

GIS-gestützte Ermittlung räumlicher Muster von dominanten Hochwasserabflussprozessen

C. RESZLER¹⁾ & W. POLTNIG¹⁾

¹⁾ JR-AquaConSol GmbH, Steyrergasse 21, A-8010 Graz, Austria.

Korrespondierender Autor: Christian RESZLER, christian.reszler@jr-aquaconsol.at

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden aus regional verfügbaren, flächendeckenden GIS-Daten räumliche Muster von dominanten Hochwasserabflussprozessen erstellt und diese durch Simulationen mit einem flächendetaillierten Niederschlag-Abflussmodell an Abflussdaten validiert. Bodenkennwerte, die für die Abflusststehung große Bedeutung haben, liegen flächendeckend im alpinen Raum (noch) nicht vor. Daher wurde diese fehlende Information aus den verfügbaren Daten Geologie und Morphologie mittels Expertenwissens abgeleitet. In ausgewählten Testgebieten zeigte sich, dass die räumlichen Verteilungen der Prozessgruppen plausibel sind, aber einzelne Parameterwerte des hydrologischen Modells in einem Feinabstimmungsprozess noch verändert werden mussten, um eine genügend gute Anpassung der simulierten an die beobachtete Hochwasserganglinie zu erzielen. Bezüglich Übertragbarkeit auf Einzugsgebiete ohne Abflussdaten bedeutet das, dass die Prozessklassifikation jedenfalls übertragbar ist, aber die mit einem Prozess verbundene Abflussreaktion an der Gebietskenntnis (z.B. durch Begehungen) oder in lithologisch ähnlichen Gebieten mit Abflussdaten in der Region geprüft werden muss.

Summary

This paper presents a method of mapping dominant flood generation processes from GIS data and validates these patterns by runoff simulations with a spatially distributed hydrological model. By now, spatial data of soils, which play a major role in runoff generation, are not available in alpine regions. Thus, the missing information about soil hydraulic properties is derived from the available GIS data - geology and morphology – incorporating expert knowledge. Case studies in selected gauged catchments showed, that spatial patterns of the main processes are plausible, but some parameters of the hydrological model had to be adjusted for fitting simulated to observed flood event hydrographs. Regarding transferability into ungauged catchments it can be concluded, that the process classification and regionalisation can accurately be applied, but runoff response connected to the different processes has to be confirmed by local catchment information (e.g. obtained by field surveys) or checked in neighbouring, lithological similar catchments with runoff data.

Schlüsselwörter: Dominante Abflussprozesse, Regionalisierung, Hydrologische Modellparameter

Keywords: Dominant processes, regionalization, hydrological model parameters

Einleitung

In der flächendetaillierten hydrologischen Modellierung auf Einzugsgebietskala ist es üblich, verschiedene GIS-Datenschichten mit physiogeographischen Eigenschaften zu überlagern, um Hydrotope zu bilden, und diesen Modellparameter zuzuordnen. Zur Wahl der Parameterwerte im regionalen Maßstab ist es aber zielführender, für eine Fläche die dominierenden hydrologischen

Prozesse zu bestimmen, wie etwa Punktwerte von Parametermessungen, z.B. Bodendurchlässigkeiten auf die Größe des Modellelements oder auf das Einzugsgebiet hoch zu skalieren (z. B. Grayson & Blöschl, 2000). Auf kleinem Raum können die Prozesse im Rahmen von Begehungen und Kartierungen bewertet und ein Prozesskatalog erstellt werden, woraus direkt Modellparameter abgeleitet werden können (Anderson & Burt, 1990; Markart et al., 2004; Reszler et al., 2014). Aber großräumig ist dies nicht mit vertretbarem Aufwand möglich. Es müssen immer Instrumente der Regionalisierung eingesetzt werden (z.B. Flügel, 1995).

Ziel dieser Arbeit ist die Verwendung von großflächig vorhandenen GIS-Datenschichten und Metainformationen zur Identifikation der dominanten Prozesse zur Hochwasserentstehung auf einer Fläche, um damit darauffolgend mit vertretbarem Aufwand räumliche Muster der Prozesse großflächig auszuweisen. Aus den GIS-Daten erfolgt nicht nur die Abgrenzung von Flächen mit gleichen physiogeographischen Eigenschaften, sondern es wird mittels hydrologischer und hydrogeologischer Überlegungen direkt auf die auf diesen Flächen erwarteten hydrologischen Prozesse geschlossen. Im Zuge dessen werden a priori Modellparameterwerte abgeleitet, die den Ausgangspunkt in der Kalibrierung von hydrologischen Modellen an Abflussdaten darstellen. Eine Vorab-Einschätzung der Größenordnung eines Parameterwertes oder dessen Fixierung erleichtert deutlich die Kalibrierung, da dadurch die bei der flächendetaillierten Modellierung mitunter sehr hohe Anzahl von Freiheitsgraden verringert werden kann (Reszler et al., 2006; Rogger et al., 2012). Zudem ist es dadurch leichter möglich, das notwendige Expertenwissen zielgerichtet einzubinden und anhand von Ähnlichkeitsmaßen eine Übertragung von Modellparameterwerten in unbeobachtete Gebiete vorzunehmen. Überprüft werden die Annahmen durch ein hydrologisches Modell, mit welchem (i) bei einem synthetischen Ereignis die entsprechenden Prozesse simuliert und die damit verbundene Abflussreaktion interpretiert, und (ii) bei aufgetretenen Hochwasserereignissen in Pegeleinzugsgebieten die Abflusssimulationen an Abflussdaten validiert werden.

Methodik

Abbildung 1 zeigt den Arbeitsablauf der vorgestellten Methodik. Am Beginn der Arbeiten steht die Definition der generell zu erwartenden hydrologischen Prozesse in Anlehnung an die gängige Literatur (z.B. Dunne & Black, 1970; Gutknecht, 1996; Peschke et al., 1999; Scherrer & Naef, 2003). Unterschiedliche hydrologische Bedingungen können dazu führen, dass jeweils verschiedene Prozesse dominant sind (z.B. Gutknecht 1993; Merz & Blöschl, 2003). Als maßgebliche Situation in dieser Arbeit wird ein großes Hochwasser als Folge eines Starkregens mit Intensitäten bis zu 50-60 mm/h bei mittleren bis feuchten Anfangsbedingungen aufgrund vorangegangener Niederschläge angesehen.

Für die Übertragbarkeit der definierten hydrologischen Prozesse auf die Fläche wird ein Regionalisierungsmodell aus GIS-Daten entwickelt. Dieses Modell greift auf regional verfügbare, flächendeckende Daten zur Geologie, Landnutzung und Morphologie zurück. Ein Entscheidungsbaum wird erstellt und in ein GIS-Modell, welches in der ArcGIS-Toolbox zur Verfügung gestellt wird, übergeführt. Das Modell liefert in einem automatisierten, reproduzierbaren Modellablauf die räumliche Verteilung der hydrologischen Prozesse. Die Auswertung erfolgt auf der Basis von Rasterzellgrößen von 10 m x 10 m. Da flächendeckende, für die Abflussprozesse relevante und verwertbare Bodendaten im alpinen Raum fehlen, muss die Einschätzung der Boden- und Untergrounddurchlässigkeit aus den vorhandenen geologischen Daten abgeleitet werden (vgl. Müller

et al., 2009). Die Methodik wird anhand der regionalen Daten für die gesamte Fläche der Bundesländer Kärnten und Steiermark angewandt und in beiden Bundesländern in Teilgebieten getestet.

