

Konzeptmodell PRMS: Prozessnähe in der Mesoskala?

Prof. Dr. Michael Vohland, Prof. als Junior-Prof., Fernerkundung und Geoinformationsverarbeitung, Universität Trier, 54286 Trier, email: vohland@uni-trier.de

1 Problemstellung

Hydrologische Modelle erfüllen Abbildungs- und Ersatzfunktionen für reale hydrologische Systeme, die sich in der Regel durch komplexe, nichtlineare Transformations- und Abflussbildungsprozesse auszeichnen. Um innere Relationen eines heterogenen Einzugsgebietes erfassen und ablaufende Prozesse besser verstehen zu können, sind a priori distributive Modelle einzusetzen, die eine flächendifferenzierte Betrachtung z.B. auf Raster-, HRU (Hydrologic Response Unit)- oder REA (Representative Elementary Areas)-Basis ermöglichen (Peschke, 1999). Die Bewegung des Wassers wird dabei konzeptionell durch die Hintereinanderschaltung von Komponentenmodellen (Untersystemmodellen) beschrieben, die jeweils einen Teilprozess des Wasserkreislaufs – z.B. Interzeption, Schneeschmelze, Infiltration – berücksichtigen.

Hydrologische Prozesse unterliegen physikalischen und damit grundsätzlich skalenunabhängigen Gesetzmäßigkeiten (Kleeberg, 1999). Nur scheinbar ergibt sich daraus für jeden sog. prozessorientierten (und darüber hinaus auch zu eventuellen Prognosezwecken einzusetzenden) Modellansatz die Notwendigkeit rein physikalisch basierter Algorithmen für alle Untersystemmodelle und der Verzicht auf integrierende effektive bzw. repräsentative Parameter – ein solcher Ansatz ist nur im Labor bzw. sehr kleinräumig (mikroskalig) unter genau untersuchten homogenen Bedingungen möglich (Becker, 1992; Grayson et al., 1992). Beim „Hochskalieren“, d.h. Wechsel zur Meso- bzw. Makroskala, steht nicht mehr die möglichst detaillierte punktbezogene Beschreibung der Wasserflüsse im Vordergrund, sondern die realistische Abbildung der für die betrachtete Skala dominierenden Prozesse unter Nutzung der zur Verfügung stehenden Eingangsdaten mit in der Regel eingeschränkter räumlicher und zeitlicher Auflösung (Kleeberg, 1999).

Die Bewertung der Prozessnähe bei Modellanwendungen ist vor allem in der Meso- und Makroskala problematisch, da hier aufgrund der untersuchten Raumdimension in der Regel keine genauen Vorstellungen über die im Einzelnen ablaufenden Prozesse existieren. Gängige Validierungskonzepte orientieren sich in der Regel am Summenparameter des am Pegel gemessenen Abflusses; die realistische und räumlich differenzierte Abbildung ablaufender Prozesse durch das Modell lässt sich auf diese Weise allerdings nicht adäquat überprüfen (Kleeberg, 1999).

Im Folgenden werden Simulationsläufe des hydrologischen Modellsystems PRMS/MMS in mesoskaligen Einzugsgebieten unter dem Aspekt realitätsnaher Abbildung und Erklärung des Gesamtsystems und stattfindender hydrologischer Transformationsprozesse betrachtet. Ergebnisse weiterer bereits erfolgter und sich ergän-

zender Studien mit PRMS/MMS (Hill et al., 1999; Vohland et al., 2000; Vohland, 2003) können dabei in die Analyse einbezogen werden.

2 Das Untersuchungsgebiet – naturräumliche Ausstattung und Datenverfügbarkeit

Betrachtet werden die im westlichen Rheinland-Pfalz gelegenen Einzugsgebiete der Mosel-Nebenflüsse Ruwer ($A_{E0}=238,5 \text{ km}^2$) und Kyll ($A_{E0}=842,8 \text{ km}^2$) (Abb. 1), die aufgrund ihrer Fläche dem oberen erweiterten Mesoskalenbereich ($100\text{-}1.000 \text{ km}^2$; vgl. Becker, 1992) zugeordnet werden können.

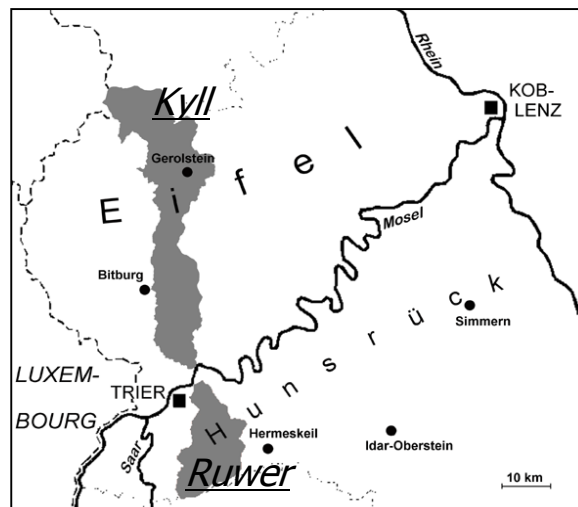


Abb. 1: Lage der untersuchten Einzugsgebiete (Rheinland-Pfalz, Deutschland)

