

GÜNTER BLÖSCHL, JÜRGEN KOMMA, THOMAS NESTER,
MAGDALENA ROGGER, JOSÉ LUIS SALINAS, ALBERTO VIGLIONE

Die Wirkung des Waldes auf Hochwässer

The effect of forests on floods

Zusammenfassung:

Diese Arbeit betrachtet, ob Landnutzungsänderungen das Hochwassergeschehen mittlerer und großer Einzugsgebiete beeinflussen, und ob sich insbesondere durch Aufforstung Hochwasserabflüsse auf Flussgebietsebene reduzieren lassen. Vorerst werden die relevanten Prozesse der Hochwasserentstehung in Hinblick auf die Wirkung des Waldes diskutiert, sodann wird der Einfluss der Einzugsgebietsgröße und der Ereignisgröße auf diese Prozesse besprochen, und schließlich wird an Hand einer Fallstudie beispielhaft für den Inn die zu erwartende Wirkung gezeigt.

Stichwörter:

Waldwirkung, Hochwasser

Abstract:

This paper examines whether land use changes influence the flood regime of medium and large river basins and, specifically, whether afforestation has the potential of reducing flood discharges at the river basin scale. In a first step, the relevant processes of flood generation are discussed with regard to the effects of forests, next the role of catchment size and event magnitude on these processes are considered and, finally, the expected effects are illustrated by a case study for the Inn river.

Keywords:

Forest function, floods

Einleitung

In den letzten Jahren gab es in Österreich, Europa und der ganzen Welt zahlreiche große Hochwässer. Im August 2005 war Westösterreich und die Schweiz durch ein großes, regionales Hochwasser betroffen, im Juni 2013 Ostösterreich und Bayern und im Juni 2016 verwüstete ein kleinräumigeres Ereignis Simbach am Inn in Niederbayern. Auf Grund dieser zahlreichen Hochwasserkatastrophen ist es nicht verwunderlich, dass der Einfluss des Menschen bei deren Entstehung und Ablauf heftig diskutiert wird. Grundsätzlich können drei Einflussfaktoren das Hochwasserregime beeinflussen: (1) Klimawandel, der zum Teil auch menschlich beeinflusst ist, (2) wasserbauliche Maßnahmen wie z.B. Flussregulierungen, und (3) Veränderungen der Landnutzung wie z.B. Rodung von Wald und Intensivierung der Landwirtschaft mit schweren Maschinen (Blöschl et al., 2011; Hall et al., 2014). Der Einfluss der Landnutzung ist auf Einzugsgebietsebene schwer greifbar wegen der räumlichen Heterogenität der damit verbundenen Prozesse (Rogger et al., 2017). Klar ist, dass der Einsatz schwerer landwirtschaftlicher Maschinen zu Bodenverdichtung führen kann – in Europa sind rund 33 Millionen Hektar durch Bodenverdichtung betroffen (Birkas, 2008). Diese wirkt sich wiederum ungünstig auf die Infiltration und damit die Hochwasserentstehung aus. Umgekehrt sind Waldböden oft lockerer, dadurch kann die Infiltration größer sein. Inwieweit diese Effekte auf Flussgebietsebene wirksam sind, ist allerdings weniger klar, für Bemessungszwecke jedoch essentiell (Blöschl und Merz, 2008; Blöschl et al., 2015). Diese Arbeit diskutiert deshalb zwei Fragen speziell für mittlere und große Einzugsgebiete: (1) Haben Landnutzungsänderungen das Hochwassergeschehen beeinflusst, und (2) lassen sich durch Landnutzungsänderungen und insbesondere durch Aufforstung Hochwasserabflüsse

auf Flussgebietsebene reduzieren? Dazu werden vorerst die relevanten Prozesse der Hochwasserentstehung in Hinblick auf die Wirkung des Waldes diskutiert, sodann wird der Einfluss der Einzugsgebietsgröße und der Ereignisgröße auf diese Prozesse besprochen, und schließlich wird an Hand einer Fallstudie beispielhaft für den Inn die zu erwartende Wirkung gezeigt.

