

Karstentwässerung im Kaisergebirge (Tirol, Österreich) – Abgrenzung hydrographischer Einzugsgebiete durch Kombination hydrogeologischer Untersuchungen mit Isotopenmethoden und hydrologischer Modellierung

Ralf Benischke · Till Harum · Christian Reszler · Pierpaolo Saccon · Gerlinde Ortner · Christophe Ruch

Eingang des Beitrages: 26. 2.2009 / Eingang des überarbeiteten Beitrages: 22. 6.2009 / Online veröffentlicht: 28. 1.2010
© Springer-Verlag 2010

Zusammenfassung Die Komplexität von Karstaquiferen drückt sich darin aus, dass die orographischen Einzugsgebiete mit hydrographischen selten übereinstimmen. Hauptzielrichtung der vorliegenden Studie ist die Erarbeitung von methodischen Grundlagen zur Erkundung von Karstaquiferen in Gebirgsräumen und damit verbunden die Abgrenzung hydrographisch wirksamer Einzugsgebiete unter Einsatz physikalisch basierter hydrologischer Modelle am Beispiel des Kaisergebirges. Für die Simulation der Teilkomponenten des Wasserhaushalts wurde das flächendetaillierte hydrologische Modell MIKE SHE herangezogen. Die Abflüsse wurden den orographischen Einzugsgebieten entsprechend zusammengefasst, an denen teils kontinuierliche, teils episodische Kontrollmessungen durchgeführt wurden. Zur Beschreibung der Wasserbewegung im Boden wurde das physikalisch basierte Modell um konzeptionelle Ansätze erweitert. Daraus ergaben sich zusätzlich zu bestimmenden Parameter. Dies erfolgte durch Kalibrierung aus den

gemessenen Abflüssen, den Zusatzinformationen aus den karsthydrologischen und isotopenhydrologischen Untersuchungen und einer Überprüfung der daraus abgeleiteten Modellvorstellung. In der ungesättigten Zone beispielsweise wurde ein Bypass-Fluss eingeführt, der die Bodenmatrix überbrückt und einen Teil des Niederschlages unmittelbar in die gesättigte Zone leitet. Der Bypass soll dem überwiegend intensiv verkarsteten Felsuntergrund, der von Röhren- und Kluftsystemen geprägt ist, Rechnung tragen. Durch Vergleich der gemessenen Abflüsse mit den simulierten Werten konnten Defizite und Überschüsse ermittelt werden und unter Einbeziehung des Höheneffektes des stabilen Isotops Sauerstoff-18, früherer Markierungsversuche und der geologisch-tektonischen Situation ein Konzeptmodell der Karstentwässerung mit Abschätzung unterirdischer Entwässerungsrichtungen entwickelt werden, das eine wichtige Basis für Ressourcenbewertung und -schutz darstellt.

Karst water drainage in the Kaisergebirge (Tyrol, Austria)—Catchment delineation combining hydrogeological investigations and isotope methods with hydrological modelling

Abstract Water resources investigations in karstic mountainous regions face the difficulty that the hydrological catchment boundaries are usually not identical with the orographic catchment boundaries. In this study an integrative method is presented that combines different sources of hydrogeological information and results of distributed water balance modelling to identify hydrological catchment boundaries and subsurface water ways in a karstic mountainous region. The different information comprises, in addition to meteorological and hydrographic data, region-wide point measurements of discharge, field surveys, isotope data, tracer tests, spring discharge data, soil and geological sur-

Dr. R. Benischke (✉) · T. Harum · Dipl.-Ing. Dr. C. Reszler · P. Saccon · Dipl.-Ing. MSc. G. Ortner · Mag. Dr. C. Ruch
Institut für Wasser Ressourcen Management, Hydrogeologie und Geophysik, Joanneum Research, Elisabethstrasse 16/II,
8010 Graz, Österreich
E-Mail: ralf.benischke@joanneum.at

T. Harum
E-Mail: till.harum@joanneum.at

Dipl.-Ing. Dr. C. Reszler
E-Mail: christian.reszler@joanneum.at

P. Saccon
E-Mail: pierpaolo.saccon@joanneum.at

Dipl.-Ing. MSc. G. Ortner
E-Mail: gerlinde.ortner@joanneum.at

Mag. Dr. C. Ruch
E-Mail: christophe.ruch@joanneum.at

veys and mapping, etc. The study was set-up in the Kaisergebirge mountain range in Tyrol/Austria, using the well known model MIKE SHE. Based on the additional information, the original model structure was adjusted to the specific situation in the karst, e.g. by introducing a bypass-flow within the unsaturated zone. The modelling results based on the orographic catchments were evaluated in terms of closure and—equally important—non-closure of the water balance. Spatial patterns of simulated hydrologic quantities are interpreted in light of the different sources of information. As a result, a regional map of surplus and deficit between observed and simulated runoff was drawn and combined with the additional information to form a general conceptual model of karst water flow directions and the location and altitude of the contributing recharge area in the high-alpine region. The results of the study provide a valuable basis for the assessment and protection of karst water resources for water supply.

Keywords Karst aquifer · Catchment delineation · Environmental isotopes · Hydrological modelling

Einleitung

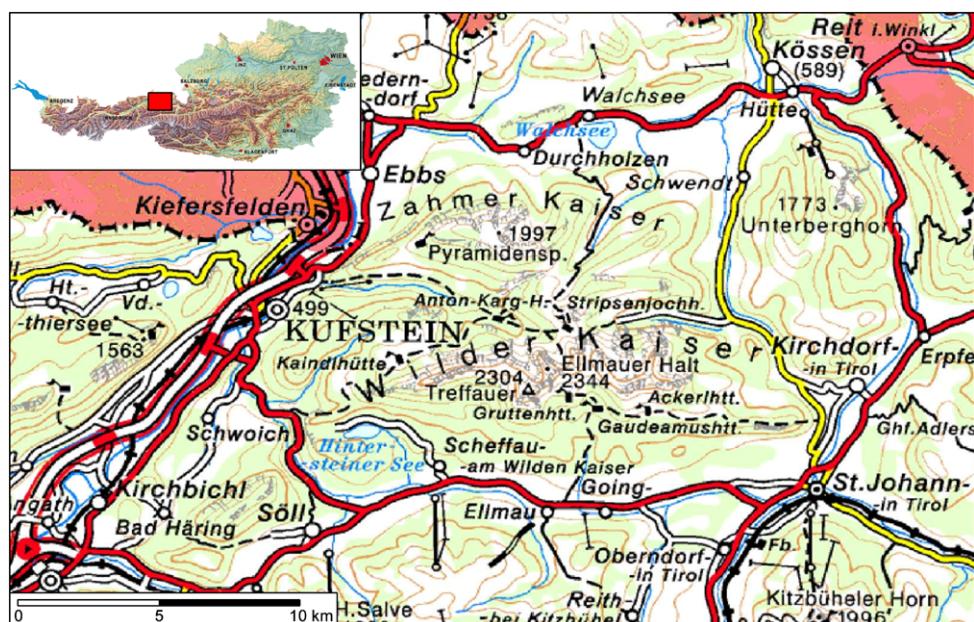
Die Komplexität von Karstaquiferen drückt sich darin aus, dass die orographischen Einzugsgebiete mit hydrographischen selten übereinstimmen. In der vorliegenden Studie werden Schritte zur Erarbeitung von neuen methodischen Grundlagen zur Erkundung von Karstaquiferen in hochalpinen Gebirgsräumen und damit verbunden die Abgrenzung hydrographisch wirksamer Einzugsgebiete vorgestellt. Die Idee war dabei die exemplarische Anwendung und Kombination verschiedener Methoden der Hydrologie bzw. Hydrogeologie zur Erfassung der Wasserressourcen eines Karstmassivs. Dies war von der Überlegung geleitet, zielgerichtet und möglichst effizient mit den zur Verfügung stehenden Mitteln und dem vorgegebenen Zeitrahmen von vier Jahren einen gesamten Gebirgsstock zu erfassen und zu bearbeiten. Daraus ergab sich, dass vor allem solche Methoden anzuwenden waren, die es erlauben, ein Untersuchungsgebiet gesamthaft karsthydrologisch zu charakterisieren, vor allem durch Anwendung von Fernerkundungsmethoden unter Einbeziehung von vorhandenen geologischen Kartengrundlagen, bodenkundlichen Daten, und des staatlichen meteorologischen und hydrographischen Messnetzes. Wie bei jeder hydrologischen Gesamtbearbeitung im Hochgebirge liegen die größten Probleme in der Heterogenität des alpinen Gebirgsraumes in den räumlich sehr ungleich verteilten vorhandenen Messstationen und den für Wasserbilanzüberlegungen meist sehr kurzen Zeitreihendaten. Aus diesem Grund wurden umfangreiche Überlegungen bezüglich Regionalisierung der hydrologischen Bilanzgrößen und zusätzliche Eigenmessungen von Abflüssen in den einzelnen

Teilgebieten durchgeführt. Die Erstellung der Wasserbilanz sowie der flächendetaillierten Grundwasserneubildung erfolgte durch ein physikalisch basiertes hydrologisches Modell unter Verwendung GIS-gestützter Regionalisierungsmethoden. Hydrologische Modellierung im Karst ist im Allgemeinen mit der Schwierigkeit konfrontiert, die unterschiedlich schnellen Infiltrationsprozesse bzw. Abflusskomponenten realitätsnah zu erfassen (z. B. Sauter et al. 2006). Die flächendetaillierte Modellierung von Wasserbilanzkomponenten eines hochalpinen Karstmassivs kann die karstinterne Hydrodynamik nicht im Detail berücksichtigen, da allein die Definition der Randbedingungen zu komplex wäre, sondern muss sich auf generelle plausibilitätskontrollierte Ansätze beschränken. So wurde das physikalisch basierte Modell um konzeptionelle Ansätze erweitert. Liegen flächendetaillierte Messungen von hydrologischen Größen vor, kann das Modell über einen Mustervergleich verifiziert werden (Grayson & Blöschl 2000). Wie im vorliegenden Fall kann die Verifikation der Ergebnisse auch über eine Plausibilitätskontrolle der räumlichen Muster und eine Überprüfung der Vorstellung über die Abläufe und Prozesse im Gebiet erfolgen (z. B. Reszler et al. 2008). Ziel der hydrologischen Modellierung in dieser Arbeit war es nicht, um jeden Preis eine Anpassung an die beobachteten Abflüsse zu erzielen; die Unterschiede sollten sichtbar bleiben zur Abschätzung von Defiziten und Überschüssen in den einzelnen Teilgebieten. In Kombination mit den verschiedenen karsthydrologischen Auswertungen, z. B. Ergebnisse von Markierungsversuchen oder Auswertungen stabiler Isotope unter Ausnutzung des Höhenefekts (Moser & Rauert 1980, Clark & Fritz 1997, Harum et al. 1997) wurde damit die Abgrenzung von hydrologischen Einzugsgebieten unterstützt. Die Studie wurde am Beispiel des Kaisergebirges in den Nördlichen Kalkalpen durchgeführt.