Beide Einzugsgebiete zeichnen sich aufgrund ihrer Lage im Mittelgebirge durch deutliche Höhenunterschiede aus; Ruwer und Kyll haben bis zu ihrer Mündung in die Mosel 527 bzw. 540 Höhenmeter zu überwinden. Während in den Höhenlagen mittlere Jahresniederschlagswerte von über 1000 mm erreicht werden, sinken sie in den unteren Tallagen auf ca. 700 mm ab. Beide Flüsse weisen ein ausgeprägtes pluviales Abflussregime auf. Deutliche Unterschiede ergeben sich hinsichtlich der geologischen Verhältnisse und den damit verbundenen Wasserspeichervolumina: Devonische Tonschiefer und Quarzite bzw. quarzitisches Sandsteine, letztere mit relativ hohem nutzbarem Speichervolumen, dominieren im Ruwer-Einzugsgebiet und im oberen Kylltal. Das mittlere und untere Kylltal ist überwiegend der Trier-Bitburger Mulde mit mesozoischen (triassischen) Sedimenten zuzuordnen. Sandsteine, Dolomite und Kalke (Buntsandstein, Unterer und Oberer Muschelkalk, Unterer Keuper) zeigen überwiegend großes Wasserspeichervermögen, während die Mergel des Mittleren Muschelkalks ebenso wie vorhandene tertiäre Decklehme nur in geringem Maße permeabel sind (Kreml-Wagner, 1996).

Die digitale GIS-integrierte Beschreibung der naturräumlichen Ausstattung beider Einzugsgebiete wird – zusätzlich zur Digitalisierung vorhandener amtlicher Karten-

werke (vgl. Hill et al., 1999) – durch die Integration von Bodenschätzungsdaten, Daten der Forstlichen Standortkartierung und die Prozessierung Digitaler Geländemodelle der Landesvermessungsämter Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen realisiert. Landnutzungsdaten können flächendeckend durch die Auswertung multitemporaler Landsat TM-Daten, die für diese Zwecke einer entsprechenden geo- und radiometrischen Vorverarbeitung unterzogen werden (vgl. Hill et al., 1999), bereitgestellt werden. Pegel- und Messreihen der DWD-Klima- und Niederschlagsstationen liefern die hydrometeorologischen Daten für einen angesichts auftretender Extremereignisse im hydrologischen Jahr 1994 gewählten Modellierungszeitraum von 1987 bis 1993 (1987: Modellinitialisierung, 1989: Kalibrationszeitraum, 1988 und 1990-1993: Validierungszeitraum).

3 Das hydrologische Modellierungswerkzeug PRMS/MMS

3.1 Struktur des Modellsystems

Bei dem vom U.S. Geological Survey (Colorado, USA) entwickelten „Precipitation Runoff Modeling System“ (PRMS), eingebettet in den UNIX-basierten Modellrahmen des „Modular Modeling System“ (MMS), handelt es sich um ein distributives Einzugsgebietsmodell, das die Fähigkeit zur detaillierten Berechnung von Wasserhaushaltsbilanzen einschließlich der einzelnen Abflussteilströme besitzt (Oberflächen-, Zwischen- und Grundwasserabfluss). Der hier eingesetzte „daily mode“ berechnet diese Größen in täglicher Auflösung für jede HRU; eine HRU wird hinsichtlich ihres

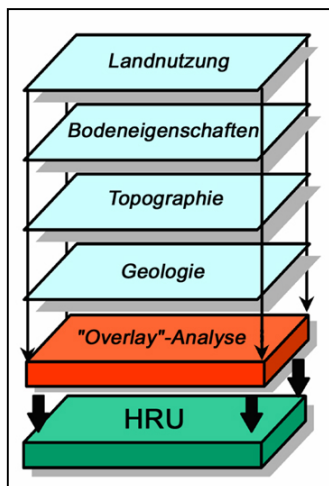
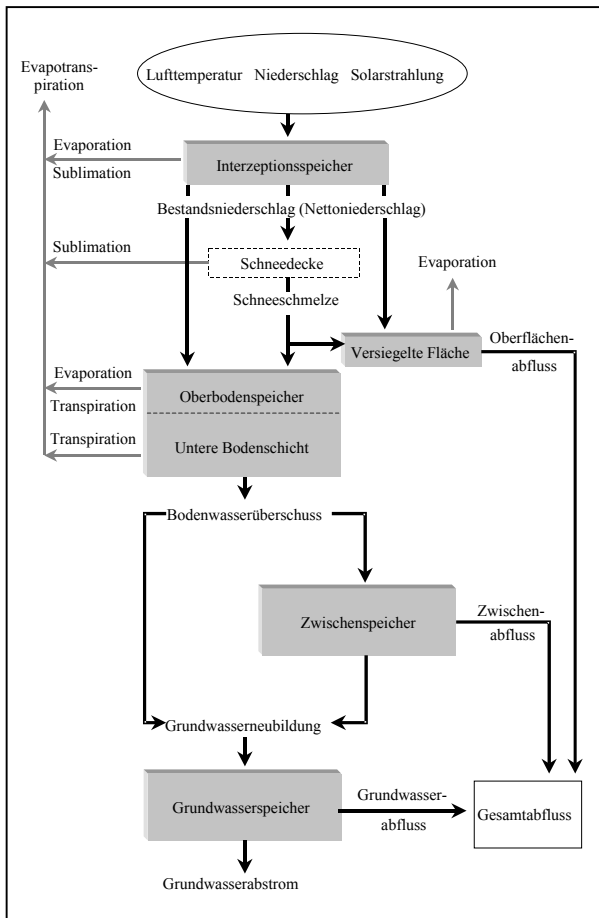


