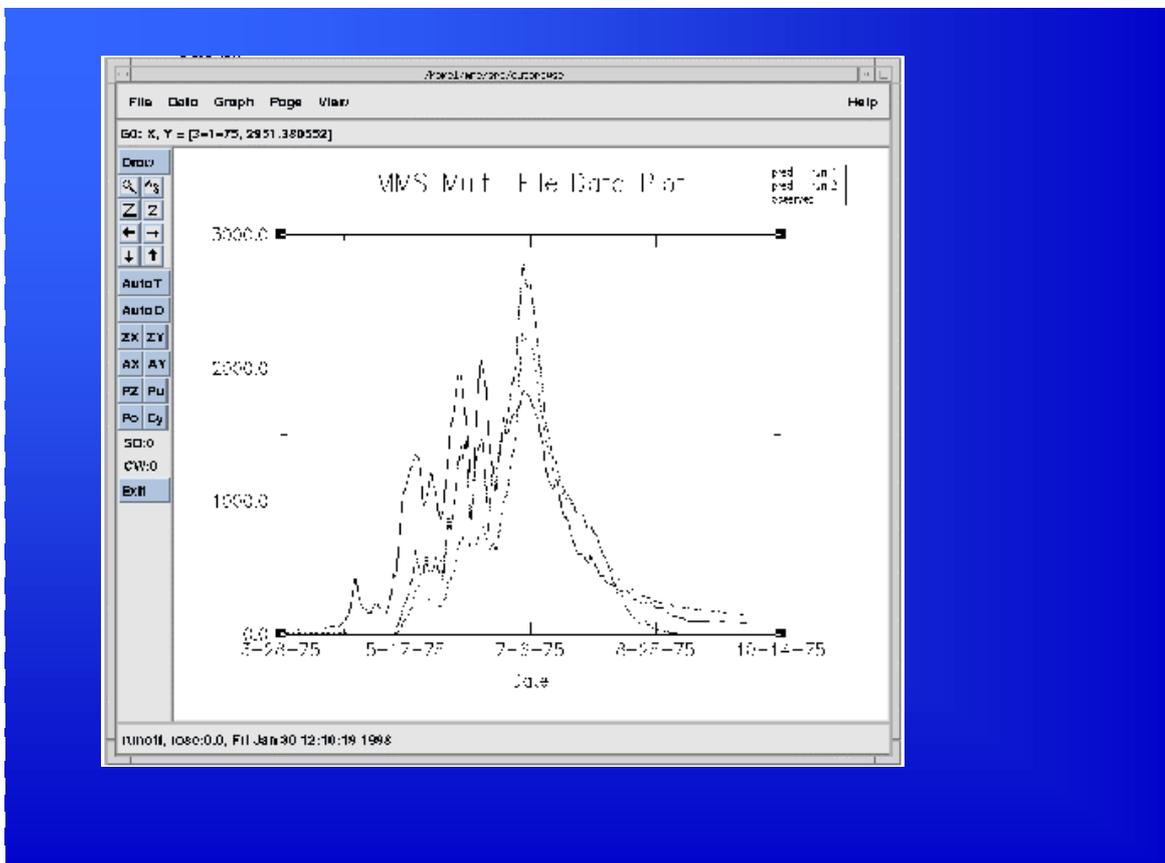
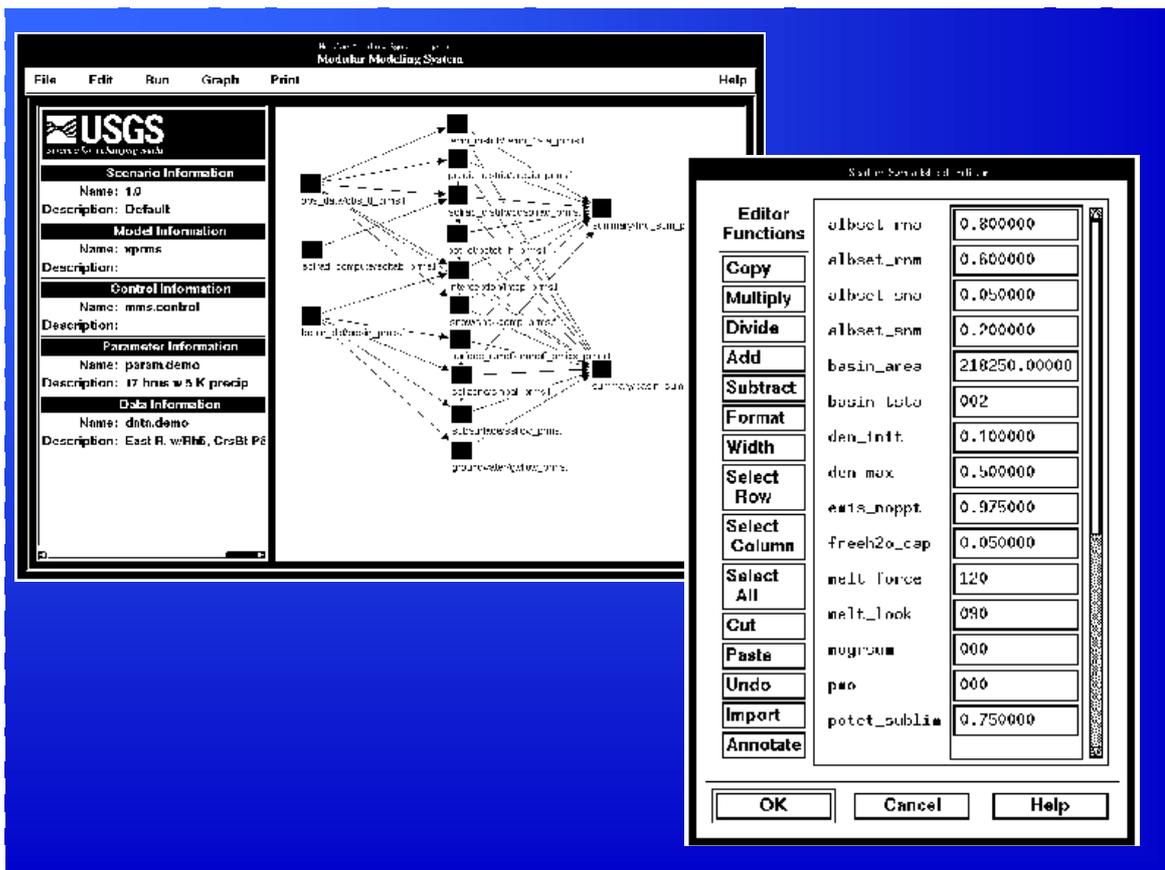
Modell	IHMS-HBV
Autor	Sten Bergström, Swedish Meteorological and Hydrological Institute
Vertrieb	s.o. (SMHINT@smhi.se)
WWW-Adresse	http://www.indic-airviro.smhi.se/HBV/
Umfang des Softwarepakets	NA-Modell
NA-Modell: - Ereignis/kontin. - Flächengliederung - Konzept/Black-Box	Wasserbilanzmodell (kontinuierlich) Flußgebietsmodell Konzeptmodell
Einzugsgebiete	Natürliche Einzugsgebite Seen
Betriebssystem	Windows 3.x/NT
Oberfläche	Menuegesteuerte Oberfläche (Windows)
Grafik	vorhanden
Ausgabe	Ergebnisse in ASCII-Dateien, beschränkte Grafikausgabe auf Drucker
Schnittstellen zu kommerz. Software	Nein
Dokumentation/Hilfe	Handbuch, Online
Ingenieurwendungen	Ja
Preis	Auf Anfrage
Sonstiges	