Zur Validierung des Ansatzes wird das Niederschlag-Abfluss-Modell KAMPUS (Reszler et al., 2006; Blöschl et al., 2008) verwendet, das flächendifferenziert die typischen Prozesse abbilden kann. Die Modellparameter können so gesetzt werden, dass ein bestimmter Prozess dominant wird (Reszler et al., 2008). Es werden Einzugsgebiete von Pegeln ausgewählt, die in unterschiedlichen Regionen in Südösterreich liegen und sich in ihren physiogeographischen Eigenschaften unterscheiden. Die Größe ist mit ca. 200 km² beschränkt, da bei Größerwerden der Gebiete andere Prozesse, vor allem der Wellenablauf im Gerinne, an Einfluss gewinnt. Durch eine unterschiedliche Überlagerung von Teilwellen durch unterschiedliche räumliche Niederschlagsverteilung oder unterschiedliche Fließlängen einzelner Gerinneabschnitte kann sich das Ergebnis der Abflussbildung verzerren. Der Fokus liegt hier auf den Abflussbildungsprozessen auf der Hangskale (Pixelskale). Es wurden Zeiträume ausgewählt, in denen große Hochwässer (z.B. Oktober 2000 mit Hochwässern bis zu HQ30 in Südösterreich oder August 2005 mit Jahrhunderthochwässern in Teilen des Alpenraumes) auftraten.

Das Modell KAMPUS besteht aus einem Niederschlag-Abflussmodell in den Kopf- und Zwischeneinzugsgebieten und einer Wellenablaufkomponente, die hier aber wie oben erwähnt aufgrund der Kleinheit der gewählten Einzugsgebiete nicht eingesetzt wird. Das Niederschlag-Abflussmodell ist ein kontinuierliches Wasserbilanzmodell auf Rasterbasis. Über einen Bodenfeuchtemodul wird die Änderung der Bodenfeuchte (Sbf) und die Abflussbildung erfasst. Dieses Modul enthält drei Parameter: Die maximale Speicherkapazität des Bodens (LS), einen Parameter für die Bodenfeuchte, bei der die potenzielle Verdunstung erreicht wird (LP), und einen Parameter β zur Beschreibung der nichtlinearen Beziehung zwischen Bodenfeuchte und des zum Abfluss beitragenden Anteils von Regen und Schneeschmelze. Die Abflusskonzentration am Hang wird anhand eines oberen Bodenspeichers, eines tiefen Bodenspeichers und eines Grundwasserspeichers mit den Speicherinhalten S1, S2 und S3 und den Speicherkonstanten k1, k2 und k3 beschrieben. Der zum Abfluss beitragende Anteil von Regen und Schneeschmelze fließt in den oberen Bodenspeicher, welcher sich auf drei Wegen entleert: erstens proportional zum Speicherinhalt in den Abfluss (Interflow); zweitens bei Überschreitung der kritischen Speicherfüllung L1, mit einer schnellen Speicherkonstante k0 in den Abfluss (Oberflächenabfluss); drittens mit einer von der Bodenfeuchte abhängigen Perkolationsrate in den tiefen Bodenspeicher und den Grundwasserspeicher, wobei die Abhängigkeit durch einen Maximalwert Lcperc und eine Hochzahl γ beschrieben wird. Der tiefe Bodenspeicher und der Grundwasserspeicher entleeren sich in den Abfluss (Basisabfluss). Zusätzlich ist eine Bypass-Komponente inkludiert, die hydrologisch einer vertikalen Wasserbewegung in Makroporen entspricht, welche die Matrix der obersten Bodenzone umgeht und einen Teil von Regen und Schneeschmelze (Faktor by) direkt in den tiefen Bodenspeicher leitet. Der Hangabfluss aus den drei Speichern wird danach zum Auslass jedes Teilgebietes transformiert und stellt den Teilgebietsabfluss bzw. direkten Zufluss zu einer Wellenablaufstrecke dar. Das Modell beinhaltet auch ein Schneeschmelzmodell auf Basis des Grad-Tag-Ansatzes. In diesem Ansatz ist die Schneeschmelze proportional zur Lufttemperatur. Der Proportionalitätsfaktor ist der Grad-Tag-Faktor. Er gibt an, wieviel im Schnee gespeichertes Wasser pro °C Lufttemperatur über einer definierten Schmelztemperatur pro Tag zum Abfluss gelangt.

Schnee spielt aber in der vorliegenden Arbeit keine Rolle. Zur räumlichen Differenzierung können die Pixel in Hydrotupe zusammengefasst werden.

Am Ende wird in einem Feinabstimmungsprozess versucht, durch im plausiblen Rahmen veränderte Parameterwerte eine Verbesserung der Ergebnisse in den jeweiligen Testeinzugsgebieten zu erzielen. Gelingt dies nicht, ohne die Parameterwerte so zu verändern, dass die Dynamik eines Prozesses der vordefinierten Dynamik widerspricht, so wird eine Rückkopplung zum Entscheidungsbaum vorgenommen und die Klassifizierung der Prozesse aus den GIS Daten geändert. Die Auswirkung dieser Veränderung auf die Ergebnisse der anderen Testgebiete wird dabei aber geprüft.

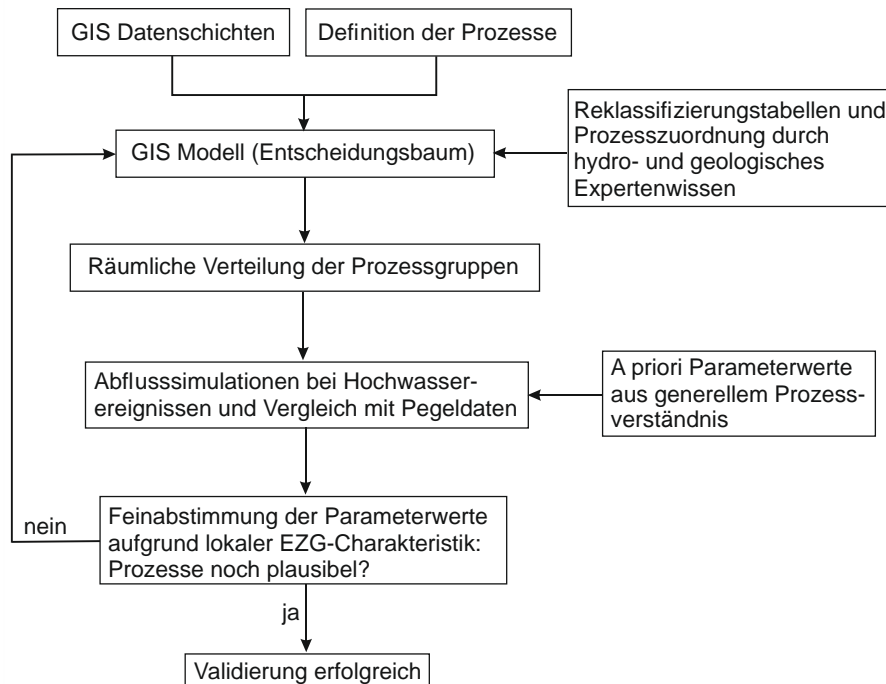


Abbildung 1: Arbeitsablauf zur Ermittlung der räumlichen Muster der Abflussprozesse.

GIS-Eingangsdaten

Als Eingangsdaten stehen aus Laserscandaten abgeleitete, frei verfügbare, digitale Geländemodelle (DGM) mit einer Auflösung von 10 m x 10 m zur Verfügung. Ebenso gibt es frei verfügbare flächendeckende CORINE-Landnutzungsdaten mit einer Auflösung von 100 m. Darüber hinaus gibt es sowohl in Kärnten als auch in der Steiermark flächendeckende geologische Karten in einer Maßstabsqualität von 1:50.000 bis 1:200.000 (nicht frei verfügbar). Landnutzungs- und Geologie Daten werden für die weitere Verwendung von Vektor- in Rasterdaten mit einer Zellgröße von 10 m x 10 m umgewandelt.

Neben diesen drei Eingangsdatensätzen (DGM, Geologie und Landnutzung) werden für das GIS-Modell zur Erstellung der Abflussprozessgruppen editierbare ASCII-Tabellen benötigt, die für eine Reklassifizierung der Rasterdaten benötigt werden. Es sind dies die Reklassifizierung der Hangneigung für die Unterteilung in sehr steile ($>45^\circ$), steile ($15^\circ-45^\circ$) und flache Bereiche ($<15^\circ$), die Reklassifizierung der Landnutzungsarten in Bereiche mit und ohne Vegetation und die Unterscheidung von bewaldeten zu nicht bewaldeten Flächen, sowie die Reklassifizierung der lithologischen Einheiten hinsichtlich ihres Abflussverhaltens. Die Reklassifizierung der lithologischen Einheiten ersetzt auch die fehlenden Bodendaten und fußt auf Expertenwissen. Dabei wird einer möglichen Bodenbildung über der lithologischen Einheit und der lithologischen Einheit selbst die Eigenschaft ja oder nein bezüglich der Wasserdurchlässigkeit zugeordnet.