Abb. 2: GIS Analyse zur HRU Definition

hydrologischen Verhaltens als quasi-homogen angesehen und konzeptionell als eine Serie vertikal hintereinander geschalteter Speicher betrachtet. Die HRU-Definition erfolgt für beide Einzugsgebiete GIS-gestützt unter Integration der unter 2 angeführten Raumdaten (Abb. 2).

Die Gesamtreaktion des Einzugsgebietes wird nach dem Superpositionsprinzip aus der flächengewichteten Summe aller Teilflächen berechnet, wobei laterale Austauschprozesse unberücksichtigt bleiben. Eine Übersicht über die innerhalb einer HRU berücksichtigten Transport- und Speicherprozesse und die wichtigsten Algorithmen von PRMS/MMS zeigt Abb. 3.



	<u>Berechnungsansatz</u>
Interzeption	Funktion der saisonalen Bestandsdichte und der Speicherkapazität der vorherrschenden Vegetation (Überlaufmodell)
PET¹	Verfahren nach TURC-WENDLING (DVWK 1996), ergänzt durch spezifische Bestandeskoeffizienten k_c
AET²	Funktion der Bodenart, des Bodenwassergehaltes und des Sättigungsdefizites der Umgebungsluft
Schneeschmelze	Schneedeckenberechnung auf Basis des Wasseräquivalents und eines dynamischen Wärmespeichers (OBLED & ROSSE 1977)
Oberflächenabfluss	Summe aus Sättigungsflächenabfluss und Infiltrationsüberschuss
Infiltration	Differenz aus Bestandesniederschlag und Oberflächenabfluss
Behandlung des Bodenwassers	Gesamtvolumen des Bodenspeichers definiert durch nFKWe; Evapotranspiration erfolgt aus oberem Speicherkompartiment in Abhängigkeit von der Durchwurzelungstiefe; Zufluss in Zwischen- und Grundwasserspeicher als Funktion des Bodenwassergehaltes
Zwischenspeicherabfluss	Lineares bzw. nichtlineares Speicherkonzept; Steuerung über Angabe der Retentionskonstanten, Tiefensickerung in Grundwasserspeicher als Funktion des Speicherinhalts
Grundwasserabfluss	Lineares Speicherkonzept

¹ Potentielle Verdunstung

² Aktuelle bzw. tatsächliche Verdunstung

Abb. 3: Von PRMS für jede HRU berücksichtigte Transport- und Speicherterme (Grafik) sowie zentrale implementierte Modellalgorithmen

Dabei wurden gegenüber der via Internet verfügbaren Originalversion einige Modifikationen durchgeführt, um das Modell an mitteleuropäische Klimaverhältnisse anzupassen und insbesondere bei der Berechnung von Interzeption bzw. Evapotranspiration und Bodenwasserhaushalt den Einfluss der Vegetationsdecke und Landnutzung adäquat und zeitlich hochaufgelöst berücksichtigen zu können (Berechnung der PET nach TURC-WENDLING und zeitlich variablen aus dem jeweiligen Blattflächenindex des Bestandes ableitbaren Koeffizienten (DVWK, 1996), Definition wichtiger Bestandesgrößen (Kapazität des Interzeptionsspeichers, Grad der Vegetationsbedeckung) mit bis zu täglicher Auflösung, Berechnung des Bodenwassergehaltes unter Berücksichtigung der jeweils aktuellen Durchwurzelungstiefe und daraus resultierender Wasserentnahme der Vegetation; vgl. Abb. 3). Zur ausführlichen Beschreibung der Modellmodifikationen sei auf Vohland (2003) verwiesen, weiterführende Informationen zur PRMS-Modellstruktur finden sich im Original-Handbuch (Leavesley et al., 1983) und in Leavesley & Stannard (1995).

3.2 Sensitivitätsanalyse und Modellparametrisierung

Die vorhandene Datengrundlage (vgl. 2) ermöglicht es, einen großen Teil der benötigten Modellparameter als numerischen Modell-„Input“ direkt bereitzustellen. So können sämtliche vom Modell benötigten nutzungsabhängigen Größen über die Auswertung der verfügbaren Satellitenbilddaten festgelegt werden (vgl. Vohland, 2003). Auf Variablenseite (Niederschlagsdaten) erfolgt eine Optimierung durch Beseitigung systematischer Messfehler (Korrektur der Tageswerte nach Richter, 1995). Zusätzlich zu den Modelleingangsgrößen, für die eine entsprechende Datengrundlage vorhanden ist und die als solche einen direkten physikalischen Bezug besitzen, müssen weitere Modellparameter bestimmt werden, für die aufgrund fehlender bzw. nicht durchführbarer Messungen allenfalls Erfahrungswerte vorliegen. Bei unbekanntem Parametern, auf die das Modell sehr sensibel reagiert, erfolgt die Festlegung unter Nutzung des modellinternen Optimierungsalgorithmus (Verfahren nach Rosenbrock, 1960) unter Einhaltung eventuell vorzugegebender Wertebereiche.