Prozesse der Hochwasserentstehung und der Einfluss des Waldes

Mit Wald bestandene Flächen, unterscheiden sich von landwirtschaftlichen Flächen in Hinblick auf die Hochwasserentstehung durch drei Faktoren (siehe Abbildung 1):

- (a) Stärkerer Rückhalt des Niederschlagswassers in der Baumkrone (Interzeption) im Vergleich etwa zu Grasland. Je nach Art, und jahreszeitenabhängig, kann die Baumkrone einige wenige Millimeter Niederschlag zurückhalten, die direkt der Verdunstung zugeführt werden, und damit nicht abflusswirksam sind. Tendenziell nimmt die Interzeption mit der Größe des Niederschlagsereignisses zu, bis eine Sättigung erreicht wird (Staelens et al. 2008). Zudem kann eine im Wald oft vorhandene Streuauflage einen kleinen zusätzlichen Niederschlagsbetrag zurückhalten (Sato et al 2004). Allerdings zeigte Holko et al. (2012) für ein Gebiet in der Hohen Tatra, dass diese Effekte nicht unbedingt auf Einzugsgebietsebene wirksam werden. Das Gebiet war durch massiven Windwurf betroffen und dadurch über mehrere Jahre baumlos. Es war kein Einfluss auf das Hochwasserregime zu erkennen, da die fehlende Verdunstung der Bäume durch die Verdunstung eines rasch aufkommenden Unterholzes kompensiert wurde.

(b) Größere Infiltrationskapazität der Böden im Wald, insbesondere durch einen hohen Anteil an Makroporen. Baumwuchs trägt wesentlich zur Bildung von Makroporen bei, die das Niederschlagswasser wesentlich effizienter infiltrieren können als die Bodenmatrix selbst (Sidle et al., 2001). Zusätzlich kann der Stammabfluss die Infiltrationseigenschaften beeinflussen (Schwärzel et al., 2012). Allerdings können, insbesondere in Nadelwäldern, die Streuauflage

zu wasserabweisenden Bedingungen führen, die wiederum die Abflusstenstehung verstärken (de Blas et al., 2010). Bei Aufforstungen kann eine positive Wirkung des Waldes auf die Bodeneigenschaften erst nach Jahrzehnten wirksam werden, da eine Veränderung der Bodenstruktur meist sehr langsam erfolgt (Hümann et al., 2011).

(c) Größere Speicherfähigkeit der Böden im Wald wegen größerer Hohlräume und geringerer Bodenfeuchte. Inwieweit eine

