

Spannungsfeld Prozesswissen – Hydrologische Modellierung aufgezeigt an einem vielseitigen Beispiel aus den Schweizer Voralpen

Simon Scherrer, Michael Margreth, Peter Kienzler

Zusammenfassung

Die bei Starkregen auftretenden Abflussprozesse sind in ihrer Art und ihrer Intensität räumlich unterschiedlich. Ihr Wesen wurde in den letzten Dekaden von verschiedenen Forschenden mit unterschiedlichen Methoden untersucht (Abflussuntersuchungen an Hängen, in Klein- und Kleinst Einzugsgebieten, Beregnungsversuche, etc.). Dies vergrösserte das Wissen und das Verständnis über Abflussprozesse. Diese Grundlagen ermöglichten die detaillierte Kartierung klein- und mesoskaliger Einzugsgebiete (EZG) nach der Abflussbereitschaft. Die Kartiermethodik wurde automatisiert, um mit Hilfe von GIS die Abflussprozesse und -bereitschaft auch für grössere EZG in hoher räumlicher Auflösung effizient ermitteln zu können.

Mit Hilfe von Abflussprozesskarten lassen sich Flächen mit starker, mittlerer und schwacher Abflussreaktion identifizieren. Diese flächendifferenzierte Betrachtung der Abflussprozesse kann als Grundlage für Niederschlag-Abflussmodelle dienen. Im Einzugsgebiet der Kleinen Emme in den Luzernischen Voralpen wurde ein solches Modell aufgebaut, um die Reaktion des Gebiets auf seltene Niederschläge zu untersuchen und um Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeiten abzuleiten. Mit Hilfe dieses flächendifferenzierten Ansatzes der Abflusentstehung konnte zusätzlich die Wirkung von Landnutzungsänderungen und von dezentralen Hochwasserschutzmassnahmen auf die Grösse extremer Hochwasser evaluiert werden. Die Ergebnisse zeigen, unter welchen Umständen und für welche Ereignisse Landnutzungsänderungen und dezentrale Hochwasserschutzmassnahmen als abflussmindernde Eingriffe für den Hochwasserschutz effizient und sinnvoll sind. Die flächendifferenzierte Betrachtung ermöglichte so eine prozessnahe Modellierung und erlaubte die Beurteilung von praktischen Fragestellungen.

1. Einleitung

Die kleinräumige Erforschung von Abflussbildungsprozessen wurde oft mit dem Ziel durchgeführt, die Reaktion von Einzugsgebieten (EZG) auf grosse Niederschläge und die Entstehung von Hochwasser besser zu verstehen. Die Prozesskenntnis führt jedoch nur dann zu einem massgeblichen Fortschritt für die Abschätzung von extremen Hochwassern und für die operationelle Hochwasservorhersage, wenn dafür geeignete Niederschlag-Abflussmodelle (NAM) verwendet werden. Etliche der heute verfügbaren NAM sind aufgrund ihrer Modellstruktur nicht in der Lage, vorhandene Information über die Abflussprozesse zu berücksichtigen. Denn üblicherweise werden NAM anhand von Niederschlag- und Abflussdaten geeicht, indem die Parameter solange verändert werden, bis ein guter „Fit“ erreicht wird.

In diesem Artikel wird an einem praktischen Beispiel das an der ETH Zürich entwickelte Niederschlag-Abflussmodell QAREA präsentiert, das Informationen über Abflussprozesse berücksichtigt, indem räumliche Unterschiede der Abflussbereitschaft in einer Karte der Abflussprozesse als Modellgrundlage verwendet werden. Diese Informationen beruhen auf Beobachtungen und gehen unabhängig von einer Modelleichung ins NAM ein. Die Prozesskarten werden basierend auf Geländeinformationen „manuell“ erstellt. Grundlage dazu ist ein

Bestimmungsschlüssel, der es erlaubt, die Prozesse zu kartieren (SCHERRER AG 2006). Bei grösseren Gebieten wie dem der Kleinen Emme kann die Erstellung solcher Karten durch den Einsatz von GIS automatisiert werden. Das hier verwendete Verfahren wurde im Wesentlichen im Zuge der Erstellung einer Abflussprozesskarte für den Kanton Zürich (1830 km²) entwickelt (NAEF et al. 2007 und MARGRETH et al. 2010 und SCHMOCKER-FACKEL et al. 2007). Die Übertragung dieses automatisierten Verfahrens auf andere Gebiete ist mit der manuellen Kartierung von „Lern“- oder Referenzgebieten“ möglich. Im Folgenden wird das Vorgehen am Beispiel der Kleinen Emme detailliert dargestellt.

2. Automatisierte Prozesskartierung

2.1 Das Einzugsgebiet der Kleinen Emme

Das Einzugsgebiet der Kleinen Emme (460 km²) liegt in den Voralpen der Zentralschweiz (Abbildung 1). Der Untergrund wird aus helvetischen Decken (mehrheitlich Kalk), Flysch, Molasse (Sandsteine, Mergel und Nagelfluh) und Moräne gebildet. Abbildung 1 zeigt die Lage der Pegel Sörenberg, Wolhusen und Litttau. Die höchsten Erhebungen bilden Pilatus (2'119 m ü.M.), Briener Rothorn (2'350 m. ü. M), Schratzenfluh (2'092 m ü.M.) und Napf (1'408 m ü.M.).