Abb. 4 dokumentiert beispielhaft für den Auslaufkoeffizienten des linear konzipierten Grundwasserspeichers (`gwflow_coef`) die Auswirkungen unterschiedlicher Parameterwerte auf das Simulationsergebnis (simulierte Größe: Abfluss am Bezugspegel des Ruwer-Einzugsgebietes). `Gwflow_coef` kann aufgrund der hydrogeologischen Heterogenität der Einzugsgebiete nicht aus der sog. Trockenwetterfalllinie abgeleitet werden; als Anhaltspunkte lassen sich jedoch z.B. die Richtwerte von Richter & Lillich (1975) verwenden, die für Kluftaquifere (z.B. geklüftete Kalke mit schneller Entleerung des Grundwasserspeichers) Auslaufkoeffizienten von 0,01 bis 0,05, für poröse Sandsteine Werte von 0,001 bis 0,01 angeben. Abb. 4 verdeutlicht, dass bereits eine vergleichsweise geringfügige Variation des Parameters um 0,01 eine deutliche Veränderung der simulierten Gesamtabflüsse insbesondere in den Monaten Juni und Juli und damit bei frühsummerlich noch gut gefülltem Grundwasserspeicher bewirkt.

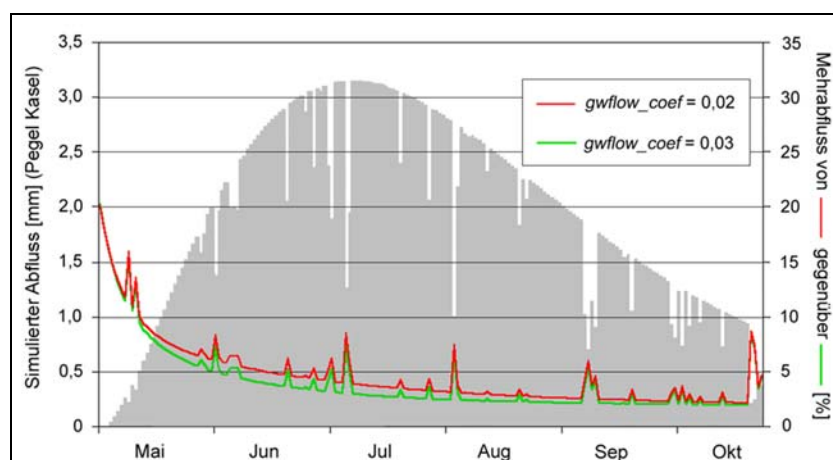


Abb. 4: Sensitivitätsanalyse für `gwflow_coef` (Ruwer, Sommerhalbjahr 1989)

Über den Optimierungsalgorithmus werden letztlich für das Ruwer-Einzugsgebiet Werte von 0,03 (Tonschiefer) bzw. 0,001 (Quarzit bzw. quarzitischer Sandstein) für *gwflow_coef* festgelegt.

Legt man die Ergebnisse der durchgeführten Sensitivitätsanalysen zugrunde, wirken sich die in Tab. 1 aufgeführten Parameter besonders signifikant auf die Modellergebnisse aus. Dabei handelt es sich ausschließlich um Größen, die wie *gwflow_coef* die Abflussbildung und -konzentration im Untergrund über vereinfachte konzeptionelle Ansätze steuern (vgl. Abb. 3).

<i>Parameterbeschreibung</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Werte</i>
<p>Auslaufkoeffizienten der Zwischenspeicher zur Berechnung des Zwischenabflusses (<i>ssres_flow</i>) in Abhängigkeit vom Speicherinhalt (<i>ssres_stor</i>)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> $ssres_flow = (ssrcoef_lin \cdot ssres_stor) + (ssrcoef_sq \cdot ssres_stor^2)$ </div>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>ssrcoef_lin</i> (linearer Koeffizient) • <i>ssrcoef_sq</i> (nicht-linearer Koeffizient) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ruwer: 0,059¹ bzw. 0,001²; Kyll: 0,134³ bzw. 0,001⁴ • Ruwer: 0,125¹ bzw. 0,004²; Kyll: 0,200³ bzw. 0,090⁴
<p>Koeffizienten zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus den Zwischenspeichern (<i>ssr_to_gw</i>), Maximalwert definiert durch <i>ssr2gw_max</i></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> $ssr_to_gw = ssr2gw_rate \cdot (ssres_stor / ssr2gw_max)^{ssr2gw_exp}$ </div>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>ssr2gw_rate</i> (linearer Koeffizient) • <i>ssr2gw_max</i> [mm] • <i>ssr2gw_exp</i> (exponentieller Koeffizient) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ruwer: 0,025¹ bzw. 0,504²; Kyll: 0,025³ bzw. 0,700⁴ • Ruwer: 25,4¹ bzw. 45,7²; Kyll: 25,4^{3,4} • Ruwer: 1,429¹ bzw. 1,651²; Kyll: 1,429³ bzw. 1,650⁴
<p>Auslaufkoeffizient zur Berechnung des Grundwasserabflusses (vgl. Text)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>gwflow_coef</i> (linearer Koeffizient) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ruwer: 0,030¹ bzw. 0,001²; Kyll: 0,026³ bzw. 0,001⁴
<p>Definition von Grundwassersenkungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>gwres_sink</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Ruwer: 0,0^{1,2}; Kyll: 0,0^{3,4}