Untersuchungsgebiet

Das zu den Nordtiroler Kalkalpen zählende Kaisergebirge (Abb. 1) ist in zwei größere Bereiche gegliedert, im Norden mit dem Zahmen Kaiser und im Süden, getrennt durch die Linie Kufstein – Kaisertal (Sparchenbachtal) – Strippenjoch (1.577 m) – Kaiserbachtal, der Wilde Kaiser mit der Ellmauer Halt (2.344 m) als Kulminationspunkt des gesamten Gebirges. Mit einer West-Ost-Erstreckung von ca. 21 km und einer Nord-Süd-Erstreckung von ca. 14 km nimmt es eine Fläche von ungefähr 230 km² ein. Als wichtigste Fließgewässer umschließen das Kaisergebirge der Inn im Westen, die Weißache, der Goinger Bach und die Reith Ache im Süden, der Kohlenbach im Osten sowie der Walchseeabfluss, der Aschenthaler Bach und der Jennbach im Norden. Nach Norden und nach Süden wird das Gebiet

Abb. 1 Lage des Untersuchungsgebietes (nach BEV AMAP-Fly – Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien, 2005). Maßstabsbalken 10 km



über einige kleinere Bäche, nach Westen durch den Sparchenbach und nach Osten durch den Kaisertalbach entwässert.

Ein starker Wechsel der Gebietsmorphologie auf kurze Distanz zeigt sich im Wilden Kaiser vorwiegend an den wasserarmen bis wasserlosen, steil aufragenden Felskämmen, mit Wandfluchten, Graten und Felstürmen, an tief eingeschnittenen Karen und mächtigen Schutthalden, im Zahmen Kaiser an plateauartigen Abschnitten mit verkarsteten, wasserlosen Hochflächen buckeliger und kupiger Oberflächengestaltung, mit Karrenfeldern und Dolinen. Die durch intensive Verkarstung geprägte ursprüngliche Altlandschaft wurde während des Pleistozäns eiszeitlich kräftig überformt. Die Kombination aus der exponierten Lage am Alpenrand mit den dort auftretenden Konvektionsniederschlägen einerseits sowie den weniger exponierten Südhängen andererseits ergeben im Kaisergebirge ein sehr heterogenes Lokalklima. In den Hochlagen, insbesondere in den Kammbereichen des Wilden und des Zahmen Kaisers, dominieren vegetationslose freie Felsflächen, vereinzelt sind höchstens schroffendurchsetzte Hänge oder kleinere Ebenheiten mit schütterem Grasbewuchs anzutreffen. Unterhalb von 2.000 m beginnt die Krummholzstufe mit zum Teil dichter Legföhrenvegetation, die ab ca. 1.400–1.500 m in Verzahnung mit der Bergwaldstufe bis etwa 1.100 m herabreicht. An vernässt Hängen und an Bächen haben sich verschiedene Erlengesellschaften entwickelt. Durch die menschliche Nutzung konnten sich je nach Untergrund und Nährstoffgehalt des Bodens nährstoffreiche Mähwiesen, Weiden und Trittrasen, Trocken- und Magerrasen entwickeln.

Daten und Auswertemethodik

Grundzüge der Geologie und Tektonik

Die geologischen Grundlagen des Untersuchungsgebietes wurden in der zahlreich vorhandenen Literatur (z. B. Ampferer 1925, 1933, Enichlmayr 1977, Wallner 1979, Wanker 1990, Zerbes & Ott 2000, Zerbes 2001, Reitner 2005, 2007) ausreichend beschrieben, sodass hier nur eine Kurzcharakteristik vorgelegt werden soll. Den Ausführungen der genannten Autoren folgend umfasst der Gesteinsbestand des Kaisergebirges die gesamte überwiegend karbonatische Gesteinsfolge vom Permoskyth bis zum Oberlias, darüber besteht eine stratigraphische Lücke, die erst mit diskordant auflagernden Gosau sedimenten bis zum Mitteleozän fortgesetzt wird. Ab dem Obereozän folgen darüber diskordant Restbestände der inneralpinen Molasse und Augenstein sedimente. Im Miozän wurde das Kaisergebirge als Scholle durch eine Nord-Süd gerichtete Einengungstektonik aus dem übrigen Tirolikum herausgehoben und damit eine Erosionsphase eingeleitet. Im Quartär insbesondere in den verschiedenen Glazial- und Interglazialphasen erfolgte dann eine weitere erosive Formung, die zur heutigen morphologischen Gestaltung des Gebirgsmassivs geführt hat. Eine der auffälligsten Ergebnisse glazialer Prozesse stellt der Hintersteiner See an der Südseite des Gebirges dar. Die Wässer werden in das Weißbachtal mit einem Stollen und über eine Druckleitung zum Kaiserwerk abgeleitet und dort energetisch abgearbeitet. Tektonische Störungen grenzen das Kaisergebirge von seiner Umgebung ab. Zusätzlich ist eine Nord-Süd gerichtete Verkürzung des ursprünglichen Se-

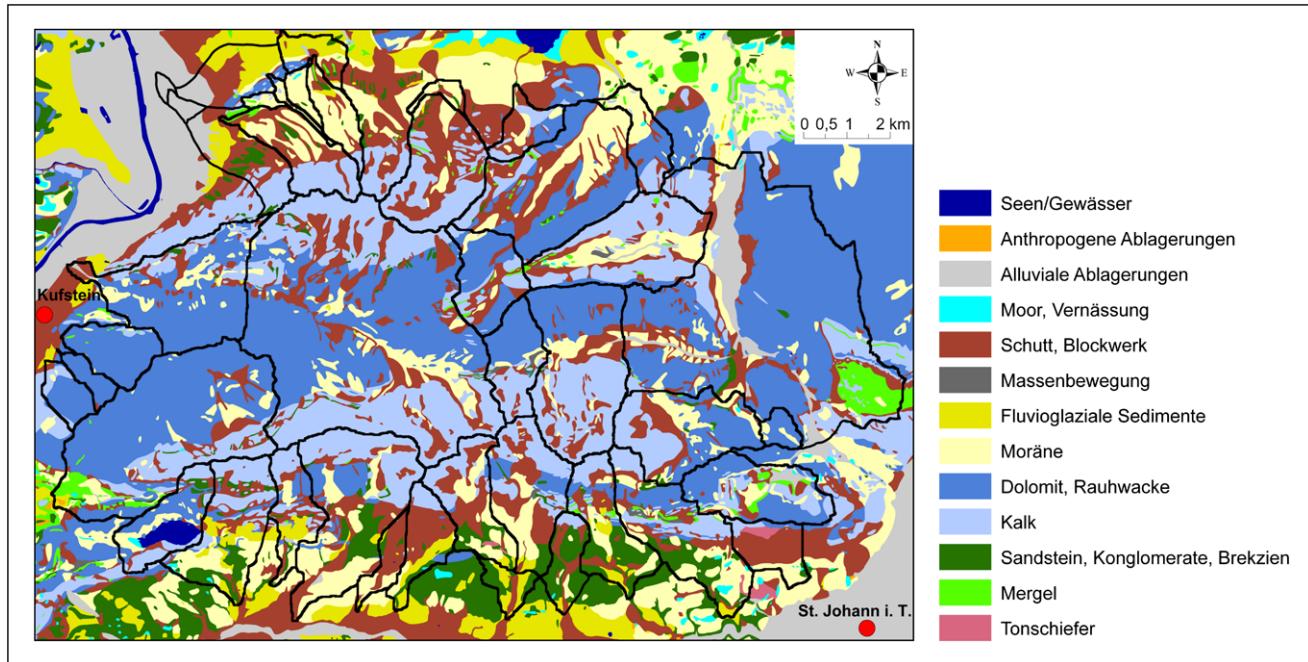


Abb. 2 Generalisierte Übersichtsdarstellung der lithologischen Einheiten des Kaisergebirges nach GIS-Zusammenführung der geologischen Kartenblätter Kufstein (ÖK Blatt 90) und St. Johann in Tirol (ÖK

Blatt 91) (nach Geologische Bundesanstalt, GBA-2005 – Zl. 400/1/06). Zur Orientierung sind bereits die im Folgenden definierten orographischen Teileinzugsgebietsgrenzen eingezeichnet (schwarze Linien)

dimentationsraumes festzustellen, wobei der große zentrale Wettersteinkalkkomplex nach oben gepresst wurde und am nördlichen Rand mit nordvergenter, im Süden mit südvergenter Aufschuppung auf seiner Unterlage aufliegt. Dadurch kam es zu einer ausgeprägten Muldenstruktur mit dem Wilden Kaiser als Südflügel und dem Zahmen Kaiser als Nordflügel.

Für die weitere Verwendung der geologischen Informationen im Rahmen der hydrologischen Modellierung war eine Generalisierung notwendig (Abb. 2). Die zugrunde liegenden geologischen Kartenwerke umfassten etwa 300 unterschiedliche Einheiten bzw. Legendeneinträge. Für die weitere Bearbeitung und als Input für die Modellierung wurde eine Reduktion auf 13 hydrogeologisch relevante Einheiten durchgeführt, um die praktische Bearbeitbarkeit zu gewährleisten, was insbesondere für die Erstellung von Pseudohydrotopen aus dem GIS-Verschnitt von lithologischen Einheiten, Landnutzung und Bodentypen von Bedeutung war. Im Zuge ergänzender Geländeaufnahmen wurden die Teileinzugsgebiete begangen und an hydrogeologisch bedeutenderen Geländeabschnitten mit größeren Quellen und Quellgruppen genauer untersucht.

Erfassung meteorologischer Parameter

Zeitreihen der meteorologischen Eingangsparameter Niederschlag, Lufttemperatur und Grasreferenzverdunstung (berechnet nach FAO – Penman-Monteith; Allen et al. 1998)

wurden aus tagesbasierten Daten der Stationen der Hydrographischen Landesabteilung Tirol bzw. der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik – ZAMG (Tab. 1, Abb. 3) zusammengestellt. Als Einschränkung war wie in den meisten Hochgebirgsgegenden der Mangel an hochliegenden Stationen festzustellen, obwohl zumindest im Kaisergebirge in höheren Lagen einige Totalisatoren zur Verfügung standen, wodurch die Höhenabhängigkeit der meteorologischen Parameter erfasst wurde. Die Messsituationen vor allem der höher gelegenen Stationen wurden genauer untersucht und etwaige Korrekturen für Schneefall oder Wind vorgenommen (Richter 1995). Die Regionalisierung der Daten erfolgte dann nach der Gradientenmethode (Seehöhenregression) auf Tagesbasis unter Hochrechnung über das digitale Geländemodell.

