

Hochwasserprognose für den Tiroler Inn (HoPI): Anwendung und Weiterentwicklung eines modularen Vorhersagesystems für alpine Einzugsgebiete

Johannes Bellinger, Paul Schattan, Kristian Förster, Johannes Schöber, Stefan Achleitner, Matthias Huttenlau, Katrin Schneider, Robert Kirnbauer, Ulrich Strasser, Georg Raffener

Zusammenfassung

Die Hochwasserereignisse 1999, 2002, 2005 sowie zuletzt 2013 verdeutlichen die Vulnerabilität der Siedlungsgebiete in Tallagen gegenüber Extremereignissen im alpinen Raum. Einen wichtigen Beitrag zum Hochwassermanagement und zur Minimierung von Schäden stellen Prognosesysteme dar.

Im Rahmen des Projekts HoPI ("Hochwasserprognose für den Tiroler Inn") wurde ein Abflussprognosesystem für den Vorhersagehorizont von 48 Stunden für den Tiroler Inn entwickelt. Eine Besonderheit dieses Vorhersagesystems ist sein modularer Aufbau, bei dem verschiedene hydrologische Modelltypen integriert werden. Für schnee- und eisschmelzdominierte Kopfeinzugsgebiete wird das räumlich voll verteilte Energiebilanzmodell SES eingesetzt. Die Modellierung des Abflusses von nicht oder nur kaum vergletscherten Flächen erfolgt mit dem räumlich halb-verteilten Wasserbilanzmodell HQsim. Dieses auf dem HRU-Konzept basierende Modell beschreibt die Abflussbildung, die Abflusskonzentration sowie den Gerinneabfluss. Die Simulation des Wellenablaufes im Tiroler Inn wird mit dem 1D-hydraulischen Modell Flux^{DSS/DESIGNER} durchgeführt.

In seiner aktuellen Form wird das System seit 2008 für die operationelle Vorhersage des Hydrographischen Dienstes des Landes Tirol und der Tiroler Wasserkraft AG eingesetzt. Trotz insgesamt guter Ergebnisse wird das System derzeit auf Verbesserungsmöglichkeiten untersucht und um die folgenden Komponenten erweitert: (1) hochaufgelöste Interpolation meteorologischer Eingangsdaten zur verbesserten Berücksichtigung der alpinen Topographie, (2) Ensemble-Simulationen unter Berücksichtigung verschiedener Wettermodelle sowie (3) Assimilation von Systemzuständen (mit dem Fokus auf Schnee) aus großflächigen Fernerkundungsdaten sowie lokalen Punktmessungen. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über das bestehende operationelle System sowie über aktuelle Entwicklungen.

1. Einleitung

Tirol ist mit einer Fläche von 12.640 km² und einer vertikalen Erstreckung von 462-3.798 m ü. NN Teil des Ostalpenkomplexes. Topographisch bedingt können nur 12,8 % der Landesfläche als permanenter Siedlungsraum und lediglich 0,4 % als Bauland für die rund 700.000 Einwohner genutzt werden (AMT DER TIROLER LANDESREGIERUNG 2014). Diese Verteilung verdeutlicht die Charakteristik von auf die Gesamtfläche bezogen dünn besiedelten Gebirgsräumen, was sich jedoch durch eine hohe Bevölkerungs- und Siedlungskonzentration in den Tallagen relativiert. Grundsätzlich zeichnen diese Gebiete eine hohe Prozessdynamik sowie die topographisch bedingte Einengung des Siedlungsraumes auf die Tallagen aus. Durch die Konzentration der Siedlungen in nächster Nähe von Bächen und Flüssen besteht, neben der allgemeinen Naturgefahrenexposition, eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Hochwasser und Überflutungen (HUTTENLAU 2010). Abbildung 1 verdeutlicht die Situation. Neben einer topographischen Übersicht ist die Konzentration der Werte an Inventar und Gebäuden dargestellt (HUTTENLAU & STÖTTER 2011). Aus der Abbildung ist die Wertekonzentration an Eigentum innerhalb der Tallagen, besonders dem Inntal und hier speziell im Großraum Innsbruck deutlich zu erkennen. Das potenzielle Schadenvolumen für Gesamt Tirol wurde durch HUTTENLAU et al. (2010) auf bis zu 105.330 direkt betroffene Personen und ein kumulatives Gesamtschadenvolumen von bis zu EUR 7,6 Mrd. ermittelt. Zukünftige Prognosen, besonders unter dem Aspekt des Klimawandels, sind weder für die Charakteristik noch für die Wiederkehrintervalle statistisch zuverlässig prognostizierbar