¹ Devon/Tonschiefer, ² Devon/Quarzit bzw. quarzitischer Sandsteine ³ Devon/Tonschiefer, Mittlerer Muschelkalk

⁴ Buntsandstein, Unterer & Oberer Muschelkalk, Unterer Keuper

Tab. 1: Werte für zentrale Modellparameter (gerundet; vgl. Vohland, 2003)

Bei der Modellparametrisierung wurde auf eine konsistente Festlegung der Parameterwerte geachtet. Die Einstellung der Parameter für das Kyll-Gebiet erfolgte – wenn auch mit Berücksichtigung der genannten hydrogeologischen Unterschiede – unter Anlehnung an die für das Ruwer-Einzugsgebiet gewählten Größen, um aus den nachfolgenden Simulationsläufen Hinweise auf die Robustheit (räumliche Extrapolierbarkeit) des Modellansatzes erhalten zu können.

4 Modellsimulationen – Diskussion der Ergebnisse

Betrachtet man die in Tagesauflösung modellierten Gesamtabflüsse, so lassen sich für beide Einzugsgebiete sowohl für den Kalibrations- als auch den Validierungszeitraum gute Übereinstimmungen zwischen simulierten und gemessenen Pegelwerten ermitteln (Abb. 5 und Tab. 2).

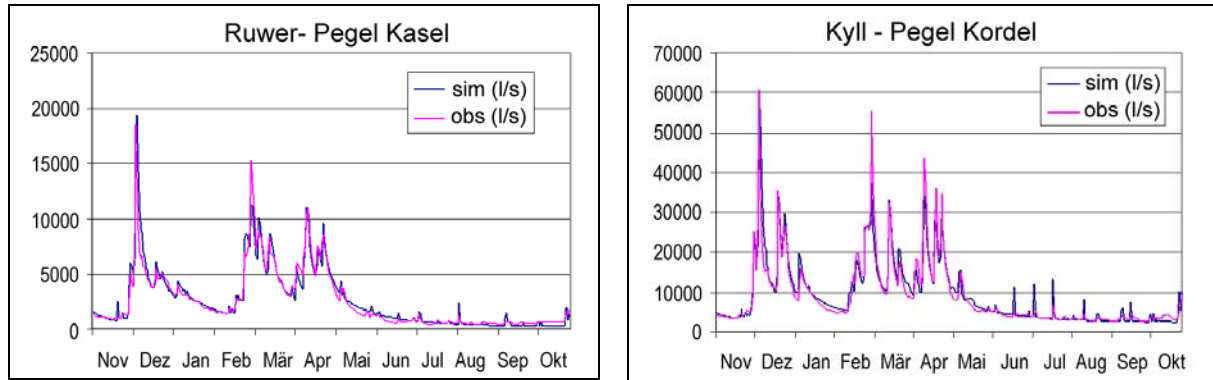


Abb. 5: Ganglinien der simulierten (sim) und gemessenen Tagesabflüsse (obs) an den Pegeln Kassel (Ruwer) und Kordel (Kyll) für 1989

Jahresabflüsse bzw. Gütemaße	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1988, 1990-1993	1988-1993
sim^{1a}	527,9	390,7	402,6	374,1	311,9	451,1	413,5 ⁴	409,7 ⁴
obs^{1a}	543,7	369,7	337,6	346,5	270,9	406,2	381,0 ⁴	379,1 ⁴
$RMSE^{1a}$	0,57	0,27	0,57	0,30	0,35	0,45	0,46	0,44
eff^{2a}	0,89	0,94	0,81	0,96	0,65	0,91	0,88	0,90
r^{3a}	0,95	0,97	0,94	0,98	0,92	0,96	0,95	0,95
$Qsim^{1b}$	435,1	348,3	335,8	317,5	357,3	399,7	369,1	365,6
$Qobs^{1b}$	492,8	342,3	310,2	290,8	296,6	329,0	343,9	343,6
$RMSE^{1b}$	0,59	0,27	0,31	0,34	0,42	0,42	0,42	0,39
eff^{2b}	0,84	0,91	0,93	0,91	0,87	0,87	0,87	0,88
r^{3b}	0,94	0,95	0,97	0,96	0,93	0,95	0,95	0,95

^a Ruwer-Einzugsgebiet ^b Kyll-Einzugsgebiet

¹ [mm]

² Efficiency nach Nash & Sutcliffe, 1970; aus Tagesabflüssen berechnet (Maximalwert 1,0)

³ Rangkorrelationskoeffizient nach SPEARMAN; alle Korrelationen bei $p < 0,01$ signifikant

⁴ Jahresdurchschnittswert

Tab. 2: Aus Tagesabflüssen berechnete Jahresabflüsse und Gütemaße für Kalibrations- und Validierungszeitraum