Hydrologische Prozesse

Die generell im mitteleuropäischen, alpinen Raum zu erwartenden hydrologischen Prozesse wurden in folgender Tabelle 1 aufgelistet und beschrieben. Gemäß der zugrundeliegenden hydrologischen Situation liegt der Fokus auf den Prozessen bei einem Starkregenereignis, das bei relativ feuchten Anfangsbedingungen zu großen Hochwässern führt. Die Benennung und Abkürzung erfolgt in Englisch nach der üblichen Konvention in der Hydrologie. Aufgrund der Fülle von verschiedenartigen Versickerungs-, Speicher- und Fließprozessen in der Hydrologie könnten durchaus noch weitere Klassen definiert werden; allerdings wird mit zunehmender Anzahl eine Differenzierung nach Gebietseigenschaften schwieriger.

Tabelle 1: Hydrologische Prozessliste (Namen in Englisch lt. Konvention in der Hydrologie).

Prozess	Beschreibung
HOF (Hortonian Overland Flow)	Oberflächenabfluss durch Überschreitung der Infiltrationskapazität der Böden schon bei geringen Intensitäten (meist nackter Fels oder versiegelte Flächen)
THOF (Temporal HOF)	Temporärer HOF mit kurzen Fließlängen bei hohen Intensitäten (vorwiegend hoch durchlässige Flächen ohne Bodenauflage)
DHOF (Delayed HOF)	Verzögerter HOF (z.B. nach zeitweiser Zwischenspeicherung, z.B. bei Interzeption und Nadelstreu-Auflage im Wald)
SOF (Saturation Overland Flow)	Oberflächenabfluss nach Sättigung von Böden, vorwiegend auf nicht bewaldeten Flächen mit mittleren Durchlässigkeiten, aber begrenzter Speicherkapazität, da Untergrund dicht
DSOF (Delayed SOF)	Verzögerter SOF durch besonders hohe Speicherung (besonders mächtiger und speicherfähiger Boden/Schutt bei geringer Neigung)
IF1 (Interflow1)	Zwischenabfluss an der Schichtgrenze von durchlässigem Boden (und/oder Makroporen) und undurchlässigem Untergrund bei entsprechendem Abtransport des Wassers (hohe Neigung)
IF2 (Interflow2)	Oberflächennahes Grundwasser (schlecht durchlässiger Untergrund), der Grundwasserspiegel kann über Gelände steigen (Quellaustritte, Vernässungen), bei flachem Gelände (Tallagen)
DP (Deep Percolation)	Tiefere Versickerung in den Untergrund bzw. in das Grundwasser (Anmerkung: es erfolgt keine Abschätzung über die Verzögerung und den generellen Beitrag im Vorfluter, dies muss je nach lokaler Situation entschieden werden)

Auf manchen Flächen können auch Kombinationen der einzelnen Grundprozesse auftreten bzw. könnte je nach Situation auch ein zweiter Prozess signifikant, aber nachgereiht, sein. Zum Beispiel wird DHOF als ein z.B. durch geringfügigen Rückhalt im Wald, verzögerter Oberflächenabfluss angesehen. Aus Gründen der Vollständigkeit wird aber jener Prozess, der bis zum Beginn des Oberflächenabflusses auftritt, auch angeführt. In diesem Fall ist das ein seichter Interflow (IF1). Ein weiteres Beispiel ist der Prozess IF2, der hier für oberflächennahen Grundwasserabfluss bei flachem Gelände, vor allem am Hangfuß, steht. Der Grundwasserspiegel kann bei längeren Niederschlägen über Gelände steigen, weshalb Quellaustritte und Vernässungen wahrscheinlich sind und danach der gesamte Niederschlag oberflächlich abfließt (hier als SOF oder bei höherer Speicherung, z.B. im Hangschutt, als DSOF bezeichnet). Dieser von Dunne (1983) beschriebene Sättigungsflächenabfluss kann bei entsprechendem Flächenanteil einen bedeutenden Abflussbeitrag bei Hochwasserereignissen liefern. Ebenso können durch Aggregieren Mischformen entstehen, z.B.

Siedlungen und locker bebautes Gebiet, in denen die Böden relativ schlecht durchlässig sind und darüber hinaus subskalig ein gewisser Anteil an versiegelten Flächen (Dach- und Verkehrsflächen) auftritt. Der Hortonian Overland Flow (HOF; Horton, 1933) wird dabei mit dem Saturation Overland Flow (SOF) kombiniert. In weiterer Folge wird hierfür die Schreibweise des nachgereihten Prozesses in Klammern eingeführt, also in den angeführten Beispielen DHOF (IF1), IF2 (SOF oder DSOF) und HOF (SOF). Zusätzlich werden noch Wasser- und Gletscherflächen separat ausgewiesen.

Regionalisierungsmodell

Als Regionalisierungsmodell wurde ein Entscheidungsbaum erstellt (Abbildung 2), mit welchem aus den GIS-Daten auf den einzelnen Flächen die dominanten Prozesstypen bzw. kombiniert auftretende Prozesstypen zugeordnet werden. Ausgehend von der Neigung (DGM) und der Landnutzung ist der zentrale Punkt die Einschätzung der Durchlässigkeit von Boden (BOD) und Untergrund (UG). Dies wird rein aus der Geologie abgeschätzt, weshalb aus Gründen der Machbarkeit eine kombinierte Einschätzung erfolgt. Jeder lithologischen Einheit wird dabei der Wert 1 (BOD ja, UG ja), 2 (BOD ja, UG nein) oder 3 (BOD nein, UG nein) zugeordnet. Zum Beispiel wird die lithologische Einheit Kalkstein zu wasserdurchlässiger Boden (z.B. Rendsina) über wasserdurchlässigem Untergrund (Karstgestein), d.h. Wert 1, und beispielsweise die lithologische Einheit Augengneis zu wasserundurchlässiger Boden über wasserundurchlässigem Untergrund, d.h. Wert 2, reklassifiziert.

In manchen Fällen ist die lithologische Einheit zwei Werten zuzuordnen, wobei man sich je nach Untersuchungsgebiet für einen der beiden Werte entscheiden muss (Expertenwissen). Als Beispiel sei die lithologische Einheit Hangschutt bzw. Schuttkörper genannt. Im Kalkgebirge sind dies hochdurchlässige Hangschuttkörper am Fuß von Felswänden mit einem verkarstungsfähigen Untergrund (Wert 1). In Kristallingebieten sind die Hangschuttkörper zwar durchlässig, der Untergrund aber im Vergleich zum Kalkstein nicht (Wert 2). Auch die Glazialgeschichte ist aus den meisten lithologischen Einheiten nicht ersichtlich, hat aber Auswirkung auf die Mächtigkeit der Bodenbildung und die Verwitterung des Untergrundes. So weisen Bereiche außerhalb der Vereisungen meist tiefgründig verwitterte Festgesteine und mächtigere Böden auf. Derartige Bereiche können nur bei Betrachtung der lokalen Situation (Expertenwissen) und Kalibrierung der Parameter des hydrologischen Modells berücksichtigt werden. Aus diesen Gründen ist im Zuge der Validierung, anhand Abflusssimulationen ein iterativer Schritt zurück zur Erstellung des Entscheidungsbaumes vorgesehen (siehe Abbildung 1).