(NACHTNEBEL et al. 2014, KÖNIG et al. 2014). Trotz verschiedener präventiver Maßnahmen zur Risikominderung sowohl mit raumplanerischen Mitteln als auch durch Maßnahmen des Flächen- und Objektschutzes (wie auch in der EG-Hochwasserrichtlinie vorgesehen, EG 2007) ist aufgrund des Bevölkerungswachstums sowie der sozio-ökonomischen Entwicklungen von einem Zuwachs der Hochwasserschäden auszugehen (KÖNIG et al. 2014). Zu deren Minimierung wird neben raumplanerischen Maßnahmen, wie bspw. die Einrichtung von Bauverbotszonen in besonders gefährdeten Bereichen, die Errichtung von Retentionsräumen, Hochwasserschutzbauten aber auch die Entwicklung von Prognosesystemen geraten (EITZINGER et al. 2014). In diesem Zusammenhang führten vor allem die katastrophalen Hochwasserereignisse der Jahre 1999, 2002, 2005 und 2013 zu verstärkten Entwicklungsanstrengungen von Prognosesystemen an österreichischen Flüssen sowie deren Anrainern (SCHÖBER 2014). Nach dem in vielen Teilen Mitteleuropas auftretenden Hochwasser 2002 erfolgte in Tirol die Entwicklung eines ersten Prognosesystems für das Inn-Einzugsgebiet. Mit dem Projekt „HOPI - HochwasserPrognosesystem Inn“ begann am heutigen Forschungszentrum *alpS – Center for Climate Change Adaptation* der Aufbau eines Prototyps für ein hybrides hydrologisch/hydraulisches System (KIRNBAUER & SCHÖBERL 2007, SENFTER et al. 2009). Nach der erfolgreichen Übernahme des Systems in den operationellen Betrieb des Hydrographischen Dienstes Tirol konzentrierte sich die darauf folgende Systementwicklung auf Anpassungen an die Bedürfnisse der Endanwender. Aktuelle Arbeiten beinhalten die Simulationsoptimierung von Schnee- und Abflussbildungsprozessen sowie der Identifizierung und Quantifizierung von Modellunsicherheiten.

2. HoPI – HochwasserPrognosesystem Inn

Das System HoPI stellt ein hybrides hydrologisch/hydraulisches Werkzeug zur Entscheidungshilfe für den Hochwasserfall dar. Aus Abbildung 1 ist neben der geographischen Einordnung auch die räumliche Gliederung des Systems ersichtlich. Das simulierte, rund 200 km lange Inn-Segment befindet sich zwischen der österreichisch-schweizer Grenze im Südwesten und der österreichisch-deutschen Grenze im Nordosten des Bundeslandes Tirol. Insgesamt umfasst das Gesamteinzugsgebiet des Prognosesystems eine Fläche von ca. 6.750 km² und eine vertikale Höhenerstreckung von 500 bis 3.762 m ü. NN (ACHLEITNER et al. 2012). Die technische Umsetzung der Hochwasserprognose für den Tiroler Inn (HoPI) verfolgt einen modularen hybriden Ansatz (ACHLEITNER et al. 2009). Ein übergeordnetes Modul besteht aus einer „Data Management und Preprocessing“ Einheit, die den Datendownload, die Datenarchivierung sowie die Datenaufbereitung durchführt. In dieser übergeordneten Funktion werden die Eingangsdaten des hydrologischen Moduls aufbereitet. Aufgrund der Abflussrelevanz werden 13 stark vergletscherte Kopfeinzugsgebiete mit einer Gesamtfläche von 460 km² in einem weiteren Modul mit dem voll verteilten Energiebilanzmodell „Schnee- und Eisschmelzmodell“ (SES) simuliert (ASZTALOS et al. 2007; SCHÖBER et al., 2010). Der dabei berechnete Abfluss wird als zusätzliche Randbedingung für die unterliegenden Einzugsgebiete verwendet. In diesen unterliegenden Gebieten werden 49 Einzugsgebiete voneinander unabhängig mit dem halb-verteilten Wasserbilanzmodell HQsim (KLEINDIENST 1996) modelliert, wobei elf Einzugsgebiete bepegelt sind. Diese simulierten Gebietsabflüsse dienen als Eingangsdaten für das letzte Modul im hybriden System. In die-

sem Element der Modellkaskade wird das in Abbildung 1 dargestellte Inn-Segment mit dem hydraulischen Modell Flux^{DSS/DESIGNER}/FLORIS²⁰⁰⁰ vom Pegel Martinsbruck (Schweizer Grenze) bis zum Pegel Oberaudorf (deutsche Grenze) berechnet (ACHLEITNER et al. 2009).