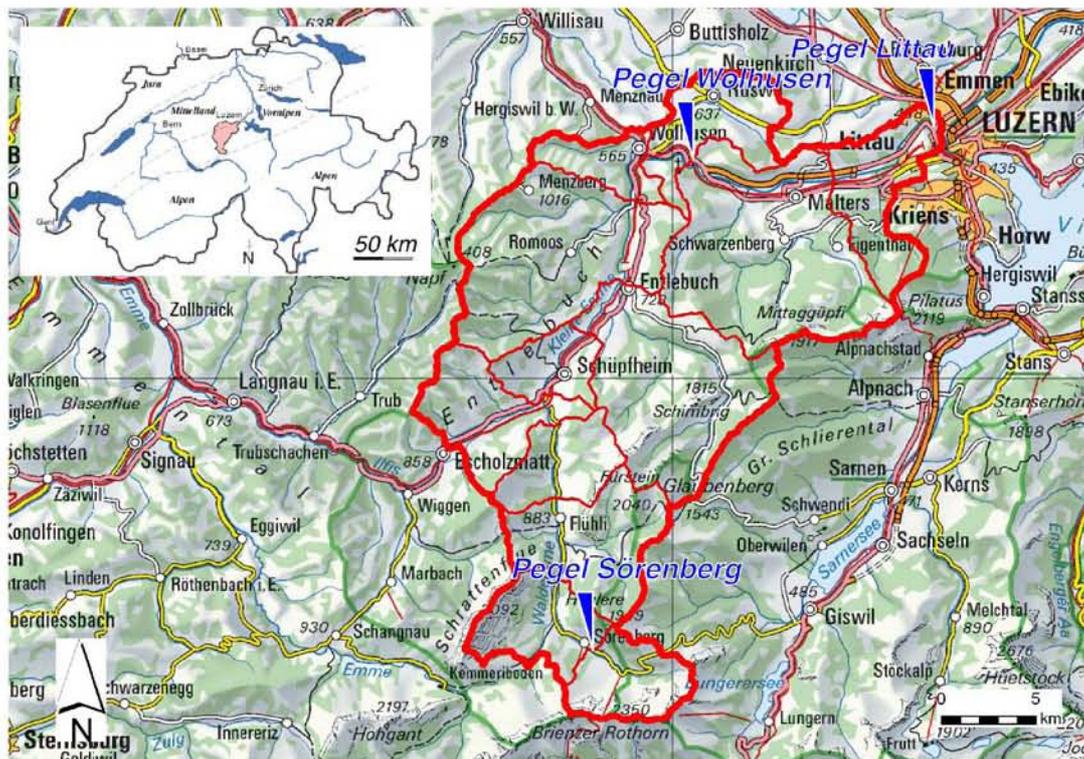


Abb. 1: Das Einzugsgebiet der Kleinen Emme (rot) mit den Teileinzugsgebieten und den Abflussmesspegeln.

2.2 „Manuelle“ und automatisierte Kartierung

In sogenannten Referenzgebieten (Abbildung 2, links) wurde die Abflussbereitschaft „manuell“ kartiert. Dazu wurden in einem ersten Schritt alle verfügbaren Unterlagen über Geologie, Geomorphologie, Landnutzung und Böden zusammengetragen. Im Fall des Referenzgebiets

Hasle (Abbildung 2, rechts) ist der geologische Untergrund vorwiegend Moräne. Fehlende Informationen über die Böden wurden durch Bodensondierungen erfasst, das Infiltrations- und Speichervermögen der Böden abgeschätzt und der jeweils massgebende Abflussprozess anhand des Bestimmungsschlüssels (SCHERRER AG, 2006) bestimmt. Abflussprozesse ähnlicher Intensität wurden zu sogenannten Abflusstypen (Abflusstyp 1 – 5) zusammengefasst.