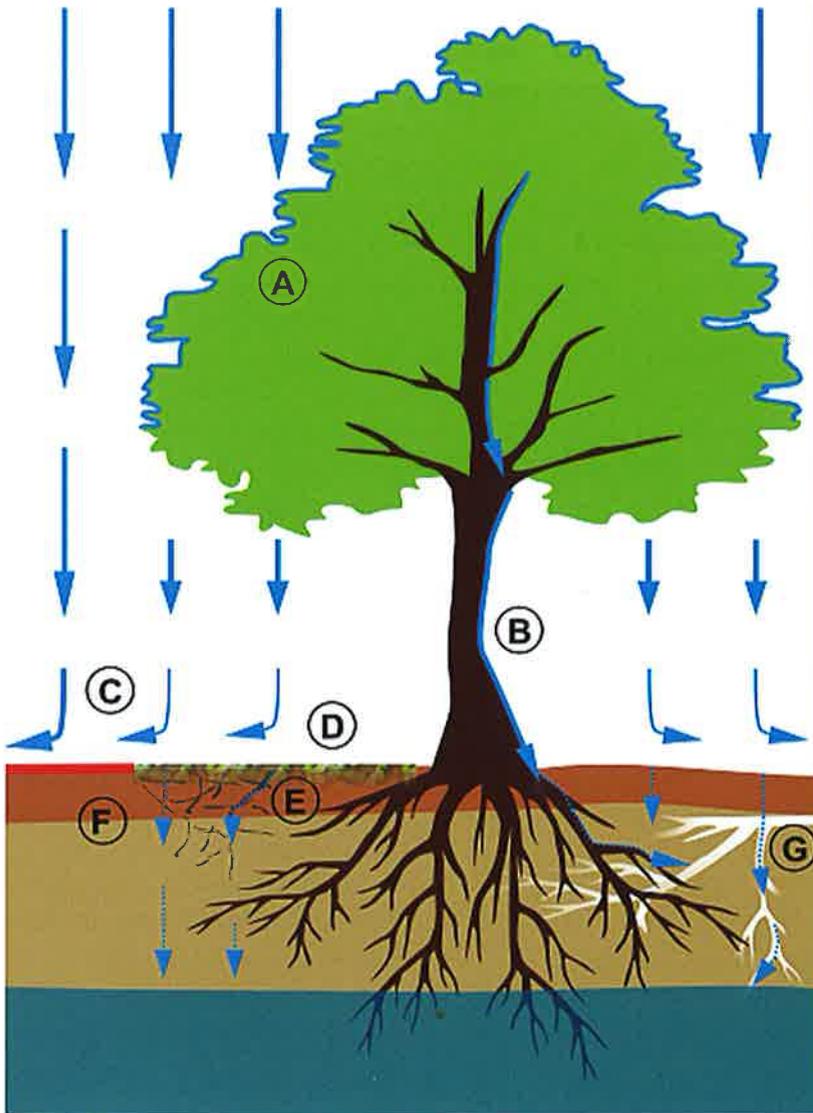


Abb. 1:
Prozesse, die die Hochwasserentstehung im Wald beeinflussen:
A Interzeption, B Stammabfluss, C Krustenbildung, D Speicherung in der Streuauflage, E Regenwurmgänge, F hydraulische Leitfähigkeit Boden, G Makroporen-Infiltration in Wurzelgängen.

Fig. 1:
Processes that can affect the flood generation in forests: A interception, B stem flow, C crust formation, D storage in the litter layer, E earthworm canals, F hydraulic conductivity of the soil, G macropore infiltration in root channels.

größere Infiltrationskapazität auch tatsächlich zu größerer Infiltration führt, hängt von den Abflussmechanismen ab. Wird Abfluss durch den „Infiltrationsüberschuss“ erzeugt, wie dies bei kurzen Starkregen auf gering durchlässigen Böden oft der Fall ist, dann ist die Infiltrationskapazität maßgebend. Bei weniger intensiven Niederschlägen, höher durchlässigen und seichten Böden entsteht Abfluss jedoch meist dadurch, dass das Speichervermögen des Bodens erschöpft ist („Sättigungsüberschuss“) (Rogger et al., 2012). Hier ist die Durchlässigkeit weniger wichtig, sondern die Bodenfeuchte oder die Lage des Grundwasserspiegels. Wald kann wegen erhöhter Verdunstung zu geringerer Bodenfeuchte und einem niedrigeren Grundwasserspiegel (und damit geringerem Abfluss) im Vergleich zu z.B. Grasland beitragen, allerdings sind die Unterschiede oft klein (Dube et al., 1995).

Einfluss der Ereignis- und Gebietsgröße

Die oben diskutierten Prozesse spielen sich lokal ab und werden in Abhängigkeit von der räumlichen Verteilung auf die Einzugsgebietsebene (bzw. Flussgebietsebene) aggregiert. Da viele Faktoren, insbesondere Klima, wasserbauliche Maßnahmen und Landnutzung die Hochwässer beeinflussen, ist die Frage der Rolle des Waldes einer experimentellen Untersuchung nicht leicht zugänglich und wird deshalb in der Regel durch mathematische Modellierung behandelt (O'Connell et al., 2007). Dabei werden Parameter des mathematischen Modells, wie die Infiltrationskapazität, mit der entsprechenden Landnutzung gekoppelt. Salazar et al. (2012) untersuchte für das Kampgebiet in Niederösterreich den Einfluss einer hypothetischen Aufforstung. Für jedes Hochwas-

serereignis führten sie zwei Simulationen durch, eine mit der realen Landnutzung und eine mit veränderter Landnutzung (entweder weniger oder mehr Waldfläche). Die Berechnungen zeigten, dass Aufforstung die Hochwasserspitzen reduziert (zufolge erhöhter Infiltration, Speicherung im Boden und Verdunstung), Abholzung hingegen die Hochwasserspitzen erhöht. Der Effekt nimmt stark mit der Größe des Ereignisses ab und beträgt bei der Größenordnung eines hundertjährigen Hochwassers weniger als 5 %. Dies liegt daran, dass bei sehr großen Niederschlägen, die Unterschiede in den Infiltrations- und Speichereigenschaften der Böden weniger wirksam sind. Ähnliche Ergebnisse wurden von Naef et al. (2002), O'Connell et al. (2007), Kohl et al. (2008) und Hess et al. (2010) gefunden.