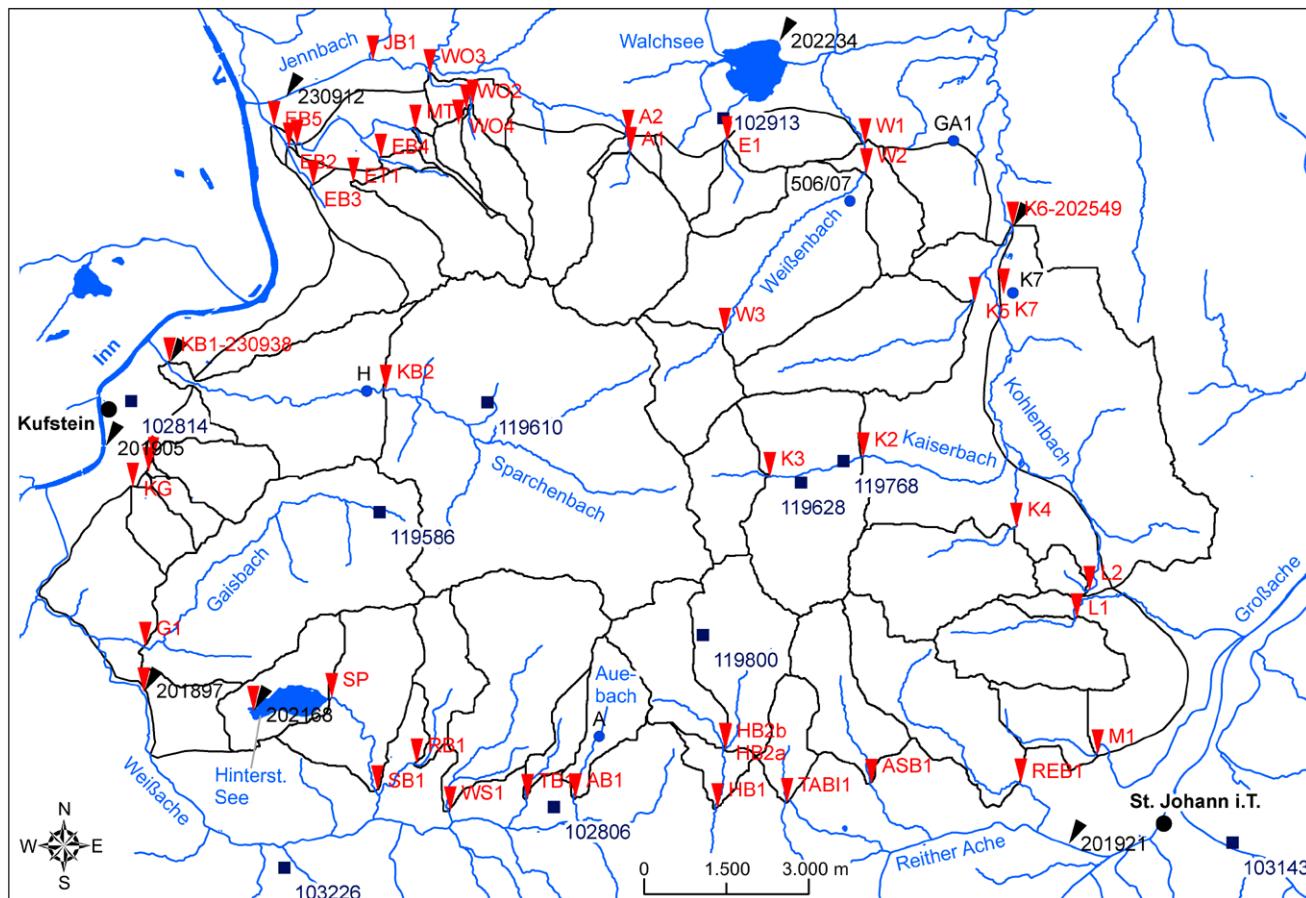
Der hydrologischen Modellierung wurde die Zeitreihe 1995–2007 zugrunde gelegt, wobei dort, wo es notwendig und möglich war, anhand von Nachbarstationen Lücken ergänzt wurden. Insbesondere bei den Totalisatoren war dies problematisch, da ihre Laufzeit im Verhältnis zu den Talstationen um vieles kürzer war, im Einzelfall nur extrem kurze Zeitreihen verfügbar waren (z. B. Gruttenhütte). Die wichtigsten Kennzahlen der meteorologischen Parameter bei den einzelnen Stationen, soweit verfügbar, zeigt Tabelle 1.

Auf Basis von Geländebegehungen und der geologischen Unterlagen wurden Stellen für Abflussmessungen ausgewählt und die auf diese Messstellen bezogenen orographischen Einzugsgebiete mittels GIS aus dem digitalen Höhen-

Tab. 1 Meteorologisches Stationsnetz im Kaisergebirge und seiner Umrahmung. Stations-Nr. lt. Hydrographischem Dienst, Meteorologische Kenndaten. T: Totalisator, übrige Stationen mit täglicher Ablesung oder registrierenden Messeinrichtungen

Station Nr.	Messstelle	Seehöhe [m ü. A.]	Niederschlag		Lufttemperatur	
			mittlere Jahressumme [mm]		Jahresmittel [°C] (Normalzahl)	1961–1990
			1961–1990 (Normalzahl)	1994–2006		
102806	Ellmau	750	1.258	1.376	–	7,4
102814	Kufstein	495	1.287	1.384	7,8	9,6
102913	Walchsee	687	1.587	1.692	–	–
103143	St. Johann in Tirol, Almdorf	756	–	1.599 (1994–2004)	–	7,5
119586	Steinberghütte (T)	1.190	–	2.031 (1996–2004)	–	–
119610	Hechleitalm (T)	920	–	2.016 (1996–2004)	–	–
119628	Griesner Alm (T)	911	–	1.749 (1996–2004)	–	–
119768	Fischbachalm-Kaiserbachtal	860	–	1.977 ^a (1994–1999)	–	–
119800	Gruttenhütte (T)	1.580	–	2.705 (1996–2004)	–	–

^aZeitreihe ergänzt

**Abb. 3** Meteorologisches und hydrographisches Messnetz im Kaisergebirge; rote Dreiecke: Abflussmessstellen; schwarze Dreiecke: Schreibpegelanlagen des Hydrographischen Dienstes; schwarze Qua-

drate: Niederschlagsstationen; schwarze Linien: Grenzen der Teileinzugsgebiete; blaue Linien: Gewässernetz. Im Text bzw. in Diagrammen beschriebene Quellen sind als blaue Kreise dargestellt

Tab. 2 Pilotgebiet Kaisergebirge. Beobachtungsstellen an Oberflächengewässern mit registrierenden Messeinrichtungen. Ausgewählte gewässerkundliche Hauptzahlen für Abflüsse bis 2005 an den ange-

führten Stationen des Hydrographischen Dienstes. Für die zusätzlich errichteten Stationen W1 und K2 stand nur der Zeitraum 09/2006 bis 10/2007 zur Verfügung (vgl. Abb. 3)

Station Nr.	Messstelle	NNQ [m ³ /s]	HHQ [m ³ /s]	MQ [m ³ /s]
230912	Niederndorf (ÖBK)	0,14 (03.10.2003)	80,1 (12.08.2002)	1,17 (seit 1995)
KB1-230938	Kufstein (ÖBK)	0,14 (16.01.2002)	45,7 (12.08.2002)	1,45 (seit 2002)
K6-202549	Schwendt-Unterbichl	1,33 (02.02.2001)	33,6 (12.08.2002)	2,73 (seit 1998)
201897	Kaiserwerk	0,36 (23.11.2003)	97,2 (03.08.1991)	2,51 (seit 1982)
–	W1 (Weißenbach)	0,23 (04.05.2007)	4,98 (06.09.2007)	0,62
–	K2 (Kaiserbachtal)	0,10 (01.01.2007)	1,04 (07.09.2007)	1,31

raster abgegrenzt. Abgrenzungskriterien waren die möglichst vollständige Erfassung des Abflusses sowie die praktischen Messmöglichkeiten an Teilabschnitten der verschiedenen Bäche des Gewässernetzes. Da im Pilotgebiet nur an den Hauptfließgewässern (Weißeache, Reither Ache, Kohlenbach, Jennbach, Sparchenbach) länger laufende hydrographische Messstationen vorhanden waren, an den Messpunkten der im Kaisergebirge abgegrenzten Teileinzugsgebiete jedoch keine Daten vorlagen, wurde ein Abflussmessprogramm konzipiert, um die aktuelle Abflussdynamik an diesen Stellen erfassen zu können. In sechs Messkampagnen wurden an allen Messstellen Terminwertmessungen des Abflusses durchgeführt. An zwei wichtigen Fließgewässern (Weißenbach im Norden und Kaiserbach im Osten) wurden Messstationen mit Lattenpegel und Datensammler neu errichtet. Eine Übersicht über die räumliche Verteilung aller Messstationen einschließlich der meteorologischen Stationen ist in Abbildung 3 enthalten, eine Auswahl gewässerkundlicher Hauptzahlen ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Zusätzlich wurden die Abflussdaten des Hintersteiner Sees – der Ausfluss aus dem See wird zur Energieerzeugung genutzt – und Seewasserstände ausgewertet. Mit freiem Auge waren bei den Begehungen die zahlreichen starken Wallerquellen im Uferbereich des Sees zu erkennen. Der See wird von einem massiven unterirdischen Zufluss gespeist, der möglicherweise deutlich größer ist, als der Zufluss aus dem direkten Einzugsgebiet allein.

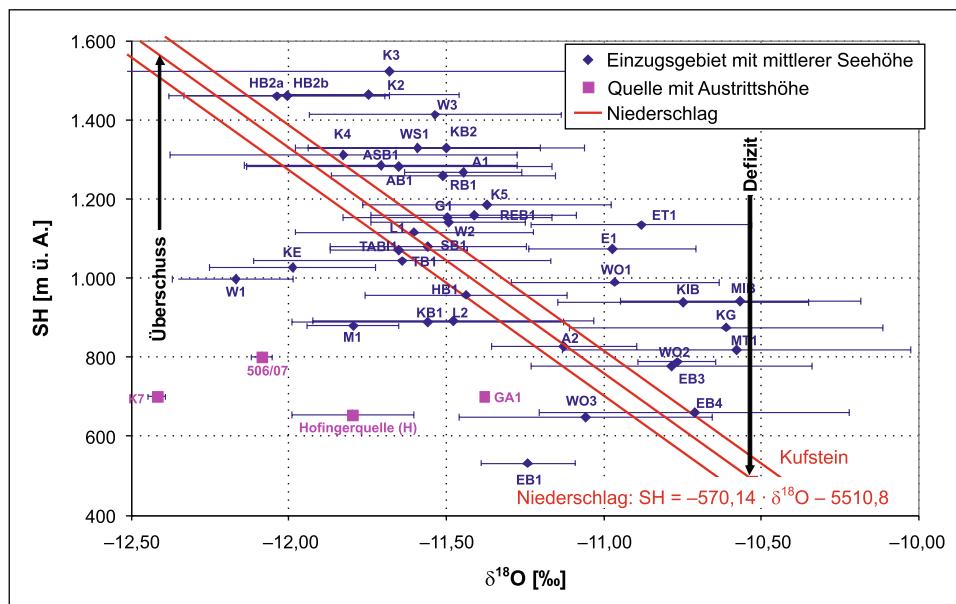
Hydrogeologische Aufnahmen (Quellenaufnahmen, Markierungsversuche, Isotopenuntersuchungen)

Berücksichtigt wurden Datenbestände aus dem Quellkataster des „Wasserversorgungskonzepts Tirol“, Quellenaufnahmen der früheren Bundesanstalt für Wasserhaushalt in Karstgebieten (im Folgenden kurz BWK) und ergänzender Geländebegehungen und Aufnahmen im Zuge der Untersuchungen. In den Jahren 1973–1976 erfolgten die BWK-Aufnahmen mit mehr als 270 Quellen als Basis für umfangreiche karsthydrologische Studien im Kaisergebirge und in der östlich benachbarten Unterberghorngruppe, die ihren Abschluss in den Markierungsversuchen

und Vorschlägen zu Schutz- und Schongebietsausweisungen der 1980er-Jahre fanden (Völkl 1988). Eines der Ziele des karsthydrologischen BWK-Untersuchungsprogrammes war die Abgrenzung hydrographischer Einzugsgebiete von Quellen mittels Markierungsversuchen. Die in den Jahren 1979–1983 durchgeföhrten 12 Markierungsversuche stellten eine Grundlage für weiterführende Untersuchungen dar (Völkl 1988). Im Zuge der Abflussmessungen erfolgte an den Messstellen für die Teileinzugsgebiete auch eine Probenentnahme zur Bestimmung der stabilen Umweltisotope Sauerstoff-18 und Deuterium. Erfahrungsgemäß und in guter Näherung repräsentiert das Mittel des Sauerstoff-18-Gehalts in einer Quelle oder eines Oberflächengerinnes jenen Gehalt, der der mittleren Seehöhe des Einzugsgebietes der jeweiligen Quelle entspricht und somit einen Hinweis auf die Lage des Einzugsgebietes bzw. auf gebietsübergreifende Entwässerungen gibt (Moser & Rauert 1980, Clark & Fritz 1997).

