

Auswirkungen des Klimawandels auf den Hochwasserschutz in Baden-Württemberg

Wolfgang Hennegriff und Jürgen Reich

1. Anlass

Als das Kooperationsvorhaben KLIWA (Klimaänderung und Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft) 1999 zusammen mit Bayern und dem Deutschen Wetterdienst ins Leben gerufen wurde, stand die konkrete Frage im Raum, wie sich die Klimaänderung in den nächsten 50 Jahren auf den Hochwasserabfluss in Süddeutschland auswirken wird. Dabei galt es zunächst, die Häufung der Hochwasserereignisse seit den 1970er Jahren hydrologisch zu bewerten und Lösungsansätze zu entwickeln, um die Folgen der Klimaentwicklung auch regional abschätzen zu können. Schließlich musste die Frage beantwortet werden, wie die Klimaänderung in hydrologischer Hinsicht quantifiziert werden kann, um Anlagen des technischen Hochwasserschutzes gegen mögliche Hochwasserverschärfungen besser dimensionieren zu können?

2. Hochwasserentwicklung im 20. Jahrhundert

Untersuchungen der vorhandenen langen Messreihen hydrometeorologischer und hydrologischer Größen können Aufschluss über die bisher beobachteten natürlichen Schwankungsbreiten und eventuell erkennbaren Veränderungen geben. Solche Untersuchungen sind auf der Grundlage einer großen Datenbasis im Rahmen von KLIWA systematisch für Baden-Württemberg durchgeführt worden. Dabei ist das Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse, der mittleren Abflüsse, der Gebiets- und Starkniederschläge, der Lufttemperatur, der Verdunstung und der Schneedeckendauer für die Zeitreihen im 20. Jahrhundert analysiert worden.

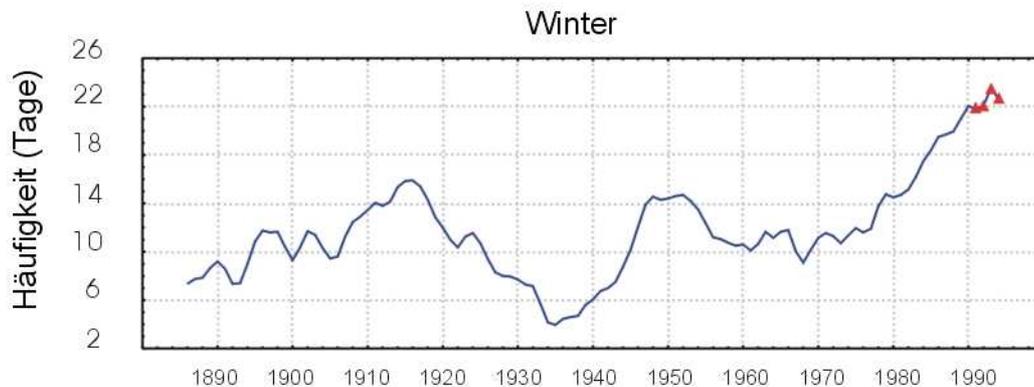


Abb.1: Entwicklung der Wetterlagen „Westlage zyklonal“: Im hydrologischen Winterhalbjahr haben gerade die für die Hochwasserbildung bedeutsamen Niederschlag bringenden Wetterlagen „Westlage zyklonal“ seit den 1970er Jahren in Süddeutschland zugenommen.

Den Trenduntersuchungen lagen die Jahres- bzw. Monatshöchstwerte der Abflüsse an 107 Pegeln zugrunde, die über lange Beobachtungszeitreihen seit mindestens 1931 verfügen. Betrachtet man die letzten 30 Jahre, zeigen sich bei den Höchstabflüssen bei vielen Pegeln zunehmende Trends. Dabei wurde festgestellt, dass bei einer Vielzahl von Einzugsgebieten die Häufigkeit von Winterhochwasser seit den 1970er Jahren zugenommen hat und dass die monatlichen Hochwasserabflüsse im hydrologischen Winterhalbjahr ab den 1970er Jahren höher als in der Zeit davor waren.