Eine Alternative zu solchen Szenariorechnungen sind Zuordnungen beobachteter Veränderungen von Hochwässern, insbesondere Hochwassertrends, zu den Prozessursachen. Eine solche Studie wurde von Viglione et al. (2016) für Oberösterreich durchgeführt. An den meisten Abflussmessstationen der Region wurden leicht zunehmende Trends der Jahreshochwässer beobachtet. Auf Basis eines Attributierungsansatzes wurde die Veränderung des Niederschlags als insgesamt wichtigste Einflussgröße der Hochwasseränderungen identifiziert, während Landnutzungsänderungen in kleinen Einzugsgebieten wichtig sein können (Abbildung 2). Die Auswirkung der Landnutzungsänderungen auf die Hochwässer nimmt mit der Einzugsgebietsfläche aufgrund einer Verschiebung der Abflussentstehungsmechanismen ab. In kleinen Einzugsgebieten mit kurzen Reaktionszeiten werden Hochwässer größtenteils durch hochintensive, kurze Niederschläge erzeugt, so dass der Mechanismus des Infiltrationsüberschusses dominant ist. In größeren Einzugsgebieten mit langen Reaktionszeiten werden Hochwässer größtenteils durch länger

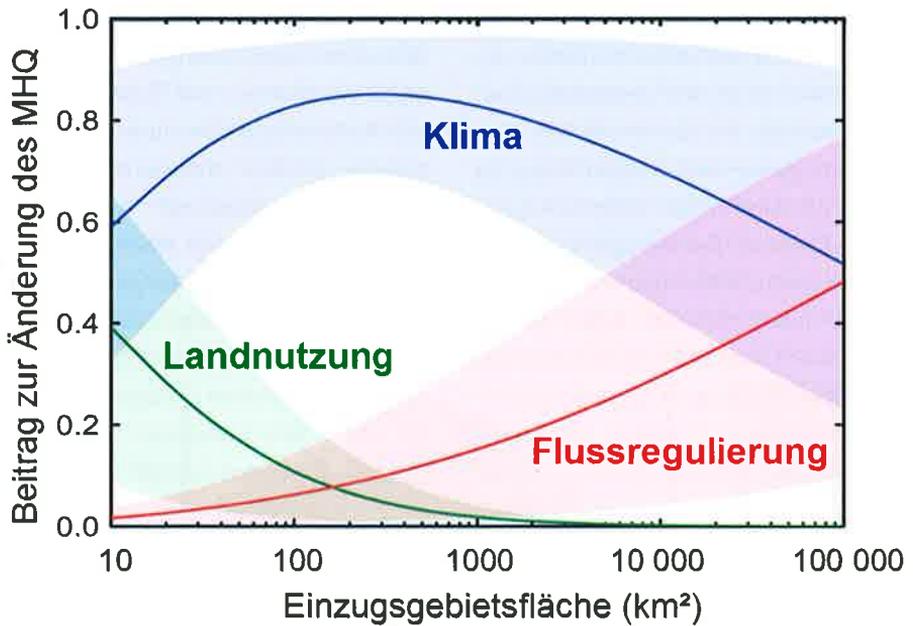


Abb. 2: Zuordnung beobachteter Veränderungen des mittleren jährlichen Hochwassers (MHQ) zu den drei Treibern: Klima, Flussregulierung und Landnutzung. 97 Einzugsgebiete in Oberösterreich, Abflussdaten 1950–2012. Aus Viglione et al. (2016).

Fig. 2: Attribution of observed changes of mean annual floods (MHQ) to the three drivers: climate, river training and land use. 97 catchments in Upper Austria, discharge data from 1950–2012; Viglione et al. (2016).

andauernde Niederschläge geringerer Intensitäten erzeugt, so dass der Mechanismus des Sättigungsüberschusses dominiert. Da Landnutzungsänderungen meist die Infiltrationskapazität und damit den ersten Mechanismus stärker beeinflussen (durch die verringerte Infiltrationskapazität z.B. zufolge Bodenverdichtung) als den zweiten, nimmt die Wirkung der Landnutzungsänderung auf Hochwässer mit der Einzugsgebietsfläche ab (Abbildung 2). Ähnliche Ergebnisse wurden in der internationalen Literatur erzielt (z.B. O'Connell et al., 2007; Hall et al., 2014; Rogger et al., 2017).