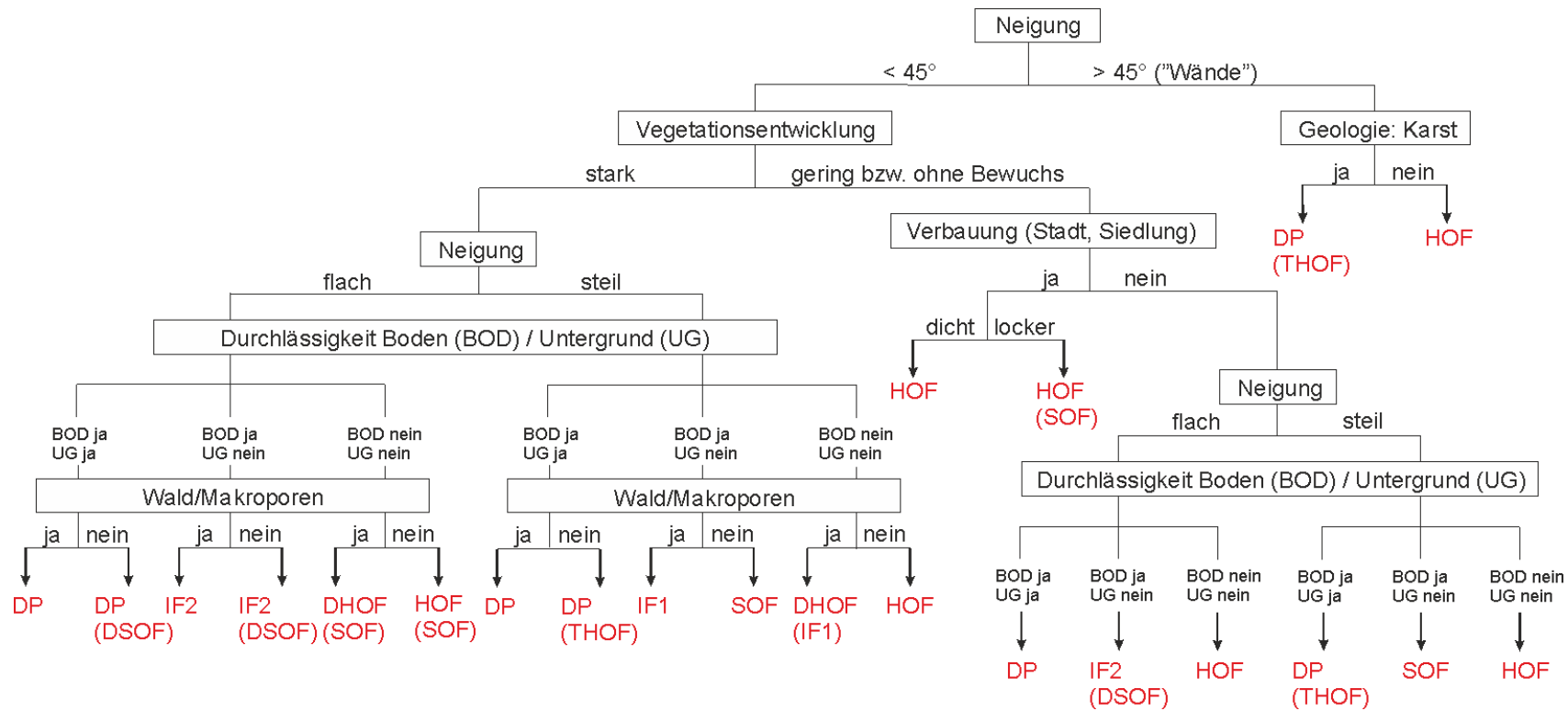


Abbildung 2: Entscheidungsbaum zur Bestimmung der dominanten Prozesse und in Klammern ein zweiter signifikanter, aber untergeordneter Prozess auf den jeweiligen Flächen. gemäß Tabelle 1.

Ergebniskarten

Die GIS-Daten sind zwar in sehr hoher Auflösung verfügbar (z.B. 1 m-Laserscan), die aber in der hydrologischen Modellierung nicht sinnvoll ist. Dies hängt mit der generellen Identifizierbarkeit von Parametern zusammen. Die Kalibrierung des Modells erfolgt auf Teilflächen- oder Teileinzugsgebietsbasis, d.h. die dabei erhaltenen Modellparameter sind nur für größere Elemente zulässig. Die Kalibrierungsergebnisse sind stark von der Anzahl vorhandener Niederschlagsstationen abhängig. Die im alpinen Raum oft spärliche Datenlage rechtfertigt eine hohe Anzahl an Elementen nicht. Daher ist auch aus Gründen der Rechenzeit für großräumige Anwendungen eine Generalisierung bzw. Aggregation der Prozesskarten zielführend.

Die Verschneidung der GIS Daten über den Entscheidungsbaum wurde in einer Auflösung von 10 m x 10 m durchgeführt. Ein Aggregieren auf größere Rasterweiten wurde in den ausgewählten Einzugsgebieten (Abbildung 3) unter Verwendung des „Majority“-Ansatzes getestet. Bei 500 m x 500 m sind die Flächenanteile der einzelnen Prozessgruppen noch sehr ähnlich der ursprünglichen 10 m x 10 m Verteilung. Bei 1 km² Rasterzellgröße werden die Abweichungen signifikant größer und einzelne, verstreut auftretende Prozessgruppen verschwinden. Außerdem wird die Anzahl der Mischpixel höher. Für die weiteren Darstellungen und Berechnungen mit dem Niederschlag-Abflussmodell wurde daher eine 500 m x 500 m Auflösung gewählt.

Vier Gebiete im Süden bzw. Südosten Österreichs wurden ausgewählt, um die Methodik zu testen (Abbildung 3). Zwei Gebiete (Miklauzhof und Tschepaschlucht) liegen im Süden Kärntens, in den Karawanken, mit bis zu 2200 m Seehöhe und einem Jahresniederschlag im langjährigen Mittel von rund 2000 mm. Das Gebiet Pöllau liegt in der Oststeiermark im Mittelgebirge (maximale Seehöhe 1260 m) mit einem mittleren Jahresniederschlag von knapp 900 mm und dazwischen befindet sich das Einzugsgebiet des Stulleneggbachs auf der Ostseite der Koralpe, bis auf knapp 1700 m Seehöhe reichend, mit einem mittleren Jahresniederschlag von rund 1300 mm. Bezüglich Geologie sind die beiden Gebiete in den Karawanken von verkarstungsfähigen Gesteinen und Schiefen geprägt, während auf der Koralpe kristalline Gesteine (Gneise, Schiefer) vorherrschen und das Gebiet Pöllau von kristallinen und tertiären Gesteinen geprägt ist. Abbildung 4 zeigt die Muster der dominanten Prozesse aus dem Entscheidungsbaum. Die Unterschiede in den Flächenanteilen der Prozessgruppen werden dabei deutlich. Dies weist auf eine unterschiedliche Abflussreaktion in den vier Gebieten hin, weshalb diese Auswahl gut geeignet erscheint, die hydrologische Wirkung der einzelnen Prozessgruppen anhand von beobachteten Hochwasserereignissen zu überprüfen.

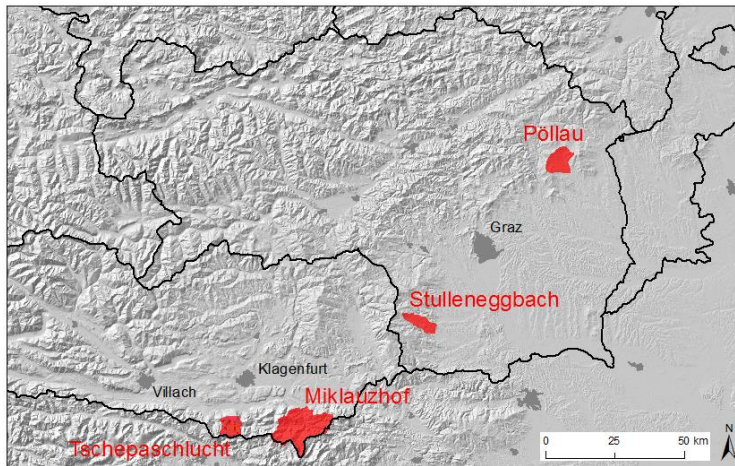


Abbildung 3: Lage der Testeinzugsgebiete in Südösterreich für die Ermittlung der Muster der hydrologischen Prozesse und für die Niederschlag-Abflussmodellierung.