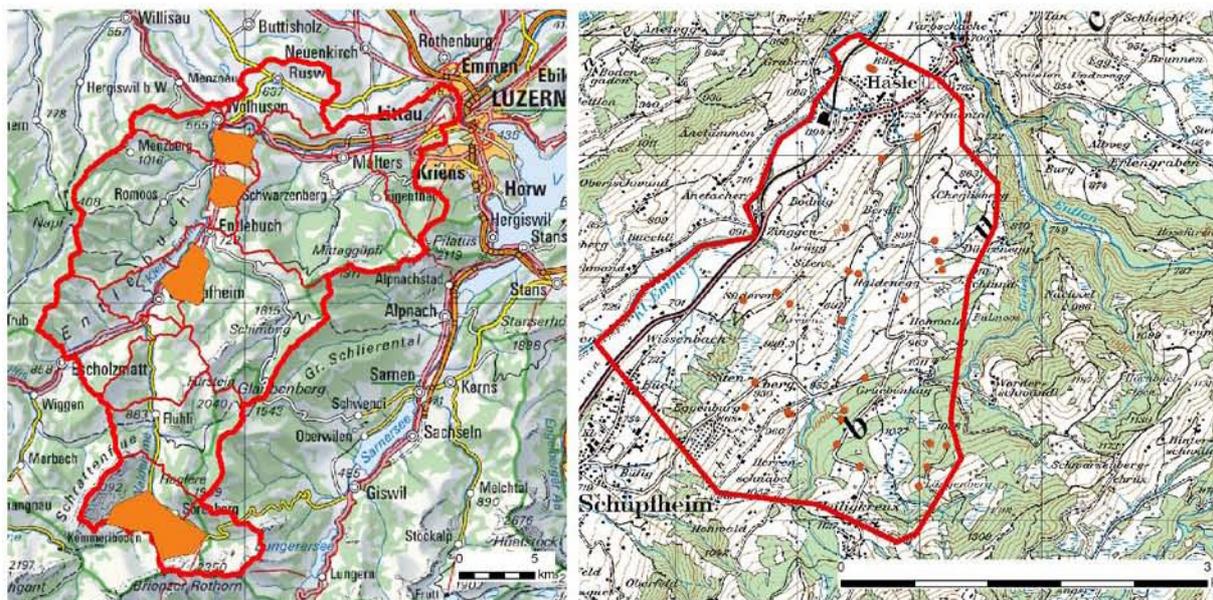


Abb. 2: Die Referenzgebiete im Einzugsgebiet der Kleinen Emme (orange, links) und als Beispiel das Referenzgebiet Hasle mit den durchgeführten Bodensondierungen.

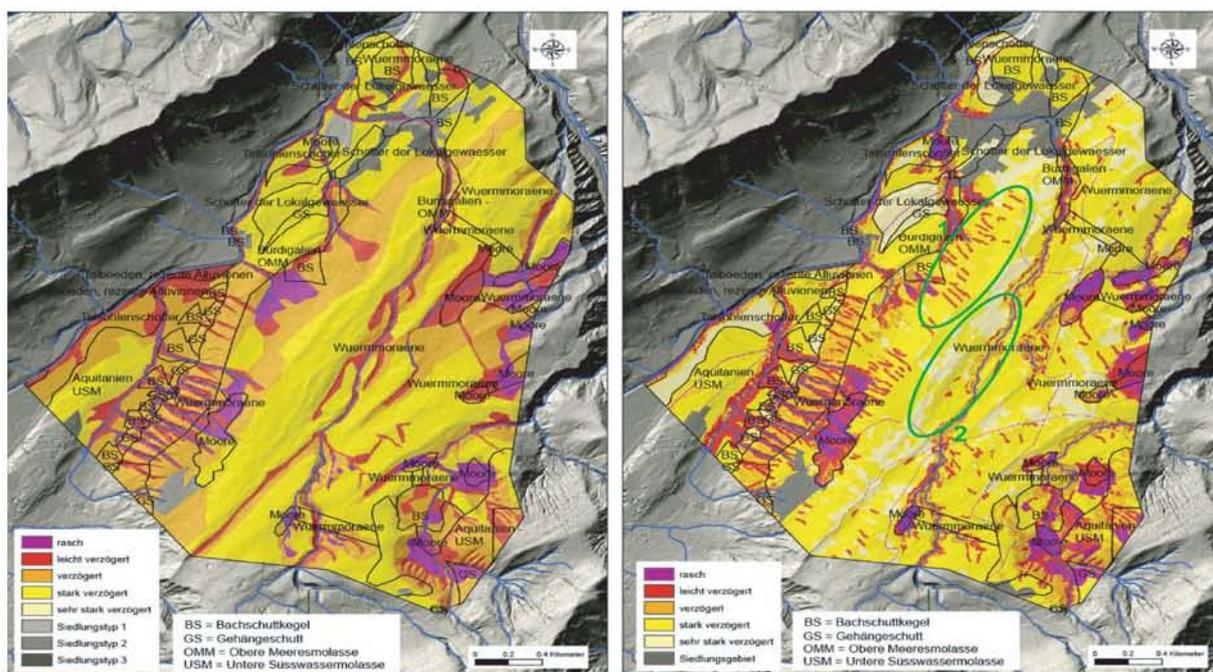


Abbildung 3 zeigt die „manuelle“ Kartierung (links) und die automatisierte Karte (rechts) des Referenzgebiets Hasle im Einzugsgebiet der Kleinen Emme (vgl. Abbildung 2). Die automa-

tisierte, GIS-gestützte Kartierung basiert auf der Geologie, Landnutzung, topographischen Parametern und Geländeformen (z.B. Kuppen, Mulden, Hangkanten und Tobel). Das dafür entwickelte Regelwerk definiert, unter welchen Bedingungen rasche, leicht verzögerte, verzögerte, stark verzögerte und sehr stark verzögerte Abflussreaktion zu erwarten ist (NAEF et al. 2007). Die topographischen Parameter und Geländeformen wurden vom „Detaillierten Terrain Modell“ der amtlichen Vermessung (DTM-AV) hergeleitet. Anhand der in den Referenzgebieten manuell kartierten Abflussprozesskarten wurde das automatisierte Verfahren auf die vorherrschenden Böden, Gesteinstypen und topographischen Gegebenheiten angepasst und dann auf eine grössere Fläche übertragen. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der beiden Kartiermethoden im Referenzgebiet Hasle im Vergleich. In diesem Fall konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden. Die Abweichungen zur manuell kartierten Abflussbereitschaft betreffen vor allem Gebiete mit einer Moränenbedeckung. Im Einzugsgebiet der Kleinen Emme weisen Moränen ungewöhnlich grosse Gebiete vernässter Böden auf.

