

Zusammenfassung

Das gehäufte Auftreten von großen Hochwasserereignissen seit 1990 hat verstärkt die Frage nach der anthropogenen Verantwortung dafür aufgeworfen. Sowohl die Landoberfläche als auch die Flusssysteme weiter Teile Mitteleuropas haben in der Vergangenheit bedeutende Eingriffe erfahren, die zweifellos zu einer veränderten Hochwassersituation in dieser Region geführt haben. Aufgrund der Vielfalt der beteiligten Prozesse und Faktoren gibt es allerdings bislang nur Schätzungen zu den Auswirkungen solcher Veränderungen auf Hochwasser. Besonders die Quantifizierung der Abflussentstehung im Einzugsgebiet, abhängig von der Zusammensetzung und Dichte der Vegetationsdecke sowie dem Zustand der Bodenoberfläche, ist noch immer mit großen Unsicherheiten behaftet.

Die Relevanz der anthropogenen Nutzung für die Hochwasserentstehung wird anhand von drei charakteristischen Einzugsgebietstypen mit dominierend urbaner, landwirtschaftlicher beziehungsweise forstwirtschaftlicher Landnutzung untersucht. Außerdem werden mit Hilfe von Klimaszenarien, die den Zustand der 2080er Jahre beschreiben, die potenziellen Konsequenzen von Klimaänderungen für die Hochwasserentstehung analysiert.

Hauptziel der vorliegenden Untersuchung ist es, anhand von verschiedenen Einzugsgebieten exemplarisch den Einfluss der Landnutzung auf die Abflussbildung bei Hochwasser darzustellen. Hierfür wurden drei mesoskalige Einzugsgebiete im deutschen Teil des Rhein-Einzugsgebietes ausgesucht, deren Größe (zwischen 100 und 500 km²) durch die Unterdrückung lokaler Effekte Verallgemeinerungen zulässt, aber trotzdem noch eine eindeutige Zuordnung von Ursache und Wirkung ermöglicht. Un-

ter diesen Gesichtspunkten wurden die Einzugsgebiete folgender Flüsse ausgewählt: *Lein* als Repräsentant einer landwirtschaftlichen Nutzung, *Körsch* als typisch urbanes Gebiet und obere *Lenne*, deren überwiegend bewaldetes Einzugsgebiet als naturnah gilt.

Untersuchungsgebiete

Das überwiegend landwirtschaftlich genutzte Einzugsgebiet der *Lein* liegt südwestlich von Heilbronn und nimmt eine Fläche von 115 km² ein. Es ist sanft gewellt und fällt von Südwesten nach Nordosten flach ab.

Das urban geprägte Einzugsgebiet der *Körsch* befindet sich im Süden von Stuttgart. Es hat eine Fläche von 127 km², die sanft von Westen nach Osten hin abfällt. Der Flusslauf der Körsch hat sich im Laufe der Zeit tief in die sonst flache Hochebene eingeschnitten.

Die vorwiegend forstwirtschaftlich genutzte *Lenne* ist ein Zufluss der Ruhr und entspringt im Rothaargebirge. Das ausgewählte Untersuchungsgebiet beschränkt sich auf den Oberlauf bis zum Pegel Bamenohl. Dieses Gebiet ist 455 km² groß und stark reliefiert.

Landnutzungsmodell

Zu Projektbeginn existierte kein zugängliches und zufriedenstellendes Modell für die Generierung von Landnutzungsszenarien. Deshalb wird diese Aufgabe für die vorliegende Untersuchung durch die Erstellung eines eigenen Verfahrens bearbeitet. Ziel bei der Erstellung von Landnutzungsszenarien ist dabei nicht nur die Berücksichtigung eines Zielwerts in Form von veränderten prozentualen Flä-

chennutzungsverhältnissen, sondern auch die Einbeziehung von Lage und Topologie (Beziehung der Flächen zueinander) der verschiedenen Nutzungen. Diese lagegetreue Spezifizierung der Flächen ist zur Beurteilung der hydrologischen Auswirkungen von Landnutzungsänderungen von besonderer Wichtigkeit. Die prozentuale Bestimmung der Änderungen (Szenarioziel) ist in der entwickelten Methode nicht enthalten. Sie wird aus externen Prognosen entnommen. Kernstück der Szenariotechnik stellt vielmehr die Disaggregation der Landnutzungsänderungen auf die Fläche dar.

Das für das Projekt entwickelte, rasterbasierte Verfahren zur Szenarioerstellung LUCK (Land Use Change scenario Kit) berücksichtigt sowohl Standortfaktoren als auch die Nachbarschaftsbeziehungen der einzelnen Flächen als Kriterien für eine Nutzungskonversion. Dabei werden auch typische Nutzungsmuster und die Wirkung von Entwicklungsachsen in der Landschaft (z.B. Straßen, Bahnlinien) in Betracht gezogen. Das daraus resultierende *Veränderungspotenzial* für jede Rasterzelle ist die Basis für die darauffolgende iterativ angelegte Landnutzungsänderungsmethode. Deren Ergebnisse dienen direkt als Inputdaten für die hydrologische Modellierung.

Hydrologische Modellierung

Für die hydrologische Modellierung von Landnutzungs- und Klimaänderungen wurde in der vorliegenden Studie das deterministische und flächendifferenzierte Modell WASIM-ETH ausgewählt, welches eine ausgewogene Mischung aus physikalisch begründeten und konzeptionellen Ansätzen darstellt. WASIM-ETH wurde ursprünglich dafür konzipiert, den Einfluss von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt von Flussgebieten zu simulieren, weswegen große Sorgfalt auf die Interpolation der meteorologischen Eingangsgrößen sowie die Modellierung der Verdunstung verwendet wurde. Um den Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung noch besser als bisher berücksichtigen zu können, wurde das Bodenmodell im Rahmen dieses Projektes um verschiedene Aspekte wie die explizite Berücksichtigung von Makroporenfluss, Verschlammung, Versiegelung mit Anschluss an eine Kanalisation und von dezentralen Rückhalten ergänzt.

Auswirkungen von Landnutzungsänderungen

Für die Untersuchungsgebiete wurden Szenarien erstellt, welche die Veränderung aller drei Hauptlandnutzungskategorien – versiegelte, land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen – abdecken.

Für alle drei Gebiete wurden Verstädterungsszenarien berechnet. Neben einer zukünftigen Versiegelungszunahme wurde anhand von historischen Karten aber auch das Ausmaß der Versiegelung in der Mitte des 19. Jahrhunderts berücksichtigt. Der historische Zustand diente außerdem zur Validierung der Szenariotechnik für Verstädterung. Dabei wurde verglichen, wie gut das Landnutzungsmodell die Entwicklung vom historischen Zustand bis zur heutigen Situation nachzeichnet.

Der Einfluss einer veränderten landwirtschaftlichen Nutzung bzw. Bodenbearbeitung wurde anhand von Flächenstilllegung und der Umstellung auf Mulchsaat untersucht.

Veränderungen im Waldanteil wurden mittels Aufforstung von landwirtschaftlichen Grenzertragsstandorten und Windwurf infolge von Stürmen durchgeführt.

Exemplarische Ergebnisse der hydrologischen Modellierung für die drei Untersuchungsgebiete sind folgende:

- (1) Am Beispiel der Lein konnte gezeigt werden, welche große Bedeutung die *lagegetreue Darstellung der Landnutzung* im hydrologischen Modell insbesondere bei kleinräumig auftretenden Niederschlägen z.B. aus Gewitterzellen hat. Die Lage eines fiktiven Siedlungszentrums hatte bei der Modellierung einen erheblichen Einfluss sowohl auf die Höhe der Hochwasserspitze als auch auf die Gestalt der Hochwasserganglinie.
- (2) Eine Zunahme der *Siedlungsflächen* im Einzugsgebiet der Lein um 50% hätte den Simulationen zufolge je nach Rahmenbedingungen sehr unterschiedliche Auswirkungen: selbst bei gleichem Wiederkehrintervall des Hochwassers von etwa 3 Jahren schwankt danach die Zunahme des Hochwassermaximums zwischen 0% für ein *langanhaltendes zyklonales Niederschlagsereignis* mit hoher Vorfeuchte und beinahe 30% für einen *intensiven Gewitterregen* bei geringer Vorfeuchte.

- (3) Wie das Beispiel des Lennegebietes illustriert, ist *Waldbestand* entgegen der nach wie vor weit verbreiteten Meinung kein Indiz für einen per se geringen Beitrag zur Hochwasserentstehung. Richtig ist, dass ein natürlicher Wald bessere Speichereigenschaften (Interzeption, Streuspeicher) aufweist als andere Landnutzungen und Waldböden oft gute Infiltrationseigenschaften besitzen. Da aber Wälder in Mittelgebirgen häufig auf geringmächtigen Böden stocken, sind Waldflächen insbesondere in Kombination mit geringdurchlässigem Festgestein prädestiniert für *rasche unterirdische Abflussbildung*.
- (4) Die Anwendung eines *Mulchsaatszenarios* für die Lein hat ergeben, dass die *Unsicherheit der Modellierung von Makroporendynamik* während konvektiver Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten weit größer ist als der mutmaßliche Einfluss des Mulchsaatverfahrens auf die Hochwasserentstehung in der *Mesoskala*. Inwiefern dies ein Artefakt des Modellansatzes ist, bedarf, soweit möglich, der experimentellen Überprüfung.
- (5) Die starke hochwasserverschärfende Wirkung von *Versiegelung* bei *kurzen und intensiven Gewitterniederschlägen kleiner Jährlichkeit* konnte beispielsweise für das Einzugsgebiet der Körsch demonstriert werden. Dort wäre den Simulationen zufolge das Abflussmaximum eines im Jahr 1992 aufgetretenen konvektiven Ereignisses im Siedlungszustand des Jahres 1836 (1,3% Siedlungsfläche) nur rund ein Sechstel so groß gewesen wie im Ist-Zustand (25% Siedlungsfläche).
- (6) Prinzipiell unterliegen gezielt eingesetzte *Versickerungsmaßnahmen für versiegelte Flächen in Siedlungsgebieten* denselben Einschränkungen, wie sie für die Auswirkungen des Einflusses der Versiegelung selbst formuliert worden sind. Dies haben Simulationen für das Leingebiet gezeigt. Der Nutzen von Versickerungsmaßnahmen ist dementsprechend groß während intensiver konvektiver Niederschläge mit geringer Vorfeuchte, deutlich kleiner aber hingegen für langanhaltende advektive Niederschläge mit hoher Vorfeuchte, da dann die Aufnahmefähigkeit sowohl des natürlichen Bodens als auch der Versickerungsanlage zurückgeht.

Die anhand der hydrologischen Modellierung gewonnenen Erkenntnisse sind jedoch nicht auf die Einzugsgebiete von Lein, Körsch und Lenne beschränkt, sondern lassen auch die Ableitung allgemein gültiger kausaler Zusammenhänge zu:

- (1) Bedeutung der *Niederschlagscharakteristika*:
 - (a) *Niederschlagsintensität*
Der Einfluss der Landoberfläche ist für *konvektive* Ereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten größer als für *advektive* Niederschlagsereignisse mit meist deutlich geringeren Niederschlagsintensitäten.
 - (b) *Niederschlagsvolumen*
Je größer das Niederschlagsvolumen, desto geringer ist der Einfluss der Landoberfläche auf die Hochwasserentstehung.
- (2) Bedeutung der *Anfangsbedingungen*:
Je trockener das Gebiet zu Beginn des Ereignisses, desto größer ist der Einfluss der Landoberfläche auf die Hochwasserentstehung.
- (3) Bedeutung der *Infiltrationsbedingungen*:
Liegt die Infiltrationskapazität in derselben Größenordnung wie die Niederschlagsintensität, dann ist der Einfluss von Änderungen der Landoberfläche für die Hochwasserentstehung am größten.
- (4) Bedeutung der *Geomorphologie*:
Stellt die Durchlässigkeit der Bodenoberfläche keine Begrenzung für die Infiltration dar, so ist der *Gesteinsuntergrund* der entscheidende Faktor für die Hochwasserentstehung. Die Landnutzung übt dann nur einen sehr geringen Einfluss auf die Abflussbildung aus.
- (5) Bedeutung der *Ereignisgröße*:
Die Höhe des Abflussmaximums oder dessen *Jährlichkeit* als Maß für die Größe eines Hochwasserereignisses ist ein nur bedingt tauglicher Indikator für die Stärke des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung. Die *Jährlichkeit* sagt weder etwas über die meteorologischen Randbedingungen eines Hochwassers aus noch über die räumliche Verteilung der Hochwasserentstehung im Gebiet.
- (6) Bedeutung der *räumlichen und zeitlichen Skala*:
In Gebieten von bis zu mehreren hundert Quadratkilometern können sowohl konvektive als auch advektive Niederschlagsereignisse zu Hochwassern führen.

In den großen Flussgebieten Mitteleuropas entstehen Hochwasser hingegen vor allem als Folge großräumiger und langanhaltender zyklonaler Regenfälle – unter Umständen in Kombination mit Schneeschmelze. Für diese Art von Ereignissen ist der Einfluss der Landoberfläche geringer als für konvektive Starkniederschläge. Konvektive Niederschlagsereignisse sind in großen Gebieten aufgrund deren lokalen Charakters von untergeordneter Bedeutung.

Auswirkungen von Landnutzungsänderungen

Die hydrologischen Modellierungsergebnisse zeigen, dass pauschale Aussagen zum Einfluss der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung aufgrund der entscheidenden Bedeutung der *Randbedingungen* unzulässig sind. Zu diesen Randbedingungen zählen in erster Linie Gebiets- und Ereigniseigenschaften, die Witterung vor dem Ereignis sowie der räumliche und zeitliche Maßstab, über den Aussagen getroffen werden. Dies wurde in der vorliegenden Studie konsequent berücksichtigt, in der Vergangenheit aber häufig vernachlässigt.

Allgemein gilt aber, dass die Landnutzung einen deutlichen Einfluss auf die Hochwasserentstehung haben kann. Dies gilt am meisten für *versiegelte Flächen*, die insbesondere bei intensiven Gewitterregen in der Regel eine starke *Abflussverschärfung* bewirken. Bei langanhaltenden advektiven Niederschlägen ist deren negativer Einfluss in der Regel zwar geringer, kann aber dennoch abhängig von den Randbedingungen auch für den Hochwasserverlauf in großen Flussgebieten relevant sein und sollte daher nicht vernachlässigt werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung fließen in das Projekt LAHOR ein, das sich mit dem Einfluss der Landoberfläche und von Ausbaumaßnahmen auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet beschäftigt. LAHOR ist Bestandteil der INTERREG Rhein-Maas-Aktivitäten (IRMA) der Europäischen Union.

Auswirkungen von Klimaänderungen

Die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Hochwasserentstehung werden anhand eines

Verfahrens (*expanded downscaling*) untersucht welches erlaubt, das Klimasignal eines in der Vergangenheit aufgetretenen hydrologischen Jahres durch ein zukünftiges Klimasignal zu ersetzen, ohne dessen Witterungsverlauf zu ändern. Mit Hilfe dieses Kunstgriffs ist es möglich, das hydrologische Jahr 1994 direkt einem hydrologischen Jahr 1994* gegenüberzustellen, dem das Klima des Zeitraums von 2070 bis 2097 aufgeprägt wird, wie es von einem Globalen Zirkulationsmodell simuliert wurde.

Für alle drei Gebiete ergibt sich im Szenario-Zustand für das letzte Drittel des 21. Jahrhunderts neben einer Erwärmung eine deutliche *Verschiebung des Niederschlagsregimes* sowie ein ungefähr 20prozentiger *Rückgang des Jahresniederschlags* für die betrachteten Ausschnitte des Rheingebietes. Der Rückgang des Jahresniederschlags ist in erster Linie die Folge einer drastischen Abnahme der Niederschläge in den Sommermonaten. Die Verschiebung im Niederschlagsregime setzt sich zusammen aus einer tendenziellen Abnahme der Niederschläge insbesondere im November und Dezember sowie einer Zunahme vor allem in den Monaten März und April. Entsprechend wird in Zukunft mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit für Weihnachtshochwasser und einem gesteigerten Auftreten von Frühjahrshochwassern zu rechnen sein. Außerdem weisen die Klimaszenarien auf eine zunehmende Variabilität im Bereich von Starkniederschlägen und damit auf eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten extremer Niederschläge hin.

Zusätzlich zu den *lokalen* Folgen einer zukünftig vermehrten Entstehung von *Frühjahrshochwassern* infolge *ergiebiger advektiver Niederschläge* hätte dies auch negative Auswirkungen auf die Hochwassersituation im *gesamten Rhein-Einzugsgebiet*. Damit stiege die Wahrscheinlichkeit, dass derartige niederschlagsbedingte Hochwasser im deutschen Teil des Rheingebietes mit *Schneeschmelzabflüssen* aus den Alpen zusammentreffen.

Stichworte

Hochwasser, Landnutzungsänderung, Klimaänderung, Landnutzungsszenarien, Klimaszenarien, Hydrologische Modellierung, Versiegelung, Landwirtschaft, Forstwirtschaft