Modular Modeling System (MMS)

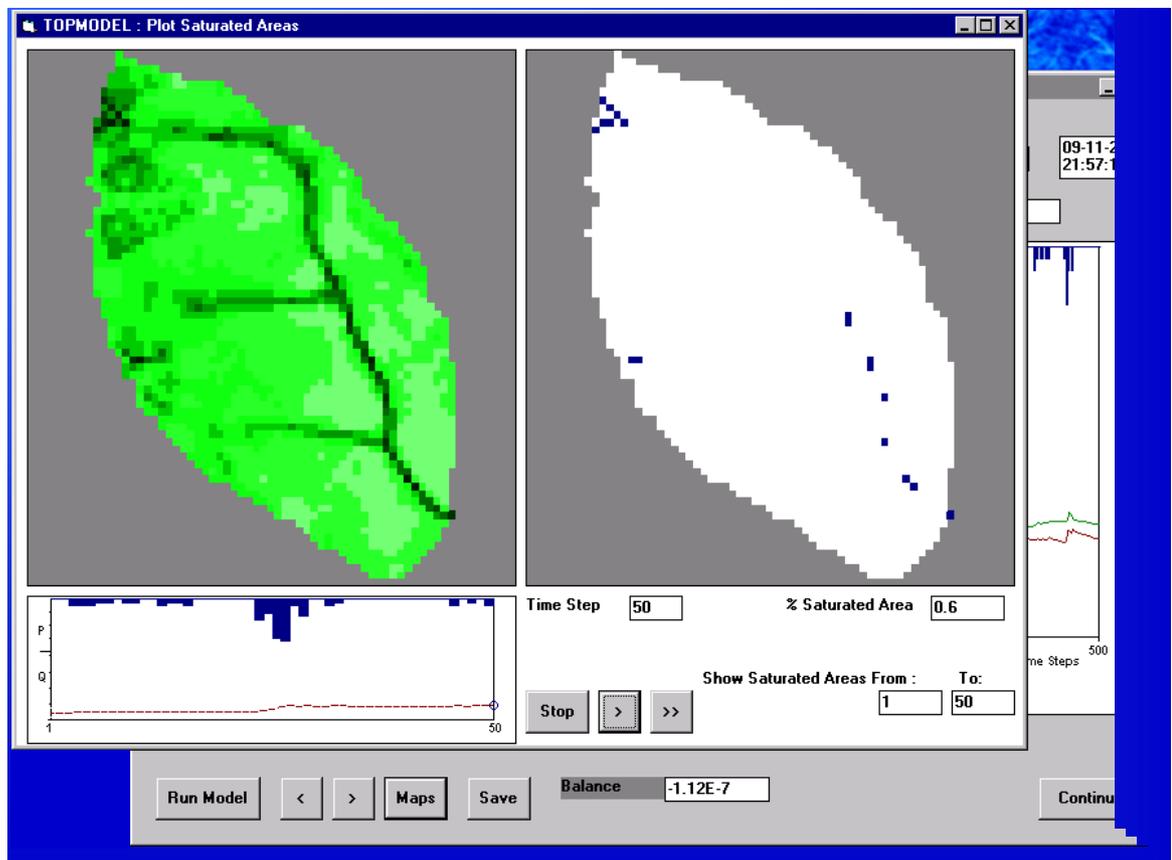
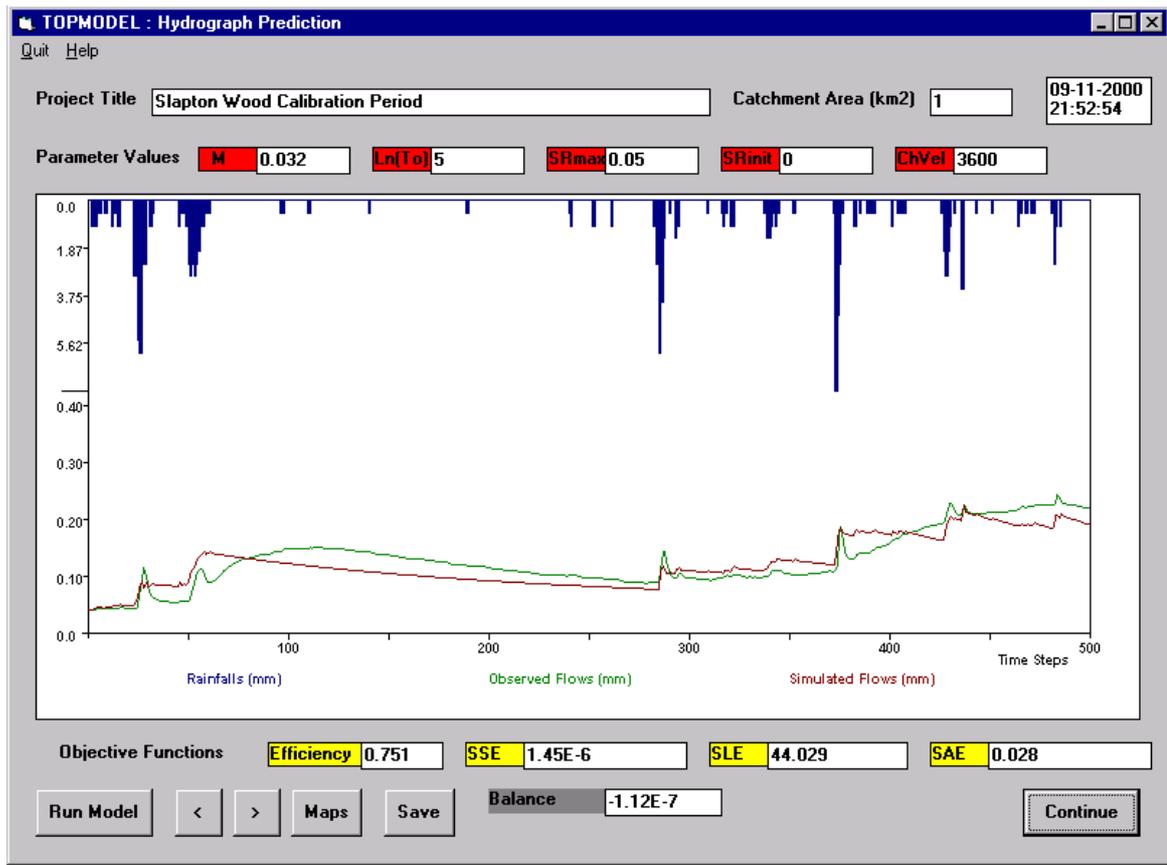
Modell	Modular Modeling System (MMS) - The Precipitation-Runoff Modeling System
Autor	George Leavesley, U.S. Geological Survey (USGS), Denver CO
Vertrieb	USGS (markstro@usgs.gov)
WWW-Adresse	http://wwwbr.cr.usgs.gov/projects/SW_precip_runoff/mms/index.html (Download)
Umfang des Softwarepakets	NA-Modell und zahlreiche andere hydrologische Programme
NA-Modell: - Ereignis/kontin. - Flächengliederung - Konzept/Black-Box	Diverse Flächendetailliert Diverse
Einzugsgebiete	Natürliche Einzugsgebiete
Betriebssystem	Unix, LINUX
Oberfläche	Menuegesteuerte Oberfläche
Grafik	Vorhanden
Ausgabe	Ergebnisse in ASCII-Dateien, Grafik in HPGL oder PostScript
Schnittstellen zu kommerz. Software	SQL Schnittstelle, GIS-Schnittstelle (ARC/INFO, GRASS), Graphical User Interface (GUI)
Dokumentation/Hilfe	Handbuch, Online
Ingenieur Anwendungen	Nein
Preis	Kostenlos
Sonstiges	