Fallstudie Inn

Im Rahmen des Projektes „Auswirkung Alpiner Retention auf die Hochwasserabflüsse des Inn“, mit dem die TU Wien durch das Amt der Tiroler

Landesregierung und die Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol, beauftragt wurde, war es möglich, den Einfluss einer hypothetischen Aufforstung von Teilen des Einzugsgebiets auf den Hochwasserabfluss des Inns zu untersuchen. Der Hochwasserabfluss einer bestimmten Jährlichkeit am Inn wird durch das Zusammenwirken der Abflüsse aus den Teileinzugsgebieten bestimmt, die sich je nach Ereignis in Hinblick auf Größe und zeitlichen Versatz unterscheiden. Es war deshalb notwendig, den raum-zeitlichen Niederschlag-Abflussprozess in stochastischer Weise modelltechnisch abzubilden. Es geht um die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens von Hochwässern einer bestimmten Größenordnung bei den Zubringern. Für das Zusammenfließen zweier Zubringer existieren zwei Grenzfälle:

- (1) die Hochwasserwellen treten bei einem

Ereignis mit hoher Wahrscheinlichkeit gleichzeitig auf, sodass sich die Scheitel maximal überlagern; oder sie treten

(2) mit hoher Wahrscheinlichkeit so verschoben auf, dass keine Überlagerung stattfindet.

Im ersten Fall addieren sich die Abflüsse der Zubringer beim Zusammenfluss, im zweiten Fall ist nur der größere Abfluss maßgebend. Die Fälle der Realität liegen dazwischen. Diese räumlichen Abhängigkeiten auf Basis von Wahrscheinlichkeiten bedeuten, dass die Fragestellung nicht mit Szenarien (wie etwa bei Überflutungsuntersuchungen üblich) gelöst werden kann, sondern ein stochastischer Ansatz erforderlich ist, der die Wahrscheinlichkeiten der räumlichen Abhängigkeiten berücksichtigt.

Um diese komplexe Fragestellung methodisch sauber zu lösen, wurden in diesem Projekt Monte Carlo Simulationen mit einer Modellkette durchgeführt, die die folgenden Teilschritte umfassten:

- Stochastische Generierung von räumlichen Niederschlagszeitreihen
- Niederschlag-Abflussmodellierung zur Umlegung der Niederschläge auf Abflussbildung, Abflusskonzentration und Wellenablauf in den Teilgebieten (Blöschl et al., 2008)
- Testen der simulierten Hochwasserzeitreihen mittels Pegelstatistik
- Modellmäßige Implementierung der hypothetischen Landnutzungsänderungen (Aufforstung) durch Wahl geeigneter Modellparameter
- Variantenstudien mittels Monte Carlo Simulationen zur Bestimmung der Wirksamkeit der hypothetischen Aufforstung auf den Inn

Der Ansatz basiert auf den Erfahrungen mit der HOWATI-Studie, bei der bereits Monte Carlo Simulationen durchgeführt wurden, allerdings nur

für einzelne Gebiete und nicht flächendeckend für das gesamte Inngebiet (Rogger et al., 2011). Dieses Projekt erweiterte den HOWATI-Ansatz um den räumlichen Aspekt.

Abflussdaten an 71 Pegeln in Tirol und in der Schweiz wurden herangezogen. Stündliche Niederschlagsdaten an 134 Stationen wurden verwendet und Tageswerte an 163 Stationen. Sämtliche Daten wurden auf ihre Qualität geprüft. Zusätzlich wurden Lufttemperaturdaten herangezogen. Informationen über Kraftwerke, Speicher und deren Einzugsgebiete sowie Wasserfassungen und Beileitungen wurden berücksichtigt. Das Untersuchungsgebiet war das Einzugsgebiet des Inn bis zum Pegel Oberaudorf (9700 km² Einzugsgebietsfläche).

Für die hypothetischen Landnutzungsänderungen wurden alle Rasterelemente im Einzugsgebiet, die als Grasland ausgewiesen waren und unterhalb einer Seehöhe von 2000m lagen, als aufgeforstet angesehen. Das betrifft etwa 11 % der Rasterelemente (also eine Fläche von ca. 100.000 ha) und stellt damit eine extreme Annahme dar (Abbildung 3). Sodann wurden die Monte Carlo Simulationen durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 für den Pegel Oberaudorf gezeigt. Man erkennt, dass die Landnutzungsänderung die Hochwasserabflüsse nur geringfügig beeinflusst. Bei einem HQ100 beträgt die Reduktion 4,4 %, bei einem HQ1000 4,8 %. Die prozentuale Reduktion bleibt also mit der Jährlichkeit in etwa gleich. Salazar et al. (2012) und andere Autoren hatten hingegen gefunden, dass der Prozentsatz mit der Ereignisgröße abnimmt. Der ungefähr gleichbleibende Prozentsatz in dieser Studie ist darauf zurückzuführen, dass die Hochwässer durch sehr unterschiedliche Überregnung zustande kommen können, und Hochwässer größerer Jährlichkeiten am Inn auch meist auf eine großräumigere Überregnung zurückzuführen sind. Dadurch sind mit zunehmender Jährlichkeit