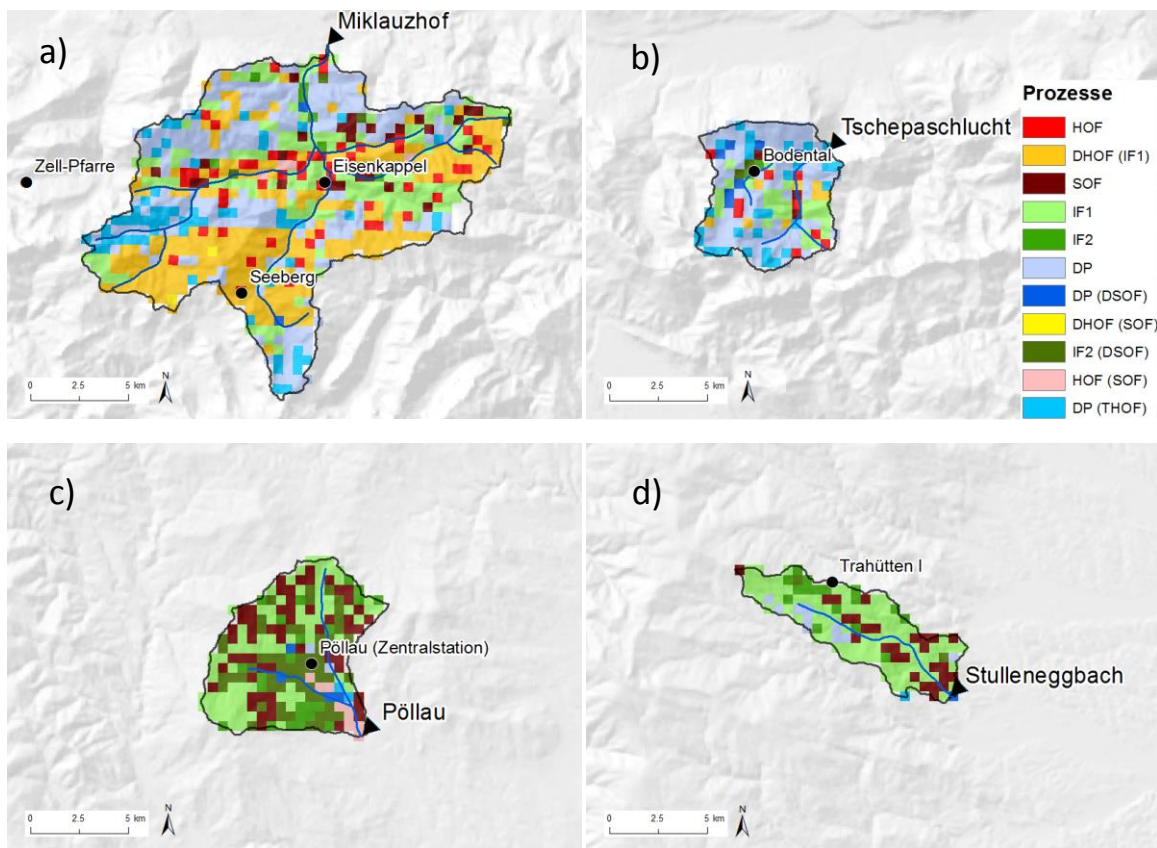


Abbildung 4: Muster der dominanten Prozesse in den Testeinzugsgebieten (Zellweite: 500 m) mit verwendeten Niederschlagsstationen; a) Miklauzhof (766 Pixel); b) Tschepaschlucht (177 Pixel); c) Pöllau (235 Pixel); d) Stulleneggbach (139 Pixel). Eingezeichnet sind jeweils die Lage der Pegel und die verwendeten Niederschlagsstationen.

Validierung

Systemantwort auf einen synthetischen Niederschlag

Zur Validierung wurden in einer theoretischen Studie vorerst Simulationen mit dem Niederschlag-Abflussmodell KAMPUS durchgeführt und die Systemantwort auf einen synthetischen, endbetonten Niederschlag gemäß den definierten hydrologischen Prozessen analysiert. Die Anfangsbodenfeuchte wurde relativ hoch, aber die Böden nicht vollständig gesättigt angenommen (im Mittel ca. 70 % Sättigung).

Die folgende Tabelle 2 zeigt die, für die einzelnen Prozessgruppen gesetzten Parameterwerte zur Abflussbildung und Abbildung 5 die simulierte Abflussreaktion für ein Pixel (500 m x 500 m). Für den HOF wurde beispielsweise die maximale Speicherkapazität LS, der Nichtlinearitätsparameter β und der Schwellenwert zur Entstehung von Oberflächenabfluss L1 sehr klein gewählt, sodass unmittelbar Oberflächenabfluss entsteht. Beim verzögerten Oberflächenabfluss DHOF (IF1), der auf Waldflächen mit schlecht durchlässigen Böden auftritt, wurden die Parameterwerte deutlich höher gesetzt, um dem größeren Rückhalt durch die Vegetation Rechnung zu tragen. Beim synthetischen Ereignis tragen diese Flächen demnach nur geringfügig zum Abfluss bei. SOF wurde vorwiegend nicht bewaldeten Flächen mit schlecht durchlässigen Böden zugeordnet; diese Flächen reagieren sehr stark, aber gegenüber dem HOF leicht verzögert. Die locker bebauten Gebiete mit HOF (SOF) und Flächen mit dem Prozessstyp IF2 (DSOF) tragen ebenfalls stark zum Ereignisabfluss bei. Bei Letzteren tritt aufgrund der beschränkten Speicherkapazität durch dichte Untergrundverhältnisse und folglich oft hohen Grundwasserständen, ebenfalls verzögert Oberflächenabfluss auf. Gegenüber den Prozessgruppen mit dominierendem Oberflächenabfluss erhält DP z.B. sehr hohe Werte für L1 und Lcperc, sodass diese Flächen in diesem Beispiel nur zum Basisabfluss beitragen. Für die Flächen mit dominierendem Interflow (IF1 und IF2) wurde ebenso ein recht hoher Wert für L1, aber ein geringerer Wert für Lcperc angenommen. Die Speicherkonstanten für den Oberflächenabfluss wurden gemäß der Größe der Einzugsgebiete auf recht kleine Werte gesetzt, wobei die bewaldeten und flacher geneigten Flächen leicht erhöhte Werte erhalten (Dämpfung). Bypass-Fluss (hoher Wert für by) wird vorwiegend in bewaldeten Gebieten und zerklüftetem Untergrund als signifikant angenommen. Die Speicherkonstante für den sehr langsam entwässernden Grundwasserspeicher wurde durchgehend mit $k_3=1200$ h angenommen; diese Komponente besitzt aber hier bei der ereignisbasierten Betrachtung keinen Einfluss.

Tabelle 2: A-priori-Schätzung der wichtigsten Parameter im Modell KAMPUS zur Simulation der definierten Abflussbildungsprozesse.