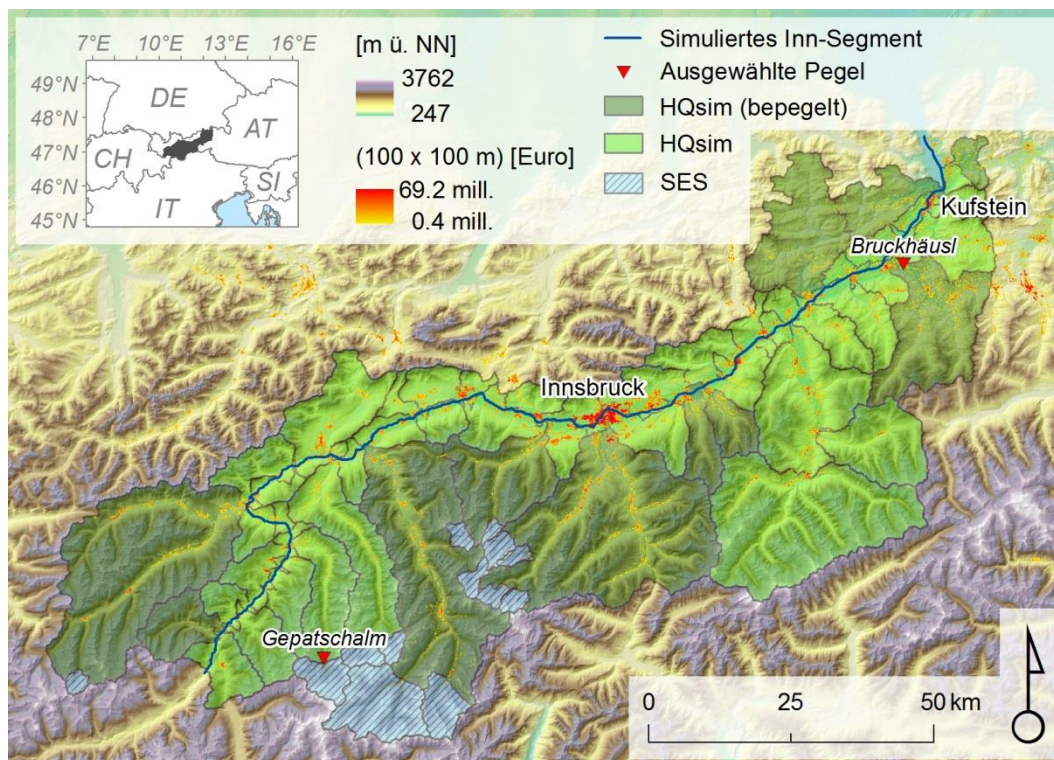


Abb. 1: Topographische Übersicht, räumliche Gliederung des Hochwasser Prognosesystems für den Tiroler Inn (HoPI) und die Werteverteilung an Inventar und Gebäuden nach HUTTENLAU & STÖTTER (2011)

2.1 Data Management und Preprocessing

Im Modul „Data Management und Preprocessing“ werden die meteorologischen Eingangsdaten der hydrologischen Modelle in die zeitliche Auflösung von einer Stunde transformiert. Dies beginnt mit dem Download der fehlenden Messdaten bis zum aktuellen Zeitpunkt. Mit den Messdaten wird das System aktualisiert, ehe die Prognose für die folgenden 48 Stunden erfolgt.

Die Aktualisierung des Systemzustands erfolgt mit Messdaten aus insgesamt 119 meteorologischen Stationen (Temperatur und Niederschlag). Daraus wird für jeden Zeitschritt der Niederschlag mit dem *Inverse Distance Weighting (IDW)* Verfahren auf ein 5 x 5 km Raster räumlich interpoliert. Die gemessene Temperatur der Stationen muss modellbedingt auf die Temperatur auf Meeressniveau und dem entsprechenden Gradienten transformiert werden. Um dabei regionale Unterschiede des Tiroler Inneinzugsgebietes zu berücksichtigen, wurden die dafür verwendeten Stationen in die Sub-Regionen „Unterland“, „Innsbrucker Raum“ sowie „Oberland“ gegliedert (ACHLEITNER et al. 2012; RINDERER et al. 2008). Zusätzlich zu diesen Eingangsvariablen werden für die mit SES simulierten Gebiete die Globalstrahlung, die relative Feuchte und die Windgeschwindigkeit bereitgestellt.