Nach den Anpassungen anhand der vier manuell kartierten Referenzgebiete wurde das Regelwerk auf das ganze Gebiet der Kleinen Emme angewendet (Abbildung 4). Die Kuchendiagramme zeigen je Flussabschnitt resp. Teil-Einzugsgebiet wie gross der Anteil der unterschiedlich stark beitragenden Gebiete ist. Summiert man die Abflusstypen 4 und 5 auf (Flächen mit stark verzögerter und sehr stark verzögerter Abflussreaktion), so zeigt sich im Teil-Einzugsgebiet oberhalb Sörenberg ein Wert von 53% (mässige Abflussreaktion) im Teil-einzugsgebiet oberhalb Flühli 18% (starke bis sehr starke Reaktion) und im Teileinzugsgebiet des Bielbachs bei Ruswil 68% (schwache Reaktion). Im gesamten EZG der Kleinen Emme weisen 36% der Fläche die Abflusstypen 4 und 5 auf (mässig – starke Reaktion).

4. Abflussberechnungen mit dem Niederschlag-Abflussmodell QAREA

4.1 Aufbau des Niederschlag-Abflussmodells

Auf der Grundlage der Prozesskarte wurde das NAM QAREA (SCHERRER & NAEF 2003) für das EZG der Kleinen Emme aufgebaut. Das NAM basiert auf der Klassifizierung der Abflussbereitschaft der Teileinzugsgebietsflächen (Abflusstypen in Abbildung 4), den dazugehörenden Abflussreaktionen (Abflussreaktionskurven) sowie auf den Laufzeiten bis zum Teileinzugsgebietsausgang (Isochronen). Zur Simulation von Landregen aber auch kurzen Gewiterniederschlägen kann das Gebiet gleichmässig überregnet werden oder auch nur Teile davon. Der gefallene Niederschlag wird aufgeteilt in Direktabfluss und in den Boden infiltrierendes Wasser. Das infiltrierte Wasser wird im Boden gespeichert und verzögert wieder abgegeben. Die Reaktion dieser Bodenspeicher wird mit linearen Speichern modelliert. Für jeden Abflusstyp wird eine eigene Speichercharakteristik angenommen. Der Direktabfluss erfährt auf dem Weg ins Gerinne eine Verzögerung durch Retention (Oberflächenspeicher), welche ebenfalls mit einem linearen Speicher simuliert wird.