Für Teileinzugsgebiete mit Zuflüssen aus anderen Gebieten wurden die Isotopengehalte mithilfe der Mischungsgleichung auf das Teileinzugsgebiet rückgerechnet. Aktuelle Isotopendaten aus dem Niederschlagsmessnetz des Umweltbundesamtes lagen nicht vor. Zur Verfügung standen nur Werte der Talstation Kufstein bis 2004 und der nächstgelegenen Höhenstation Patscherkofel (außerhalb des Untersuchungsgebietes). Aufgrund des signifikanten Temperaturanstieges in den letzten Jahrzehnten ist eine zunehmende Anreicherung im Niederschlag zu beobachten. Dies bedeutet, dass sich die Seehöhenbeziehung aus dem Isotopenhöheneffekt verschiebt. Basierend auf diesem Trend wurden die aktuellen Inputwerte für das Gebiet für den Untersuchungszeitraum durch Trendberechnung aus den Daten der vergangenen Jahre geschätzt. In Abbildung 4 ist die Beziehung Seehöhe zu den mittleren ¹⁸O-Gehalten und deren Standardabweichung dargestellt. Bei Quellen gilt als Bezugshöhe die Austrittsseehöhe, bei Oberflächengerinnen die mittlere Seehöhe des orographischen Einzugsgebietes. Bei Einzugsgebieten, die im Schwankungsbereich des Niederschlages liegen, kann näherungsweise eine Übereinstimmung zwischen orographischem und unterirdischem Ein-

Abb. 4 Beziehung Seehöhe zu Sauerstoff-18-Gehalt ($\delta^{18}\text{O}$) im Niederschlag (geschätztes Jahresmittel 2007 mit angenommener Fehlerbreite der Schätzung von $\pm 0,2\text{\textperthousand}$), in den Einzugsgebieten und ausgewählten Quellen (vgl. auch Abb. 3)



zugsgebiet angenommen werden. Abweichungen von der Niederschlagsgeraden lassen Rückschlüsse auf die tatsächliche mittlere Seehöhe des hydrographischen Einzugsgebietes zu. Eine Übereinstimmung war nur bei sehr wenigen Gebieten gegeben. Große Karstquellen wie die Hofingerquelle (H) zeigen deutlich ein hochgelegenes Einzugsgebiet, welches weit über das orographische hinausreicht. Hingegen zeigt das Einzugsgebiet AB1, das in der Hauptsache durch die Auebachquelle (A) entwässert wird, ein tiefer gelegenes und im Vergleich zur Orographie verkleinertes Einzugsgebiet.

Hydrologische Modellierung

Ziel der hydrologischen Modellierung im Rahmen der karsthydrologischen Untersuchungen ist die Identifikation von Defiziten und Überschüssen in der Wasserbilanz durch einen Vergleich von simulierten Abflüssen unter Verwendung der orographischen Einzugsgebiete mit den an den jeweiligen Gebietsauslässen gemessenen Abflüssen. Für die Simulation der Teilkomponenten des Wasserhaushalts wurde das flächendetaillierte, integrierte hydrologische Modell MIKE SHE (Abbott et al. 1986, Refsgaard & Storm 1995) verwendet. Im Modell werden die hydrologischen Prozesse räumlich differenziert nachgebildet; die Berechnung erfolgt auf Rasterbasis (Pixel). Die simulierten Abflüsse in den Pixeln werden sodann den orographischen Teileinzugsgebieten entsprechend zusammengefasst. Die zeitliche Auflösung der Berechnungen erfolgte auf Tagesbasis für den Zeitraum 1994 bis 2007. Zeitlich und räumlich variierende Inputdaten sind mittels der Gradientenmethode regionalisierte Niederschläge, die vegetationsbezogene Referenzverdunstung ET0

nach Penman-Monteith, sowie deren Umrechnung auf die verschiedenen Vegetationseinheiten in Anlehnung an Allen et al. (1998) und die Lufttemperaturen. Für die mittlere potentielle Jahresverdunstung ET0 ergaben sich Werte zum Beispiel im Tal bei Wald von rd. 850 mm und bei Wiese von rd. 600 mm sowie in der Höhe auf 2.000 m bei Wald von rd. 700 mm und bei Wiese von rd. 500 mm. Räumliche Inputdaten für das Modell sind der digitale 10 × 10 m-Höhenraster, die Landnutzungsverteilung und der Blattflächenindex sowie die Verteilung der Pedohydrotope und deren zugehörige Parameterwerte.

Landnutzung und Blattflächenindex (LAI)

Da die Wasserbilanz und die Grundwasserneubildung in starkem Maße mit der Landnutzung und der Vegetationsbedeckung verknüpft sind, war es notwendig, auch eine gebietspezifische Auswertung der Landnutzung durchzuführen. Mit einer GIS-basierten Satellitenbildauswertung wurden die Landnutzung und die Vegetationsbedeckung ermittelt und die Auswertergebnisse durch Geländebegehungen stichprobenartig verifiziert sowie parallel dazu der Blattflächen-Index (LAI – Leaf Area Index) bestimmt. Der Blattflächenindex LAI, der das Verhältnis der gesamten Blattoberfläche eines Bestandes zur gesamten Bestandsgrundfläche beschreibt, geht als Modellparameter für die Berechnung der Verdunstung ein. Für seine Bestimmung wurde ein Verfahren angewendet, das auf der Kombination von multispektralen Satellitenbildern (LANDSAT 7 ETM+) und direkten Messungen mit einem LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (PCA) auf Referenzflächen im Gelände basiert. Dieses Verfahren ist nicht im verwendeten Modell-

system implementiert, sondern in der Software zur Auswertung von Satellitenbildern (ERDAS-IMAGINE). Dazu wurden aus den Satellitenbildern mithilfe des NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) LAI-Werte abgeleitet. Der NDVI bildet ein Maß für die photosynthetische Aktivität und ist stark mit Dichte, Vitalität und dem LAI der Vegetationsdecke korreliert (z. B. Lettner et al. 2001). Die aus den Satellitenbildern abgeleiteten LAIs wurden mit jenen auf den Referenzflächen mit dem PCA gemessenen Werten verglichen, einem linearen Regressionsmodell unterworfen und schließlich auf das Gesamtgebiet übertragen. Für die Berechnung mittlerer LAI-Werte für jede Landnutzungsklasse wurden die einzelnen Landnutzungsklassen mit dem LAI-Raster verschnitten. Die Geländebegehung zur Verifizierung von Landnutzungstypen und LAI-Daten erfolgte bei ähnlichen Strahlungsverhältnissen wie bei der ausgewählten Satellitenbildaufnahme. Sehr ähnliche Landnutzungsklassen wurden zusammengefasst und schließlich 11 Landnutzungsklassen von ursprünglich 25 Klassen ausgewiesen (Tab. 3).

Tab. 3 Ergebnis der Einteilung in Landnutzungsklassen: Flächenanteile und ermittelte Werte des LAI

Landnutzungsklassen	Fläche [km ²]	Anteil [%]	LAI
Wasser	0,5	0,2	–
Wald	108	53,7	2,6
Buschwerk	8,5	4,2	2
Wiese	16,9	8,4	2,4
Alm	26,6	13,2	2,5
Boden mit niedriger Vegetation	15,6	7,8	1,4
Ackerflächen	1,7	0,8	3,7
Kies, Schotter	15,4	7,7	0
Felsflächen	6,6	3,3	0
Niedrige Bebauungsdichte	1,0	0,5	1
Hohe Bebauungsdichte	0,2	0,1	0
Gesamtbetrag	201	100	

Tab. 4 Beispiel für Grundbodenparameter und die daraus abgeleiteten maßgeblichen hydraulischen Parameter für ein Pedohydrotop. Θ_{res} ist der Residualwassergehalt (Wassergehalt bei Welkepunkt), Θ_{sat} der Sättigungswassergehalt und k_{sat} die Wasserleitfähigkeit bei Sättigung.

Horizont	von–bis [cm]	Humus [%]	Sand [%]	Schluff [%]	Tonanteil [%]	Bodenart	Grobanteil [Vol.-%]	Θ_{res}	Θ_{sat}	k_{sat} [m/s]
A	0–5	26,7	–	–	–	L	–	0,24	0,77	$1,2 \cdot 10^{-5}$
A Bg	5–15	10	–	–	–	L	30	0,21	0,56	$3,7 \cdot 10^{-5}$
B	15–30	–	35	38	27	L	30	0,21	0,56	$3,7 \cdot 10^{-5}$
C	>30	–	–	–	–	–	90	0,06	0,29	$1,0 \cdot 10^{-3}$

Bodendaten – Pedohydrotope

Das hydrologische Modell benötigt bodenphysikalische Eingangsparameter wie Wassergehalt und gesättigte Wasserleitfähigkeit. Aus bestehenden Bodenkartierungen wurden Grundparameter wie Horizonttyp, die Horizontmächtigkeit, die Bodenart, der Grobanteil und der Humusgehalt erhoben. Bodenkartierungen lagen zunächst nur für Acker- und Grünlandflächen (ca. 19 % der Fläche des Untersuchungsgebietes) vor. Für die übrigen 81 % der Fläche mussten Neuerhebungen durchgeführt werden. Da eine flächendeckende Kartierung eines derart großen und gebirgigen Gebietes im Rahmen der Untersuchungen nicht möglich war, wurden Böden ähnlicher Eigenschaften zu sogenannten Pedohydrotopen aggregiert. Dazu wurden die GIS-Layer „Landnutzungsformen Wald und Agrarbereiche“ und „Ausgangsmaterial entsprechend der generalisierten geologischen Karte“ miteinander verschnitten (Abb. 2). Daraus ergaben sich insgesamt 10 Pedohydrotope. Zu jedem Pedohydrotop wurden auf Basis der Grundbodenparameter die hydraulischen Parameter über Pedotransferfunktionen aus bodenphysikalischen Datenbanken (Soil Vision 2002) übernommen. Waren keine entsprechenden Datensätze vorhanden, wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen (Katzensteiner et al. 1998, Walther et al. 2004). Tabelle 4 zeigt die Grundparameter und die hydraulischen Parameter beispielhaft für ein Pedohydrotop (Bodenart: Pseudovergleyte Braunerde, Pedohydrotop: Moräne/Almboden).