Für die Prognose der darauffolgenden 48 Stunden werden meteorologische Daten des Analyse- und Nowcasting-Systems INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis) (HAIDEN et al. 2010) der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) verwendet (ACHLEITNER et al. 2012). Die in einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer verfügbaren Daten werden auf das lokale 5 km Raster gemittelt und entsprechend den Formatvorgaben aufbereitet.

2.2 Hydrologische Simulation

Die hydrologische Simulation des Tiroler Inn-Einzugsgebietes wird mit den beiden Modellen SES und HQsim in Form einer kaskadenartig-gekoppelten Modellkette durchgeführt.

Das Schnee- und Eisschmelzmodell SES

Das Schnee- und Eisschmelzmodell SES (ASZTALOS et al. 2007) ist ein voll verteiltes Modell, dem ein 50 m Raster zugrunde liegt. Mithilfe des Energiebilanzansatzes werden Schneeakkumulation sowie Schneeschmelzprozesse differenziert für Schnee, Firn und Eis berücksichtigt und der berechnete Abfluss durch Nash-Kaskaden zum Gebietsauslass geführt. Neben den drei schneedominierten Abflüssen bestehen noch die Kaskaden für felsige Oberflächen und den unterirdischen Abfluss. (ASZTALOS et al. 2007, SCHÖBER et al. 2010).

HQsim

HQsim (KLEINDIENST 1996) ist dagegen ein halb-verteilt hydrologisches Modell, das hauptsächlich auf dem Wasserbilanzmodell BROOK von FEDERER & LASH (1983) basiert. Im Gegensatz zu BROOK, das die Wasserbilanz für kleine Einzugsgebiete berechnet, kombiniert HQsim den Wasserbilanzansatz mit hydrological response units (HRUs) (DOBLER & PAPPENBERGER 2013) und führt deren Abfluss mithilfe von Gerinnesegmenten zum Gebietsauslass. Innerhalb eines HRUs werden die Prozesse wie die Schneedeckenakkumulation, -abbau, Evapotranspiration, Oberflächenabfluss, Versickerung, Fließbewegung in der ungesättigten Bodenzone sowie Tiefenversickerung berücksichtigt.

Die in HoPI verwendeten HRUs integrieren die Information des lokalen Bodentyps aus der Bodenübersichtskarte des Hydrologischen Atlas von Österreich nach PETICKA & POSCH (2005), der Exposition und der Höhenzone (generiert aus einem DHM mit einer räumlichen Auflösung von 50 m). Informationen wie beispielsweise der *Leaf Area Index* für die Evapotranspiration sind räumlich an Vegetationseinheiten des CORINE Land Cover Datensatzes (BOSSARD et al. 2000) geknüpft. Die Konzentrationszeit, die der Abfluss von einem HRU zu seinem nächstgelegenen Vorfluter benötigt, wird mithilfe der Formel nach MORGALI & LINSLEY (1965) ermittelt. Zuletzt wird die Fließgeschwindigkeit innerhalb des Gerinnes mithilfe der Fließgeschwindigkeitsformel für steile Gebirgsbäche von RICKENMANN (1996) berechnet.

2.3 Hydraulische Simulation

Die Simulation des Wellenablaufs im Tiroler Inn erfolgt über eine 1-dimensionale hydraulische Simulation mit der kommerziellen Software Flux^{DSS/DESIGNER}/FLORIS²⁰⁰⁰. Eine nähere Beschreibung dieses Ansatzes ist in REICHEL et al. (2000) zu finden.