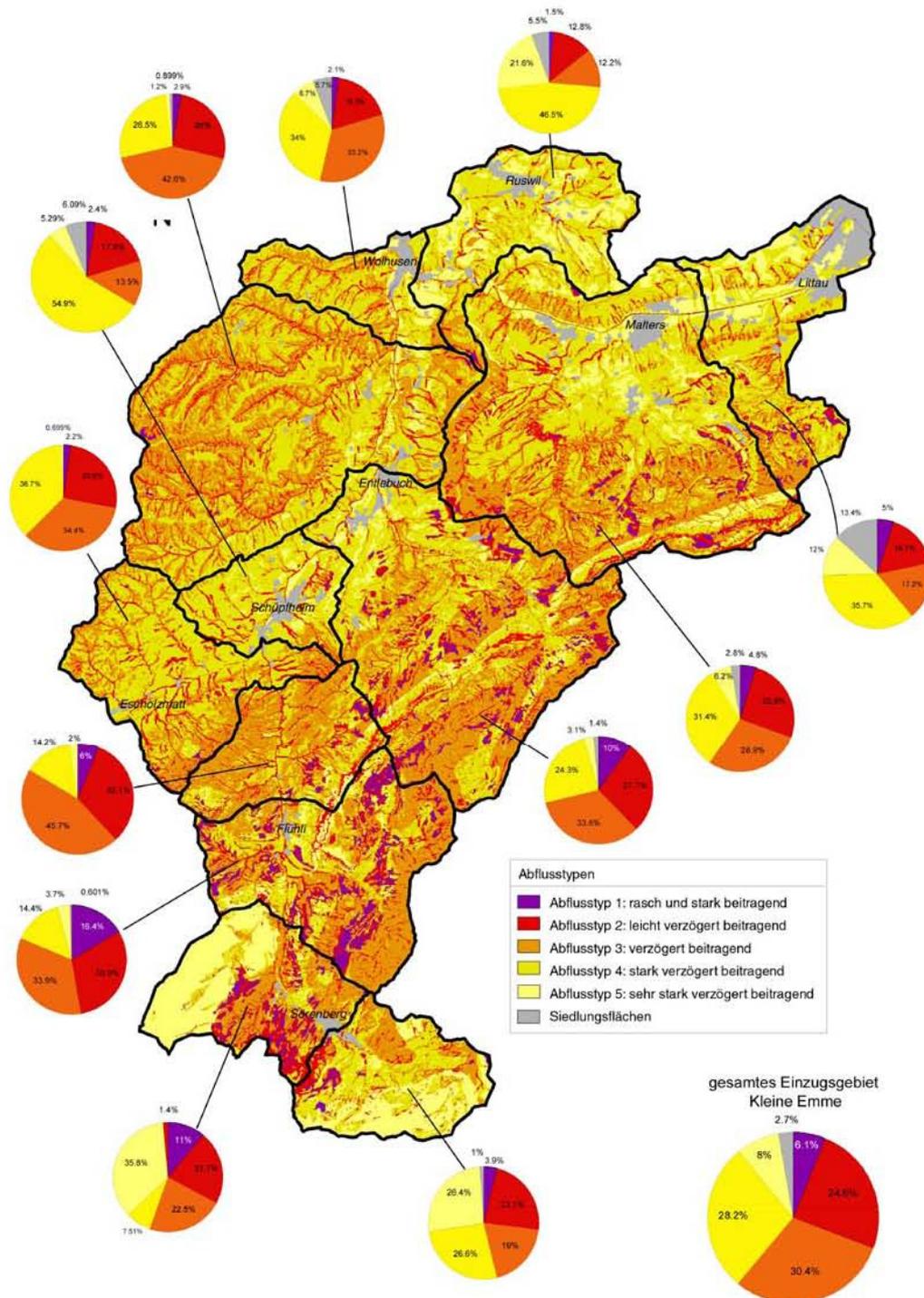


Abb. 4: Flächen ähnlicher Abflussbereitschaft (Abflusstypen) im Einzugsgebiet der Kleinen Emme. Die Kuchendiagramme zeigen die Anteile der Abflusstypen je Teileinzugsgebiet an. Das Diagramm unten rechts bezieht sich auf das gesamte Einzugsgebiet der Kl. Emme.

4.2 Verifikation des Modells

Das NAM wurde durch Nachrechnen diverser Ereignisse überprüft bzw. verifiziert. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Nachrechnung an den drei Pegelstellen im EZG des Ereignisses vom 16. Juli 2002 als intensive Niederschläge eines der grössten Hochwasser der letzten

Jahre an der Kleinen Emme verursachten. Der zeitliche Verlauf und das Volumen werden durch das NAM gut nachgebildet, lediglich beim ersten Peak reagiert das Modell etwas zu langsam. Aufgrund dieser Nachrechnungen zeigte sich, dass das NAM für die Berechnung von Szenarien eingesetzt werden kann (Kap. 4.3 und 5).

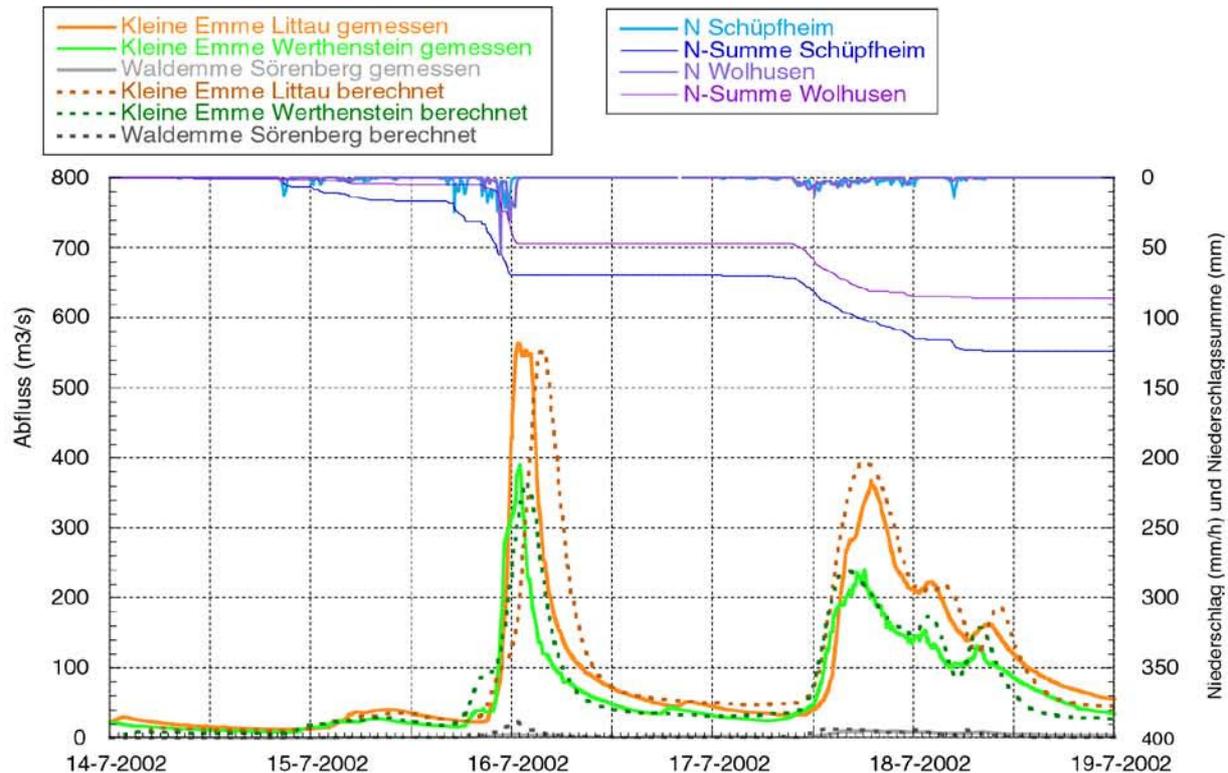


Abb. 5: Der Niederschlagsverlauf der Stationen Schüpfheim und Wolhusen und die an den verschiedenen Pegeln gemessenen Abflussganglinien des Hochwassers vom 16./17.7.2002. Die gepunkteten Linien zeigen die Berechnung mit dem Modell QAREA.