Adaptierung der Modellstruktur

Zur Beschreibung der Wasserbewegung im Boden werden in MIKE SHE physikalisch basierte Ansätze angeboten. Aufgrund der speziellen Situation im Karst wurden diese vereinfacht und um konzeptionelle Ansätze erweitert. Aus letzteren ergeben sich jedoch zusätzlich zu den Bodenparametern zu bestimmende Parameter. Sowohl die Adaption der Modellstruktur als auch die Wahl der Parameterwerte erfolgte in erster Linie durch Kalibrierung an die Dynamik der gemessenen Abflüsse. Sämtliche Annahmen wurden aber vor dem

gung. Für die Form des funktionalen Zusammenhangs zwischen Wasserleitfähigkeit und Wassergehalt wurde der Ansatz von Van Genuchten/Mualem gewählt

Hintergrund der aus den umfangreichen zusätzlichen Auswertungen erhaltenen Informationen getroffen und durch die unterschiedlichen Daten gestützt. Für die Teilgebiete ohne kontinuierliche Abflussmessung wurden die Parameter von benachbarten Teilgebieten mit Abflussmessungen übertragen.

In der ungesättigten Zone beispielsweise wurde nicht die volle Richards-Gleichung verwendet. Der Term des Matrixpotenzials (Saugspannung) wurde wegen der seichten Böden im Gebirge und des teilweise sehr durchlässigen Untergrunds (Schutt, verkarsteter Fels) vernachlässigt. Dadurch wird der vertikale Fluss nur mehr von der Schwerkraftkomponente bestimmt, und für die Berechnung ist nur mehr ein Parameter, die hydraulische Leitfähigkeit bzw. der funktionale Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Wassergehalt, maßgeblich. Dieser Ansatz wurde für den Fluss durch die Bodenmatrix verwendet. Zusätzlich wurde ein Bypass-Fluss eingeführt, der die Bodenmatrix überbrückt und einen Teil des Niederschlages unmittelbar in die gesättigte Zone leitet. Der überwiegend intensiv verkarstete Felsuntergrund ist geprägt von Röhren- und Kluftsystemen, in denen ein Teil des Niederschlagswassers sehr rasch durch den Untergrund zum Abfluss gelangt. Der Bypass-Fluss soll diesem Prozess Rechnung tragen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Einführung des Bypass-Flusses die Simulation näher an das beobachtete Gebietsverhalten heranbringt (Abb. 6). Zusätzlich bestätigen die beobachteten Quellschüttungen (Dynamik, Leitfähigkeiten) diesen signifikanten Prozess. Aus der Kalibration an die Dynamik der beobachteten Ganglinien ergaben sich Werte für den Anteil des Bypass-Flusses an der Grundwasserneubildung im Mittel beispielsweise für das obere Gebiet des Sparchenbaches (TG 48 – Teilgebiet der Simulation in Abb. 6) von ca. 60 % oder für das obere Gebiet des Weißenbaches (TG 13) von ca. 35 %.

In der gesättigten Zone wurde kein detailliertes Grundwasserströmungsmodell herangezogen, sondern auf das vereinfachte Konzept des Linearspeichers zurückgegriffen. Im Karst handelt es sich meist um ein System von rasch – jedoch nur temporär – zum Abfluss beitragenden bodennahen Zonen und Röhren und von tieferen Zonen, in denen das Wasser länger gespeichert ist, woraus entsprechend lange Entleerungszeiten hervorgehen. Es wurden daher mehrere Speicher sowohl parallel als auch hintereinander geschaltet (Abb. 5). Die Berechnung erfolgte auf Teilgebietbasis, d. h. die berechnete Grundwasserneubildung in den Pixeln wurde zusammengefasst und danach durch das Speichersystem zum Gebietsauslass transformiert. Die generelle Speicherstruktur sowie die Aufteilung zwischen den Speichern und die Speicherkonstanten (k_I , k_{perc} , k_{BF1} und k_{BF2}) wurden aus dem Rückgangsverhalten der gemessenen (Basis-)Abflüsse (Rezessionsanalysen) und aus den generellen Einschätzungen über die unterirdischen Abflussvorgänge im

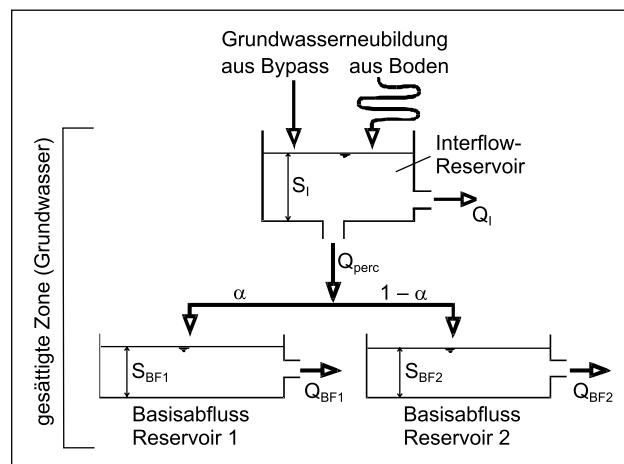


Abb. 5 Prinzip der verschiedenen Linearspeicher für den Ausfluss aus der gesättigten Zone (Grundwasser) im Modell

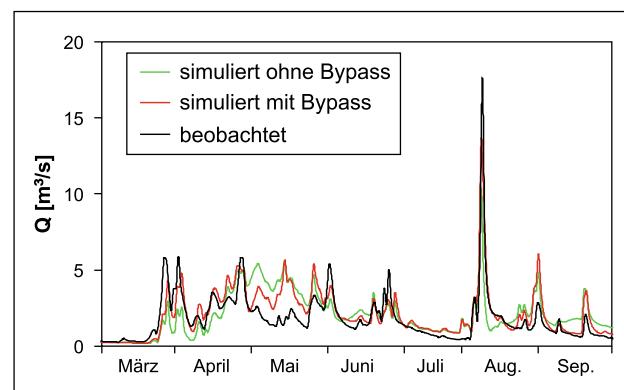


Abb. 6 Wirkung des Bypass-Flusses in der Simulation: Beispiel Sparchenbach im Jahr 2006 (Simulation: Summe aus Teilgebieten 48 und 25; Beobachtung am Pegel Kufstein)

Gebirgsstock vorabgeschätzt. Diese Werte wurden als a priori-Parameter im Kalibrationsprozess der Speicherkoef fizienten verwendet und anhand eines Vergleichs der simulierten und beobachteten Dynamik der Abflussganglinien manuell/visuell feinabgestimmt.

Ergebnisse

Das zentrale Ziel der Anwendung eines hydrologischen Modells im Karstgebiet in dieser Arbeit war die Ermittlung von Defiziten und Überschüssen in den Abflüssen der einzelnen (Teil-)Einzugsgebiete, um in Kombination mit den Informationen aus den umfangreichen Analysen und unter Berücksichtigung möglicher Modellunsicherheiten ein Konzeptmodell der Karstentwässerung des Gebirgsstocks zu entwickeln. Die Abbildungen 7 bis 9 zeigen Beispiele von Ergebnissen der Simulation. In Abbildung 7 sind die Dauerlinien von simulierten und beobachteten Abflüssen verglichen, beispielhaft für Teilgebiete, bei denen kontinuierliche

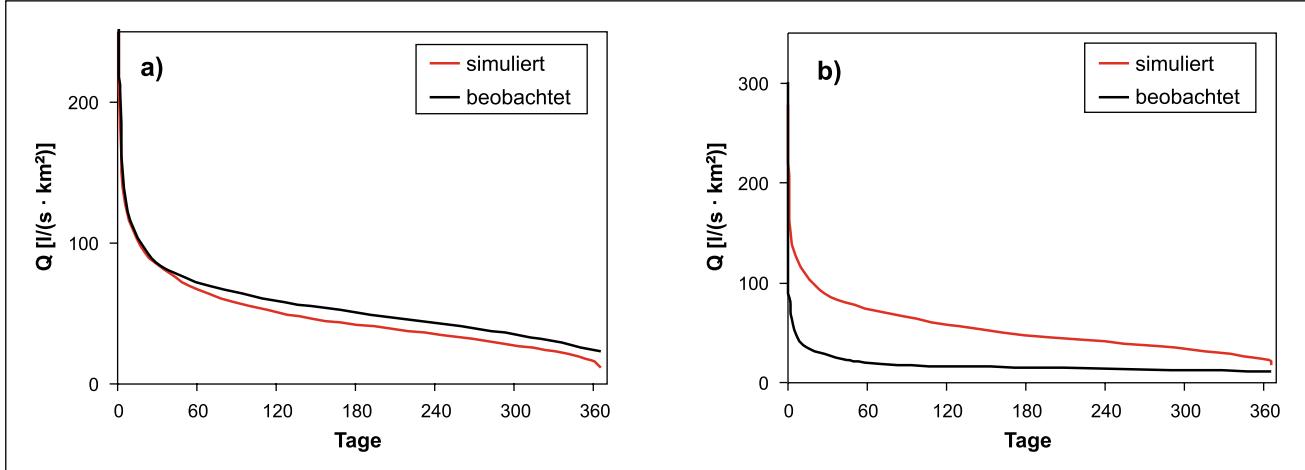
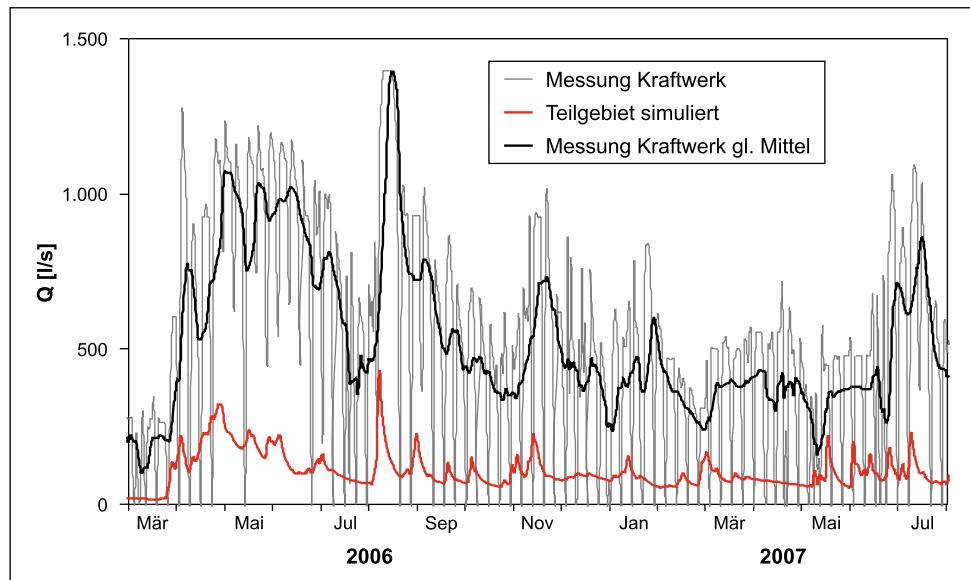


Abb. 7 Simulierte und gemessene Dauerlinien der Abflussspenden. (a) Kohlenbach, Pegel Schwendt (Teilgebiete 3, 4, 5, 6, 7 und 8); (b) Kaiserbach, Messpunkt K2 (Teilgebiete 4 und 5)

Abb. 8 Simulierte Zuflüsse aus dem direkten Einzugsgebiet des Hintersteiner Sees (Teilgebiet 33) im Vergleich mit Abarbeitungsdaten des Kraftwerks



Messungen am Gebietsauslass vorlagen. Zur Vergleichbarkeit wurden die Abflüsse in Spenden umgerechnet. In der Abbildung 7a ist die Situation am Pegel Schwendt am Kohlenbach (Teilgebiete 3, 4, 5, 6, 7 und 8) zu sehen. Im Basisabfluss wird die Beobachtung durch die Simulation unterschätzt, woraus abgeleitet werden kann, dass das Gebiet unterirdisch einen Zufluss aus einem benachbarten Gebiet erhält. Eine sehr starke Überschätzung – und das in allen Größenordnungen der Abflussmengen – zeigt sich am Kaiserbach (Teilgebiete 4 und 5 kombiniert) in Abbildung 7b. Hier wird deutlich, dass ein großer Teil des Gebietes nicht am Pegel, an welchem die Messungen vorgenommen wurden, erfasst wird.