3. Anwendung und aktuelle Entwicklungen

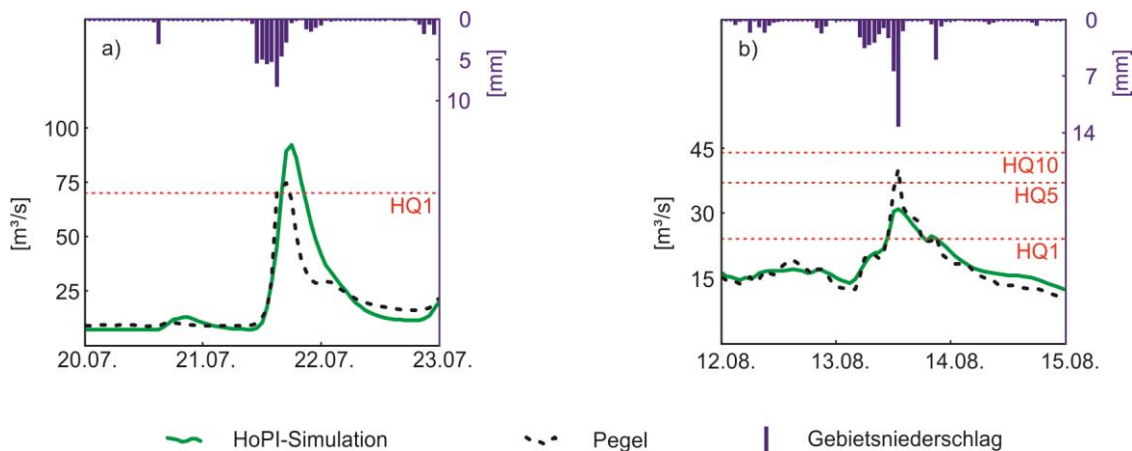


Abb. 2: Zeitreihen aus operationellen Betrieb im Jahr 2014 für a) den Pegel „Bruckhäusl“ an der Brixentaler Ache und b) den Pegel „Gepatschalm“ an der Fagge.

Wie in der Einleitung erwähnt, ist das Hochwasser Prognosesystem seit mehreren Jahren im operationellen Einsatz. Neben der ursprünglichen Zielstellung, der Hochwasserprognose, wird das System inzwischen auch unterstützend für wasserwirtschaftliche Fragestellungen, wie bspw. der Abflussprognose zur Spülung von Wehrbereichen genutzt. Ein anschauliches Beispiel ist das Ereignis aus Abbildung 2 a. In der zweiten und dritten Juliwoche 2014 zog ein Tiefdruckgebiet zunächst von den Britischen Inseln über Zentraleuropa. In Nordtirol gingen teils heftige Gewitter nieder und es fielen teils ergiebige Regenmengen (GATTERMAYER 2014a). In der Brixentaler Ache führten diese Niederschlagsmengen zu einem Pegelanstieg mit Überschreitung der HQ1-Marke. Dieses Ereignis machte man sich bei der Spülung des örtlichen Kraftwerkes zunutze. Die Abflussprognose durch das HoPI-System konnte in diesem Fall sehr zufriedenstellend den Anstieg der Abflussganglinie abbilden. Zweifelsohne entsprechen nicht alle Prognosen derart den Erwartungen. Der August 2014 war in Nordtirol mit bis zu 27 Regentagen von einer anhaltenden trüben Witterungsphase geprägt. Dies hatte zur Folge, dass in Gebieten nahe dem Alpenhauptkamm 125-150 % der Niederschläge im Vergleich zur Referenzreihe 1981-2010 fielen. Insbesondere vom 12.8. auf den 13.8. führte eine, sich ostwärts verlagernde Kaltfront zu intensiven Niederschlägen im Zentralalpenraum. Im Bereich der Öztaler Alpen löste das Niederschlagsfeld starke Abflussreaktionen aus wodurch vereinzelt die Hochwassermeldemarke im Bereich HQ5 überschritten wurde (GATTERMAYER 2014b). Abbildung 2 b veranschaulicht die HoPI-Simulation dieses Ereignisses. Zwar wird der Verlauf ebenfalls akzeptabel nachgebildet, jedoch ist deutlich das fehlende Abflussvolumen am Ganglinienscheitel zuerkennen. Dieses Charakteristikum ist symptomatisch für die Pegel der Stubai- und Öztaler Alpen zu diesem Zeitpunkt. Ein möglicher Erklärungsansatz könnten kleinräumig eingelagerte konvektive Niederschlagszellen darstellen, die sich abseits der Niederschlagsstationen ergossen. Zwar bildet das vergleichsweise dichte Tiroler Stationsnetz die großräumige Variabilität des Niederschlags ausreichend ab, jedoch ist eine signifikante Abnahme der Stationsdichte mit der Höhe feststellbar. Insbeson-

dere die Abbildung der Niederschlagscharakteristik oberhalb von 2.500 m ü. NN ist aufgrund der kleinräumigen topographisch bedingten Variabilität äußerst diffizil. Um die räumliche Variabilität des Niederschlags repräsentativer abbilden zu können, wird derzeit der Einsatz verschiedene Interpolationsmethoden getestet.