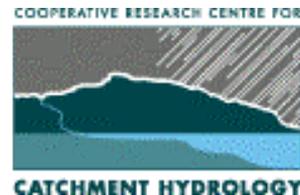




TOPMODEL

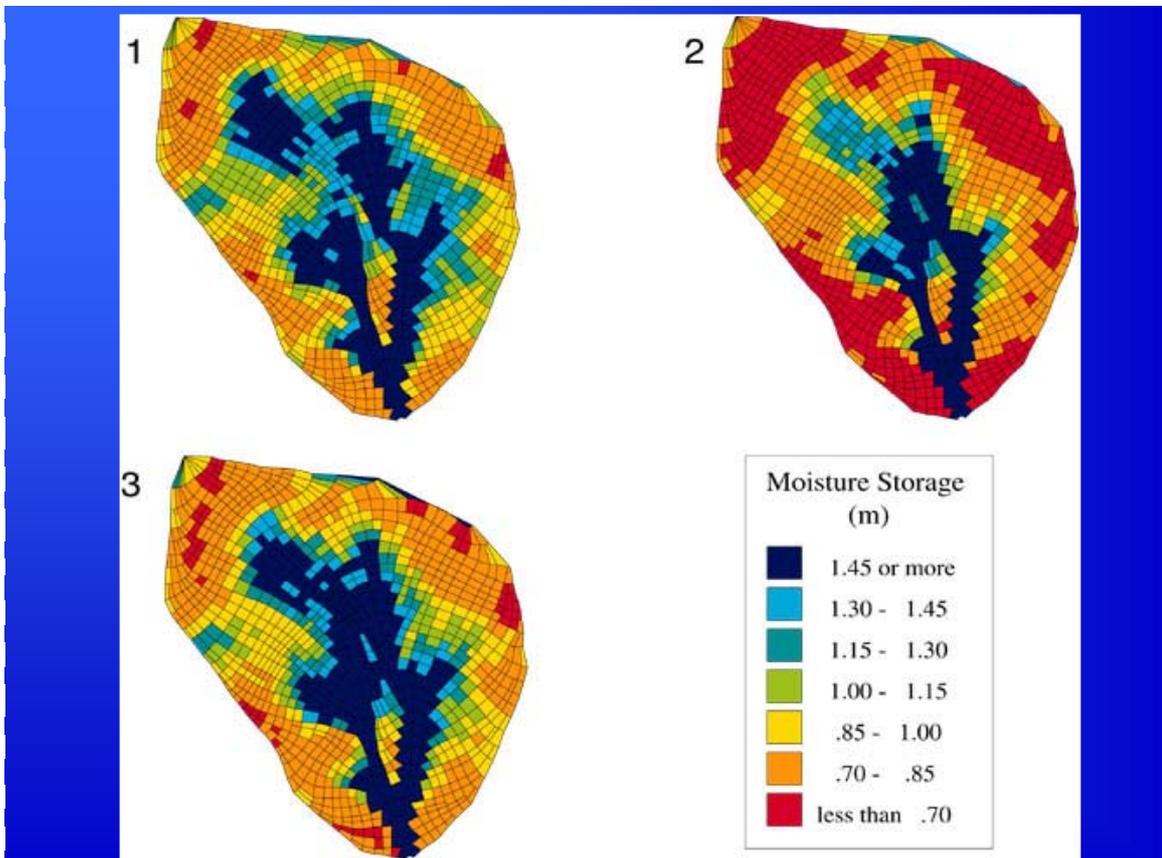
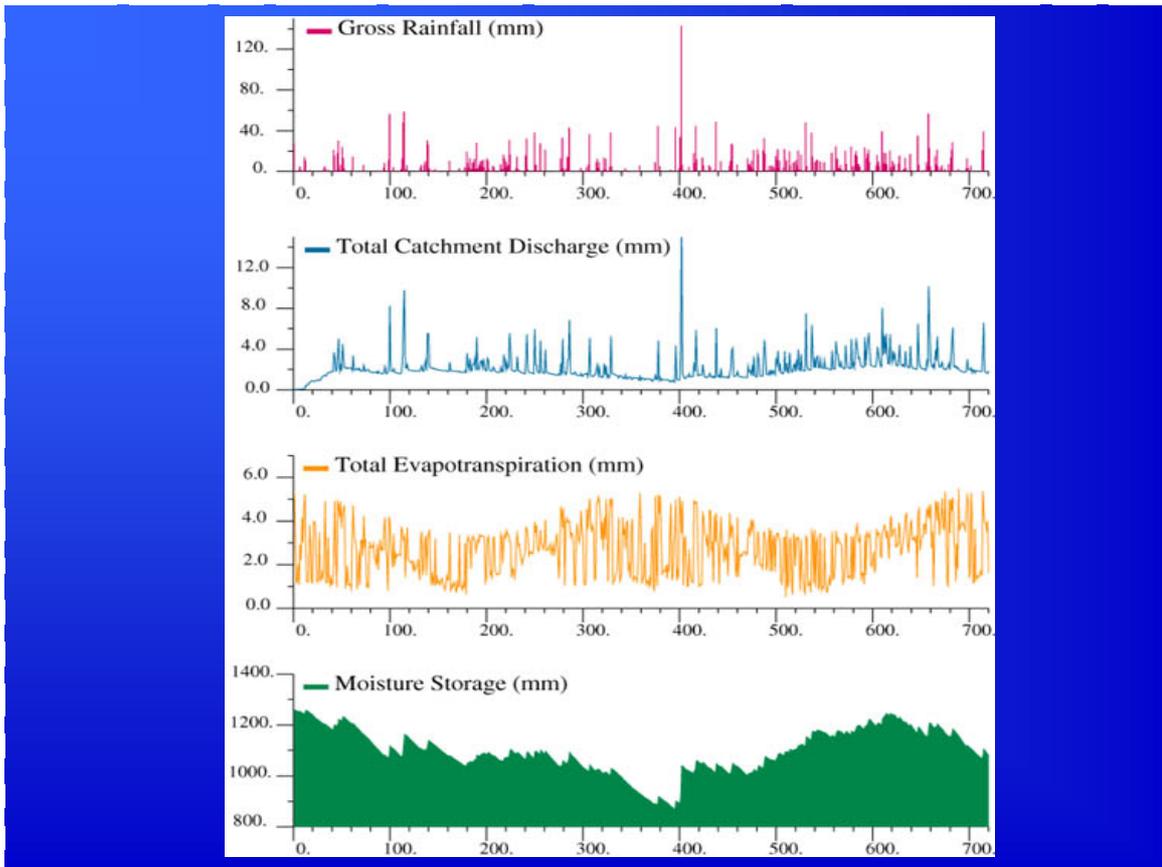
Modell	Topmodel
Autor	Keith Beven, CRES, Lancaster University, England
Vertrieb	s.o. (K.Beven@lancaster.ac.uk)
WWW-Adresse	http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/topmodel.html (Download)
Umfang des Softwarepakets	NA-Modell, Sensitivitätsanalyse der Parameter, Monte Carlo Simulationen
NA-Modell: - Ereignis/kontin. - Flächengliederung - Konzept/Black-Box	Wasserbilanzmodell (kontinuierlich) Einzelgebiete unter Verwendung von flächendetaillierten Geländeinformationen Konzeptmodell
Einzugsgebiete	Natürliche Einzugsgebiete
Betriebssystem	Windows 95/NT/2000
Oberfläche	Menuegesteuerte Oberfläche (Windows)
Grafik	Vorhanden
Ausgabe	Ergebnisse in ASCII-Dateien, Keine Ausgabe der Grafiken
Schnittstellen zu kommerz. Software	Nein
Dokumentation/Hilfe	Handbuch, Online
Ingenieur Anwendungen	Nein
Preis	kostenlos
Sonstiges	





TOPOG

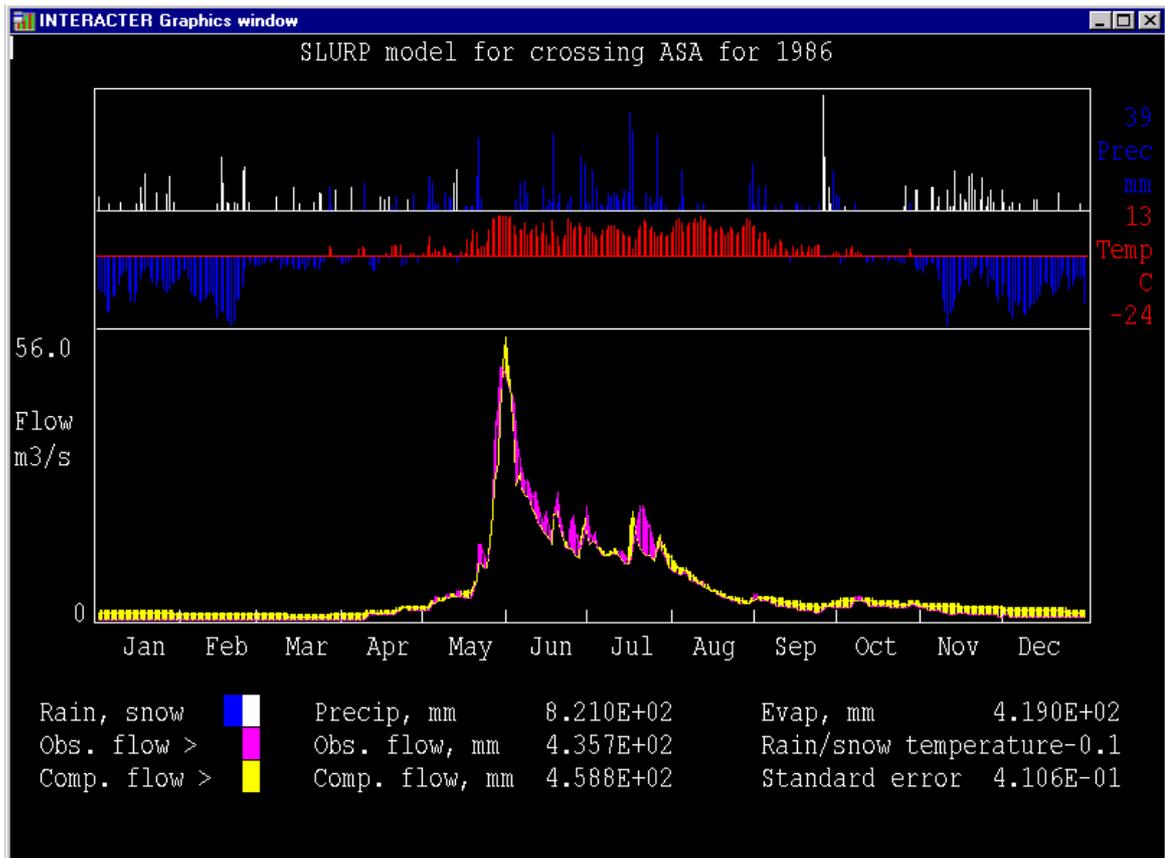
Modell	TOPOG
Autor	Division of Land and Water, CSIRO, Canberra, Australien
Vertrieb	s.o.
WWW-Adresse	http://www.per.clw.csiro.au/topog/
Umfang des Softwarepakets	Modellbibliothek (z.B. NA-Modell, Geländeanalysemodule, Transportmodell)
NA-Modell: - Ereignis/kontin. - Flächengliederung - Konzept/Black-Box	Wasserbilanzmodell (kontinuierlich) Flächendetailliertes Einzugsgebietsmodell Konzeptmodell/physikalisch basiert
Einzugsgebiete	Natürliche Einzugsgebiete
Betriebssystem	UNIX
Oberfläche	Menuegesteuerte Oberfläche
Grafik	Vorhanden
Ausgabe	Diverse
Schnittstellen zu kommerz. Software	Nein
Dokumentation/Hilfe	Handbuch, Online
Ingenieuranwendungen	Nein
Preis	Kostenlos für wissenschaftliche Zwecke
Sonstiges	





SLURP Hydrological Model

Modell	SLURP Hydrological Model
Autor	Geoff Kite, International Water Management Institute, Sri Lanka
Vertrieb	s.o. (g.kite@cgiar.org, geoffkite@hydrologic-solutions.com)
WWW-Adresse	SLURP: http://www.cgiar.org/iwmi/software/SLURP.htm , http://www.hydrologic-solutions.com/index.htm TOPAZ: http://duke.usask.ca/~martzl/topaz/index.html
Umfang des Softwarepakets	NA-Modell, TOPAZ Geländeanalysemodul
NA-Modell: - Ereignis/kontin. - Flächengliederung - Konzept/Black-Box	Wasserbilanzmodell (Kontinuierlich) Einzelgebiete unter Verwendung von flächendetaillierten Geländeinformationen, Flußgebietsmodell Konzeptmodell
Einzugsgebiete	Große natürliche Einzugsgebiete
Betriebssystem	Basierend auf DOS, lauffähig auf allen Windowsversionen
Oberfläche	Menuegesteuerte Oberfläche (DOS)
Grafik	Vorhanden
Ausgabe	Ergebnisse in ASCII-Dateien, beschränkte Grafikausgabe auf Drucker
Schnittstellen zu kommerz. Software	Nein
Dokumentation/Hilfe	Handbuch
Ingenieuranwendungen	Nein
Preis	Kostenlos
Sonstiges	



SLURP, Properties of Canopy and Snowmelt Rates: Screen 1 of 1

Land cover	Canopy cap. mm	No-radn snowmelt Jan	With-radn snowmelt Jul	With-radn snow conv fac.	Land cover	Canopy cap. mm	No-radn snowmelt Jan	With-radn snowmelt Jul	With-radn snow conv fac.
impervious	0.1	1.0	1.5	0.3 0.01					
forest	1.0	1.0	1.7	0.3 0.01					
crop&grass	1.0	1.0	2.2	0.3 0.01					

Snowmelt is in mm/oC/day; Conv. factor converts net radn in w/m**2 to mm

Press F1 for help, End to continue, Esc to quit



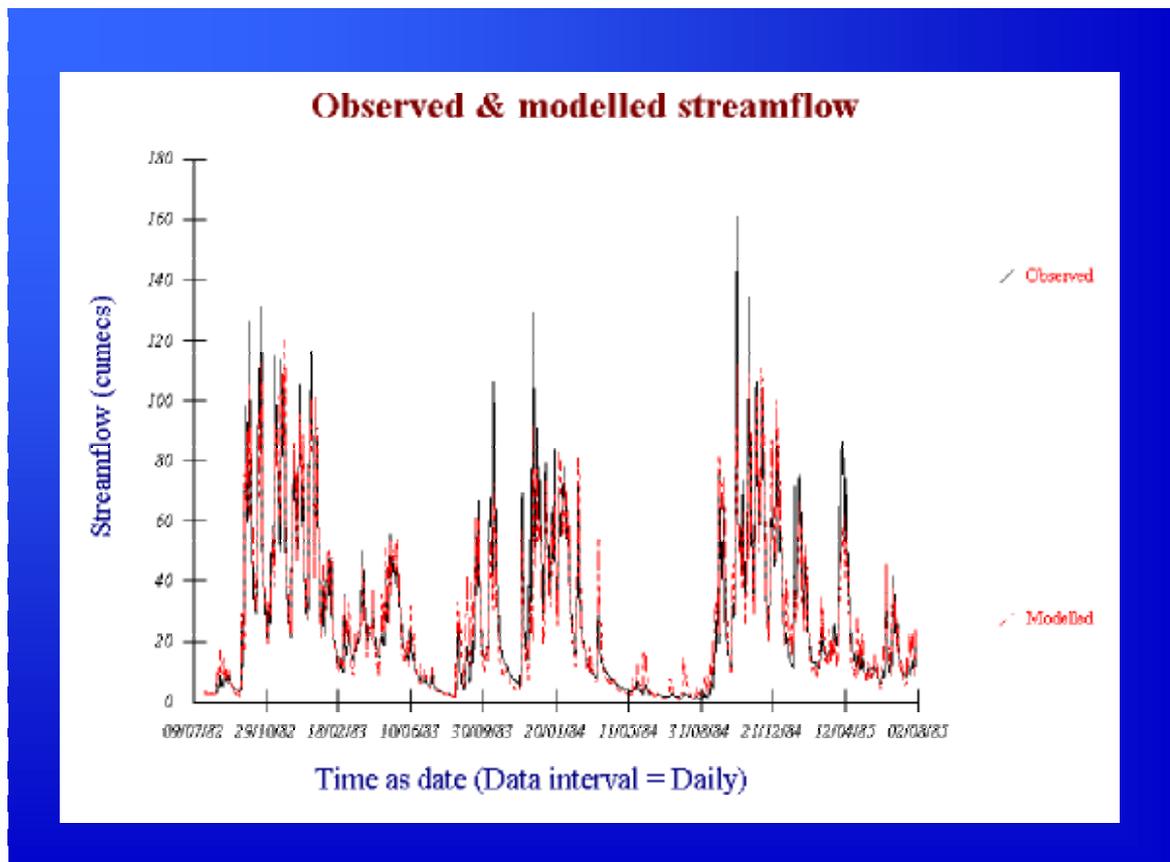
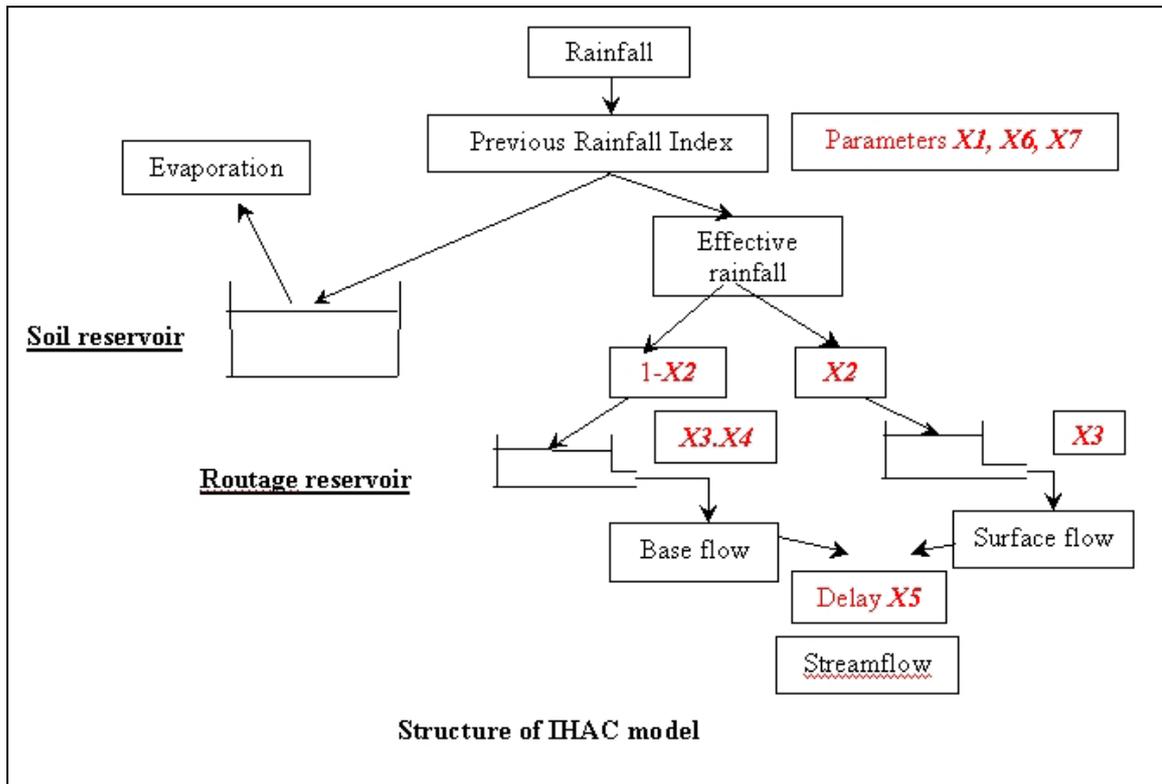
**Centre for
Ecology & Hydrology**

NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL

CEH Wallingford - Formerly the Institute of Hydrology

IHACRES

Modell	IHACRES
Autor	Institute of Hydrology, Wallingford & CRES, Australian National University
Vertrieb	s.o. (igl@ceh.ac.uk)
WWW-Adresse	http://www.nwl.ac.uk/ih/www/products/bswihacres.html
Umfang des Softwarepakets	NA-Modell
NA-Modell: - Ereignis/kontin. - Flächengliederung - Konzept/Black-Box	Wasserbilanzmodell (kontinuierlich) Einzelgebiete Black-Box Modell (Transferfunktion)
Einzugsgebiete	Natürliche
Betriebssystem	Windows 3.1
Oberfläche	Menuegesteuerte Oberfläche (Windows)
Grafik	Vorhanden
Ausgabe	Ergebnisse in ASCII-Dateien
Schnittstellen zu kommerz. Software	Nein
Dokumentation/Hilfe	Handbuch
Ingenieurwendungen	Nein
Preis	\$ 500
Sonstiges	



3. Literatur

Øverland, H. und H.-B. Kleeberg (1992) Möglichkeiten der Abflußmodellierung unter Nutzung von Geoinformationssystemen. Mitteilungen des Institutes für Wasserwesen. Universität der Bundeswehr München, 158 Seiten und Anlagen.

Singh V. P. and D. K. Frevert (Ed.) (2001a) Mathematical models of small watershed hydrology, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 972 pp.

Singh V. P. and D. K. Frevert (Ed.) (2001b) Mathematical models of large watershed hydrology, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 914 pp.

Singh, V. P. (Ed.) (1995) Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, 1130 pp.

Anschrift der Verfasser:

Dipl. Ing. Ralf Merz

Ao.Univ.Prof. Dr. Günter Blöschl

Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft

Technische Universität Wien

Karlsplatz 13/223, A-1040 Wien

Tel: +43 1 58801 22312 Fax: +43 1 58801 22399

e-mail: merz@hydro.tuwien.ac.at