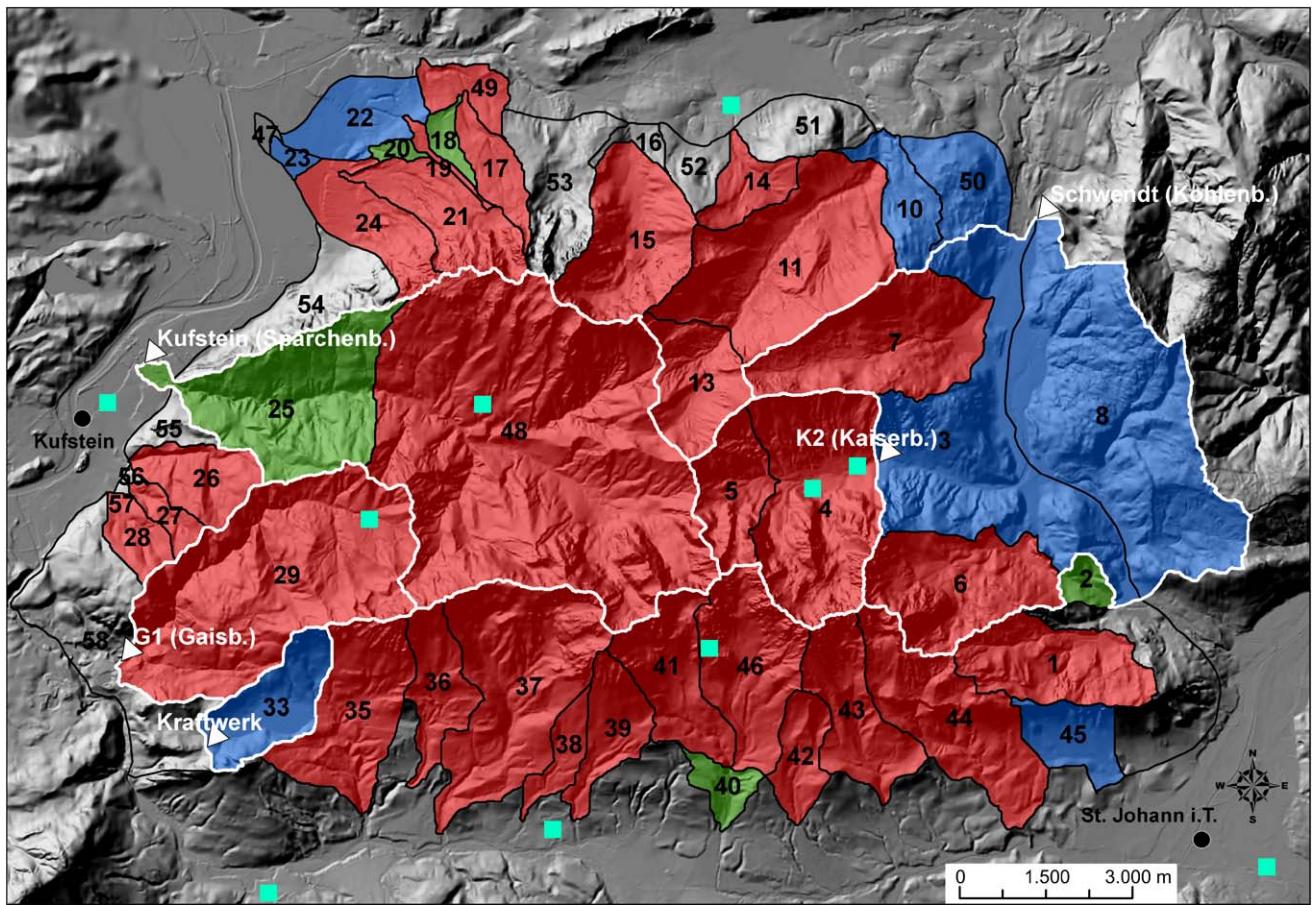
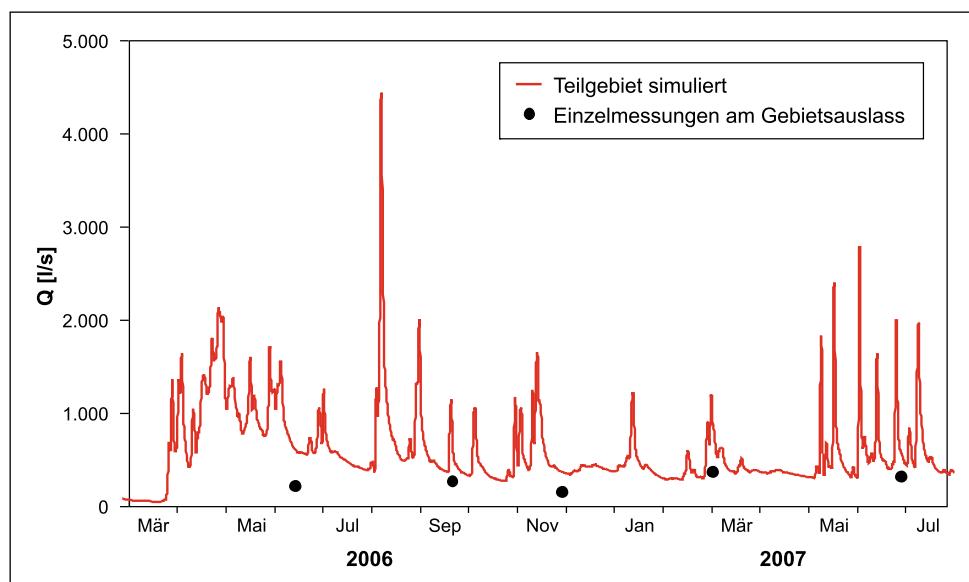
Abbildung 8 zeigt ein weiteres Beispiel. In diesem Fall wurden Daten der Abarbeitung des Hintersteiner Sees im Kraftwerk zum Vergleich herangezogen. Der See wird innerhalb eines Jahres abgearbeitet. Deutlich ist die Unter-

schätzung der beobachteten Ganglinie durch die Simulation zu erkennen. Das direkte Einzugsgebiet beträgt lediglich 3 km^2 . Die Simulationen bestätigen, dass der See von einem massiven unterirdischen Zufluss gespeist werden muss, der nicht aus dem direkten Einzugsgebiet allein stammen kann.

Auch die periodischen Einzelmessungen (Abb. 9) können für diese Abschätzung herangezogen werden. Der Niveauunterschied zwischen simulierten und beobachteten Abflusswerten, vor allem im Auslaufbereich nach einem Regenereignis, kann hinsichtlich Überschuss und Defizit bewertet werden. Im vorliegenden Beispiel werden die Messdaten durch die Simulation überschätzt. Eine Quantifizierung der Über- bzw. Unterschätzung durch die Simulation ist jedoch aufgrund des Fehlens einer durchgehenden Ganglinie nicht im Detail möglich.

Abbildung 10 zeigt das Ergebnis der regionalen Über- bzw. Unterschätzung. Vor allem im Osten des Gebirgs-

Abb. 9 Simulierte Abflüsse im Vergleich mit punktuellen Einzelmessungen. Gebiet Gaisbach, Messpunkt G1 (Teilgebiet 29), an der Südflanke des Kaisergebirges



meteorologischen Stationen (hellblaue Quadrate) und die Pegel bzw. Messstellen der in Abbildungen 7 bis 9 dargestellten Teilgebiete (weiße Dreiecke). Die graue Schattierung bezeichnet die Topographie nach dem Digitalen Höhenmodell

ges, am Kohlenbach (Teilgebiete 3 und 8), zeigt sich ein Überschuss in den Messungen. In vielen, vor allem den höher gelegenen Teilgebieten treten Defizite auf, das heißt, es wurde an vielen Stellen weniger gemessen, als sich aus den Simulationen für die entsprechenden Teilgebiete ergab. Auffällig waren die teilweise starken Überschüsse in den Teilgebieten 33 (direktes Einzugsgebiet des Hintersteiner Sees) und 45. Diese Ergebnisse dienen zur Unterstützung der Bildung einer Modellvorstellung der Karstentwässerung im Gebirgsstock.

Kombination der Informationen – Modellvorstellung der Karstenwässerung

Aus den regionalen Defiziten und Überschüssen aus der hydrologischen Modellierung wurde unter Einbeziehung des Höheneffektes des stabilen Isotops Sauerstoff-18, früherer Markierungsversuche und der geologisch-tektonischen Situation ein Konzeptmodell der Karstentwässerung mit

Abschätzung unterirdischer Entwässerungsrichtungen entwickelt. Die Karte in Abbildung 11 ist das Ergebnis nach Zusammenführung der Informationen. Die Vorstellung über eine gebietsübergreifende Entwässerung wurde durch mehr oder weniger starke Pfeile gekennzeichnet. Die Erstellung erfolgte manuell unter Berücksichtigung der Ergebnisse und Einschätzungen aus den einzelnen Bearbeitungsschritten. Unterlegt ist die Karte der geologischen Verhältnisse (Abb. 2).