Dazu wurde der Ausschnitt der Stubaier und Öztaler Alpen als Testgebiet untersucht. Abbildung 3 stellt die Interpolation des aktuell implementierten *IDW*-Verfahrens (Abbildung 3 b) verschiedener Abwandlungen innerhalb der *MeteoIO* (BAVAY & EGGER 2014) gegenüber. Der Vergleich mit dem *IDW*-Verfahren der *MeteoIO* (Abbildung 3-d) zeigt deutliche Unterschiede sowohl der räumlichen Niederschlagsmuster, als auch der kumulierten Niederschlagssummen ($\pm 20\%$) im Einzugsgebiet Gepatschalm (Fagge, siehe auch Tabelle 1). Durch die zusätzliche Berücksichtigung von höhenabhängigen Niederschlagsgradienten (Abbildung 3-a und 3-c), ist ein deutlich plausibleres Niederschlagsmuster erkennbar. Die Niederschlagsgradienten wurden dabei aus den nächsten 15 Stationen je Pixel (Abbildung 3-a) bzw. aller 38 Stationen des Analysegebiets (Abbildung 3-c) ermittelt. Im Untersuchungszeitraum vom 16.07.-15.08.2014 sind nur geringe Unterschiede in den Ergebnissen zu erkennen. Im Vergleich zu der aktuell verwendeten Variante sind nur geringfügige Veränderungen der kumulierten Niederschlagsmenge sowohl für den Monatszeitraum als auch für das Hochwasser-Ereignis festzustellen, jedoch wirken die räumlichen Niederschlagsmuster deutlich plausibler. Für die Verbesserung der hydrologischen Simulationen, besonders im Hochgebirge, ist es denkbar eine Variante dieser Niederschlagsaufbereitung in das System zu integrieren. Darüber hinaus können die erwähnten Verfahren zur Aufbereitung weiterer meteorologischen Eingangsdaten verwendet werden.

Tab. 1: Interpolierte Niederschläge für das Einzugsgebiet Gepatschalm (Fagge, Kaunertal) für den Zeitraum 16.07.-15.08.2014 sowie das Hochwasserereignis vom 12.08.- 14.08.2014.

	IDW HoPI [mm]	IDW <i>MeteoIO</i> [mm]	IDW + Gradient (15) [mm]	IDW + Gradient (38) [mm]
16.07.-15.08.2014	232,0	203,5	250,3	230,9
12.08.-14.08.2014	58,1	50,4	61,0	60,0

Neben der Aufbereitung der meteorologischen Daten ist die laufende Korrektur einzelner Modellvariablen Inhalt aktueller Entwicklungen. Dabei steht besonders die Schneedecke im Vordergrund, von deren Ausdehnung optische Satellitendaten in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung durch bspw. das Portal www.cryoland.eu vorliegen. Um die Unsicherheiten in den meteorologischen Prognosen zu berücksichtigen, ist die Einbindung verschiedener IN-CA-Prognosen zu einer Ensembleprognose vorgesehen.