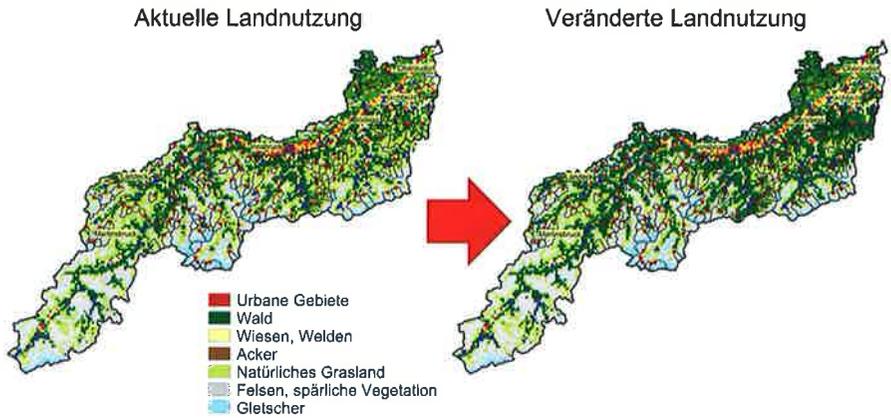


Abb. 3: Einzugsgebiet des Inn bis zum Pegel Oberaudorf. Links: aktuelle Landnutzung. Rechts: veränderte Landnutzung bei der 11 % der Einzugsgebietsfläche statt als Grasland als Wald angesehen wurden. Landnutzung links nach Seger (2001).

Fig. 3: Catchment area of the Inn river above the Oberaudorf stream gauge. Left: current land use; Right: changed land use, where 11 % of the area have been changed from grassland to forest; current land use according to Seger (2001).

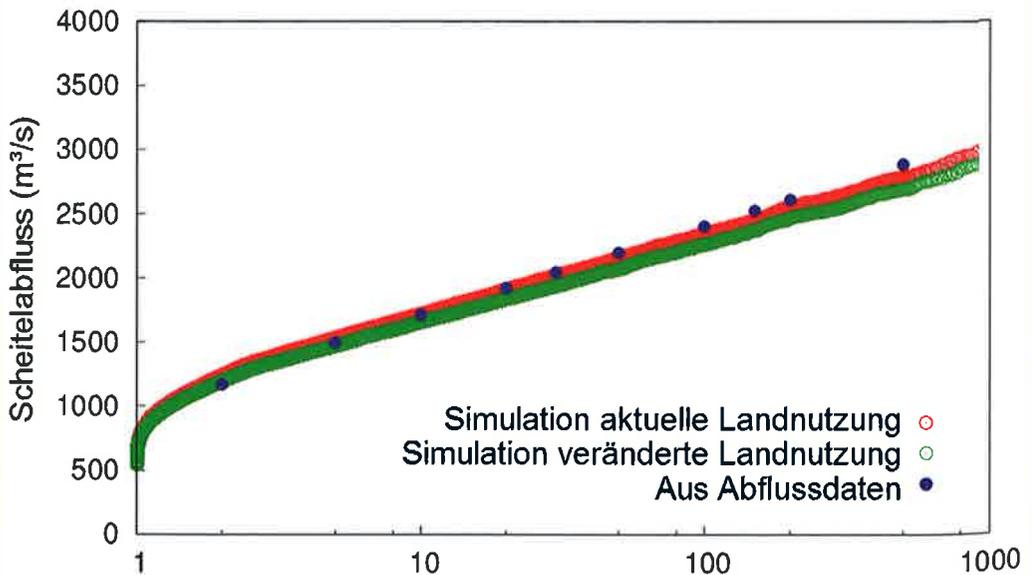


Abb. 4: Ergebnis der Monte Carlo Simulationen (10 000 Jahre) für aktuelle Landnutzung (Abbildung 3 links) und veränderte Landnutzung (Abbildung 3 rechts), sowie Vergleich mit aus den Abflussdaten des Pegels Oberaudorf bestimmten Abflüssen.