Insgesamt konnten fünf hydrogeologische Systeme unterschieden werden:

- Westteil des Zahmen Kaisers
- Ostteil des Zahmen Kaisers
- Zentraler Teil des Kaisergebirges im Bereich des Strippenjochs
- Westlicher und zentraler Teil des Wilden Kaisers
- Östlichster Teil des Wilden Kaisers mit dem vorgelagerten Niederkaisergebiet

Im *Westteil des Zahmen Kaisers* sind generell zwei große Hauptabstromrichtungen gegeben: der Kammbereich und

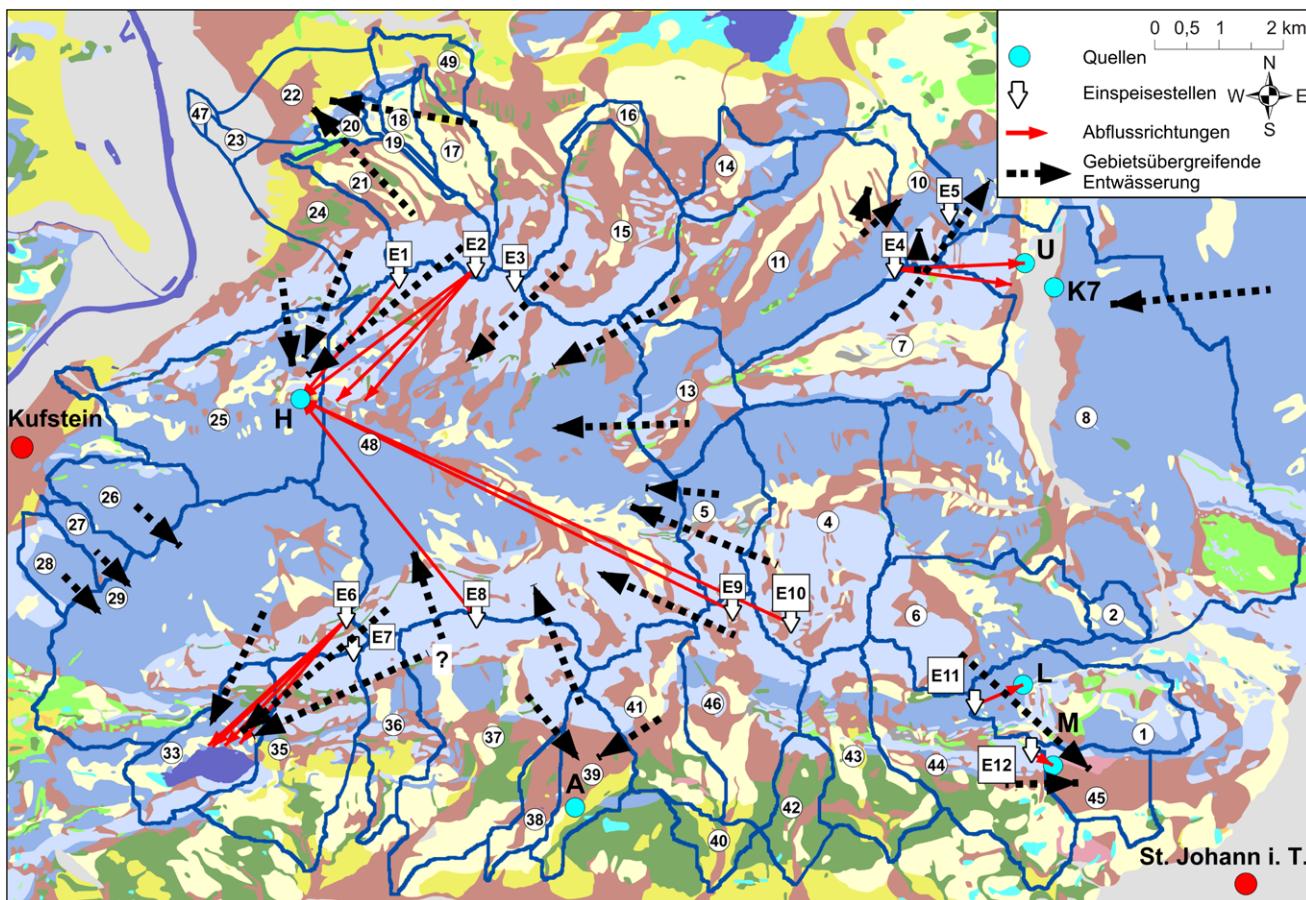


Abb. 11 Vorstellung über gebietsübergreifende Entwässerungen aus der Zusammenführung der Informationen aus den einzelnen Bearbeitungsschritten. Geologische Grundlage entsprechend Abbildung 2.

E1 bis E12 sind Einspeisungsstellen für die Markierungsversuche (vgl. Tab. 5). Zahlen in Kreisen sind Nummern der Teileinzugsgebiete

seine unmittelbare Nordflanke entwässern in der Hauptsache nach Süden in das Sparchenbachtal (Teilgebiete 25 und 48) mit der wichtigsten Quelle, der Hofingerquelle (H). Dies wird deutlich belegt durch die Ergebnisse des Markierungsversuches 1979 (Völkl 1988) und die Ergebnisse der Isotopenuntersuchungen an der Hofingerquelle, nach denen die mittlere Einzugsgebetsseehöhe bei etwa 1.200 m liegt. Zusätzlich wird dies durch die Isotopendaten vom Pegel Sparchenbach (KB1-230938) gestützt. Die Deutung von Zerbes (2001) zeigt ein liegendes Stockwerk aus Wettersteinkalk und ein hangendes Stockwerk mit Gesteinen der Raibler Gruppe. Aufgrund der geologischen Muldenstruktur fließen die schnellen Komponenten der versickernden Wässer im Wettersteinkalkareal rasch zur Quelle, während Wässer, die im auflagernden Stockwerk versickern, oberhalb der stauenden Raibler Unterlage in höherliegenden Quellen austreten. Abflussüberschüsse sind an den beiden Teileinzugsgebieten des Sparchenbaches nicht sehr klar erkennbar, deuten sich aber aus der Modellierung des Gebiets des Sparchenbaches an: oben ist die Bilanz negativ – unten ist die Bilanz eher ausgeglichen (jeweils Teilgebiete 48 und 25 in Abb. 10), was auf Gebietsverluste im südlichen zum Wilden Kaiser gehörenden Kammbereich, aber auch auf einen nicht erfassbaren Porengrundwasserabstrom im Bereich der beiden Messstellen zurückgeführt werden kann. Der tiefere Teil der Northwestseite des Zahmen Kaisers zeigt deutliche lokale unterirdische Entwässerungen Richtung Ebbsbach, was sich beim Vergleich Messung – Simulation in einem deutlichen Überschuss desselben (Teilgebiet 22) und Defiziten der benachbarten (Teilgebiete 23, 49) bzw. der oberhalb liegenden Teilgebiete 17–19 und 21 äußert. Dazu kommt, dass das

Einzugsgebiet des Ebbsbaches mit ca. 900 m Seehöhe deutlich höher liegen muss. Zugleich zeigen die Wässer der benachbarten Einzugsgebiete mit Abflussdefiziten eine deutliche Anreicherung im Sauerstoff-18-Gehalt, was auf eine tiefergelegene lokale Entwässerung hinweist.

Der *Ostteil des Zahmen Kaisers* liegt geologisch im Einflussbereich einer ausgeprägten Antiklinalstruktur. In diesem Bereich ist eine deutliche SW-NE-Entwässerung zu den großen Quellen am NE-Sporn des Gebietes (Teilgebiet 50) und im Weißenbachtal (Teilgebiete 10 und 11) gegeben. Die Isotopenuntersuchungen zeigen für beide Quellgruppen höher gelegene Einzugsgebiete (ca. 970 m bzw. 1.380 m ü. A.). Ebenso zeigt das Teilgebiet 10 des unteren Weißenbachs gemäß der Modellierung einen deutlichen Abflussüberschuss und ein hochgelegenes Einzugsgebiet (ca. 1.420 m ü. A.). Dies wird weiters belegt durch ein ausgeprägtes Abflussdefizit und tiefergelegenes Einzugsgebiet des Kohlalmbaches (Teilgebiet 7) trotz der im untersten Teil austretenden episodischen Karstquellen. Die aufgrund eines Markierungsversuches 1979 nachgewiesene Entwässerung des Kammbereiches des NE-Sporns belegt die durch die gegebenen geologischen Strukturen vorgezeichneten Entwässerungswege.

Im *Bereich um das Stripsenjoch* im zentralen Teil des Kaisergebirges besteht die größte Einengung dieser geologischen Muldenstruktur, wobei die Ost-West verlaufende Muldenachse an dieser Stelle einerseits nach West und andererseits nach Osten abwärts geknickt ist. Die hydrographisch wirksame Wasserscheide liegt in diesem Bereich östlich der orographischen, d. h. östlich des Stripsenjochs, was die deutlichen Abflussdefizite und die isotopisch ange-

Tab. 5 Ergebnisse der Markierungsversuche an den wichtigsten Quellen des Kaisergebirges (Völkl 1988). Die Transportgeschwindigkeit für die Eingabe vom Petersköpfel bezieht sich auf den frühest möglichen Termin, da der Markierungsstoff nur in Aktivkohlen nachweisbar war

Einspeisungsstelle	Seehöhe [m ü. A.]	Markierungsstoff	Einspeisejahr	Hauptaustritt	Distanz [m]	Höhendifferenz [m]	Transportgeschwindigkeit [m/Tag]
E1: Petersköpfel	1.740	10 kg Tinopal	1979	Hofingerquelle (H)	2.425	1.086	97 ^a
E2: Egersgrinn	1.720	3 kg Uranin	1979	Hofingerquelle (H)	3.400	1.066	2.333
E3: Pyramiden spitze	1.920	2 kg Eosin	1979	Kein Nachweis			
E4: Scheibenkogel	1.420	2 kg Rhodamin FB	1979	Unterbühelquelle (U)	2.000	770	701
E5: Oberleinalm	1.030	20 kg Hostalux	1979	Kein Nachweis			
E6: Steinbergalm	1.574	4 kg Eosin	1981	Hintersteiner See	2.500	693	432
E7: Scheffauer	2.080	2 kg Rhodamin FB	1981	kein Nachweis			
E8: Wiesberg	2.000	5 kg Amidorhodamin G	1981	Hofingerquelle (H)	3.500	1.346	12
E9: Ellmauer Tor	1.900	1 kg Rhodamin FB	1983	Hofingerquelle (H)	7.500	1.246	9,6
E10: Grießener Kar	1.900	5 kg Uranin	1983	Hofingerquelle (H)	8.200	1.246	16,8
E11: Kaiser Hochalm	1.470	1 kg Amidorhodamin G	1983	Luigambachquelle (L)	250	95	0,7
E12: Kaiser Niederalm	1.315	2 kg Tinopal CBS-X	1983	Maurerquelle (M)	500	305	799

^aZeitreihe ergänzt

reicherten Wässer, also tiefergelegene Teilgebiete im oberen Weißenbachtal (Teilgebiet 13) und im obersten Kaiserbachtal (Teilgebiete 4 und 5) belegen. Somit entwässert ein Teil östlich und nördlich des Stripenjochs zum Sparchenbach.

Im zentralen Teil des Wilden Kaisers ist ebenso wie im zuvor beschriebenen Bereich der Mulde eine nach Westen bzw. WNW zum Sparchenbach gerichtete Entwässerung gegeben, was durch die Ergebnisse der Markierungsversuche 1983 (Völkl 1988) bestätigt wird. Die davon betroffenen Gebiete zeigen Abflussdefizite und ein tiefergelegenes tatsächliches Einzugsgebiet. Aufgrund der sehr langen Transportzeiten (ca. $2\frac{3}{4}$ Jahre von E9 und ca. $1\frac{1}{4}$ Jahre von E10; vgl. Abb. 11 und Tab. 5) der Markierungsstoffe aus diesem Gebietsteil zur Hofingerquelle kann geschlossen werden, dass an dieser Quelle ein nicht unbeträchtlicher Anteil jeweils länger gespeicherten Wassers bei Niederschlagsereignissen mobilisiert wird und eine mengenmäßig bedeutende Basisabflusskomponente vorhanden ist.