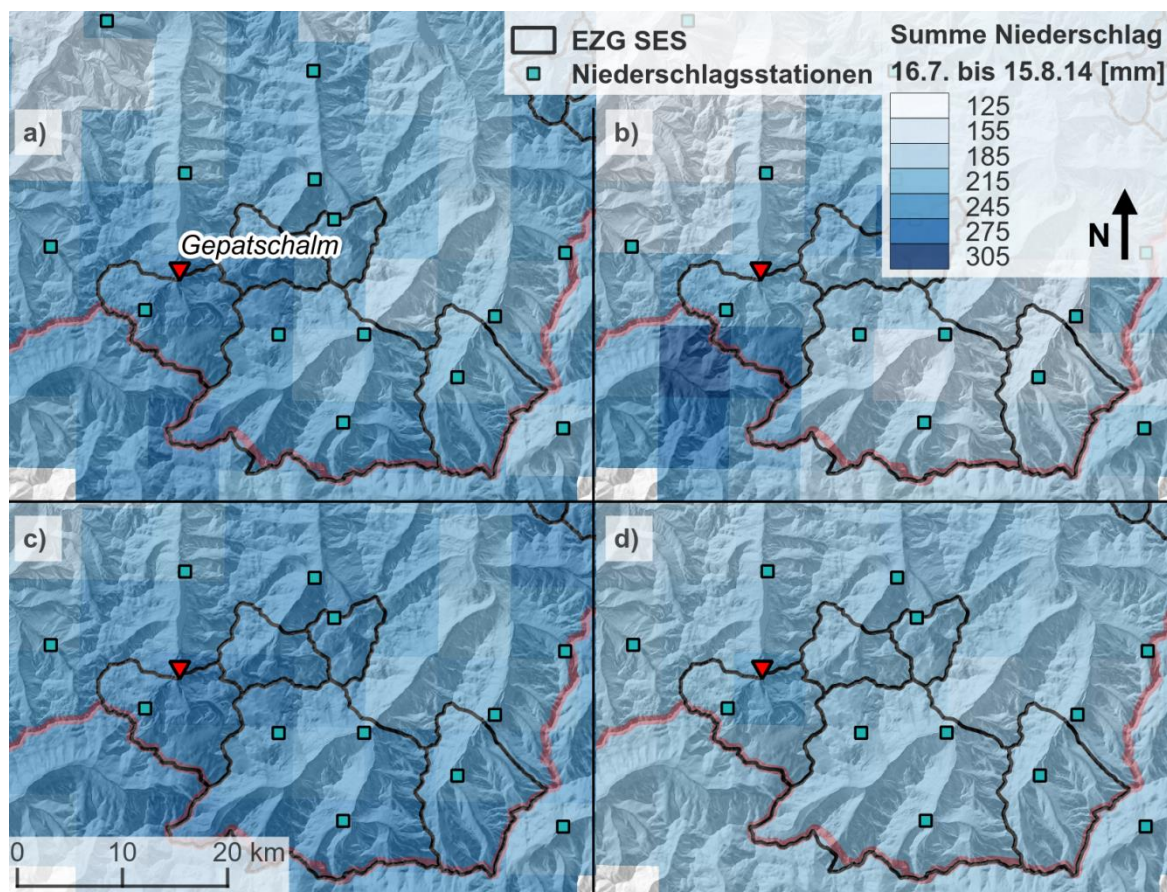


Abb. 3: Gegenüberstellung verschiedener Methoden zur Interpolation meteorologischer Variablen in den Ötztaler Alpen am Beispiel der kumulierten Niederschlagssumme im Zeitraum 16.07.-15.08.2014. a) *IDW* mit höhenabhängigem Gradienten (lineare Regression der 15 nächsten Stationen je Pixel), b) *IDW* ohne Gradient (HoPI), c) *IDW* mit höhenabhängigem Gradienten (lineare Regression der nächsten 38 Stationen je Pixel), d) *IDW* ohne Gradient (MeteoI).

Literatur

- ACHLEITNER, S., RINDERER, M., KIRNBAUER R. (2009): Hydrological modeling in alpine catchments: sensing the critical parameters towards an efficient model calibration. *Water Science & Technology* 60 (6): 1507-1514.
- ACHLEITNER, S., SCHÖBER, J., RINDERER, M., LEONHARDT, G., SCHÖBERL, F., KIRNBAUER, R. and SCHÖNLAUB, H. (2012): Analyzing the operational performance of the hydrological models in an alpine flood forecasting system. *Journal of Hydrology* 412-413: S. 90–100.
- AMT DER TIROLER LANDESREGIERUNG (2014): Statistisches Handbuch Bundesland Tirol 2014. S. 1-422, Eigenverlag, Innsbruck.