Prozess	LS (mm)	β	by	L1 (mm)	Lcperc (mm/d)	k0 (h)	k1 (h)	k2 (h)
HOF	10	1	0.0	1	1	1	12	120
DHOF (IF1)	120	5	0.2	40	2	3	24	120
SOF	100	4	0.1	10	3	1	12	120
IF1	150	5	0.4	40	10	4	48	120
IF2	200	4	0.2	40	20	2	120	240
DP	50	2	0.6	80	40	2	120	120

DP (DSOF)	80	3	0.4	60	40	2	120	120
DHOF (SOF)	120	4	0.1	30	3	4	48	120
IF2 (DSOF)	200	4	0.1	20	20	2	120	240
HOF (SOF)	20	2	0.0	10	3	1	12	120
DP (THOF)	50	2	0.6	60	20	2	120	120

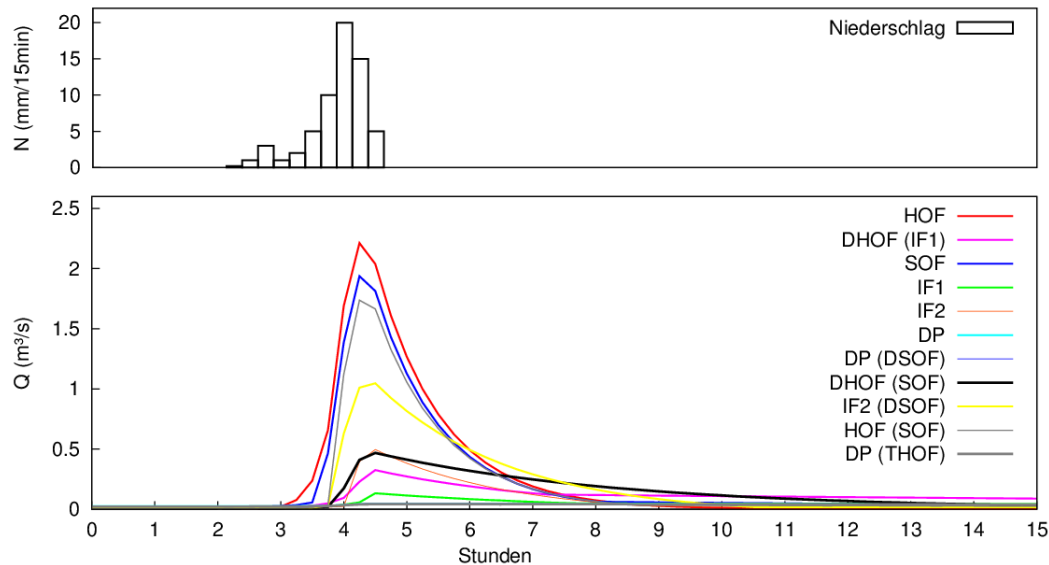


Abbildung 5: Synthetisches Starkregenereignis mit relativ hohen Anfangsbedingungen bezüglich Bodenfeuchte und simulierter Abfluss von einem Pixel mit 500 m x 500 m.

Aufgetretene Ereignisse in den Testeinzugsgebieten

In den Testeinzugsgebieten wurden aufgetretene große Ereignisse mit dem Modell, unter Verwendung der in Abbildung 4 dargestellten räumlichen Verteilung der Prozessgruppen nachgerechnet. Jeweils unterschiedliche Prozesse sind in den Gebieten dominant, wodurch die Parameterwerte für die entsprechenden Flächen auch getrennt getestet werden können. Anzumerken ist aber, dass die A-priori-Parameterwerte aus Tabelle 2 in einem kurz gehaltenen Feinabstimmungsprozess, der auf einer lokalen Kenntnis der Gebiete basiert, auch verändert wurden. Es betrifft dies vor allem den Parameter k_0 für die Reaktion des Oberflächenabflusses, der je nach Größe und Form des Einzugsgebietes variieren kann, und den Schwellenwert L_1 , der aufgrund der unterschiedlichen Mächtigkeiten und Speichereigenschaften der Böden variieren kann, sowie die Tiefenperkolation DP bzw. Grundwasserneubildung, die je nach Mächtigkeit der ungesättigten Zone und der Beschaffenheit des Aquifers (Karst- oder Porenaquifer) unterschiedliche Dämpfungseigenschaften besitzt. Ebenso können Schuttflächen je nach unterliegender Lithologie unterschiedlich beschaffen sein. Im Lithologie-Layer ist keine Information über die Unterlage von Schuttflächen verfügbar, dies muss daher aus der Kenntnis der regionalen Verhältnisse abgeleitet werden.

Als Modellinput wurden Niederschlags- und Temperaturdaten von Stationen des Hydrographischen Dienstes (HD) im Gebiet verwendet (siehe Abbildung 4). Die Abflussdaten stammen ebenfalls vom HD und im Falle des Stulleneggbaches von der ÖBB. Der Zeitschritt ist 15 min oder 1 h, je nach

Verfügbarkeit der Daten. Die Anfangsbedingungen wurden nach einigen ersten Durchläufen auf Basis eines Vergleichs der simulierten und beobachteten Basisabflüsse, am Beginn der betrachteten Periode geschätzt.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Simulationsergebnisse in den vier Gebieten nach dem Feinabstimmungsprozess. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis im Gebiet des Pegels Miklauzhof in den Karawanken in Kärnten. Die Dominanz des Prozesses des verzögerten Oberflächenabflusses auf steilen Waldflächen über undurchlässigem Schiefer, DHOF (IF1), ist deutlich erkennbar (Verteilung Abbildung 4a). Die Veränderungen der Parameterwerte gegenüber der A-priori-Schätzung betreffen vor allem den Beitrag der verkarsteten Flächen zum Basisabfluss, der im Feinabstimmungsprozess durch Anpassung der Simulation an die Beobachtung bestimmt wurde. Das Gebiet des Pegels Tschepaschlucht liegt zwar in Nachbarschaft zum Gebiet Miklauzhof, aber vor allem die unterschiedliche Geologie ergab vollkommen unterschiedliche Muster der Prozessgruppen (Verteilung Abbildung 4b). Auch die Abflusssimulation in Abbildung 7 zeigt, dass DP aus dem Karst dominant ist, aber die Reaktion ist gedämpft. Die verkarsteten Flächen scheinen zur Gänze zum Abfluss im Gerinne beizutragen. Die Modellparameter unterscheiden sich gegenüber dem Gebiet Miklauzhof kaum. HOF kommt in beiden Gebieten von den freien Felsflächen.

In dem, im Mittelgebirge liegenden Gebiet Pöllau (Abbildung 8) ist der dominierende Prozessstyp der Oberflächenabfluss nach Sättigung (SOF und DSOF, Verteilung Abbildung 4c). Hier mussten aber vor allem die Parameter L1 und Lcperc gegenüber der A-priori-Schätzung verändert werden. Nach den ersten Simulationsläufen wurde sehr rasch deutlich, dass sie in allen Prozessgruppen stark verringert werden mussten. L1 bewegt sich beispielsweise nur zwischen 5 und 20 mm. Es tritt also in diesem Gebiet sehr wenig Speicherung, Zwischenabfluss (Interflow) und Grundwasserneubildung auf. Diese Veränderung kann durch die spezielle Situation im Übergangsbereich von Kristallingesteinen zur tertiären Talfüllung erklärt werden, da hier die schluffigen Böden wenig speicherfähig sind. Vereinzelt tritt DP als Grundwasserneubildung in einen, dem Bachlauf begleitenden Porenaquifer auf.

Im letzten Beispiel (Abbildung 9) am Stulleneggbach, dessen Gebiet in höhere Lagen der Koralpe reicht, dominiert ebenfalls SOF, die A-priori-Parameterwerte wurden hier aber kaum verändert. Geologisch treten hauptsächlich Gneise auf, die aber tiefgründig verwittert sind und daher hohe Speicherkapazität besitzen. Aufgrund der außergewöhnlichen Größe des Ereignisses ist im Gegensatz zum Gebiet Pöllau der Beitrag von IF1 hoch. Es sind dies vorwiegend bewaldete Flächen, die auch einen markanten Flächenanteil besitzen (siehe Abbildung 4d).