Der Westteil des Wilden Kaisers, etwa ab der Ellmauer Halt, zeigt zwei generelle Hauptabflussrichtungen, eine nach Norden in das Sparchenbachtal und eine nach Südwesten in das Gebiet des Hintersteiner Sees. Dies wird wiederum durch Ergebnisse der Markierungsversuche 1981 (Völkl 1988) belegt, wonach die Eingabe am Wiesberg (E8) zur Hofingerquelle und die etwas weiter westlich gelegene Eingabe im Bereich oberhalb der Steinbergalm (E6) zum Hintersteiner See gerichtet war. Die Gesamtabflussmenge (Kraftwerksdaten des Kaiserwerks) aus dem überwiegend durch (teilweise auch unterseeischen) Quellen gespeisten Hintersteiner See zeigt einen deutlichen Abflussüberschuss und nach den Isotopenergebnissen ein hochgelegenes Einzugsgebiet (ca. 1.320 m ü. A.). Der Hintersteiner See entwässert als Ganzes einerseits beträchtliche Anteile des oberen Gaisbachgebietes (Teilgebiet 29), andererseits auch die höhergelegenen Bereiche des Nordabfalles des Wilden Kaisers im Bereich Wiesberg und Scheffauer (Teilgebiet 48). Defizite und isotopisch angereicherte Wässer der südlichen Teileinzugsgebiete Wegscheidbach (36) und Rehbach (37) belegen dies. Die schon in das Inntal entwässernden Gräben Kienbach (26), Mitterndorfer Bach (27) und Kalkgraben (28) weisen ebenfalls ein deutliches Abflussdefizit und tiefgelegene Einzugsgebiete auf, sodass Gebietsverluste in das Gaisbachtal (29) anzunehmen sind. Ein unerkannter Abstrom aus diesen drei Einzugsgebieten in das Inntal ist aufgrund der Lage der Messstellen im Anstehenden unwahrscheinlich. Der aus den Einzugsgebieten dieser drei Gräben verursachte Überschuss am Gaisbach kann aber wegen der hohen Gebietsverluste des letzteren zum Hintersteiner See nicht erkannt und auch nicht quantifiziert werden. Das auf der Südseite des Wilden Kaisers (Bereich Treffauer) gelegene Auebachgebiet (Teilgebiet 39) mit der großen Auebachquelle (A) zeigt sowohl von den Abflüssen als auch von

den Isotopendaten ein tiefergelegenes Einzugsgebiet und ein leichtes Abflussdefizit, was durch den Vergleich der gemessenen mit der simulierten Schüttungsganglinie bestätigt wird. Die gemessenen Schmelzwasserabflüsse enden deutlich früher als im hydrologischen Modell errechnet. Aus geologischen Gründen dürfte das Einzugsgebiet im Norden mit der Wandbasis des Treffauer begrenzt sein andererseits sind übergreifende Entwässerungen zur Auebachquelle aus den benachbarten Gebieten (Teilgebiete 38, 37 und 41) anzunehmen.

Der östlichste Teil des Wilden Kaisers und das ganz im Südosten gegen St. Johann in Tirol vorgelagerte Niederkaisergebiet haben im Gesamtsystem eine isolierte Stellung. Die Ergebnisse zeigen einerseits einen deutlichen Abflussüberschuss und ein mit ca. 1.200 m hochgelegenes Einzugsgebiet des Maurerbaches (Teilgebiet 45), äquivalente Defizite, sowie tiefergelegene Einzugsgebiete des Rettenbaches (Teilgebiet 44) und des Engetbaches (Teilgebiet 6). Allerdings kann im Bereich des Engetbaches ein gewisser Anteil an Porengrundwassersabstrom nicht ausgeschlossen werden.

In den bisherigen Betrachtungen wurde der von der Seite des Unterberghorns stammende Abflussanteil am Kohlenbach (Teilgebiet 8) nicht näher berücksichtigt, da er weit über das Untersuchungsgebiet hinausgeht. Die Isotopenmessungen an der Mühlbachlquelle (K7 im Teilgebiet 8) zeigen das höchstgelegene Einzugsgebiet des gesamten Raumes mit ca. 1.550 m ü. A. Das Einzugsgebiet der Quelle muss daher weit über das orographische hinaus in den Zentralteil des Unterberghorns reichen, was auch durch Ergebnisse von Markierungsversuchen (Völkl 1988) gestützt wird.

Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurden methodische Grundlagen zur Erkundung von Karstaquiferen in Gebirgsräumen erarbeitet und damit verbunden die Abgrenzung hydrographisch wirksamer Einzugsgebiete unter Einsatz physikalisch basierter hydrologischer Modelle. Für das Kaisergebirge in Österreich konnten mittels Fernerkundung, durch GIS-basierte Auswertung geologischer Daten, Bestimmung des LAI durch Messungen mittels PCA auf Referenzflächen, von Bodenaufschlüssen, durch Erstellung von Pedohydrotopen sowie durch Regionalisierung meteorologischer und hydrographischer Daten die Basis für die Untersuchungen geschaffen und gleichzeitig die Eingangsparameter für die hydrologische Modellierung bestimmt werden. Durch die Modellierung der Wasserbilanz und der Grundwasserneubildung konnte eine plausible Datenbasis für versorgungswasserwirtschaftliche Belange erstellt werden. Die Auswertung vorhandener Studien zur Hydrogeologie, von verschiedenen Quellenaufnahmen sowie von Ergebnissen früherer

Markierungsversuche brachte zusätzliche Kenntnisse zur Karstentwässerung des Untersuchungsgebietes. Durch Vergleich der gemessenen Abflüsse mit den simulierten Werten konnten Defizite und Überschüsse ermittelt werden und unter Einbeziehung des Höheneffektes des stabilen Isotops Sauerstoff-18, früherer Markierungsversuche und der geologisch-tektonischen Situation ein Konzeptmodell der Karstentwässerung mit Abschätzung unterirdischer Entwässerungsrichtungen entwickelt werden, das eine wichtige Basis für Ressourcenbewertung und -schutz darstellt.

Danksagung Die Arbeiten erfolgten im Rahmen des Kompetenznetzwerkes „Alpine Wasserressourcen und ihre Bewirtschaftung“, das durch die Zusammenarbeit von Forschungs- und Wirtschaftspartnern den Aufbau von Forschungskompetenz bei den beteiligten Wirtschaftspartnern zum Ziel hatte (<http://www.waterpool.org>). Die vorliegende Arbeit erfolgte als Teil im Rahmen des Work Package „Resourcenerkundung“ von 2004–2008. Allen beteiligten institutionellen Forschungs- und Wirtschaftspartnern, insbesondere allen an den Feld- und Auswertearbeiten beteiligten Personen sei an dieser Stelle für die Zusammenarbeit gedankt.

Literatur

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O’Connell, P.E., Rasmussen, J.: An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, SHE, 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *J. Hydrol.* **87**, 61–77 (1986)
- Allen, R., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M.: Crop evapotranspiration—guidelines for computing water requirements, 300 S. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome (1998)
- Ampferer, O.: Über die Kaisergebirgsdecke. *Verh. Geol. B.-A.* **1925**, 150–152 (1925)
- Ampferer, O.: Geologischer Führer für das Kaisergebirge, 131 S. *Verh. Geol. B.-A.* **1933**, Wien (1933).
- Clark, I., Fritz, P.: Environmental Isotopes in Hydrogeology, 328 S. Lewis, New York (1997)
- Grayson, R.B., Blöschl, G. (Hrsg.): Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling, 404 S. Cambridge University Press, Cambridge (2000)
- Harum, T., Fank, J., Stichler, W.: Recharge area and hydrodynamics of a spring in an alpine dolomitic karst aquifer using the altitude effects of specific discharge and isotope content. In: *Annales Geophysicae*, Part II: Hydrology, Oceans, Atmosphere & Nonlinear Geophysics 15, Suppl. II, C313. European Geophysical Society, Copenhagen (1997)
- Enichlmayr, E.: Der geologische Bau des Zahmen Kaisers unter besonderer Berücksichtigung der Luftbild und Satellitenbildauswertung, 150 S. Unveröff. Diss. Univ. Innsbruck (1977)
- Katzensteiner, K., Fuxjäger, C., Ottner, F.: Wasser- und Nährstoffhaushalt ausgewählter Waldstandorte im Nationalpark Kalkalpen, 118 S. Bericht zum Projekt „Karstdynamik im Nationalpark Kalkalpen“ 1603, Univ. f. Bodenkultur, Wien (1998)
- Lettner, J., Hank, K., Wagner, P.: Ökonomische Potentiale der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung. *Ber. Landwirtsch.* **79**(1), 107–139 (2001)
- Moser, H., Rauert, W.: Isotopenmethoden in der Hydrologie. Lehrb. d. Hydrogeologie, Bd. 8, 400 S. Gebr. Borntraeger, Berlin (1980), Refsgaard, J.C., Storm, B.: MIKE SHE. In: Singh, V.P. (Hrsg.) Computer Models of Watershed Hydrology, pp. 809–846. Water Resources Publications, Colorado (1995)
- Reitner, J.: Quartärgeologie und Landschaftsentwicklung im Raum Kitzbühel – St. Johann in Tirol – Hopfgarten (Nordtirol) vom Riss bis in das Würm-Spätglazial (MIS 6-2), 190 S. Unveröff. Diss. Univ. Wien (2005)
- Reitner, J.: Glacial dynamics at the beginning of Termination I in the Eastern Alps and their stratigraphic implications. *Quat. Int.* **164–165**, 64–84 (2007)
- Reszler, C., Komma, J., Blöschl, G., Gutknecht, D.: Dominante Prozesse und Ereignistypen zur Plausibilisierung flächendetaillierter Niederschlag-Abflussmodelle. *Hydrol. Wasserbewirtschaftung* **52**(3), 120–131 (2008)
- Richter, D.: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. *Ber. Dutsch. Wetterd.* **1995**, 194 (1995)
- Sauter, M., Kovács, A., Geyer, T., Teutsch, G.: Modellierung der Hydraulik von Karstgrundwasserleitern – Eine Übersicht. *Grundwasser* **11**(3), 143–156 (2006)
- Soil Vision: A knowledge-based data base system for saturated/unsaturated soil properties. SoilVision Systems Ltd., Canada. www.soilvision.com (2002)
- Völkl, G.: Karsthydrologische Untersuchungen im Kaisergebirge. Markierungsversuche zur Feststellung der Quelleinzugsgebiete als Grundlage für Schutz- und Schongebietsverordnungen, 60 S. Report UBA-88-024, Wien (1988)
- Wallner, H.: Der geologische Bau des Wilden Kaisers unter besonderer Berücksichtigung der Luftbild- und Satellitenbildauswertung, 148 S. Unveröff. Diss. Univ. Innsbruck (1979)
- Walther, L., Zimmermann, S., Blaser, P., Luster, J., Lüscher, P.: Waldböden der Schweiz, Bd. 1, Grundlagen und Region Jura, 768 S. Hep Verlag, Bern (2004).
- Wanker, W.: Strukturengeologische Untersuchung der Kaisergebirgscholle und ihrer Unterlage mit einem Beitrag zur Sedimentologie und Fazies des Permoskyths südlich des Kaisers (Kufstein – St. Johann/Tirol), 144 S. Unveröff. Diss. Univ. Innsbruck (1990)
- Zerbes, D., Ott, E.: Geologie des Kaisergebirges (Tirol). Kurzerläuterungen zur Geologischen Karte 1 : 25.000 und Exkursionsvorschläge. *Jahrb. Geol. B.-A.* **142**(1), 95–143 (2000)
- Zerbes, D.: Sedimentäre Anlage und tektonische Formung des Kaisergebirges, 348 S. Diss. Techn. Univ. München. Hieronymus, München (2001)