Fig. 4: Results of the Monte Carlo simulations (10 000 years) for current land use (Figure 3, left) and changed land use (Figure 3, right) and comparison with the discharge data of the Oberaudorf stream gauge.

auch zunehmend mehr Teileinzugsgebiete wirksam. Insgesamt ist die Wirkung allerdings sehr klein. Eine vermutlich realistischere Aufforstung von 10.000 ha würde die Wirkung auf weniger als 0,5 % reduzieren.

Schlussfolgerungen

Für kleine Einzugsgebiete in Klimaregionen wie Österreich besitzt eine Erhöhung des Waldanteiles auf Kosten von Grünland das Potential, kleine Hochwässer zu reduzieren. Bei großen Hochwässern geht die Wirkung stark zurück. Für mittlere bis große Einzugsgebiete ist die Wirksamkeit sowohl für kleine als auch für große Hochwässer gering. Während eine Erhöhung des Waldanteiles aus anderen Gründen sinnvoll sein kann (Schutz vor Bodenerosion, Lawinen, Muren, Steinschlag), ist Aufforstung keine wirksame Maßnahme des Hochwasserschutzes für mittlere bis große Einzugsgebiete.

Danksagung

Die Untersuchungen entstanden im Rahmen des durch das Amt der Tiroler Landesregierung und die Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol geförderten Projektes „Auswirkung Alpiner Retention auf die Hochwasserabflüsse des Inn“; der FWF Projekte I 3174-N29 und P 23723-N21, sowie des SYSTEMRISK Projektes (EU Grant 676027).

Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Alle Autoren:

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien
bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

Literatur / References:

- BIRKAS, M. (2008) Environmentally sound adaptable tillage, Akademia Kiado, Budapest, Hungary, 354 pp.
- BLÖSCHL, G. und R. MERZ (2008) Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit – Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. Wasserwirtschaft, 98 (11) 12-18.
- BLÖSCHL, G., A. VIGLIONE, R. MERZ., J. PARAJKA, J. SALINAS und W. SCHÖNER (2011) Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 63, (1-2), 21- 30.
- BLÖSCHL, G., C. RESZLER und J. KOMMA (2008) A spatially distributed flash flood forecasting model, Environmental Modelling & Software, 23 (4), pp. 464-478.
- BLÖSCHL, G., Z. HORVÁTH, A. KISS, J. KOMMA, T. NESTER, R. A.P. PERDIGÃO, A. VIGLIONE und J. WÄSER (2015) Neue Methoden für das Hochwasserrisikomanagement, Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ), 160, 15-27.
- DE BLAS, E., RODRÍGUEZ-ALLERES, M., and ALMENDROS, G. (2010) Speciation of lipid and humic fractions in soils under pine and eucalyptus forest in northwest Spain and its effect on water repellency. Geoderma, 155(3), 242-248.
- DUBÉ, S., PLAMONDON, A. P., and ROTHWELL, R. L. (1995) Watering up after clear-cutting on forested wetlands of the St. Lawrence lowland. Water Resources Research, 31(7), 1741-1750.
- HALL, J., B. ARHEIMER, M. BORGA, R. BRÁZDIL, P. CLAPS, A. KISS, T. R. KJELSDEN, J. KRIAUCIŪNIENĖ, Z. W. KUNDZEWICZ, M. LANG, M. C. LLASAT, N. MACDONALD, N. MCINTYRE, L. MEDIERO, B. MERZ, R. MERZ, P. MOLNAR, A. MONTANARI, C. NEUHOLD, J. PARAJKA, R. A. P. PERDIGÃO, L. PLAVCOVÁ, M. ROGGER, J. L. SALINAS, F. SAUQUET, C. SCHÄR, J. SZOLGAY, A. VIGLIONE und G. BLÖSCHL (2014) Understanding Flood Regime Changes in Europe: A state of the art assessment, Hydrology and Earth System Sciences, 18, 2735-2772, doi:10.5194/hess-18-2735-2014.
- HESS, T. M., HOLMAN, I. P., ROSE, S. C., ROSOLOVA, Z., and PARROTT, A. (2010) Estimating the impact of rural land management changes on catchment runoff generation in England and Wales. Hydrological Processes, 24(10), 1357-1368.
- HOLKO, L., FLEISCHER, P., NOVÁK, V., KOSTKA, Z., BIČÁROVÁ, S., and NOVÁK, J. (2012). Hydrological Effects of a Large Scale Windfall Degradation in the High Tatras Mountains, Slovakia. In Management of Mountain Watersheds (pp. 164-179). Springer Netherlands.
- HÜMANN, M., SCHÜLER, G., MÜLLER, C., SCHNEIDER, R., JOHST, M., and CASPARI, T. (2011) Identification of runoff processes—The impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. Journal of Hydrology, 409(3), 637-649.
- KOHL, B., K. KLEBINDER, G. MARKART, F. PERZL, H. PIRKL, F. RIEDL und L. STEPANEK (2008) Analyse und Modellierung der Waldwirkung auf das Hochwasserereignis im Paznauntal vom August 2005. www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2008_2_505.pdf
- Naef, F., Scherrer, S., and Weiler, M. (2002) A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. Journal of Hydrology, 267(1), 74-79.
- O'CONNELL, P. E., EWEN, J., O'DONNELL, G., and QUINN, P. (2007) Is there a link between agricultural land-use management and flooding?. Hydrology and Earth System Sciences, 11(1), 96-107.
- ROGGER, M., B. KOHL, H. PIRKL, M. HOFER, R. KIRNBAUER, R. MERZ, J. KOMMA, A. VIGLIONE, G. BLÖSCHL (2011) HOWATI – HochWasser Tirol – Ein Beitrag zur Harmonisierung von Bemessungshochwässern in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 63, (7-8), 153-161.