- ASZTALOS, J., KIRNBAUER, R., ESCHER-VETTER, H., BRAUN, L. (2007): A distributed energy balance snow and glacier melt model as a component of a flood forecasting system for the Inn river, Proceedings of the Alpine Snow Workshop, Munich, October 5–6, 2006, Germany, Berchtesgaden. Berchtesgaden National Park research report 53: S. 9–17, Berchtesgaden.
- BAVAY, M., EGGER, T. (2014): Meteolo 2.4.2: a preprocessing library for meteorological data. *Geoscientific Model Development* 7: S. 3135-3151.
- BOSSARD, M., FERANEC, J., OTAHEL, J. (2000): CORINE land cover technical guide - addendum 2000. Technical Report 40, European Environment Agency, Copenhagen.
- DOBLER, C. and PAPPENBERGER, F. (2013): Global sensitivity analyses for a complex hydrological model applied in an alpine watershed: Global sensitivity analyses for a complex hydrological model. *Hydrological Processes* 27 (26): S. 3922–3940.
- EG (Europäische Gemeinschaft) (2007): Über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Richtlinie 2007/60/EC des Europäischen Parlaments und des Rates, vom 23.10.2007. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* L 288/27.
- EITZINGER, J., HABERL, H., AMON, B., BLAMAUER, B., ESSL, F., GAUBE, V., HABERSACK, H., JANDL, R., KLIK, A., LEXER, M., RAUCH, W., TAPPEINER, U., ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S. (2014): Land- und Forstwirtschaft, Wasser, Ökosysteme und Biodiversität. In: *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften: S. 771–856, Wien, Österreich.
- FEDERER, C. A., LASH, D. (1983): BROOK: A hydrologic simulation model for eastern forests. Research Report Number 19, Water Resource Research Center, University of New Hampshire, Durham, New Hampshire.
- GATTERMAYER, W. (2014a): Hydrologische Übersicht Juli 2014, <http://www.tirol.gv.at>
- GATTERMAYER, W. (2014b): Hydrologische Übersicht August 2014, <http://www.tirol.gv.at>
- HAIDEN, T., KANN, A., PISTOTNIK, G., STADLBACHER, K., WITTMANN, C. (2010): Integrated nowcasting through comprehensive analysis (INCA). System description, Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna.
- HUTTENLAU, M., STÖTTER, J., STIEFELMEYER, H. (2010): Risk-based damage potential and loss estimation of extreme flooding scenarios in the Austrian Federal Province of Tyrol. *Natural Hazards and Earth System Science* 10 (12): S. 2451-2473.
- HUTTENLAU, M., STÖTTER, J. (2011): The structural vulnerability in the framework of natural hazard risk analyses and the exemplary application for storm loss modelling in Tyrol (Austria). *Natural Hazards* 58 (2): S. 705-729.
- KIRNBAUER, R., SCHÖBERL, F. (2007): A2.1 HOPI HOchwasserPrognosesystem Inn. Endbericht: Phase 1 (1.2.2003 bis 30.9.2006). Technical report, alpS - Zentrum für Naturgefahren Management, Innsbruck, Österreich (unveröffentlicht).
- KLEINDIENST, H. (1996): Erweiterung und Erprobung eines anwendungsorientierten hydrologischen Modells zur Gangliniensimulation in kleinen Wildbacheinzugsgebieten. Diplomarbeit, Ludwig Maximilians Universität, München.
- KÖNIG, M., LOIBL, W., STEIGER, R., ASPÖCK, H., BEDNAR-FRIEDL, B., BRUNNER, K. M., HAAS, W., HÖFERL, K. M., HUTTENLAU, M., WALOCHNIK, J., WEISZ, U. (2014):

- Der Einfluss des Klimawandels auf die Antroposphäre. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 641–704.
- MORGALI, J., LINSLEY, R. (1965): Computer analysis of overland flow. *Journal of Hydraulics Division* 91(3): S. 81–100.
- NACHTNEBEL, H. P., DOKULIL, M., KUHN, M., LOISKANDL, W., SAILER, R., SCHÖNER, W. (2014): Der Einfluss des Klimawandels auf die Hydrosphäre. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften: S. 411–466, Wien, Österreich.
- PETICKA, R. & POSCH, K. (2005): Bodenübersichtskarte. In: BMLFUW: Hydrologische Atlas Österreichs. 2. Lieferung. Kartentafel 1.4. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- REICHEL, G., FÄH, R. und BAUMHACKEL, G. (2000): FLORIS-2000: Ansätze zur 1,5D-Simulation des Sedimenttransportes im Rahmen der mathematischen Modellierung von Fließvorgängen. Volume 19 of Symposium: Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen: S. 485–494. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz, Graz.
- RICKENMANN, D. (1996): Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. *Wasser, Energie, Luft - Eau, Energie, Air* 88 (11/12): S. 298–304.
- RINDERER, M., ACHLEITNER, S., ASZTALOS, J., KIRNBAUER, R. (2008): Sensitivity analysis of lapse rate and corresponding elevation of the snowline - limited data availability and its impact on snow and glacier melt. Institute for Catastrophic Loss Reduction, Toronto, Ontario, Canada.
- SENFTER, S., LEONHARDT, G., OBERPARLEITER, C., ASZTALOS, J., KIRNBAUER, R., SCHÖBERL, F., SCHÖNLAUB, H. (2009): 2 flood forecasting for the river inn. In: VEULLIET, E., STÖTTER, J., WECK-HANNEMANN, H.: Sustainable Natural Hazard Management in Alpine Environments: S. 35–67. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- SCHÖBER, J., ACHLEITNER, S., KIRNBAUER, R., SCHÖBERL, F., SCHÖNLAUB, H. (2010): Hydrological modelling of glacierized catchments focussing on the validation of simulated snow patterns - applications within the flood forecasting system of the Tyrolean river inn. *Advances in Geosciences* 27: S. 99–109.
- SCHÖBER, J. (2014): Improved snow and runoff modelling of glacierized catchments for flood forecasting. Dissertation, Leopold Franzens Universität, Innsbruck.