4.3 Hochwasserbeeinflussung durch Landnutzungsänderungen

Um die Abflussreaktion von EZG zu beeinflussen, können Landnutzungsänderungen eingesetzt werden. Eingriffe in die Landnutzung sind aber nur dort sinnvoll, wo durch entsprechende Massnahmen Flächen mit einer starken Abflussreaktion in eine schwächere Abflussreaktion überführt werden können (NAEF et al. 2002). Im EZG der Kleinen Emme kommen vor allem Moore und Waldflächen für solche Massnahmen in Frage. Wie gross der mögliche Einfluss der unterschiedlichen Bewirtschaftung und Nutzung von Mooren und Waldflächen auf das Abflussverhalten bei Hochwasser sein kann, lässt sich mit dem NAM simulieren.

Drei grosse Hochwasser (Juli 2002, August 2005 und August 2007) wurden im Sinne einer Maximalbetrachtung nochmals gerechnet, in dem die Nutzung / Bewirtschaftung einerseits der Moore und andererseits der Waldflächen verändert wird. Die Veränderung erfolgte über eine Neueinschätzung der Abflussbereitschaft der Gebiete.

a) Hochwasserbeeinflussung durch rekultivierbare Moore

Moore sind heute geschützt, vor allem im 1. und 2. Weltkrieg wurde jedoch vielerorts Torf abgebaut, getrocknet und als Brennstoff verwendet. Zur Verbesserung der Holzproduktion wurden viele Moore drainiert, durch die angelegten Gräben wurde der Wasserspiegel im Moor abgesenkt und damit die Wuchsbedingungen der Bäume verbessert. Der Hochwasser dämpfende Einfluss einer Moorrenaturierung wurde in einer Untersuchung aus Bayern aufgezeigt (ZOLLER & CRONAUER 2003). Demnach wies das drainierte Moor grössere Hochwasserspitzen auf, als das renaturierte Vergleichsgebiet. Ob sich diese Erkenntnisse verallgemeinern lassen, ist unklar. Verschiedene Moor-Renaturierungsprojekte sind in den letzten Jahren auch in der Schweiz ausgeführt worden (Grabenverfüllungen, Querriegel in Drainagegräben oder Ausflussregulierungen). Auf diese Weise wird versucht, tief liegende Wasserspiegel bis in Oberflächennähe anzuheben (0.1 bis 0.2 m unter Flur). Um in Mooren eine abflussmindernde Wirkung zu erreichen, muss verhindert werden, dass diese bei Niederschlägen rasch (oder leicht verzögert) entwässern. Solche Eingriffe machen nur in wenig oder kaum geneigten Mooren Sinn, denn bei zu grosser Neigung muss angenommen werden, dass Entwässerungsprozesse (Subsurface Flow) unabhängig von Gräben stattfinden (KIENZLER & NAEF 2008).

Die Ermittlung flacher Mooregebiete im EZG der Kleinen Emme erfolgte über das GIS. Die meisten Moore haben im EZG eine Neigung > 10%. Den Mooren mit einer Neigung < 10% wurde eine schwächere Abflussreaktion zugeordnet (Abflusstyp 1 und 2 wurde zu Abflusstyp 3; Abflusstyp 3 zu 4). Betroffen von dieser Massnahme sind allerdings nur 4.2 km² (0.9% des EZG). Wie Tabelle 1 zeigt, ist die Wirkung von rekultivierten Moorflächen im EZG der Kleinen Emme auf die Hochwasserspitzen gering.

Tab. 1: Vergleich der Abflussspitzen im Ist-Zustand und bei maximal möglicher Dämpfung in den Mooren.

Ereignis	Pegel	Ist-Zustand gerechnet [m ³ /s]	Szenario Dämpfung in Mooren [m ³ /s]	Dämpfung der Abflussspitze
16.7.2002	Littau	553.4	549.5	0.7 %
	Werthenstein	366.9	364.3	0.7 %
	Sörenberg	24.6	24.3	1.2 %
21./22.8.2005	Littau	801.9	800.1	0.2 %
	Werthenstein	458.5	457.1	0.3 %
	Sörenberg	45.7	45.7	0.0 %
8.8.2007	Littau	554.2	551.3	0.5 %
	Werthenstein	385.2	383.0	0.6 %
	Sörenberg	24.9	24.7	0.8 %

b) Hochwasserbeeinflussung durch Waldflächen (sog. Hochwasserschutzwälder)