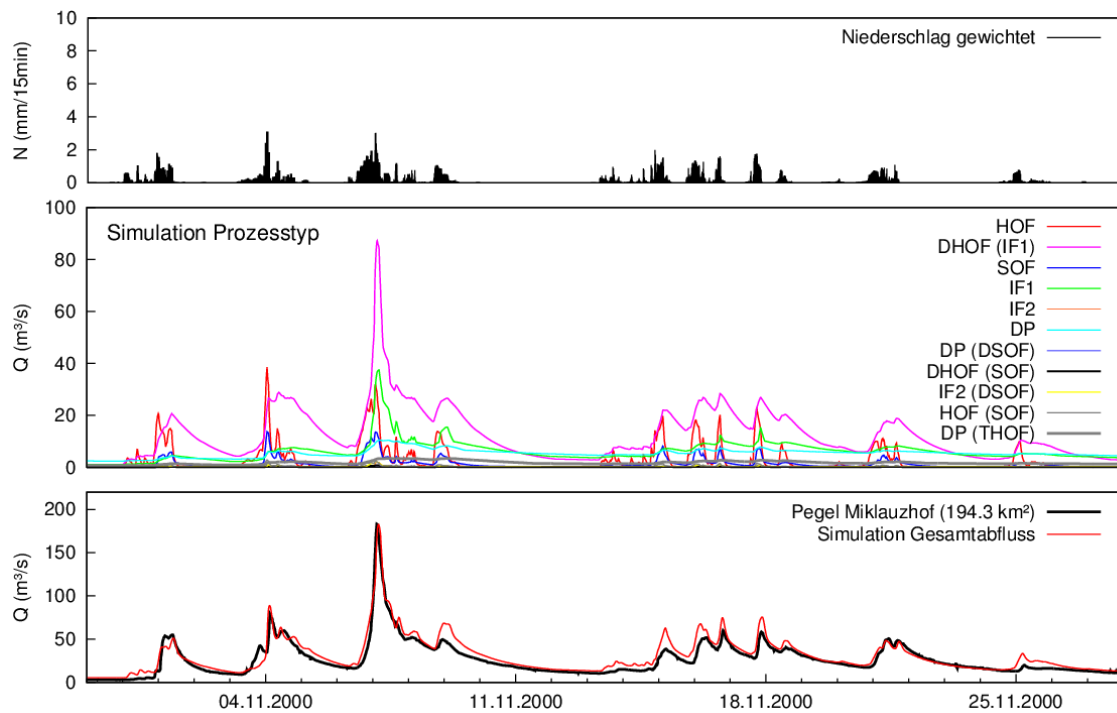


Abbildung 6: Ergebnisse der Modellsimulation im Gebiet Miklauzhof bei einem großen Hochwasser im Jahr 2000.

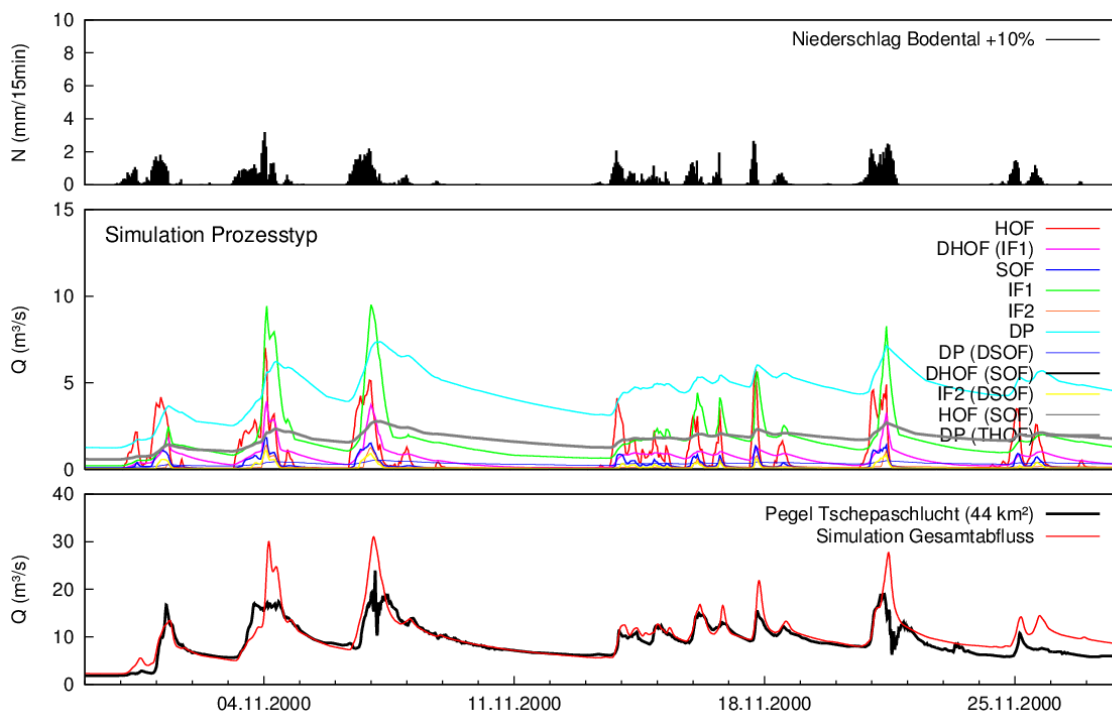


Abbildung 7: Ergebnisse der Modellsimulation im Gebiet Tschepaschlucht bei einem großen Hochwasser im Jahr 2000.

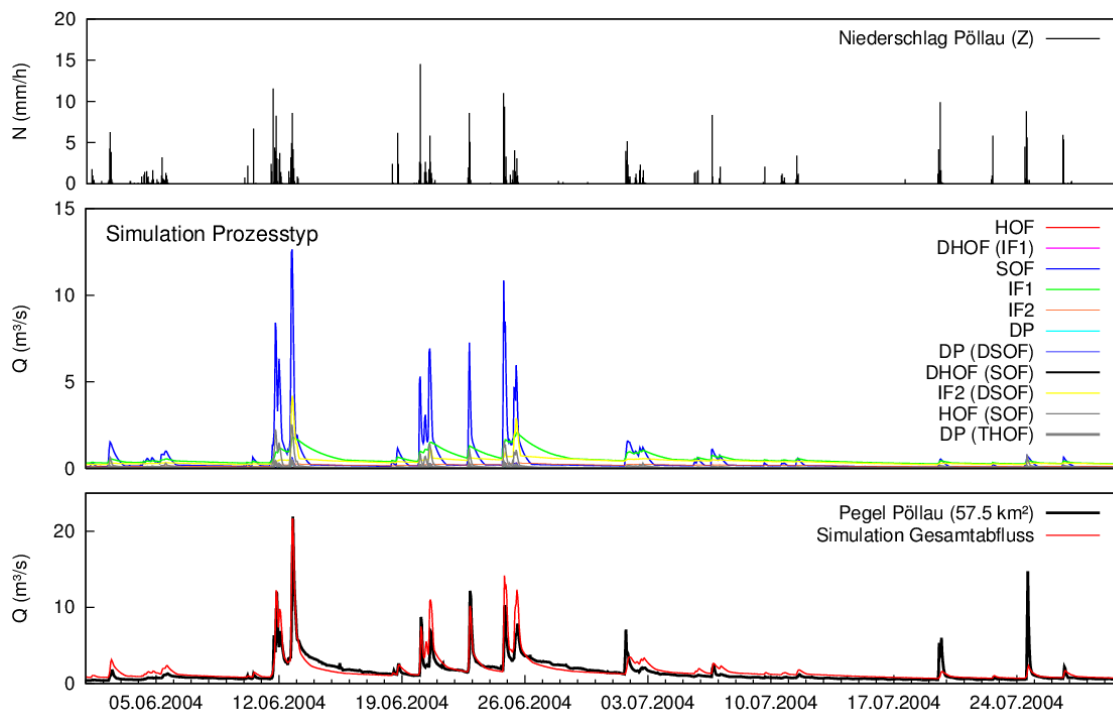


Abbildung 8: Ergebnisse der Modellsimulation im Gebiet Pöllau bei einem mittleren bis großen Hochwasser im Jahr 2004.