ROGGER, M., H. PIRKL, A. VIGLIONE, J. KOMMA, B. KOHL, R. KIRNBAUER, R. MERZ and G. BLÖSCHL (2012)

Step changes in the flood frequency curve: Process controls, *Water Resources Research*, 48, W05544, doi:10.1029/2011WR011187.

ROGGER, M., M. AGNOLETTI, A. ALAOU, J.C. BATHURST, G. BODNER, M. BORGA, V. CHAPLOT, F. GALLART, G. GLATZEL, J. HALL, J. HOLDEN, L. HOLKO, R. HORN, A. KISS, S. KOHNOVA, G. LEITINGER, B. LENNARTZ, J. PARAJKA, R. PERDIGÃO, S. PETH, L. PLAVCOVÁ, J.N. QUIN-TON, M. ROBINSON, J.L. SALINAS, A. SANTORO, J. SZOLGAY, S. TRON, J.J.H. VAN DEN AKKER, A. VIGLIONE and G. BLÖSCHL (2017)

Land-use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research. *Water Resources Research*, 53, 5209–5219, doi:10.1002/2017WR020723.

SALAZAR, S., FRANCÉS, F., KOMMA, J., BLUME, T., FRANCKE, T., BRONSTERT, A., and BLÖSCHL, G. (2012)

A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of "retaining water in the landscape" in different European hydro-climatic regions, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3287–3306, doi:10.5194/nhess-12-3287-2012.

SATO, Y., KUMAGAI, T. O., KUME, A., OTSUKI, K., and OGAWA, S. (2004)

Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers—the effects of rainfall conditions and leaf shapes, *Hydrological Processes*, 18(16), 3007–3018.

SCHWÄRZEL, K., EBERMANN, S., and SCHALLING, N. (2012)

Evidence of double-funneling effect of beech trees by visualization of flow pathways using dye tracer. *Journal of hydrology*, 470, 184–192.

SEGER, M. (2001)

Rauminformationssystem Österreich – ein digitaler thematischer Datensatz des Staatsgebietes. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 89 (2), 101–110.

SIDLE, R. C., NOGUCHI, S., TSUBOYAMA, Y. AND LAURSEN, K. (2001)

A conceptual model of preferential flow systems in forested hillslopes: evidence of self-organization. *Hydrological Processes*, 15, 1675–1692.

STAELENS, J., DE SCHRIJVER, A., VERHEYEN, K., and VERHOEST, N. E. (2008)

Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes*, 22(1), 33–45.

VIGLIONE, A., B. MERZ, N. VIET DUNG, J. PARAJKA, T. NESTER and G. BLÖSCHL (2016)

Attribution of regional flood changes based on scaling fingerprints. *Water Resources Research*, 52, 5322–5340, doi: 10.1002/2016WR019036.





Wildbach- und Lawinenverbau

Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz
Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rock Fall Engineering

Sperrenbau – Sperrentypen – Sperrenfunktionen

verein der diplomingenieure
der wildbach und lawinenverbauung
österreichs

ISBN: 978-3-9504159-5-7
88. Jahrgang, Juni 2018, Heft Nr. 181

Heft 181