Im EZG der kleinen Emme sind grosse Bestände flachwurzelnder Fichten vorhanden. Langfristig besteht die Idee, diese ortsfremden Bestände durch tiefer wurzelnde Baumarten zu ersetzen (Buche, Ahorn, etc). Diese Massnahmen hätten den Effekt, dass ein grösserer Teil des Bodens durch (Grob-) Poren erschlossen und damit das Speichervermögen des Bodens erhöht würde. Im EZG der Kl. Emme wurden 96.7 km² Wald als sog. Hochwasserschutzwald ausgewiesen. Einige dieser Waldflächen weisen Böden mit gehemmter Durchlässigkeit und/oder mässigem bis geringem Speichervolumen auf. Das Potential für eine Erhöhung des Bodenspeichers ist bei diesen Flächen sehr begrenzt. Zudem gibt es Standorte, an denen eine Erhöhung des Speichervermögens kaum möglich ist, weil die Artenzusammensetzung bezüglich Wasserspeicherung schon heute gut oder aus anderen Gründen nicht zu beeinflussen ist. Im Einzugsgebiet der Kleinen Emme wurde daher angenommen, dass auf den 96.7 km² Hochwasserschutzwäldern das hochwasserrelevante Speichervolumen durch Eingriffe hin zu einer günstigeren Artenzusammensetzung durchschnittlich um maximal 10 mm erhöht werden kann.

Tab. 2: Vergleich der Abflussspitzen im Ist-Zustand und bei maximal möglicher Dämpfung in den Waldflächen.

Ereignis	Pegel	Ist-Zustand gerechnet [m ³ /s]	Szenario Dämpfung in Mooren [m ³ /s]	Dämpfung
16.7.2002	Littau	553.4	522.5	5.6 %
	Werthenstein	366.9	348.8	4.9 %
	Sörenberg	24.6	24.5	0.4 %
21./22.8.2005	Littau	801.9	800.8	0.1 %
	Werthenstein	458.5	456.9	0.3 %
	Sörenberg	45.7	45.7	0.0 %
8.8.2007	Littau	554.2	533.9	3.7 %
	Werthenstein	385.2	370.8	3.7 %
	Sörenberg	24.9	24.8	0.4 %

Tabelle 2 zeigt, dass die Abflussspitzen bei den Hochwassern 2002 und 2007 im einstelligen Prozentbereich gedämpft werden. Beim Hochwasser 2005, dessen Gebietsniederschlag um 100 mm höher liegt als bei den Hochwassern 2002 und 2007, ist die Dämpfung der Abflussspitzen sogar noch geringer. Es gilt weiterhin zu bedenken, dass die Einleitung solcher Massnahmen einige Jahre dauert, und bis zum Wirksamwerden nochmals ein paar Jahrzehnte verstreichen.

6. Abschätzung von Hochwasserabflüssen unterschiedlicher Jährlichkeit

Das auf Abflussprozesskarten basierende NAM kann auch eingesetzt werden, um die Reaktionsweise von EZG auf seltene meteorologische Bedingungen zu untersuchen (Starkregen). Dazu wurden Niederschlagsszenarien hergeleitet, welche aus Niederschlägen unterschiedlicher Dauer und Jährlichkeit bestehen. Im Unterlauf der kleinen Emme wurden auf diese Weise in verschiedenen Teileinzugsgebiete Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit berechnet. Abbildung 6 zeigt als Beispiel das Frequenzdiagramm des Bielbachs mit den grössten Werten der Abflussberechnungen mit dem NAM (gelb) sowie rekonstruierten Abflussspitzen historischer Hochwasser (blaue Kästchen). Mit dieser Vorgehensweise werden Beobachtungen (historische Hochwasser, Kartierung der Abflussbereitschaft) und Abflussberechnungen kombiniert. Dieser umfassende Ansatz verleiht der Hochwasserabschätzung eine höhere Zuverlässigkeit.