Die berechneten Korrelationskoeffizienten sind allerdings nur von eingeschränkter Aussagekraft, da die gegenseitige Unabhängigkeit innerhalb der Datenreihen aufgrund hoher Autokorrelation nicht erfüllt ist (vgl. Vohland, 2003). Einen Ansatz zur Berechnung gegenseitig unabhängiger Datenreihen ermöglicht die auf Box & Jenkins (1976) zurückgehende ARIMA-Modellierung. Bei diesem Verfahren erfolgt eine Modellbildung zur Neuschätzung der jeweiligen Zeitreihen aus zeitreihen-inhärenten Komponenten (autoregressiver Anteil (AR), Grad der Differenzierung (Integrated/I), Ordnung des gleitenden Durchschnitts (Moving Average/MA)) bzw. aus einer Kombination dieser Komponenten. Die notwendige Identifikation der entsprechenden Modellparameter erfolgt anhand der Autokorrelations- bzw. partiellen Autokorrelationsfunktion der jeweils betrachteten Zeitreihe. Die Anpassung des Modells liefert als neue Datenreihen Schätzwerte und berechnete Residuen; letztere dürfen keine signifikanten Autokorrelationen aufweisen.

Im vorliegenden Fall erfolgt sowohl für die an den Bezugspegeln gemessenen als auch die simulierten Tagesabflüsse eine ARIMA-Modellanpassung; die Korrelationen der Residuen aus jeweils beiden Datenreihen liefern ein entsprechend bereinigtes und damit aussagekräftiges Zusammenhangsmaß.

	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1988, 1990-1993	1988-1993
r^{1a}	0,81	0,85	0,80	0,84	0,86	0,83	0,84	0,84
r^{1b}	0,79	0,87	0,77	0,76	0,67	0,82	0,76	0,78

^a Ruwer-Einzugsgebiet ^b Kyll-Einzugsgebiet

¹ Rangkorrelationskoeffizient nach SPEARMAN; Signifikanzniveau für alle Jahre $p < 0,01$

Tab. 3: Korrelationen der Residuen der ARIMA-Modellanpassung für simulierte (sim) und gemessene (obs) Tagesabflüsse (Ruwer- und Kyll-Einzugsgebiet)

Die aus den Residuen der Modellanpassung berechneten Korrelationskoeffizienten (Tab. 3) liegen erwartungsgemäß relativ deutlich unter den für die autokorrelierten Datenreihen berechneten Werten. Insgesamt sprechen jedoch auch die ARIMA-basierten Auswertungen für stabile Ergebnisse im gesamten Validierungszeitraum. Neben der Analyse der Gesamtabflusswerte bietet sich eine detaillierte Betrachtung der einzelnen simulierten Abflusskomponenten an. Am Beispiel der in Abb. 6 dargestellten winterlichen Abflussspitze (November bis Dezember 1988) kann nachvollzogen werden, dass hier schnellreagierende unterirdische Abflussanteile (simulierter Zwischenabfluss) wesentlich sind. Der Oberflächenabfluss ist in den Wintermonaten für das Zustandekommen von Abflussspitzen nur von untergeordneter Bedeutung, setzt aber in den Sommermonaten dem grundwasserbürtigen Basisabfluss bei kurzen, konvektiven Niederschlagsereignissen kleinere „peaks“ auf, die auch an der Abflussganglinie am Pegel gut nachvollzogen werden können (Abb. 5). Die vom Modell angenommene zeitliche Abfolge der Teilströme lässt sich gut mit Chemographen ge-

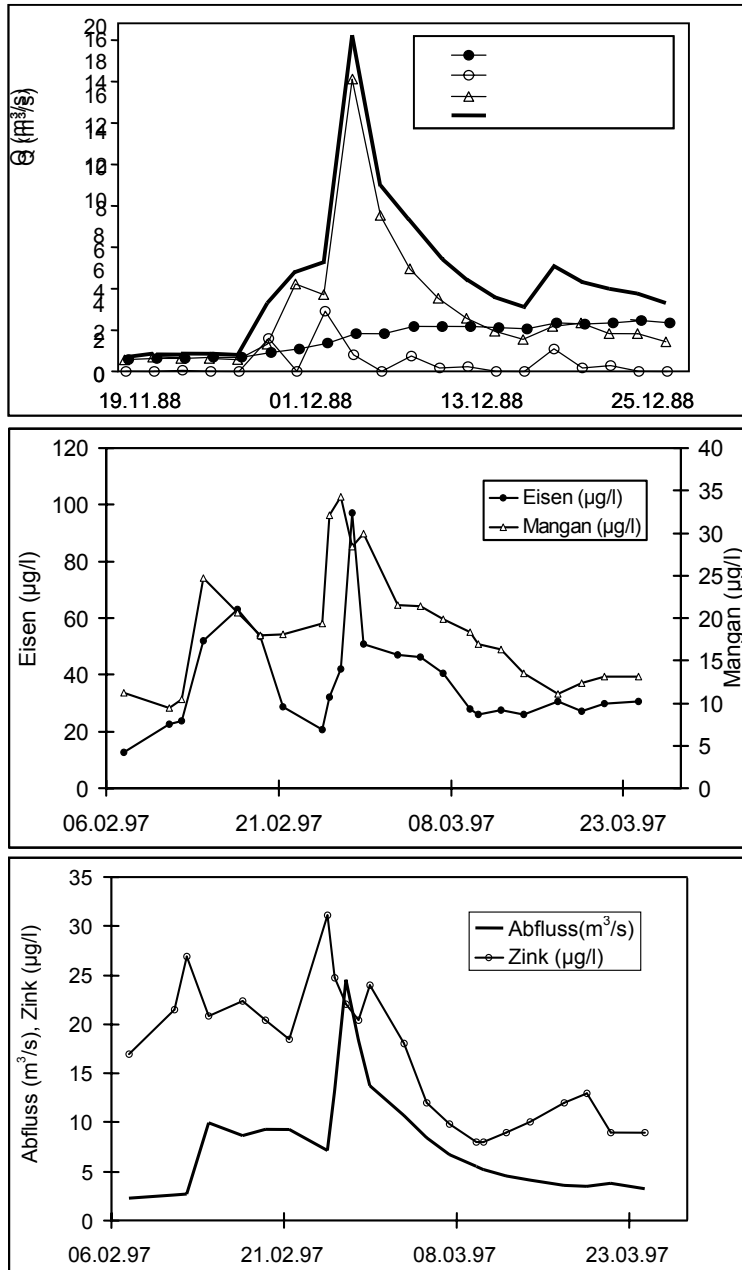


Abb. 6: Vergleich der Simulationsergebnisse (1988) mit Chemographen von Umwelttracern (1997) am Pegel Kasel (Ruwer)

löster Schwermetalle, ebenfalls während einer Winterwelle (Februar bis März 1997) am Pegel Kasel gemessen, parallelisieren (Abb. 6). Mit der simulierten Reaktionsweise des Oberflächenabflusses stimmen die schnelle Zu- und Abnahme der Zinkkonzentrationen – gelöstes Zink kann im Wesentlichen als Indikator oberflächlicher Abflussanteile betrachtet werden (Randall et al., 1978) – im ansteigenden Ast der Welle (vgl. Abflussgraph für 1997) überein. Gelöstes Mangan und Eisen kommen in den anoxischen Bereichen des Ausgangsgesteins bzw. Bodens vor; Mangan geht dabei aufgrund seines geringeren Redoxpotentials vor Eisen in Lösung und lässt sich primär mittleren Bodenschichten zuordnen, während Eisen auf tiefere Bodenwasserkomponenten hinweist (Vohland et al., 2000).

Die eigentliche Abflussspitze korrespondiert entsprechend mit markant ausgeprägten „peaks“ der gemessenen

Mangankonzentrationen und des Zwischenabflusses. Der Grundwasserabfluss nimmt – übereinstimmend mit den ermittelten Konzentrationen gelösten Eisens – erst nach dem Abflusspeak im Retentionsast der Welle zu.

Die Analyse der Chemographen bestätigt demnach die von PRMS bilanzierten Teilströme und kann ebenso wie die gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Pegelwerten als Hinweis für die Robustheit und Konsistenz der durchgeführten Simulationsläufe angesehen werden. Aufgrund der Modellkonzeption lässt sich allerdings nur eine adäquate „Verhaltensnachahmung“ (Casper, 2002) ohne ei-

gentliche Prozessklärung konstatieren. So fasst der simulierte Zwischenabfluss undifferenziert alle schnellwirksamen unterirdischen Abflusskomponenten als Resultat verschiedener komplexer Abflussbildungsprozesse zusammen. Der durchgeführte Abgleich mit Umwelttracern stellt einen Plausibilitätstest dar und ist nicht als „echte“ Validierung zu verstehen, da die Herkunft des Wassers der einzelnen Abflusskomponenten durch PRMS nicht genau nachvollzogen werden kann.

Die Stabilität der in beiden Einzugsgebieten erzielten Simulationsergebnisse spricht, zumindest bei ähnlichen Randbedingungen, für die Möglichkeit räumlicher Extrapolation. Dabei kommt neben der Modellkonzeption auch der Verfügbarkeit adäquater Eingangsdaten und Rauminformationen zentrale Bedeutung zu (Vohland, 2003). Räumlich hochaufgelöste Informationen lassen sich in der Mesoskale (wie auch in der Mikroskale) über Fernerkundungsdaten (z.B. Landsat TM/ETM, ASTER, SPOT, ALI) bereitstellen. Ihre quantitative Auswertung über die klassische Landnutzungs-klassifizierung hinaus kann zur Optimierung von Modellsimulationen im Sinne verbesserter Abbildung realer Systeme beitragen (vgl. Andersen et al., 2003; Vohland, 2003) und erleichtert über die jederzeit reproduzierbare Bereitstellung von Modellparametern die Bewertung unterschiedlicher Modellansätze bzw. Simulationsergebnisse im Hinblick auf Nachbildung und Erklärung real ablaufender hydrologischer Prozesse (Kleeberg, 1999).

5 Zusammenfassung

Das in der vorliegenden Studie eingesetzte hydrologische Modellsystem PRMS/MMS liefert für die mesoskaligen Einzugsgebiete von Ruwer und Kyll (Rheinland-Pfalz) realistische Abflusswerte. Sowohl die Gesamtabflüsse als auch die verschiedenen Teilströme des Abflusses können – wie statistische Gütemaße und Vergleiche mit gemessenen Umwelttracern belegen – plausibel und mit hoher Genauigkeit simuliert werden. PRMS erweist sich als robustes und räumlich extrapolierbares Konzeptmodell.

Während das Verhalten des gesamten Systems gut abgebildet bzw. nachgeahmt werden kann, ist es aufgrund der teilweise implementierten vereinfachenden, konzeptionellen „grey box“-Ansätze von PRMS (z.B. bei Betrachtung des sog. Zwischenabflusses) nicht möglich, alle stattfindenden Abflussbildungs- bzw. Transformationsprozesse eindeutig nachzuvollziehen und damit in ihrem Wirkungsgeflecht zu erklären. Diese eingeschränkte Prozessorientierung limitiert die Möglichkeit zeitlicher Extrapolation bzw. prognostischer Simulation.

Über die Güte einer Modellsimulation entscheidet neben dem gewählten Modellkonzept auch die Verfügbarkeit adäquater Eingangsdaten. Notwendig zur Bewertung der Abbildungseigenschaften von Modellansätzen ist die Verwendung von jederzeit reproduzierbaren Modellparametern, wie sie z.B. über die Auswertung entsprechend aufgelöster Fernerkundungsdaten bereitgestellt werden können.

6 Literatur

- Andersen, J., Dybkjaer, G., Jensen, K.H., Refsgaard, J.C., Rasmussen, K. (2002): Use of Remotely Sensed Precipitation and Leaf Area Index in a Distributed Hydrological Model. *J. Hydrol.* 264, 34-50.
- Becker, A. (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: Kleeberg, H.-B. [Hrsg.]: Regionalisierung in der Hydrologie – Ergebnisse von Rundgesprächen der Deutschen Forschungsgemeinschaft, 16-32.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M. (1976): *Time Series Analysis: Forecasting and Control*.
- Casper, M. (2002): Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald). Dissertation TH Karlsruhe.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter 238.
- Grayson, R.B., Moore, I.D., McMahon, T.A. (1992): Physically Based Hydrologic Modeling – 2. Is the Concept Realistic?. *Water Resources Research* 26 (10), 2659-2666.
- Hill, J., Vohland, M., Udelhoven, T. (1999): Remote Sensing, GIS and Hydrological Modelling – PRMS-Based Physical Modelling for Flood Risk Mapping in the Ruwer and Kyll Basin (Rhineland-Palatinate, Germany). Final results of the Floodgen Project. Projektbericht, EU-Kontrakt ENV4-CT96-0368.
- Kleeberg, H.-B. (1999): Zum Problem der Regionalisierung in der Hydrologie. In: Kleeberg, H.-B., Mauser, W., Peschke, G., Streit, U. [Hrsg.]: Hydrologie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogrammes (1992 bis 1998). Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft, 3-12.
- Kremb-Wagner, F. (1996): Zur Geologie und Hydrogeologie der Trier-Bitburger Mulde. Schriftenreihe des Schiefer-Fachverbandes in Deutschland e.V., Sonderband 1996.
- Leavesley, G., Lichty, R., Troutman, B., Sandon, L. (1983): *Precipitation-Runoff Modeling System: User's Manual*. Water Resources Investigations Report 83-4238.
- Leavesley, G., Stannard, L. (1995): The Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS). In: Singh, V. [Hrsg.]: *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, 281-310.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970): River Flow Forecasting Through Conceptual Models. Part 1 – A Discussion of Principles. *J. Hydrol.* 10, 282-290.
- Obled, C., Rosse, B. (1977): Mathematical Models of Melting Snowpack at an Index Plot. *J. Hydrol.* 32, 139-163.
- Peschke, G. (1999): Skalenwechsel über Modelle. In: Kleeberg, H.-B., Mauser, W., Peschke, G., Streit, U. [Hrsg.]: Hydrologie und Regionalisierung – Ergebnisse eines Schwerpunktprogrammes (1992 bis 1998). Forschungsbericht Deutsche Forschungsgemeinschaft, 13-22.
- Randall, C.W., Helsel, D.R., Grizzard, T.J., Hoehn, R.C. (1978): The impact of atmospheric contaminants on storm water quality in an urban area. *Prog. Wat. Tech* 10 (5-6), 417-431.
- Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Regenmessers. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, 194.
- Richter, W., Lillich, W. (1975): *Abriß der Hydrogeologie*.
- Rosenbrock, H.H. (1960): An Automatic Method of Finding the Greatest or Least Value of a Function. *Computer Journal* 3, 175-184.
- Vohland, M., Treis, A., Krein, A., Udelhoven, T., Hill, J. (2000): Landnutzungsbezogene Modellierung hochwassergenetisch relevanter Abflusskomponenten im Ruwer-Einzugsgebiet. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 44 (4), 190-200.
- Vohland, M. (2003): Optimierung modellgestützter Wasserhaushaltsbilanzierung durch fernerkundlich gestützte Parametrisierung landnutzungsabhängiger Größen. Dissertation Universität Trier (UB Trier).