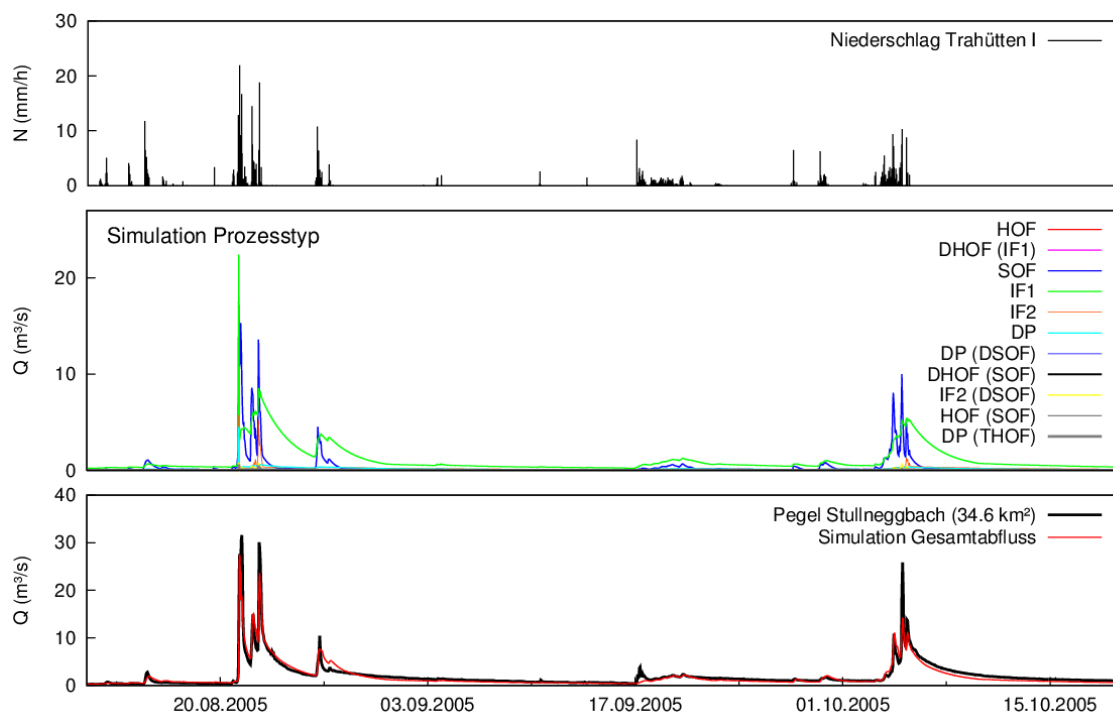


Abbildung 9: Ergebnisse der Modellsimulation im Gebiet Stulleneggbach bei einem sehr großen Hochwasser im Jahr 2005.

Schlussfolgerungen

Aus regional verfügbaren, flächendeckenden Daten (Geologie, Landnutzung, Morphologie) wurden über einen Entscheidungsbaum in einem ArcGIS-Modell 11 dominante Abflussprozessgruppen klassifiziert, die für die Hochwasserentstehung maßgebend sind. Bodenkennwerte, die für die Abflusentstehung große Bedeutung haben, liegen flächendeckend im alpinen Raum (noch) nicht vor. Daher wurde diese fehlende Information aus den verfügbaren Daten Geologie und Morphologie mittels Expertenwissens abgeleitet. Diesen ermittelten Prozessgruppen wurden aus der hydrologischen Argumentation Parameterwerte eines prozessorientierten, flächendetaillierten hydrologischen Modells zugewiesen. Damit konnten in Testeinzugsgebieten die ermittelten Prozessgruppenmuster anhand eines Vergleichs von simulierten und beobachteten Abflussganglinien bei Hochwasserereignissen validiert werden.

Die Abflusssimulationen mit den gewählten A-priori-Parametern lieferten bereits gute Ergebnisse. Es zeigte sich, dass die Verteilungen der regionalisierten Abflussprozessgruppen plausibel sind, aber einzelne Parameterwerte in einem Feinabstimmungsprozess in jedem Testgebiet noch verändert werden mussten, um eine genügend gute Anpassung, der simulierten an die beobachtete Abflussganglinie zu erzielen. Das bedeutet, dass gleich klassifizierte Abflussprozesse je nach Gebiet eine unterschiedliche Abflusswirksamkeit aufweisen können oder, dass es weitere nicht erfasste Prozessklassen gibt. Neben der generellen Form des Einzugsgebietes (Abflusskonzentrationszeiten) und den Unsicherheiten in der räumlichen Verteilung von Starkniederschlägen ist dies vor allem durch die unterschiedlichen Speichereigenschaften von Boden und Verwitterungszone in verschiedenen Einzugsgebieten begründet. Bezüglich Übertragbarkeit auf Einzugsgebiete ohne Abflussdaten bedeutet das, dass die Prozessklassifikation jedenfalls übertragbar ist, aber die mit einem Prozess verbundene Abflussreaktion (Form der simulierten Abflussganglinie) an der Gebietskenntnis (z.B. durch Begehungen) geprüft werden muss. Die aus der hydrologischen Einschätzung gesetzten A-priori-Parameterwerte ermöglichen eine Abschätzung von Hochwasserganglinien, müssen aber in lithologisch ähnlichen Einzugsgebieten in der Region getestet und feinabgestimmt werden.

Danksagung

Niederschlags- und Abflussdaten stammen vom Hydrographischen Dienst Steiermark, und im Falle des Stulleneggbaches auf der Koralpe wurden die Abflussdaten von der ÖBB zur Verfügung gestellt. Die geologischen GIS-Datenschichten wurden von den Landesregierungen von Kärnten und Steiermark bereitgestellt.

Referenzen

- Anderson M. G., Burt T. P. (Eds.; 1990): Process studies in Hillslope Hydrology, 539 S., Hoboken, N.J. (John Wiley).
- Blöschl G., Reszler Ch., Komma J. (2008): A spatially distributed flash flood forecasting model. *Environmental Modelling & Software*, 23/4, 464-478.
- Dunne T., Black R. D. (1970): An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, 6/2, 478-490.
- Dunne T. (1983): Relation of field studies and modelling in the prediction of storm runoff. *Journal of Hydrology*, 65, 25-48.
- Grayson R.B., Blöschl G. (Eds.; 2000): *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling*. 404 p., Cambridge, UK., Cambridge University Press.
- Gutknecht D. (1993): Grundphänomene hydrologischer Prozesse. *Zürcher Geographische Schriften*, 53, 25-38, ETH Zürich.
- Gutknecht D. (1996): Abflusentstehung an Hängen - Beobachtungen und Konzeptionen. *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft*, 48 (5/6), 134-144.
- Horton R. E. (1933): The role of infiltration in the hydrological cycle. *American Geophysical Union*, 14, 446-460.
- Flügel W.-A. (1995): Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes*, 9, 423-436.
- Markart G., Kohl B., Sotier B., Schauer T., Bunza G., Stern R. (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). Bundesamt und Forschungszentrum für Wald (BFW) Dokumentation, Nr.3.
- Merz R., Blöschl G. (2003): A process typology of regional floods. *Water Resources Research*, 39/12, 1340.
- Müller C., Hellebrand H., Seeger M., Schobel S. (2009): Identification and regionalization of dominant runoff processes – a GIS-based and a statistical approach. *Hydrology and Earth System Science*, 13, 779-792.
- Peschke G., Etzenberg C., Müller G., Töpfer J., Zimmermann S. (1999): Das wissensbasierte System FLAB – Ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflussbildung. *IHI-Schr.*, 10, Int. Hochschulinstitut Zittau, Deutschland.
- Reszler C., Komma J., Blöschl G., Gutknecht D. (2006): Ein Ansatz zur Identifikation flächendetaillierter Abflussmodelle für die Hochwasservorhersage. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50/5, 220-232.
- Reszler C., Komma J., Blöschl G., Gutknecht D. (2008): Dominante Prozesse und Ereignistypen zur Plausibilisierung flächendetaillierter Niederschlag-Abflussmodelle. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52 (3), S.120-131.
- Reszler C., Stadler H., Komma J., Blöschl G. (2014): Mapping and modelling spatial patterns of dominant processes in a karstic catchment. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 16, EGU2014-11752, 2014.
- Rogger M., Pirkl H., Viglione A., Komma J., Kohl B., Kirnbauer R., Merz R., Blöschl G. (2012): Step changes in the flood frequency curve: Process controls. *Water Resources Research*, 48, W05544.
- Scherrer S., Naef F. (2003): A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. *Hydrological Processes*, 17, 391-401.