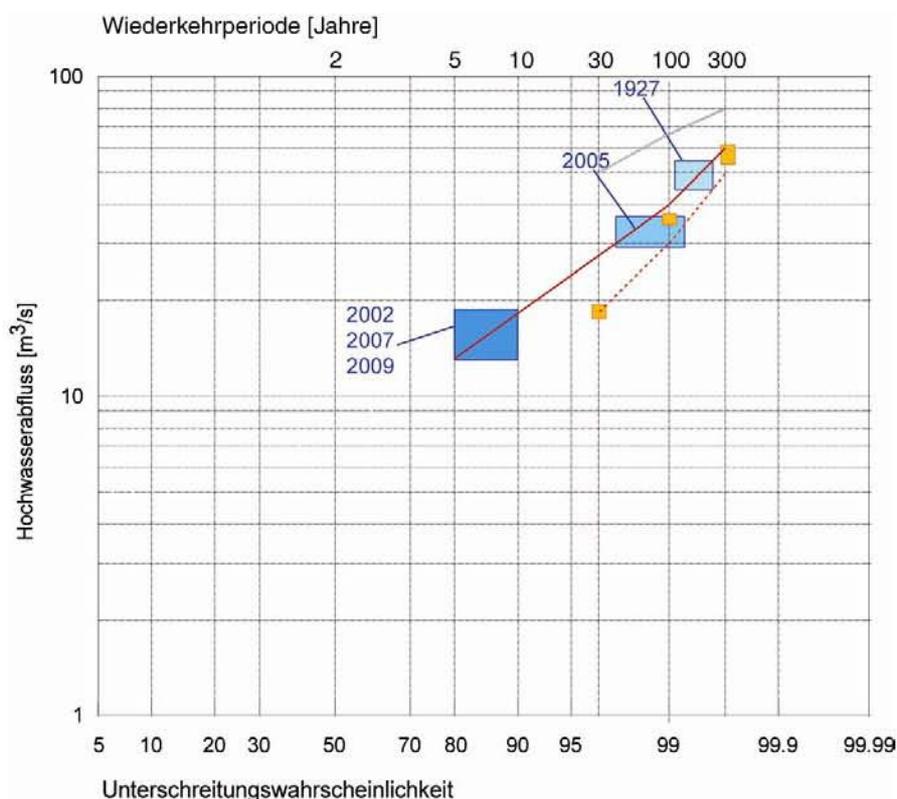


Abb. 6: Frequenzdiagramm des Bielbachs (Oberlauf, 14.5 km²). Eingetragen sind die abgeschätzten Abflussspitzen der Hochwasser der Jahre 1927, 2005 sowie 2002, 2007 und 2009. Die Resultate der Modellrechnungen sind orange dargestellt. Die roten Linien markieren den vorgeschlagenen Bereich der Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeit.

7. Schlussfolgerungen

Abflussprozesskarten lassen sich verwenden, um räumlich differenzierte Informationen zur Abflussbildung in Niederschlag-Abflussmodelle einzubringen. Die Modellstruktur des NAM muss aber fähig sein, die Abflussreaktion der einzelnen Flächen zu erfassen und in einen Abfluss umzurechnen. Im vorliegenden Fall liess sich mit Hilfe der kartierten Abflussbereitschaft die Wirksamkeit zur Hochwasserminderung möglicher Landnutzungsänderungen untersuchen. Die Rekultivierung entwässerter Moore erwies sich im Gebiet der Kleinen Emme

als wenig wirksame Massnahme, um gezielt Niederschlag zurückzuhalten und die Spitze grosser Hochwasser zu dämpfen. Etwas wirksamer dürfte der Ersatz flachwurzelnder Fichtenbestände mit tiefer wurzelnden Baumarten sein. Die Abflussspitzen grosser Hochwasser liessen sich um ein paar Prozente vermindern. Angesichts des enormen Aufwandes und der Dauer für die Umsetzung solcher Massnahmen im Einzugsgebiet der Kleinen Emme, scheinen andere Hochwasserschutzmassnahmen am Gerinne sinnvoller. Das auf Abflussprozesskarten basierende Niederschlag-Abflussmodell liess sich auch einsetzen, um Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit abzuschätzen.

Dank

Wir bedanken uns beim Kanton Luzern, Verkehr und Infrastruktur, Abteilung Naturgefahren für die Möglichkeit, diese spannende Studie durchführen zu können.

Literatur

- KIENZLER, P. & F. NAEF (2008): Subsurface storm flow formation at different hillslopes and implications for the 'old water paradox'. *Hydrological Processes*, 22, 104-116
- MARGRETH, M., NAEF, F. & S. SCHERRER (2010): Weiterentwicklung der Abflussprozesskarte Zürich in den Waldgebieten. Projekt im Auftrag des AWEL, Kanton Zürich
- NAEF, F., SCHERRER, S. & M. WEILER (2002): A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. *Journal of Hydrology* 267 (2002) 74-79
- NAEF, F., MARGRETH, M., SCHMOCKER-FACKEL, P. & S. SCHERRER (2007): Automatisch hergeleitete Abflussprozesskarten – ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. *Wasser, Energie, Luft*, 99, 3. Baden
- SCHERRER, S. & F. NAEF (2003): Hochwasserabschätzung in Schweizer Einzugsgebieten - Praxishilfe. Kap. 3 Grundlagen zu den Abflussbildungsprozessen, 4.1 Niederschlag-Abfluss-Modelle. In: M. Spreafico, R. Weingartner, M. Barben, A. Ryser, *Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 4 – Bern 2003*
- SCHERRER, S. (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, 18/2006
- SCHERRER AG & SoilCom GmbH (2010): Beurteilung der Abflussbereitschaft des Einzugsgebiets der Kleinen Emme (Kt. LU) durch automatisierte Kartierung (GIS) - Ermittlung von Flächen mit potentiellem Wasserrückhalt und ihr Einfluss auf den Hochwasserabfluss. Auftraggeber: Verkehr und Infrastruktur des Kt. Luzern vif, Abteilung Naturgefahren. Bericht 10-136
- SCHERRER AG & SoilCom GmbH (2011): Hydrologische Grundlagen an den Seitenbächen der Kleinen Emme (Unterlauf). Auftraggeber: Verkehr und Infrastruktur des Kt. Luzern vif, Abteilung Naturgefahren. Bericht 11-153.
- SCHMOCKER-FACKEL, P., NAEF, F. & S. SCHERRER (2006): Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 2, 891-906
- ZOLLER, A. & H. CRONAUER (2003): Der Wasserhaushalt von Hochmooreinzugsgebieten in Abhängigkeit der Nutzung. *Hochwasserschutz im Wald*. Hrsg. Bayr. Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft