

Klaus Schneeberger, Johannes Bellinger, Moritz Samm, Matthias von Stackelberg & Tobias Lang

Hochwassermuster im Einzugsgebiet der Isar

Flood pattern in the Isar river catchment

Hochwasserereignisse treten in der Regel in einer räumlich heterogenen Ausprägung auf. Ihre systematische Analyse lässt statistische Aussagen über die Interaktion einzelner Gewässerabschnitte innerhalb eines Beobachtungszeitraums zu. Basierend auf Abflussspitzen an ausgewählten Pegelstandorten werden räumliche Strukturen von Abflussereignissen im Einzugsgebiet der Isar mit der Methode der bedingten Häufigkeit untersucht. So wird der Frage nachgegangen, inwieweit Abhängigkeiten von Abflussspitzen für ausgewählte Standorte an der Oberen, Mittleren und Unteren Isar sowie an der Donau von oberhalb gelegenen Pegeln bestehen. Es konnte dabei gezeigt werden, dass Abflussspitzen im Bereich der Oberen Isar stark miteinander korrelieren und eine hohe Abhängigkeit der Abflussspitzen entlang der gesamten Isar von der Abflussbildung in ihrem Kopfeinzugsgebiet besteht. Im Gegensatz dazu ist die Abhängigkeit der Abflussspitzen an der Donau unterhalb der Isar-Einmündung vom alpin geprägten Kopfeinzugsgebiet der Isar gering und nimmt mit zunehmender Ausprägung der Abflussspitzen asymptotisch ab. Die vorliegende Studie trägt zum besseren Verständnis der vorherrschenden räumlichen Hochwassermuster im Einzugsgebiet der Isar bei. Der angewandte Ansatz kann auf beliebige Gebiete mit ausreichend hoher Verfügbarkeit von Abflussmessdaten übertragen werden.

Schlagwörter: Hochwassermuster, zeitliche und räumliche Pegelabhängigkeit, Ausdehnung von Hochwasserereignissen

Flood events usually have a temporal and spatial heterogeneous characteristic. A statistical approach, based on the concept of conditional frequency, is used to analyse the characteristics of widespread high streamflow events in the Isar river catchment. The spatial pattern and the dependence between river segments are examined for river gauging stations at the Upper, Middle and Lower Isar as well as the Danube river at gauges upstream and downstream of the confluence of both rivers. The results show a strong dependence between high streamflow for the alpine headwater catchments and the representative gauges at the outlet of the Upper and Lower Isar catchments. For the Middle and Lower Isar, a high dependence between the alpine headwater catchments and the site at the outlet of these regions was detected as well. In contrast, the dependency between the alpine headwater catchments and the gauge in Hofkirchen at the Danube River is low and decreases asymptotically with increasing intensities. This study contributes to a better understanding of the prevailing spatial flood patterns in the Isar river catchment. The applied approach can be transferred to any region with good availability of streamflow measurements.

Keywords: Flood pattern, spatial and temporal dependencies, extension of flood events

1 Einleitung

Aufgrund von unterschiedlichen Niederschlagszentren und zeitlichen Niederschlagsverläufen, aber auch verschiedenen hydrologischen Systemzuständen (Vorfeuchte etc.) hat jedes Hochwasser seine eigene Ausprägung. Obwohl Hochwasserereignisse somit äußerst heterogen in ihrem räumlichen und zeitlichen Verlauf sind, treten häufig ähnliche Zusammenhänge zwischen Teileinzugsgebieten bzw. ihren Flussläufen auf. In der Regel erlangt man Kenntnis über diese Zusammenhänge durch eine retrospektive Untersuchung historischer Einzelereignisse, Niederschlag-Abfluss-Modellierungen bzw. hydrodynamische Simulationen. Eine weitere Möglichkeit bietet die bedingte Häufigkeitsanalyse, bei der systematisch Abflussspitzen unterschiedlicher Pegelstationen betrachtet werden (KEEF et al., 2009; SCHNEEBERGER et al., 2018).

Die vorliegende Studie befasst sich mit den räumlichen Zusammenhängen von Abflussspitzen der Isar. Ihr Einzugsgebiet ist als Untersuchungsgebiet gut geeignet, da die Isar auf der einen Seite diverse wasserwirtschaftliche Grundfunktionen sowie wertvollen städtischen Natur- und Erholungsraum, beispielsweise für die Metropolregion München, bietet. Auf der anderen Seite geht von ihr auch ein erhebliches Risiko aus, wie die Hochwasserereignisse der Jahre 1813, 1899, 1954, 1999, 2005 und 2013 exemplarisch zeigen (BERZ, 2020; BFG, 2013; BLÖSCHL et al., 2013; CHORYŃSKI et al., 2012; HD, 1900; SCHRÖTER et al., 2015). Im Einzugsgebiet

der Isar haben natürliche und von Menschenhand errichtete Retentionsräume einen wesentlichen Einfluss auf den Hochwasserabfluss. Während an der Amper und der Loisach, zwei linksufrigen Zubringern der Isar, die Hochwasserwellen durch zahlreiche Seen und Moore gedämpft werden, stellte bis in die 1950er Jahre der im Karwendel gebildete Hochwasserabfluss der Isar ein großes Risiko für die Metropole München dar. Seit der Fertigstellung des Sylvensteinspeichers im Jahre 1959 bildet der Hochwasserrückhalt durch die Talsperre eine zentrale Komponente des Hochwasserschutzsystems an der Isar (WASSERWIRTSCHAFTSAMT WEILHEIM, 2009; STMUV 2014). Die Wirkung von potenziellen Retentionsräumen im Einzugsgebiet der Isar, deren optimale Lage sowie ihr regionaler und überregionaler Nutzen hinsichtlich einer Risikoreduktion ist Inhalt verschiedener Studien (SEIBERT et al., 2014; STAHL et al., 2016; STAHL & CASPER, 2017; STAHL & HOFSTÄTTER, 2018).

Ergänzend zu den bisherigen Studien analysiert die vorliegende Arbeit das Zusammenwirken von Abflussspitzen an der Isar und ihren Zubringern mittels bedingter Häufigkeitsanalyse. Dabei wird der Frage nachgegangen, inwieweit eine räumliche Abhängigkeit von Abflussspitzen am Unterlauf der Isar von den Abflussspitzen im Kopfeinzugsgebiet besteht, die durch die erwähnten Retentionsräume zum Teil stark beeinflusst werden. Dazu werden exemplarische Pegel an Flussabschnitten der Isar ("Bezugspegel") herangezogen und deren Abhängigkeit auf oberhalb gelegene Pegelstandorte ("Oberliegerpegel") untersucht. Für eine überre-

gionale Einordnung wird deren Abflussverhalten (Abflussspitzen) mit zwei weiteren Pegelzeitreihen an der Donau in Beziehung gesetzt. Die statistische Analyse der räumlichen Abhängigkeit von Abflussspitzen kann Praktiker/innen bei der objektiven Einordnung der räumlichen Zusammenhänge, die ansonsten möglicherweise subjektiv vorgenommen würden, helfen.

KEEF et al. (2009) entwickelten eine Methode zur Analyse der räumlichen Abhängigkeit von hohen und extremen Abflüssen bzw. Niederschlägen, die dem Ansatz der bedingten Häufigkeit folgt. Dabei wird die relative Häufigkeit für eine definierte Abflussspitze an einem Standort untersucht, unter der Bedingung, dass an einem weiteren Standort ein gewisser Grenzwert erreicht oder überschritten wird. KEEF et al. (2009) entwickelten dabei zwei (räumliche) Abhängigkeitsmaße ($P_{ij}(p)$ und $N_j(p)$). Nachdem die Methode zunächst auf ausgewählte Standorte in Großbritannien angewandt wurde (KEEF et al., 2009), konnten SCHNEEBERGER & STEINBERGER (2018) deren Übertragbarkeit auf andere Regionen am Beispiel des österreichischen Bundeslands Vorarlberg zeigen. Dabei bestätigte sich unter anderem, dass im alpinen Kontext die Wahl der Eingangsgrößen bzw. die Definition der verwendeten unabhängigen Abflussspitzen von großer Bedeutung ist. Zudem wurden die beiden räumlichen Abhängigkeitsmaße sowie eine Clusteranalyse im gesamten Bundesgebiet der Schweiz angewandt, um die räumliche Ausprägung häufiger Hochwasser darzustellen (SCHNEEBERGER et al., 2018).

In den genannten Studien werden die Grenzwerte zur Bestimmung der Abflussspitzen an Bezugs- und Oberliegerpegeln mittels eines identischen Perzentilwerts festgelegt. Bei praktischen Anwendungen ist jedoch vielmehr die Kenntnis des Zusammenwirkens von unterschiedlichen Ausprägungen der Abflussspitzen von Interesse. Daher wird die Methode von KEEF et al., 2009 in dieser Studie erweitert und das räumliche Maß $P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond})$ eingeführt. Dabei werden die Perzentilwerte, die an den Oberliegerpegeln die Grenzwerte definieren, im Vergleich zu jenen am Bezugspegel variiert. Somit kann beispielsweise die relative Häufigkeit ermittelt werden, dass am Oberliegerpegel eine moderate Abflussspitze auftritt, wenn gleichzeitig am Bezugspegel eine hohe Abflussspitze beobachtet wurde. Diese Erweiterung der Methode ermöglicht eine allgemeingültigere Aussage über die räumliche Ausprägung von Hochwassermustern im Untersuchungsgebiet. Die angewandte Häufigkeitsanalyse greift auf beobachtete Messreihen zurück, wodurch ausschließlich Aussagen über Zusammenhänge von häufig auftretenden Hochwassern möglich sind.

2 Untersuchungsgebiet und Daten

Das Untersuchungsgebiet umfasst das Einzugsgebiet der Isar von ihrer Quelle im Karwendel bis zu ihrer Mündung in die Donau (Abb. 1). Die Isar entwässert nach einer Fließlänge von über 280 km eine Fläche von rund 8.900 km². Ihr Einzugsgebiet befindet sich am Nordrand der Alpen und stellt eine topographisch sehr heterogene Region dar. Die Abflussverhalten der Kopfeinzugsgebiete von Isar, Loisach und Ammer sind vor allem durch die alpinen und voralpinen Wildbäche gekennzeichnet. An der Loisach fungieren das Murnauer Moos, der Kochelsee sowie die Loisach-Kochelsee-Moore als natürliche Retentionsräume und dämpfen die steilen Hochwasserwellen ab. Da weitere Zubringer aus der Münchener Schotterebene keinen maßgeblichen Einfluss auf das Abflussgeschehen haben, ist die Mittlere Isar wei-

terhin stark vom Abfluss aus den Alpen sowie dem Alpenvorland geprägt. Der einzige Zufluss, der zu einer wesentlichen Verschärfung eines Hochwassers führt und das Abflussgeschehen der Unteren Isar beeinflussen kann, ist die nördliche von Moosburg in die Isar mündende Amper (LfU, 2011; STMUV, 2015). Ihren Ursprung bildet die in den Ammergauer Alpen entspringende Ammer. Ihre verhältnismäßig schnelle und steile Hochwasserwelle wird jedoch durch die natürliche Retention des Ammersees zu der vergleichsweise flachen und langgezogenen Hochwasserwelle der Amper umgeformt. Ab Landshut fließen der Isar keine weiteren erwähnenswerten Nebengewässer zu, die den Hochwasserabfluss maßgeblich verändern. Somit wird das Hochwassergeschehen der Unteren Isar hauptsächlich durch die Isar und deren oberstromige Zuflüsse charakterisiert (LfU, 2011; STMUV, 2015).

Den Beitrag einzelner Teileinzugsgebiete an der Abflussspitze der Isar zeigt Abbildung 2 am Beispiel der mittleren Jahresmaxima der betrachteten Abflusszeitreihen (MHQ). In dem Abflussschema sind alle relevanten Fließgewässer, natürliche Seen und künstliche Wasserspeicher dargestellt. Die Strichstärke eines Flussabschnittes wurde entsprechend dem MHQ des oberhalb gelegenen Pegels skaliert und bis zum nachfolgenden Pegel, Zufluss oder See zugeordnet. Das Abflussschema zeigt den mittleren Hochwasserabfluss und hilft, den Beitrag einzelner Flussabschnitte zueinander einzuschätzen, ohne jedoch eine Auskunft zur Gleichzeitigkeit von einzelnen Abflussspitzen zu bieten. Auffallend ist der verhältnismäßig geringe MHQ-Beitrag der Amper. Das Abflussschema zeigt außerdem die deutliche Reduzierung der Hochwasserabflussspitze an der Oberen Isar durch den Sylvensteinspeicher. Dieser dämpft die Hochwasserwelle an der Isar soweit ab, dass Hochwasserereignisse in der Regel in den

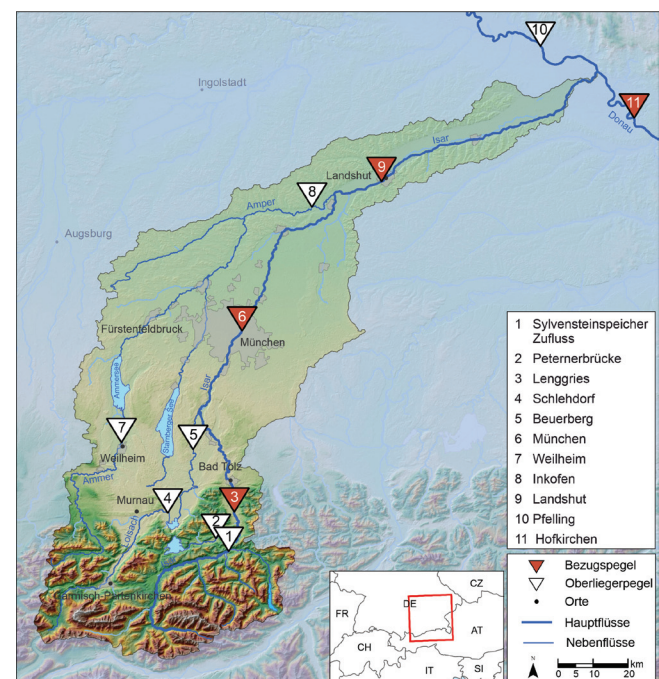
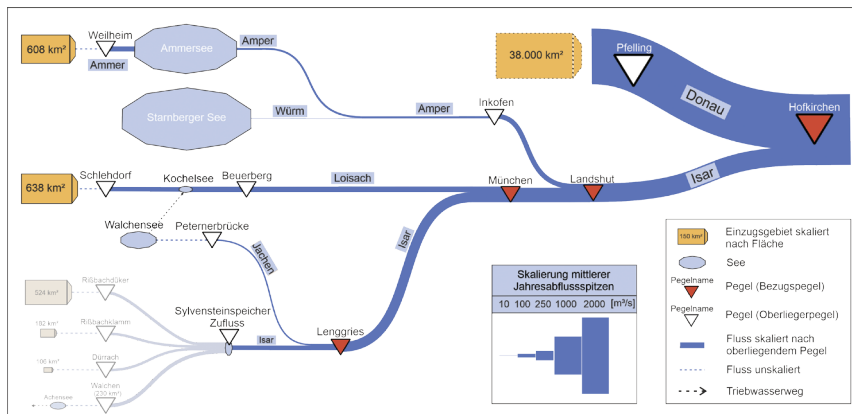


Abbildung 1

Einzugsgebiet der Isar mit den betrachteten elf Pegelstationen.
Catchment of the Isar River including the eleven relevant river gauging stations.

**Abbildung 2**

Abflussschema des betrachteten Untersuchungsgebiets. Die Skalierung der Linien erfolgt nach den mittleren Jahresmaxima. Grau hinterlegte Pegel und Flussabschnitte werden in der Studie nicht unmittelbar berücksichtigt und zeigen die Auswirkung des Sylvensteinspeichers.

Schematic drawing of river reaches. The line thickness corresponds to the mean values of the appropriate annual maximum discharge. River gauges and sections in grey colour are not directly taken into account in the study, but are helpful to better understand the influence of the Sylvenstein reservoir for flood formation.

Städten Bad Tölz und München keine Schäden verursachen. Um zu überprüfen, inwieweit der Hochwasserabfluss entlang der gesamten Isar von der Abflussbildung im Kopfeinzugsgebiet abhängt, wurden an jedem Flussabschnitt der Isar exemplarische Pegel (Bezugspegel) ausgewählt und deren Abhängigkeit von ausgewählten Pegelstandorten im Kopfeinzugsgebiet untersucht. Stellvertretend wurde für die Obere Isar der Pegel Lenggries, für die Mittlere Isar der Summenpegel München und für die Untere Isar der Summenpegel Landshut betrachtet. Um zusätzlich die Abhängigkeit des Hochwasserabflusses an der Donau unterhalb der Isar-Einmündung von deren Kopfeinzugs-

gebiet herauszuarbeiten, wurde der Pegel Hofkirchen in die Studie aufgenommen. Die Pegelstandorte im Kopfeinzugsgebiet der Isar, Loisach und Ammer sind Tabelle 1 sowie Abbildung 1 zu entnehmen. Sie befinden sich an repräsentativen Standorten von relevanten Zuflüssen zur Isar. Entsprechend der Bezugspegel werden in dieser Studie die vier Abflussmuster Lenggries, München, Landshut und Hofkirchen betrachtet. Ein Abflussmuster besteht aus dem jeweiligen Bezugspegel (dargestellt in roter Farbe in Abb. 1 und 2) und zwei bis sieben Oberliegerpegeln (Tab. 2).

Grundsätzlich liegen die Zeitreihen in hoher zeitlicher Auflösung, in ausreichender Länge und Datenqualität vor. Die gewählten Pegelstationen weisen keine Umläufigkeiten auf und die Verteilung der Abflussspitzen, die mit verschiedenen Grenzwerten definiert werden, ist im jeweiligen Betrachtungszeitraum der Abflussmuster homogen.

Aufgrund der unterschiedlichen Einzugsgebietsgrößen der betrachteten Abflussmuster wird bei der Auswahl der Datengrundlage auf Zeitreihen in Stunden- bzw. Tagesauflösung zurückgegriffen. Für die Festlegung der geeigneten Datengrundlage gibt, neben dem in den Methoden beschriebenen Ansatz zur Festlegung der durchschnittlichen Dauer von Abflussereignissen, die mittlere Fließzeit der Abflusswelle Auskunft (Tab. 2). Der angewandte Ansatz erfordert lückenlose Zeitreihen. Betrachtet man Daten in Stundenaufösung, weisen die vorliegenden Zeitreihen der betrachteten Pegelstationen Lücken im Durchschnitt von 1,5 ‰ und von maximal 4,8 ‰ auf. Aufgrund des sehr geringen Ausmaßes der Lücken wurden die-

Tabelle 1

Verwendete Pegelzeitreihen inklusive der Pegel- und Gewässernamen, der Einzugsgebietsgrößen (A_{EO}) und der Datenverfügbarkeit in täglicher (Tagesmaximalwerte; Q_{max}^{TX}) und stündlicher Auflösung (Stundendaten; $\bar{Q}^{HT}$).

Runoff time series including the name of the gauging station, the river name, the catchment size (A_{EO}) and the availability of data in daily (daily maximum values; Q_{max}^{TX}) and hourly resolution ($\bar{Q}^{HT}$).

Messstelle				Datenverfügbarkeit	
Name	Gewässer	A_{EO} [km ²]	Abk.	Q_{max}^{TX}	$\bar{Q}^{HT}$
Sylvensteinspeicher Zufluss	Isar	1.130,0	Syl@Isa	1960 - 2018	1965 - 2018
Peternerbrücke	Jachen	59,5	Pet@Jac	1947 - 2018	1970 - 2018
Lenggries	Isar	1.295,5	Len@Isa	1949 - 2018	1970 - 2018
Schlehdorf	Loisach	638,1	Sch@Loi	1925 - 2018	1981 - 2018
Beuerberg	Loisach	1.051,1	Beu@Loi	1950 - 2018	1970 - 2018
München	Isar	2.814,0	Mün@Isa	1958 - 2018	1970 - 2018
Weilheim	Ammer	608,0	Wei@Amm	1925 - 2018	1970 - 2018
Inkofen	Amper	3.097,2	Ink@Amp	1925 - 2018	1970 - 2018
Landshut	Isar	7.971,0	Lan@Isa	1958 - 2018	1970 - 2018
Pfelling	Donau	37.774,8	Pfe@Don	1925 - 2018	1970 - 2018
Hofkirchen	Donau	47.517,8	Hof@Don	1900 - 2018	1970 - 2018

Tabelle 2

Mittlere Fließzeit der unverformten Hochwasserwelle in Stunden vom Oberliegerpegel (dargestellt als Zeilen) zum Bezugspegel (Spalten) (Quelle: [www.hnd.bayern.de / Wasserwirtschaftsamt Weilheim](http://www.hnd.bayern.de/WasserwirtschaftsamtWeilheim)).
Mean concentration time between adjacent gauges. The dependent sites are displayed as lines and the conditioning sites as columns (source: [http://www.hnd.bayern.de / Wasserwirtschaftsamt Weilheim](http://www.hnd.bayern.de/WasserwirtschaftsamtWeilheim)).

Oberlieger- pegel	Fließzeit der unverformten HW-Welle [h]			
	Len@Isa	Mün@Isa	Lan@Isa	Hof@Don
Syl@Isa	2,5	13	20	41
Pet@Jac	2,5	13	20	41
Sch@Loi	-	15 - 35	21 - 42	43 - 63
Beu@Loi	-	6	13	34
Wei@Amm	-	-	90	110
Ink@Amp	-	-	5	26
Pfe@Don	-	-	-	3

se mit dem jeweiligen Stunden- bzw. Tagesmaximalwert, der im Durchschnitt über den gesamten Beobachtungszeitraum in der Zeitreihe zum Zeitpunkt der Lücke auftritt, ersetzt. Da der Fokus der Untersuchung auf der räumlichen Analyse von Abflussspitzen liegt, sind die Auswirkungen durch die Mittelwertbildung als vernachlässigbar einzustufen.

3 Methode

Die Studie untersucht räumliche Abhängigkeiten von Abflussspitzen an verschiedenen Standorten bei großräumig auftretenden Hochwasserereignissen. Mit der angewandten Häufigkeitsanalyse werden ausschließlich beobachtete Messreihen ausgewertet, weswegen Aussagen nur im unteren Bereich von häufig auftretenden Hochwasserereignissen möglich sind. Aufgrund der Länge der Zeitreihen und der erforderlichen Mindestanzahl an untersuchten Abflussspitzen lassen sich Rückschlüsse für Abflussspitzen ziehen, die in der Regel maximal im Bereich von 5- bis 10-jährlichen Ereignissen liegen. In der Folge werden diese als "hohe Abflussspitze" bezeichnet. Die Definition der Ausprägung von Abflussspitzen erfolgt dabei über den Grenzwert $q_p(X)$, wobei p die empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit und X die Gesamtheit der Beobachtungen (hier: alle Zeitschritte der Pegelmessreihe, die in m^3/s vorliegt) darstellt. Die Untersuchung beschränkt sich primär nicht auf die Analyse einer einzelnen Pegelzeitreihe, sondern untersucht vielmehr das gemeinsame Auftreten von Ereignissen mit mittlerer und hoher Abflussspitze an verschiedenen Standorten innerhalb einer bestimmten Zeitspanne. Dazu wird in einem ersten Schritt die zeitliche Ausprägung des Abflussereignisses analysiert, um relevante Zeitspannen abzugrenzen und sogenannte Blockmaxima für die Analyse der räumlichen Abhängigkeiten zu definieren.

Zeitliche Ausprägung der Abflussereignisse

Für die weitere Auswertung werden Reihen mit einer gleichen Anzahl an Einträgen an allen Standorten (d. h. kongruente Ereignisse) benötigt. Die Festlegung der relevanten Zeitspannen, in denen die Abflussspitzen auftreten, erfolgt mithilfe einer statistischen Methode. Für die Ermittlung ihrer Länge wird der Ansatz von SCHNEEBERGER et al. (2018) angewandt. Dieser gibt die re-

lative Häufigkeit $R_i(p, L)$ dahin gehend, dass Abflussereignisse an einer Pegelmessstelle i eine bestimmte Länge $L(L \geq 1)$ aufweisen, wie folgt an:

$$R_i(p, L) = H(X_{i,t}, \dots, X_{i,t+L-1}) \geq q_p | X_{i,t} \geq q_p \wedge X_{i,t-1} < q_p \wedge X_{i,t+L} < q_p \quad (1)$$

Für den Zeitschritt t der Zeitreihe $X_{i,t}$ wird somit untersucht, ob der Grenzwert q_p (hier definiert durch die empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit p) überschritten wird. $R_i(p = 0,99, L = 2) = 0,4$ bedeutet demnach, dass in der betrachteten Zeitreihe 40 % der Abflussereignisse, die durch das 99ste Perzentil definiert werden, exakt zwei Tage andauern. Wird eine Zeitreihe der Tagesmaximalwerte als Datengrundlage herangezogen, tritt ein Abfluss, der durch das 99ste Perzentil definiert wird und demnach den Grenzwert $q_{p=0,99}$ überschreitet, im Mittel ca. 3,6 mal im Jahr auf. Nachfolgend lässt sich für die Länge von Abflussereignissen an n Standorten eine durchschnittliche relative Häufigkeit ermitteln (SCHNEEBERGER et al., 2018):

$$R(p, L) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i(p, L) \quad (2)$$

Da sich die Unterschreitungswahrscheinlichkeit p jeweils auf die vorliegende Beobachtungszeitreihe bezieht, kann das Maß $R_i(p, L)$ unabhängig von ihrer zeitlichen Auflösung (Stundenauflösung (H1) und Tagesmaxima (TX)) angewandt werden.

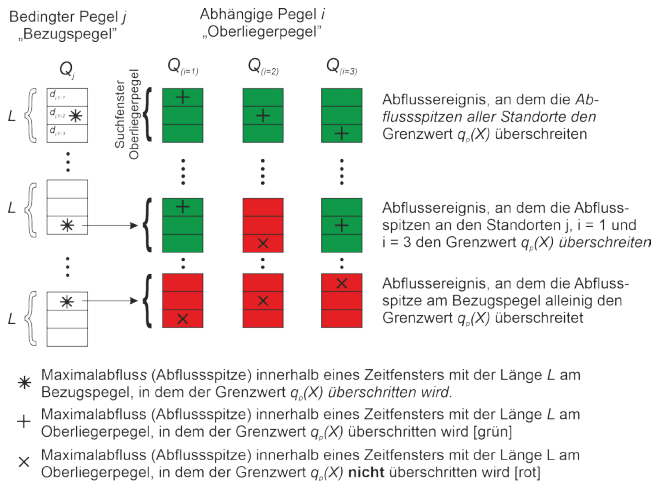
Analyse der räumlichen Abhängigkeiten

Basierend auf dem Maß $R(p, L)$ wird für jedes Abflussmuster die Länge der Zeitspannen zur Abgrenzung eines mehrere Standorte betreffenden Abflussereignisses festgelegt. Die zugrundeliegenden Zeitreihen eines Abflussmusters weisen somit den identischen Zeitraum auf. Innerhalb eines Zeitfensters werden "zeitgleich" aufgetretene Abflussspitzen am Bezugspegel und an den Oberliegerpegeln analysiert. Dabei wird überprüft, ob auch der dortige Grenzwert $q_p(X_i)$ überschritten wird. Abbildung 3 verdeutlicht die Interpretation und Anwendung der sogenannten Blockmaxima Q .

Die Analyse der räumlichen Abhängigkeit folgt der Methode der bedingten Häufigkeit, wobei unter Häufigkeit immer die relative Häufigkeit zu verstehen ist. Die bedingte (auch konditionale) Häufigkeit $P(A|B)$ beschreibt die relative Häufigkeit des Ereignisses A unter der Bedingung, dass das Ereignis B bekannt ist. Entsprechend KEEF et al. (2009) kann die Abhängigkeit zwischen verschiedenen Standorten mit dem räumlichen Abhängigkeitsmaß $P_{ij}(p)$ beschrieben werden:

$$P_{ij}(p) = H(Q_i > q_p(Q_i) | Q_j > q_p(Q_j)) \quad (3)$$

Somit beschreibt $P_{ij}(p)$ die Häufigkeit, dass an einem abhängigen Pegel i (Oberliegerpegel) der Abfluss den lokalen Grenzwert $q_p(Q_i)$ überschreitet, unter der Bedingung, dass der Abfluss am bedingten Pegel j (Bezugspegel) den lokalen Grenzwert $q_p(Q_j)$ ebenso überschreitet (SCHNEEBERGER & STEINBERGER, 2018). Der Grenzwert $q_p(Q)$ wird dabei durch das Perzentil p definiert, das bei der Prozessierung der Blockmaxima sowohl auf den Bezugspegel Q_j als auch den Oberliegerpegel Q_i angewandt wird. Klassischerweise wird bei der Anwendung des räumlichen Ab-

**Abbildung 3**

Datenprozessierung und Interpretation von "gemeinsamen" Abflussereignissen (SCHNEEBERGER et al., 2018, angepasst).

Data preparation and interpretation of "joint" streamflow events (based on SCHNEEBERGER et al., 2018).

hängigkeitsmaßes $P_{ij}(p)$ am Oberlieger- und Bezugspegel derselben Grenzwert $q_p(Q)$ verwendet. Um jedoch nicht ausschließlich dieselben Ausprägungen an den unterschiedlichen Standorten zu vergleichen, werden verschiedene Grenzwerte $q_p(Q)$ zwischen dem Oberliegerpegel und dem Bezugspegel zugelassen. Somit wird beispielsweise das Auftreten der elf höchsten Abflussspitzen am Bezugspegel und den zeitgleich auftretenden Abflussspitzen am Oberliegerpegel verglichen, wobei an diesem die 70 höchsten Spitzen als relevant für die Interpretation eines gemeinsamen Ereignisses erachtet werden. Für die Betrachtung unterschiedlicher Grenzwerte am Bezugspegel ($q_{pcond}(Q_j)$) sowie am Oberliegerpegel ($q_{pdep}(Q_i)$) wird das räumliche Abhängigkeitsmaß $P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond})$ wie folgt eingeführt:

$$P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond}) = H(Q_i > q_{pdep}(Q_i) | Q_j > q_{pcond}(Q_j)) \quad (4)$$

Eine exemplarische Auswertung des adaptierten räumlichen Abhängigkeitsmaßes $P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond})$ am Beispiel des Bezugspegels Landshut und seinen Oberliegerpegeln München und Inkofen wird in Abbildung 4 dargestellt. Folgende Interpretation hilft, die dargestellten Abhängigkeiten zu veranschaulichen:

Markierung (I):

Im Beobachtungszeitraum trat bei den elf höchsten Abflussspitzen am Bezugspegel Landshut mit einer Häufigkeit von 92 % auch am Pegel Inkofen eine Abflussspitze auf, welche zu den 70 höchsten dieses Standorts zählt.

Markierung (II):

Im Beobachtungszeitraum trat bei den 70 höchsten Abflussspitzen am Bezugspegel Landshut mit einer Häufigkeit von 74 % auch am Pegel München eine Abflussspitze auf, welche zu den 105 höchsten dieses Standorts zählt.

Für eine einfachere Interpretation wird für das Maß der Abhängigkeit $P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond})$ eine Einteilung in die folgenden fünf Kategorien eingeführt:

- sehr hohe Abhängigkeit: $P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond}) > 0,8$
- hohe Abhängigkeit: $0,6 < P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond}) \leq 0,8$
- moderate Abhängigkeit: $0,4 < P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond}) \leq 0,6$
- geringe Abhängigkeit: $0,2 < P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond}) \leq 0,4$
- sehr geringe Abhängigkeit: $P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond}) \leq 0,2$

4 Resultate und Diskussion

Zeitliche Ausprägung von Abflussereignissen

Um die typische Dauer von Abflussereignissen für verschiedene Abflussspitzen (definiert durch die unterschiedlichen empirischen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten p) zu untersuchen, wurde die Häufigkeit ihrer durchschnittlichen Länge ($R_i(p, L)$) berechnet. Durch das heterogene Einzugsgebiet der Isar bilden sich an verschiedenen Standorten unterschiedlich lange Ereignisse aus. Daher wurde sowohl auf Daten in Stundenauflösung als auch auf Tagesmaximalwerte für die Auswertung zurückgegriffen. Zeitreihen in Stundenauflösung haben einen höheren Informationsgehalt, jedoch sind sie im Vergleich zu den Tagesmaximalwerten für kürzere Zeiträume verfügbar (Tab. 1). Somit musste jeweils zwischen den detaillierten Informationen und einer längeren Datenverfügbarkeit abgewogen werden. Basierend auf allen elf Pegelzeitreihen (Tagesmaximalwerte) gibt Abbildung 5 einen Überblick über die Häufigkeit der durchschnittlichen Länge von Abflussereignissen für unterschiedliche Unterschreitungswahrscheinlichkeiten und Zeitfenster. Von links nach rechts wird dabei die Häufigkeit für verschiedene Ereignisdauern dargestellt. Die Boxplots fassen die Ergebnisse für verschiedene Ausprägungen der Abflussspitzen (definiert durch p) zusammen. Grün markiert ist jeweils das Mittel über alle vier betrachteten Unterschreitungswahrscheinlichkeiten und es zeigt sich, dass 41 % aller Ereignisse eine Dauer von einem Tag, 69 % eine Dauer von zwei Tagen und 83 % eine Dauer von drei Tagen aufwiesen. Lediglich 4 % der Ereignisse traten über einen Zeitraum von sechs oder mehr Tagen auf. Obwohl sich die Ausprägungen der betrachteten Ereignisse deutlich unterscheiden, variiert der Median der einzelnen Boxplots unabhängig des betrachteten p -Wertes nur gering. Signifikante Unterschiede sind nur bei sehr hohen p -Werten (d. h. hohe Abflussereignisse) und langen Zeitspannen zu erkennen.

Die räumlich differenzierte Betrachtung führte zu unterschiedlichen Blockmaxima pro Abflussmuster. Exemplarisch wird dies anhand von Zeitreihen der Tagesmaximalwerte und $p = 0,997$ (in etwa der jeweilige durchschnittliche Jahresmaximalwert) erläutert. Abbildung 6 stellt jeweils den Anteil der durchschnittlichen Dauer von Abflussereignissen an den elf Pegelstandorten dar. An den für das Abflussmuster Lengries verwendeten Oberliegerpegeln Sylvensteinspeicher und Peternerbrücke dauerten rund 90 % der Abflussereignisse zwei Tage oder kürzer an. So beträgt die über die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten von $p = 0,997, 0,9992$ und $0,9998$ gemittelte durchschnittliche Häufigkeit für ein Zeitfenster von zwei Tagen $R^{H1}(p, L \leq 47) = 0,953$. Ein Blockmaximum von 47 Stunden erfasst somit in der Regel Abflussspitzen, die an den jeweiligen Pegelstandorten auftraten und interpretiert diese als gemeinsames Ereignis. Aufeinanderfolgende Abflussereignisse, die z. B. einen zeitlichen Abstand

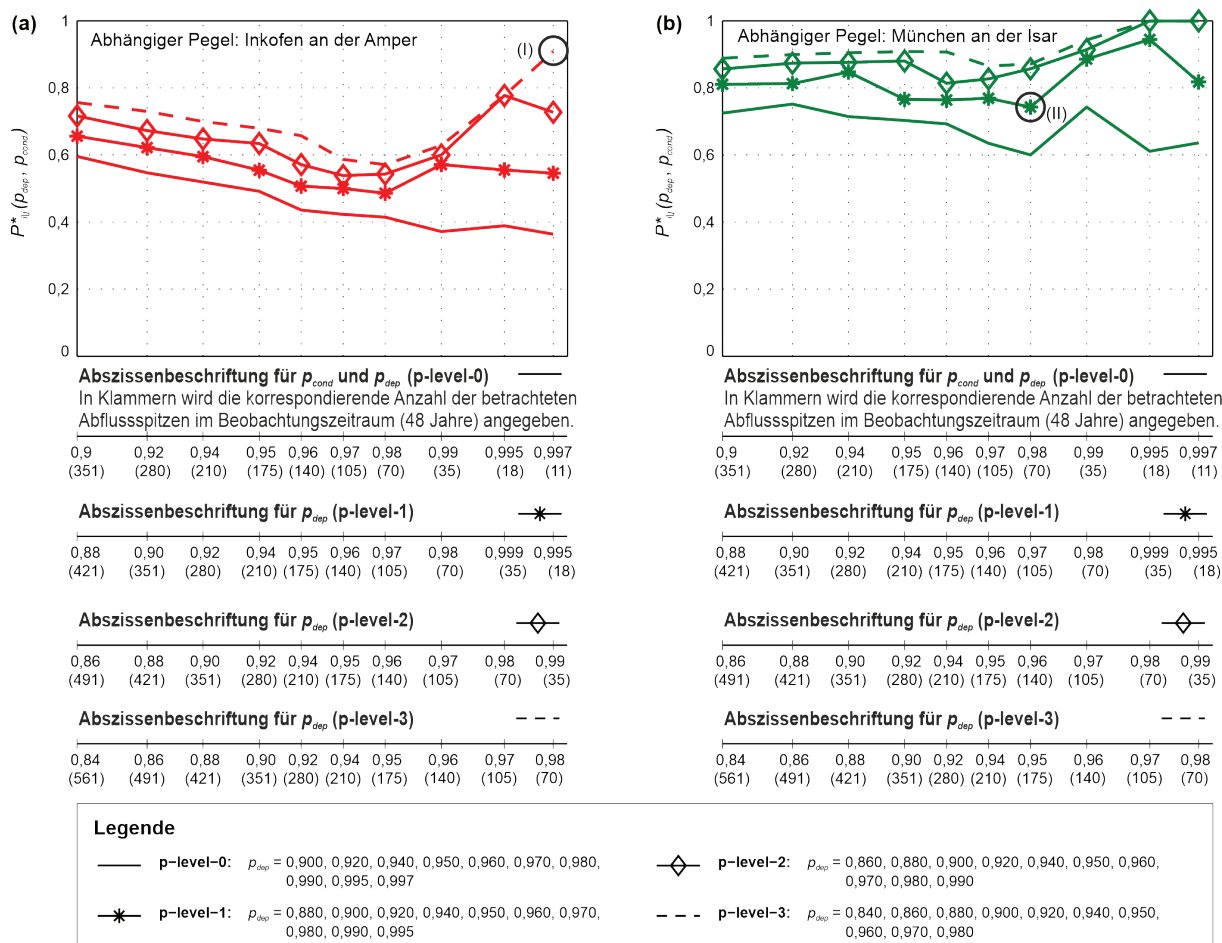


Abbildung 4

Exemplarische Darstellung des räumlichen Abhängigkeitsmaßes $P^*_{ij}(p_{dep}, p_{cond})$ für den "bedingten" Pegel (Bezugspegel) Landshut (Isar) samt Markierungen für zwei Lesebeispiele zur Interpretation. Als Grundlage für die Ermittlung des Abhängigkeitsmaßes dienen Blockmaxima mit einem Zeitfenster von 5 Tagen, basierend auf Zeitreihen der Tagesmaxima der Pegelstationen Landshut (Isar), (a) Inkofen (Amper) und (b) München (Isar).

*Spatial dependence measure $P^*_{ij}(p_{dep}, p_{cond})$ for conditioning site Landshut (Isar river) including marks for easier interpretation. The estimates are calculated for block maxima that occur within a time window of 5 days and are based on daily maximum data of river gauges Landshut (Isar river), (a) Inkofen (Amper) and (b) Munich (Isar river).*

von drei Tagen aufweisen, werden hingegen als unabhängige Ereignisse interpretiert. Die relativ kurze Fließzeit von 2,5 Stunden zwischen den Oberliegerpegeln und dem Bezugspegel Lengries (Tab. 2) hat somit keine negativen Auswirkungen auf dieses Zeitfenster. Für das Abflussmuster des Bezugspegels München wurden neben den beiden genannten Oberliegerpegeln noch die Standorte Schlehdorf und Beuerberg an der Loisach ausgewertet. Im Mittel benötigt die unverformte Hochwasserwelle von den jeweiligen Standorten nach München sechs Stunden bis drei Tage. Im Gegensatz zu den Oberliegerpegeln Sylvensteinsee, Peternerbrücke und Schlehdorf, deren Abflussereignisse in 89 % der Fälle nach zwei Tagen oder kürzer abgelaufen sind, sind die Abflussereignisse am Pegel Beuerberg nur in 75 % der Fälle kürzer als vier Tage. Dies ist auf die natürliche Retention des Kochelsees und der Loisach-Kochelsee-Moore zurückzuführen. Für die räumliche Analyse des Abflussmusters München wurde daher auf die Zeitreihen der Tagesmaximalwerte (1960 bis 2018) mit Blockmaxima mit einem Zeitfenster von drei Tagen zurückgegriffen. Für den Bezugspegel Landshut (stellvertretend für die Untere Isar) wurden zusätzlich noch Weilheim (Ammer) und

Inkofen (Amper) als Oberliegerpegel ausgewertet. Im Gegensatz zur Ammer, bei der in Weilheim 95 % der Abflussereignisse maximal drei Tage andauerten, sind Hochwasserereignisse an der Amper vor allem durch die dämpfende Wirkung des Ammersees geprägt. So waren in Inkofen lediglich 86 % der Ereignisse kürzer als drei Tage und 97 % der untersuchten Ereignisse erst nach acht Tagen abgelaufen. Vergleicht man alle sieben Oberliegerpegel, so zeigt sich, dass 97 % aller Abflussereignisse bis zu fünf Tage andauerten. Daher wurde für die räumliche Analyse des Abflussmusters Landshut auf Zeitreihen der Tagesmaximalwerte zurückgegriffen und ein Zeitfenster von fünf Tagen für die Festlegung der Blockmaxima gewählt.

Für den Bezugspegel Hofkirchen (stellvertretend für die Donau unterhalb der Isarmündung) wurde neben den bekannten Oberliegerpegeln zusätzlich der Standort Pfelling an der Donau (oberhalb der Isarmündung) berücksichtigt. Entgegen der Erwartung waren Abflussereignisse in Pfelling ($A_{EO} \sim 38.000 \text{ km}^2$) im Mittel kürzer als in Landshut ($A_{EO} \sim 8.000 \text{ km}^2$). So sind in Pfelling bisher rund 94 % der Abflussereignisse nach spätestens fünf Tagen

abgelaufen, in Landshut dagegen nur 80 %. Dies kann unter anderem auf die Retention der zahlreichen Seen im Einzugsgebiet der Isar, aber auch auf die Überlagerung der ablaufenden Hochwasserwellen aus Isar und Amper zurückgeführt werden. Zwar dämpfen die Seen (inklusive des gesteuerten Rückhalts am Sylvensteinspeicher) und Moore die Amplitude des Hochwasserabflusses, verlängern aber auch nachfolgend den ablaufenden Ast der Hochwasserwelle. Zudem stellt die Überlagerung der Abflussspitzen aus Isar und Amper nicht den Regelfall dar, sodass sich unterhalb der Ampermündung (Landshut) über einen längeren Zeitraum ein relativ hoher Abfluss einstellen kann (STMLU, 1980). Für die räumliche Untersuchung der Abflussereignisse wurden für das Abflussmuster Hofkirchen Zeitreihen der Tagesmaximalwerte herangezogen und ein Zeitfenster von fünf Tagen für die Blockmaxima gewählt.

Räumliche Ausprägung von Abflussspitzen

Stellvertretend für die Obere Isar und namensgebend für das erste Abflussmuster wurde der Bezugspegel Lenggries gewählt. Bei höheren Perzentilwerten (Level 1-3) liegt eine hohe bis sehr hohe Abhängigkeit der Isar in Lenggries vom Zufluss zum Sylvensteinspeicher (Isar) vor (Abb. 7 (a)). Gleichzeitig zeigt der Pegel Lenggries eine moderate bis hohe Abhängigkeit vom Pegel Peternerbrücke (Jachen) (Abb. 7 (b)). Eine Abhängigkeit zwischen 70 % und 90 % lässt den Eindruck entstehen, dass extrem hohe Abflüsse an der Isar in Lenggries (die höchsten 9 Ereignisse in 48 Jahren) nicht zwingend (d. h. in 100 % der Fälle) mit hohem Zufluss zum Sylvensteinspeicher bzw. hohem Abfluss am Pegel Peternerbrücke einhergehen. In gewissem Maße kann dies auf den gesteuerten Rückhalt am Sylvensteinspeicher, der zu einer zeitlichen Verschiebung der Abflussspitze unterhalb der Talsperre führen kann, zurückgeführt werden. Insbesondere bei extremen Hochwasserereignissen wurde in der Vergangenheit seine Zuflussspitze in der Weitergabe sehr stark reduziert (Hochwasser Mai 1999: rd. 98 %; Hochwasser August 2005: rd. 78 %; WASSERWIRTSCHAFTSAMT WEILHEIM, 2009). Zudem ist das verbleibende 106 km² große Einzugsgebiet zwischen den Oberliegerpegeln und Lenggries von zahlreichen Wildbächen mit schneller und starker Abflussreaktion geprägt (STMUV, 2015).

Der Bezugspegel München ist namensgebend für das Abflussmuster an der Mittleren Isar unterhalb der Loisach-Einmündung (Abb. 8). Neben den Oberliegerpegeln an der Oberen Isar wurden zusätzlich die Standorte Schlehdorf (oberhalb Kochelsee) und Beuerberg (unterhalb Kochelsee) an der Loisach ausgewertet. Vor allem bei hohen p -Werten wurden hohe bis sehr hohe Abhängigkeiten der Abflussspitzen der Isar in München von allen betrachteten Oberliegerpegeln festgestellt (Level 1-3). Insbesondere bei sehr hohen Abflussspitzen (höchsten 7 Ereignisse in 59 Jahren) wurde eine 100%-ige Abhängigkeit von den bei-

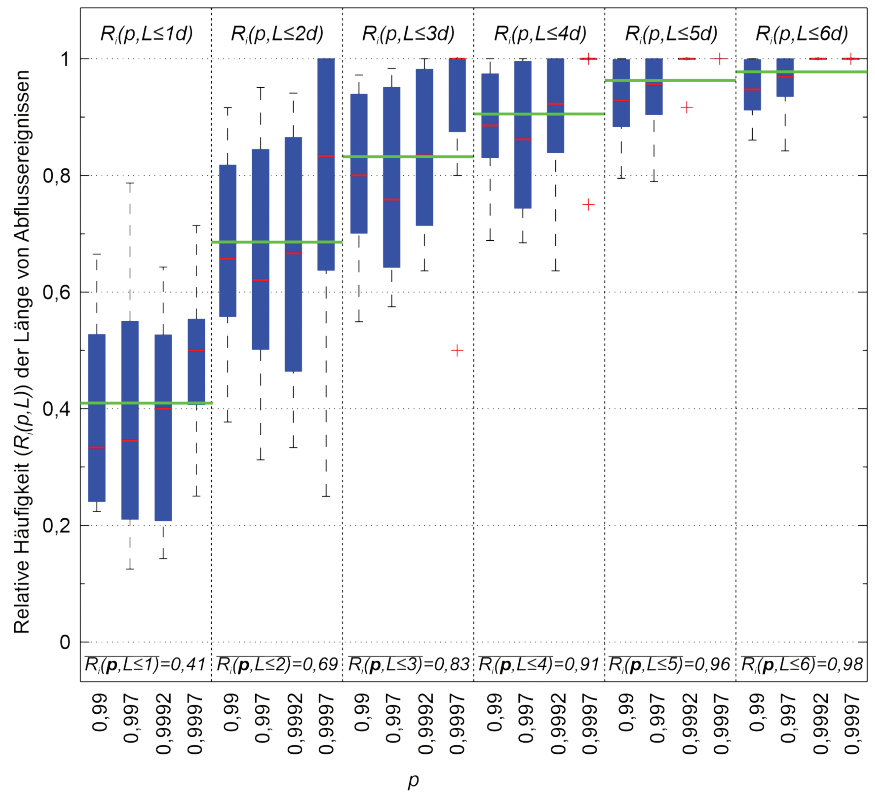


Abbildung 5

Relative Häufigkeit $R(p, L)$ der Länge von Abflussereignissen der elf betrachteten Zeitreihen (Tagesmaximalwerte). Die Boxplots sind gruppiert nach der Länge L des betrachteten Zeitfensters. Jede Gruppe beinhaltet jeweils die Auswertung für $p = 0,99, 0,997, 0,9992$ und $0,9997$. Die grüne Linie zeigt den Mittelwert von $R(p, L)$ für jede Gruppe. Frequency $R(p, L)$ of the length of occurrence of high streamflow of eleven relevant time series (daily maximum data). The boxplots grouped according to the length L of the time window. Each group contains the estimates for $p = 0,99, 0,997, 0,9992$, and $0,9997$. The green line shows the mean of $R(p, L)$ of each group..

den Pegeln an der Loisach gefunden. Somit sind in der Vergangenheit sehr hohe Abflussspitzen in München immer auch mit sehr hohen Abflüssen an der Loisach und in mehr als 70 % der Fälle mit hohem Zufluss zum Sylvensteinspeicher bzw. hohem Abfluss der Jachen einhergegangen. Dieser Effekt kann unter anderem auf das Hochwassermanagement des Sylvensteinspeichers, dessen Abgabe vorrangig auf die Schutzziele Bad Tölz und München abgestimmt wird, zurückgeführt werden. Das zeitliche Auftreten von Abflussspitzen unterhalb des Sylvensteinspeichers wird dadurch nicht so sehr durch dessen Zufluss, sondern eher durch die Abflussbildung und -spitzen der unterhalb gelegenen Teileinzugsgebiete bestimmt. Die verhältnismäßig kleinen Wildbacheinzugsgebiete reagieren dabei schneller als beispielsweise das Gesamteinzugsgebiet des Sylvensteinspeichers. In Kombination mit der Speichersteuerung führt dieses zu der im Vergleich zur Loisach geringeren Abhängigkeit von der Oberen Isar.

Der Bezugspegel Landshut wurde stellvertretend für die Untere Isar unterhalb der Amper-Mündung gewählt. Neben den Oberliegerpegeln an der Isar und der Loisach wurden für die Auswertungen die Standorte Weilheim (oberhalb Ammersee) und Inkofen (unterhalb Ammersee) hinzugenommen. Für die Level 2 und 3 herrscht in Bezug auf die Standorte im Oberlauf der Isar eine hohe (Abb. 9 (a, b)) und im Bereich der Loisach

eine hohe bis sehr hohe Abhängigkeit vor (Abb. 9 (c, d)). Wie schon bei den vorigen Bezugspegeln kann dieser Effekt mit dem gesteuerten Rückhalt am Sylvensteinspeicher erklärt werden. Interessanterweise konnte eine hohe und besonders bei sehr hohen Perzentilbereichen (Level 3) sehr hohe Abhängigkeit der Abflussspitzen an der Unteren Isar von der Ammer in Weilheim festgestellt werden (Abb. 9 (e)). Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 9 (f), dass die Abhängigkeit der Isar in Landshut von der Amper bei Inkofen von zunächst hoch auf moderat zurückfällt, ehe sie wieder zu hoch (Level 2) bzw. sehr hoch (Level 3) ansteigt. Generell ist zu beobachten, dass bei sehr hohen Abflussspitzen (die höchsten 11 Abflussspitzen in Landshut) alle Pegelmessstellen im Oberlauf der Isar, der Loisach und der Ammer/Amper beim Level 3 eine sehr hohe Abhängigkeit aufweisen. Das bedeutet, dass in der Vergangenheit sehr hohe Abflüsse in Landshut ($p_{cond} = 0,997$) häufig auch mit hohen Abflussspitzen (den höchsten 70 Abflussspitzen im Betrachtungszeitraum) an den Standorten im Oberlauf einhergingen.

Der Bezugspegel Hofkirchen wurde stellvertretend für die Donau unterhalb der Isar-Mündung gewählt. Neben den bereits bekannten Oberliegerpegeln im Einzugsgebiet der Isar wurde zusätzlich der Pegel Pfelling an der Donau (oberhalb der Isar-Mündung) betrachtet. Erwartungsgemäß konnten hohe bis sehr hohe Abhängigkeiten der Abflussspitzen

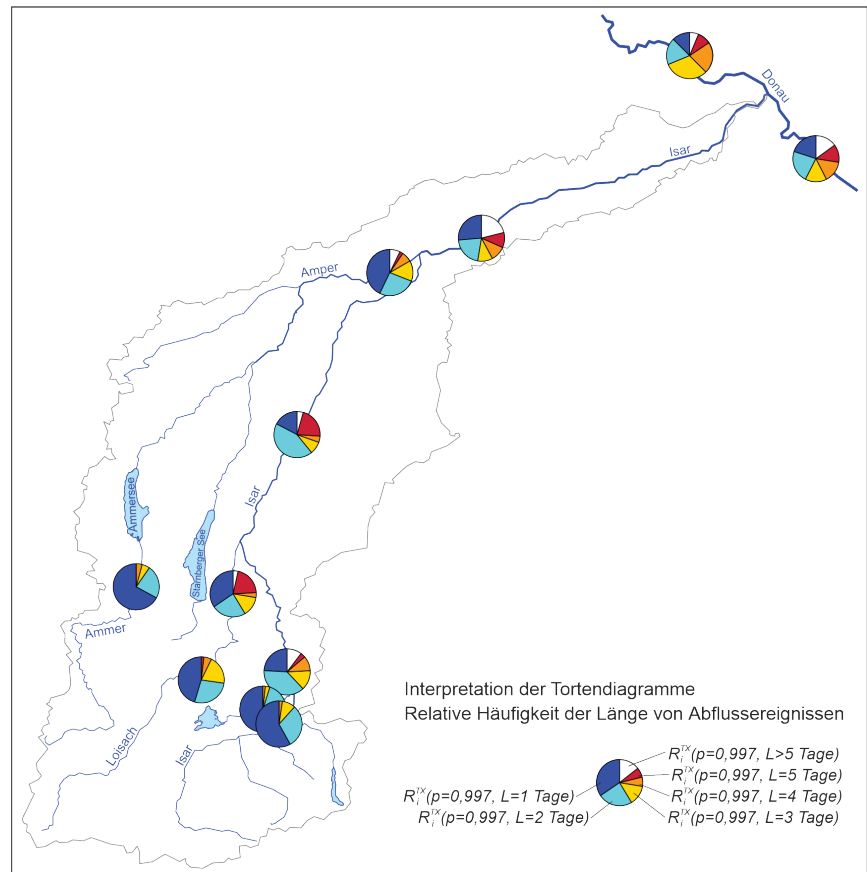


Abbildung 6

Karte des Einzugsgebiets der Isar mit den elf betrachteten Pegelstandorten und der relativen Häufigkeit $R_i(p = 0,997, L)$ der Länge der Abflussspitzen.

Map of the Isar river catchment including the eleven relevant river stations and the frequency $R_i(p = 0,997, L)$ of the length of high streamflow.

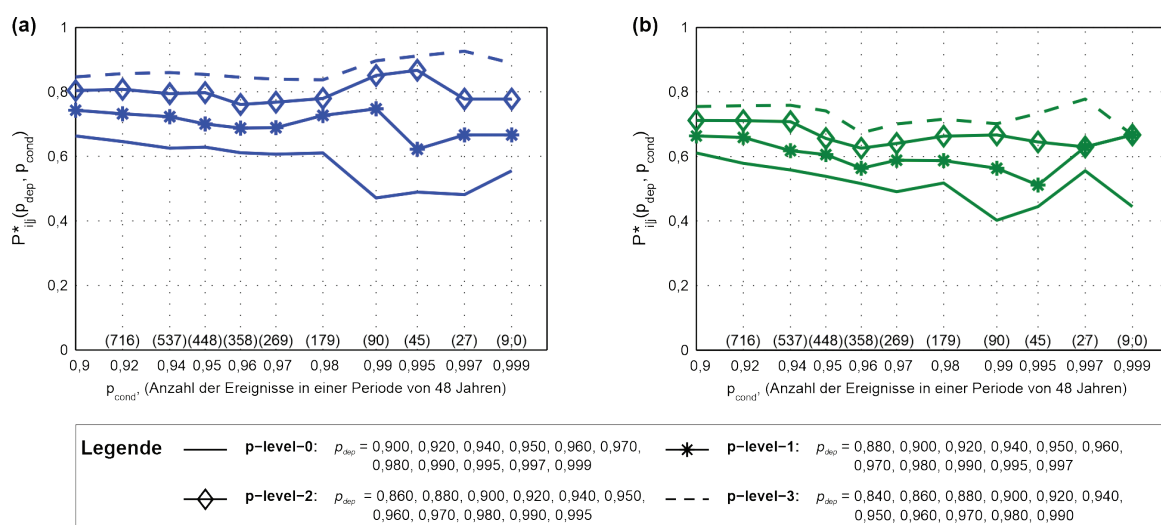
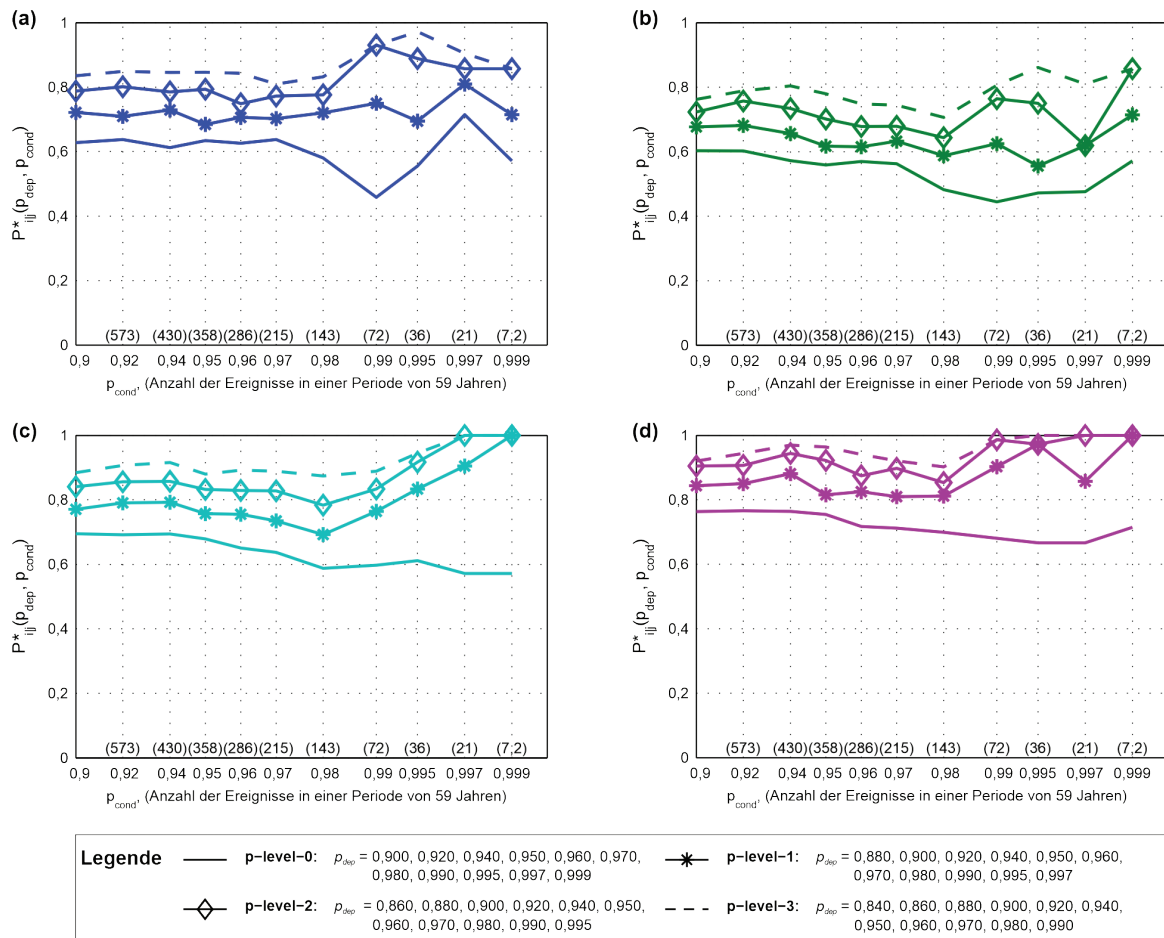


Abbildung 7

Räumliches Abhängigkeitsmaß $P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond})$. Bezugspegel: Lenggries an der Isar. Oberliegerpegel: (a) Sylvensteinspeicher Zufluss und (b) Peternerbrücke an der Jachen.

Spatial dependence measure $P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond})$. Conditioning site: Lenggries at the Isar river. Dependent sites: (a) Sylvensteinspeicher inflow and (b) Peternerbrücke at the Jachen river.

**Abbildung 8**

Räumliches Abhängigkeitsmaß $P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond})$. Bezugspegel: München an der Isar. Oberliegerpegel: (a) Sylvensteinspeicher Zufluss, (b) Peternerbrücke an der Jachen, (c) Schlehdorf an der Loisach und (d) Beuerberg an der Loisach.

Spatial dependence measure $P_{ij}^*(p_{dep}, p_{cond})$. Conditioning site: Munich at the Isar river. Dependent sites: (a) Sylvensteinspeicher inflow, (b) Peternerbrücke at the Jachen river, (c) Schlehdorf at the Loisach river, and (d) Beuerberg at the Loisach river.

am Pegel Hofkirchen von jenen an der Station Pfelling detektiert werden (Abb. 10 (g)). Vor allem bei hohen Intensitäten beträgt sie im Level 2-3 nahezu 100 %. Im Vergleich dazu ist die Abhängigkeit des Bezugspegels Hofkirchen von den Standorten an der Isar, Loisach und Amper (Abb. 10 (f-e)) nur moderat bzw. von der Amper (Abb. 10 (f)) moderat bis hoch. Darüber hinaus nimmt die Abhängigkeit der Donau in Hofkirchen von den Abflussspitzen in den Kopfeinzugsgebieten der Isar (Abb. 10 (a, b, c, e)) bei allen betrachteten Perzentilbereichen (Level 0-3) asymptotisch ab. Insbesondere bei hohen Abflussspitzen ($p_{cond} = 0,997$) ist nur noch eine sehr geringe Abhängigkeit von den Kopfeinzugsgebieten und somit auch vom Sylvensteinspeicher-Zufluss vorhanden. Einzig für die Standorte an der Loisach ist noch eine geringe bis moderat einzustufende Abhängigkeit nachweisbar. Dies kann mit dem Murnauer Moos sowie dem Kochelsee zusammenhängen, durch deren natürliche Retention die Hochwasserwelle der Loisach im Vergleich zur Isar breiter und flacher verläuft. Hinzu kommt, dass sich am Pegel Beuerberg unter bestimmten Voraussetzungen eine Doppelwelle ausbildet (STAHL et al., 2016). Die zweite Abflussspitze kann dabei die erste Abflussspitze überschreiten und unter Umständen zeitgleich mit der Abflussspitze der Donauwelle in Hofkirchen auftreten.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die vorliegende Studie ermittelt Abflussmuster bei großräumig auftretenden Hochwasserereignissen an der Isar. Dazu wurde das gemeinsame Auftreten von Abflussspitzen, die im Bereich häufiger Hochwasser einzuordnen sind, an verschiedenen Standorten innerhalb einer bestimmten Zeitspanne untersucht. Für einen Bezugspegel wurden zunächst die relevanten Abflussspitzen über einem Grenzwert (definiert mittels Unterschreitungswahrscheinlichkeit) bestimmt und deren Abhängigkeit von relevanten Abflussspitzen an exemplarischen Oberliegerpegeln untersucht.

Grundlage für die räumliche Untersuchung sind Blockmaxima, die mithilfe einer Häufigkeitsuntersuchung der Ereignisdauer ermittelt wurden. Ein Blockmaximum stellt ein Zeitfenster dar, das ein (über)regionales Hochwasserereignis definiert und innerhalb dessen "zeitgleich" auftretende Abflussspitzen sowohl am Bezugspegel als auch an den Oberliegerpegeln hinsichtlich der Überschreitung von Grenzwerten analysiert wurden. Aufgrund der räumlich differenzierten Ereignisdauer wurden die Blockmaxima individuell an den jeweiligen Bezugspegel angepasst. Im

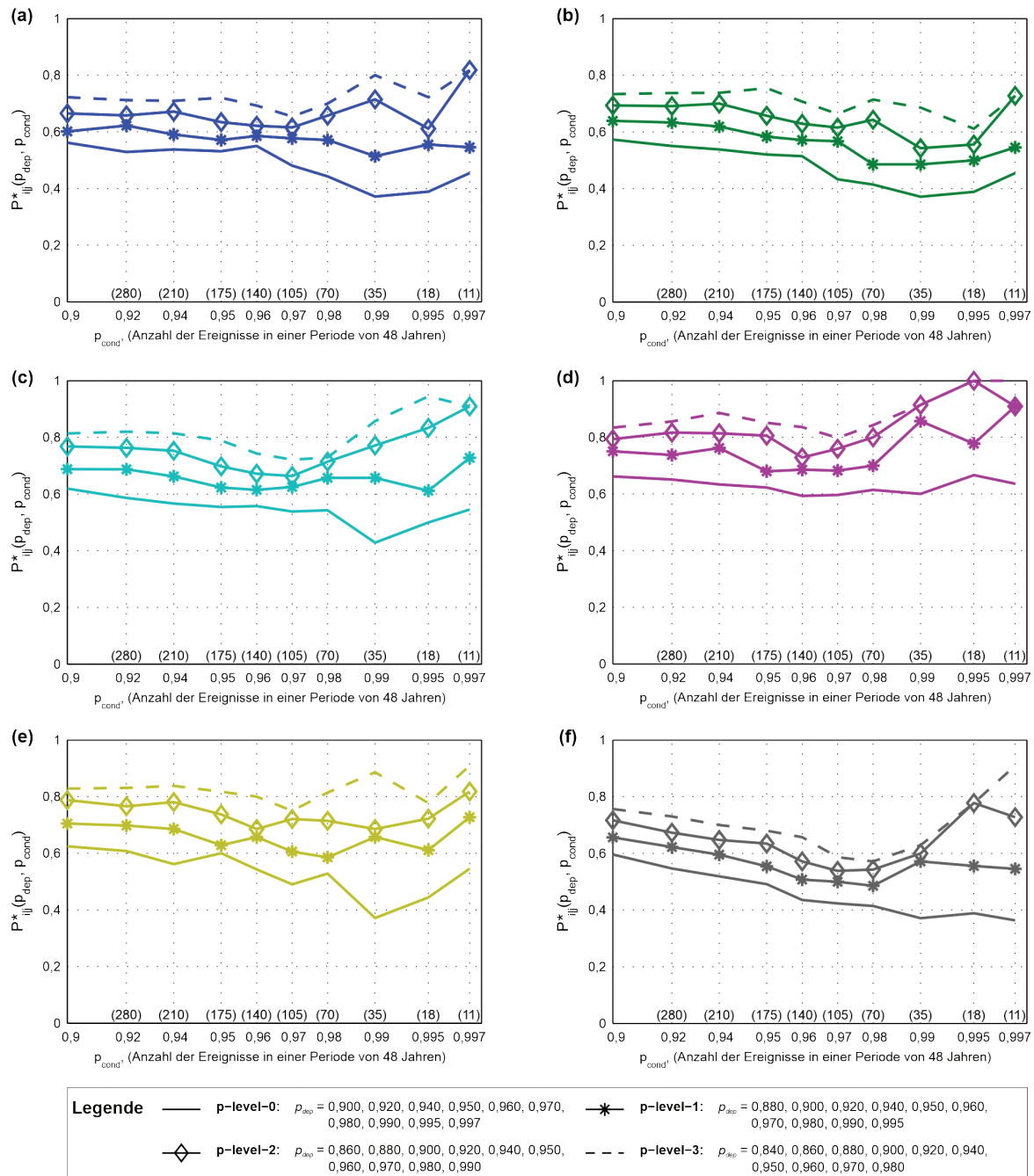


Abbildung 9

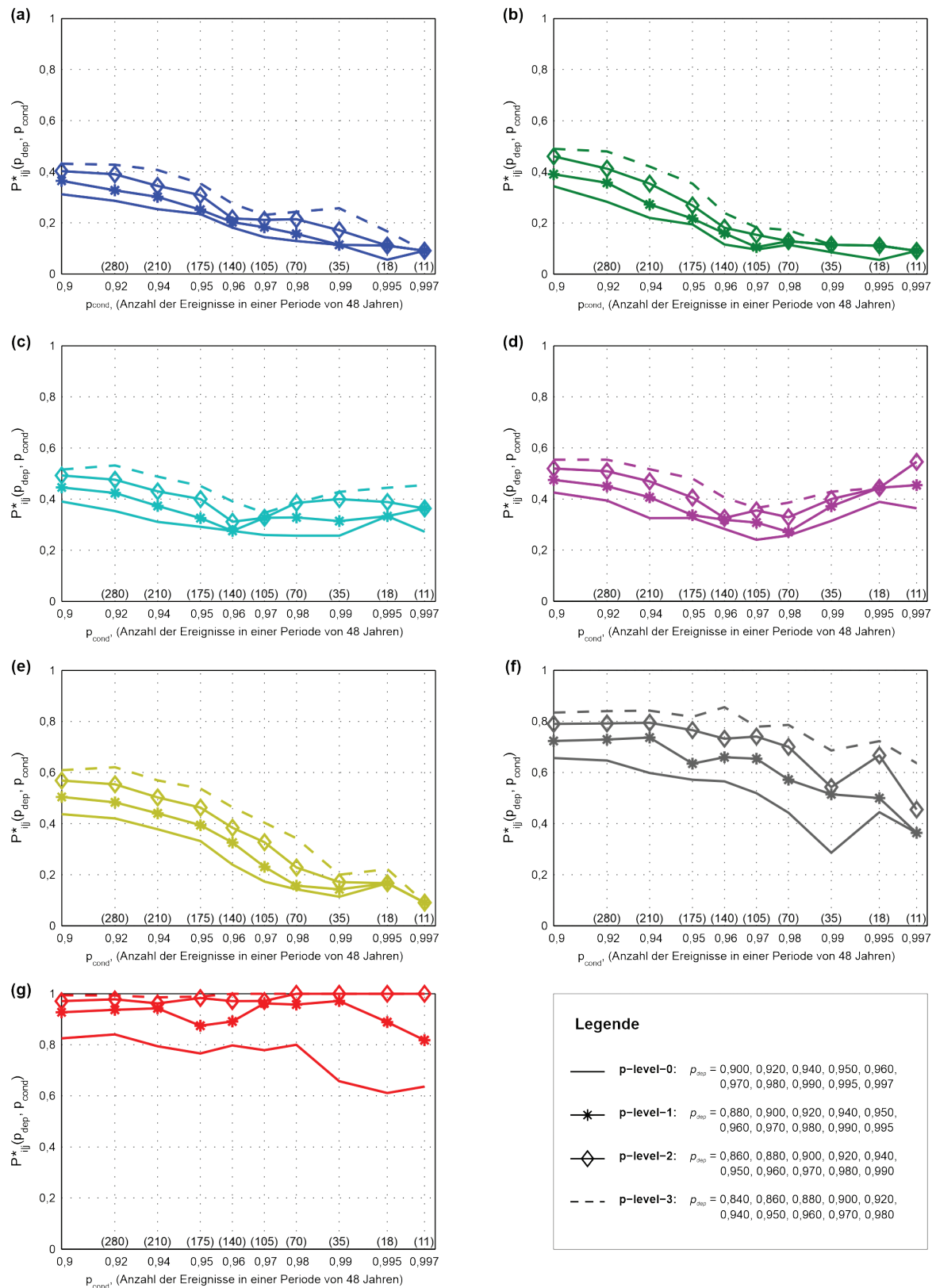
Räumliches Abhängigkeitsmaß $P^*_{ijl}(p_{dep}, p_{cond})$. Bezugspegel: Landshut an der Isar. Oberliegerpegel: (a) Sylvensteinspeicher Gesamtzufluss, (b) Peternerbrücke an der Jachen, (c) Schlehdorf an der Loisach, (d) Beuerberg an der Loisach, (e) Weilheim an der Ammer und (f) Inkofen an der Amper.

*Spatial dependence measure $P^*_{ijl}(p_{dep}, p_{cond})$. Conditioning site: Landshut at the Isar river. Dependent sites: (a) Sylvensteinspeicher inflow, (b) Peternerbrücke at the Jachen river, (c) Schlehdorf at the Loisach river, (d) Beuerberg at the Loisach river, (e) Weilheim at the Ammer river, and (f) Inkofen at the Amper river.*

Bereich der Oberen Isar (Bezugspegel Lenggries) wurden Daten mit stündlicher Auflösung und einem Zeitfenster von 47 Stunden verwendet. Aufgrund der längeren Ereignisdauern am Standort Beuerberg sowie der längeren Datenverfügbarkeit wurde ab der Mittleren Isar (Bezugspegel München) auf Tagesmaximalwerte mit einem Zeitfenster von drei Tagen zurückgegriffen. Für die Abflussmuster an der Unteren Isar (Bezugspegel Landshut) sowie

der Donau (Bezugspegel Hofkirchen an der Donau) wurde das Zeitfenster der Blockmaxima auf fünf Tage erweitert.

Die statistische Auswertung der vorliegenden Abflusszeitreihen zeigt eine moderate bis hohe Abhängigkeit des Bezugspegels Lenggries von seinen Oberliegerpegeln. Der gesteuerte Hochwasserrückhalt des Sylvensteinspeichers sowie die Abflussbil-

**Abbildung 10**

Räumliches Abhängigkeitsmaß $P^*_{ij}(p_{dep}, p_{cond})$. Bezugspegel: Hofkirchen an der Donau. Oberliegerpegel: (a) Sylvensteinspeicher Gesamtzufluss, (b) Peternerbrücke an der Jachen, (c) Schlehdorf an der Loisach, (d) Beuerberg an der Loisach, (e) Weilheim an der Ammer, (f) Inkofen an der Amper und (g) Pfelling an der Donau.

Spatial dependence measure $P^*_{ij}(p_{dep}, p_{cond})$. Conditioning site: Hofkirchen at the Danube river. Dependent sites: (a) Sylvensteinspeicher inflow, (b) Peternerbrücke at the Jachen river, (c) Schlehdorf at the Loisach river, (d) Beuerberg at the Loisach river, (e) Weilheim at the Ammer river, (f) Inkofen at the Amper river, and (g) Pfelling at the Danube river.

dung der Wildbäche unterhalb des Speichers beeinflussen deutlich den Hochwasserabfluss der Oberen Isar. In Extremfällen wird der Hochwasserabfluss der Isar so stark durch den Sylvenstein-speicher reduziert, dass die Abflussspitze unterhalb der Talsperre weniger durch die Isar, sondern vielmehr durch den Abfluss der einmündenden Wildbäche geprägt wird. Die Abhängigkeit der Mittleren Isar (Standort München) von allen Oberliegerpegeln ist als hoch bis sehr hoch einzustufen. Insbesondere gingen in der Vergangenheit sehr hohe Abflussspitzen in München immer mit hohen Abflüssen an der Loisach einher. Stellvertretend für die Untere Isar wurde der Pegel Landshut als Bezugspegel herangezogen. Auch die Abflussspitzen dieses Gewässerabschnittes sind in hohem Maß von der Abflussbildung im Kopfeinzugsgebiet der Isar abhängig. Im Vergleich dazu ist die Abhängigkeit von der Amper insgesamt geringer und wird erst bei hohen Abflussspitzen in Landshut wieder sehr hoch. Dieser Effekt ist auf die Retention des Ammersees zurückzuführen, der seinen Zufluss aufnimmt und zeitverzögert wieder an die Amper abgibt. Im Gegensatz dazu zeigen die Abflussspitzen an der Donau unterhalb der Isareinmündung (Bezugspegel Hofkirchen) nur moderate Abhängigkeiten von Abflussspitzen an der Oberen Isar, die bei hohen Abflüssen asymptotisch abnehmen. Erwartungsgemäß weisen die Abflussspitzen am Bezugspegel Hofkirchen eine hohe bis sehr hohe Abhängigkeit von Abflussspitzen am Pegel Pfelling (Donau) auf.

Der hier vorgestellte Ansatz hilft allgemeine Aussagen über das räumlich differenzierte Hochwassergeschehen in einem Einzugsgebiet abzuleiten bzw. quantitativ zu belegen. Neben unterschiedlichen Ereignisdauern können auch Interaktionen zwischen Haupt- und Nebengewässer herausgearbeitet werden. Die angewandte Häufigkeitsanalyse bedient sich beobachteter Messdaten, sodass sich die getroffenen Aussagen ausschließlich auf die Vergangenheit beziehen. Je nach Länge der vorhandenen Zeitreihen werden die Aussagen belastbarer sowie die analysierten Abflussspitzen seltener. Methodenbedingt ist kein allgemein gültiger induktiver Schluss auf seltenere Hochwasserereignisse (z. B. HQ_{100}) möglich. Doch auch in der vorliegenden Form hilft die Methode, das Hochwasserabflussgeschehen in einem Flusssystem besser zu verstehen und Aussagen zu gemeinsamen Auftreten von Abflussspitzen in unterschiedlichen Teilbereichen quantitativ zu stützen. So wird die Abhängigkeit der Abflussspitzen entlang der Isar von der Abflussbildung an der Oberen Isar sowie die Bedeutung des Sylvensteinspeichers als zentrales Hochwasserschutzelement an der Isar sichtbar. Gleichzeitig zeigt sich die geringere Abhängigkeit der Abflussspitzen an der Donau von den Kopfeinzugsgebieten der Isar. Eine mögliche Erweiterung, die zur weiteren Verbesserung des Gebietsverständnisses beitragen könnte, wäre die Einbeziehung von Niederschlagsdaten (KEEF et al., 2009). Dabei ist insbesondere in alpinen Untersuchungsregionen auf eine ausreichende Dichte an Niederschlagsmessstationen mit langen Messreihen zu achten.

Summary and conclusion

This study examines the spatial patterns of large-scale high streamflow and frequent flood events in the Isar river catchment. For this purpose, the simultaneous occurrence of streamflow peaks at different locations within a certain time period was investigated. Therefore, in a first step, relevant streamflow peaks above threshold values (defined by a non-exceedance probability) were determined for conditioning and dependent sites. In a second

step, the spatial dependences between these streamflow peaks were analysed.

In order to consider lagged observations at different sites, block maxima were used as the basis for spatial analyses. Block maxima represent discharge peaks within a time window and define a (supra)regional flood event. Within these block maxima "simultaneously" occurring discharge peaks, at both the reference gauge and the dependent sites, were analysed with regard to the exceedance of threshold values. Due to the spatial characteristic of the study area and the different event durations, the block maxima were individually adapted for different reference gauges. Thus, in the area of the Upper Isar (reference gauge Lenggries), data with hourly resolution and a time window of 47 hours were applied. Due to the longer event durations at the Loisach river (in particular, at gauge Beuerberg) and higher availability of daily maximum data, time series with daily resolution and a time window of three days were used for the central part of the Isar river (reference gauge Munich). For the analysis of the spatial patterns of the Lower Isar (reference gauge Landshut) and the entire Isar river catchment including two sites at the Danube river (reference gauge Hofkirchen), a time window of five days was applied to deduce block maxima.

The spatial analysis of the Upper Isar river area shows a moderate to high dependency between the Lenggries reference gauge and its upstream gauges. The flood management of the Sylvenstein reservoir and the streamflow of the torrential catchments downstream of the reservoir clearly influence the flood discharge at the Isar river at Lenggries. In cases of frequent floods, the flood discharge of the Isar is attenuated by the Sylvenstein reservoir so that the peak discharge below the reservoir is less influenced by the Isar but rather by the discharge of the contributing torrential catchments. The spatial dependence between the Munich conditioning site and the upstream sites is high to very high. Very high streamflow events at the Munich gauge have always occurred together with high streamflow at the Loisach river.

The Landshut gauge is used as a reference station for the Lower Isar area. For this location, there is once again a generally high dependence between the conditioning site and the sites in the Upper Isar area and the Loisach river. The dependence of the reference site to the Amper river is comparably low and only becomes very high when the streamflow magnitude rises at the Landshut gauge. This effect exists due to the retention of the Lake Ammer, which delays the streamflow peak in the Amper river catchment. Streamflow peaks at the Danube downstream from the confluence with the Isar river (reference gauge Hofkirchen) have a low to moderate dependence on streamflow peaks at the sites in the Isar catchment and a high to very high dependence on streamflow peaks at the Danube river at Pfelling.

The present approach allows general conclusions about the spatially differentiated flood behaviour in a study area. In addition to the analysis of different event durations, interactions of different tributaries can be elaborated. As the results are based on the results are based on representative and long time series, they relate exclusively to the past. The reliability of the results depends on the quality and length of observation data and, of course, longer time series enable the conclusions about events that occur more seldomly. The approach, by its nature, does not allow for inductive conclusion to rare events (e. g. a 100-year flood). Never-

theless, it can help to better understand the flood behaviour of a river system and simultaneous occurrence on high streamflow peaks at multiple sites. The present case study shows the dependence structure of frequent floods along the Isar river and the importance of flood formation of the headwater catchments and the influence of the Sylvenstein reservoir. At the same time, the results show low dependence of streamflow peaks between the Danube and the headwater catchments of the Isar river. Rainfall measurements could be included in the spatial analysis to further improve the understanding of the underlying flood processes and the prevailing dependence structure in a study area (cf. KEEF et al., 2009). In particular in alpine regions, for such analyses the sufficient density of rainfall measurements is essential.

Erklärung zur Datenverfügbarkeit

Die hydrologischen Messreihen wurden von der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung bereitgestellt und sind online frei zugänglich via: <https://gkd.bayern.de>.

Danksagung

Wir danken T. Steinberger für die wertvollen Gespräche zu den methodischen Grundlagen und zwei anonymen Gutachter/innen für ihre Hinweise, die zu einer wesentlichen Verbesserung des Manuskripts geführt haben.

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. Klaus Schneeberger, PhD
alpS GmbH
Grabenweg 68, Innsbruck
klaus.schneeberger@gmx.net

Matthias von Stackelberg, M.Sc.
alpS GmbH
Grabenweg 68, Innsbruck
Institut für Geographie
Universität Innsbruck
Innrain 52f, Innsbruck
stackelberg@alps-gmbh.com

Dr. Johannes Bellinger
Moritz Samm, M.Sc.
Dr.-Ing. Tobias Lang
Wasserwirtschaftsamt Weilheim
Pütrichstraße 15, 82362 Weilheim
johannes.bellinger@wwa-wm.bayern.de
moritz.samm@wwa-wm.bayern.de
tobias.lang@wwa-wm.bayern.de

Literaturverzeichnis

- BERZ, G. (2020): Naturkatastrophen (seit 1800); [https://www.historisches-lexikon-bayerns.de/Lexikon/Naturkatastrophen_\(seit_1800\)](https://www.historisches-lexikon-bayerns.de/Lexikon/Naturkatastrophen_(seit_1800)).
- BFG (2013): Das Juni-Hochwasser des Jahres 2013 in Deutschland (The 2013 June flood in Germany). – BfG, BfG Report no 1793.
- BLÖSCHL, G., T. NESTER, J. KOMMA, J. PARAJKA & R.A.P. PERDIGÃO (2013): The June 2013 flood in the Upper Danube Basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods. – *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (12), 5197–5212; DOI: 10.5194/hess-17-5197-2013.
- CHORYŃSKI, A., I. PIŃSKWAR, W. KRON, R. BRAKENRIDGE & Z.W. KUND-ZEWICZ (2012): Catalogue of Large Floods in Europe in the 20th Century. – IAHS special publication 10, Wallingford.
- HD (1900): Beiträge zur Hydrographie Österreichs – Die Hochwasserkatastrophe des Jahres 1899 im österreichischen Donaugebiete. – Hydrographischer Dienst in Österreich, Hydrographischer Dienst in Österreich 78/4.
- KEEF, C., C. SVENSSON & J.A. TAWN (2009): Spatial dependence in extreme river flows and precipitation for Great Britain. – *Journal of Hydrology* 378(3–4), 240–252; DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.09.026.
- LFU (2011): Flusslandschaft Isar im Wandel der Zeit. – Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- SCHNEEBERGER, K., O.K. RÖSSLER & R. WEINGARTNER (2018): Spatial patterns of frequent floods in Switzerland. – *Hydrological Sciences Journal* 63 (6), 895–908; DOI: 10.1080/02626667.2018.1450505.
- SCHNEEBERGER, K. & T. STEINBERGER (2018): Generation of Spatially Heterogeneous Flood Events in an Alpine Region – Adaptation and Application of a Multivariate Modelling Procedure. – *Hydrology* 5 (5/1), 5; DOI: 10.3390/hydrology5010005.
- SCHRÖTER, K., M. KUNZ, F. ELMER, B. MÜHR & B. MERZ (2015): What made the June 2013 flood in Germany an exceptional event? A hydro-meteorological evaluation. – *Hydrology and Earth System Sciences* 19 (1), 309–327; DOI: 10.5194/hess-19-309-2015.
- SEIBERT, S.P., D. SKUBILICS & U. EHRET (2014): The potential of coordinated reservoir operation for flood mitigation in large basins – A case study on the Bavarian Danube using coupled hydrological–hydrodynamic models. – *Journal of Hydrology* 517, 1128–1144; DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.06.048.
- STAHL, N., A. BAUER & T. LANG (2016): Standortbewertung potenzieller Hochwasserrückhaltestandorte durch eine Wirkungsanalyse mittels Niederschlags-Abfluss-Modellierung und 2D-Berechnung am Beispiel des Isareinzugsgebietes. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 60 (3), 213–222; DOI: 10.5675/HyWa_2016,3_4.
- STAHL, N. & M. CASPER (2017): Eine neue ereignisbasierte Variante zur Ableitung von synthetischen Niederschlagsverteilungen zur Generierung von Hochwasserganglinien mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell LARSIM am Beispiel des Isareinzugsgebietes. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 61 (2), 93–119; DOI: 10.5675/HyWa_2017,2_2.
- STAHL, N. & M. HOFSTÄTTER (2018): Vb-Zugbahnen und deren Auftreten als Serie mit Bezug zu den resultierenden Hochwassern in Bayern und Auswirkungen auf Rückhalteräume im Isareinzugsgebiet. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 62 (2), 77–97; DOI: 10.5675/HyWa_2018,2_2.
- STMLU (1980): Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Isar: Kurzfassung. – Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München.
- STMUV (2015): Hochwasserrisikomanagement-Plan für den bayerischen Anteil der Flussgebietseinheit Donau – Managementzeitraum 2016–2021. Anhang 3 Beschreibung der Planungseinheiten. – Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz.
- STMUV (2014): Hochwasserschutz Aktionsprogramm 2020plus. Bayerns Schutzstrategie – Ausweiten, Intensivieren, Beschleunigen. – Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz.
- WASSERWIRTSCHAFTSAMT WEILHEIM (2009): Der Sylvensteinspeicher; Download Broschüre: https://www.wwa-wm.bayern.de/fluesse_seen/gewaesserportraits/index.htm unter /Sylvensteinspeicher.