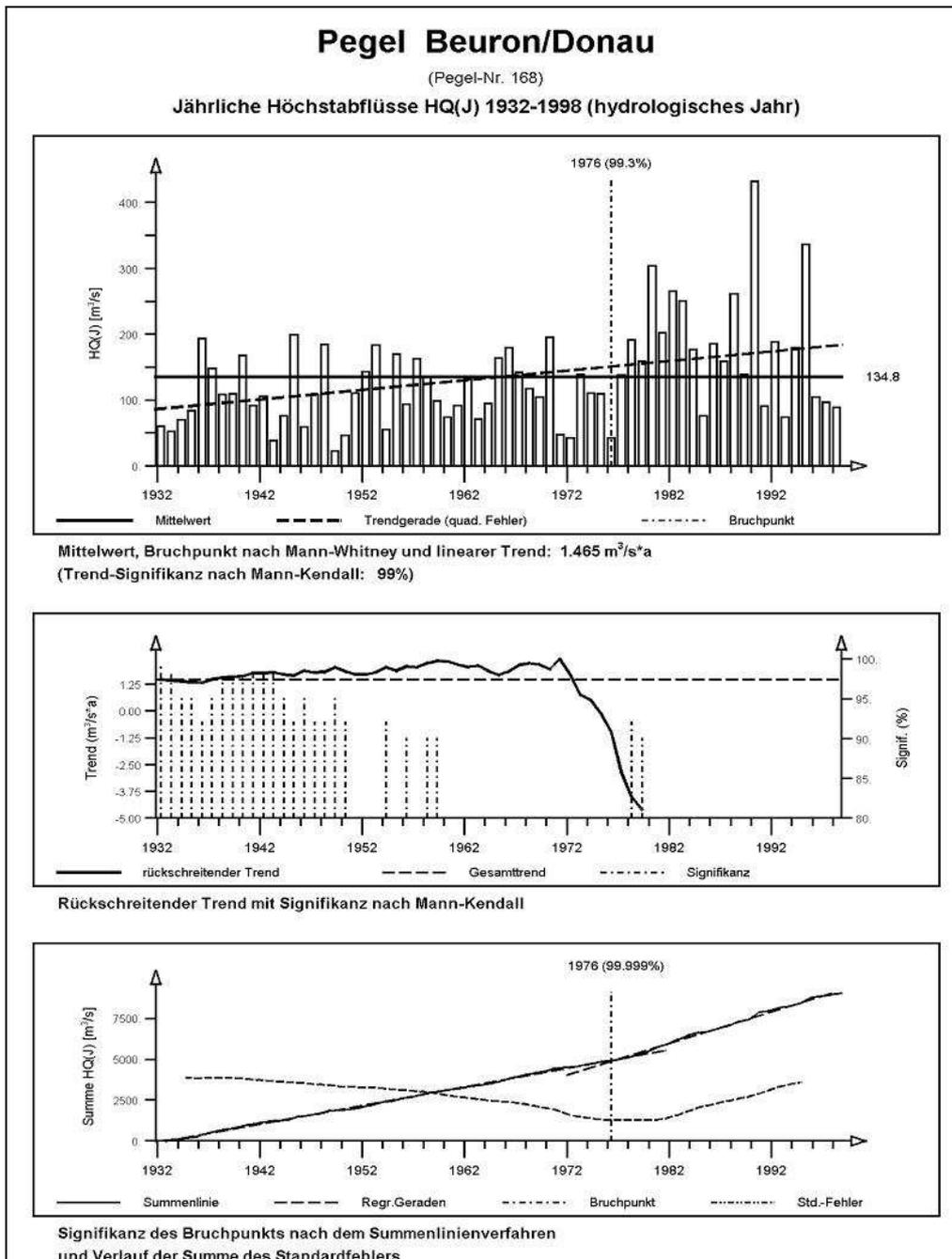


Abb. 2: Analyse der jährlichen Hochwasserabflüsse am Pegel Beuron/Donau

Diese Verschärfung der Hochwasserlagen wird einerseits mit der Erhöhung der durchschnittlichen Lufttemperatur andererseits mit der Zunahme der zyklonalen Westwetterlagen in Verbindung gebracht.

3. Prognosen für die künftige Klimaentwicklung

Da im 21. Jahrhundert mit einem weiteren deutlichen Anstieg der mittleren Lufttemperatur zu rechnen ist, liegt die Frage nahe, wie in diesem Jahrhundert sich die meteorologischen, hydro-meteorologischen und hydrologischen Parameter als Folge veränderter atmosphärischer Umweltbedingungen, insbesondere durch die Zunahme der Konzentrationen an Treibhausgasen verändern und wie sich die Hochwasserabflüsse im 21. Jahrhundert entwickeln werden.

Untersuchungen belegen, dass gegenüber der vorindustriellen Zeit der CO₂-Gehalt der Atmosphäre von 280 ppm (parts per million = 0,028 %) heute auf 380 ppm (= 0,038 %) angestiegen ist. Die atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Lachgas sind die höchsten seit mindestens 650.000 Jahren. Das Ausmaß, in dem diese Gase heute den Treibhauseffekt verstärken, ist in den letzten 20.000 Jahren ohne Beispiel. Die jährliche Zunahme der CO₂-Konzentration beträgt gegenwärtig 1,5 ppm.

Um die weitere Entwicklung des Erdklimas realistisch abschätzen zu können, musste daher neben den natürlichen Klimafaktoren der „Faktor Mensch“ berücksichtigt werden. Dazu wurden vom Sachverständigen-Gremium „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) der Vereinten Nationen sogenannte Emissionsszenarien entwickelt. In diese Szenarien fließt ein, wie sich die Weltbevölkerung entwickeln wird, welchen Lebensstandard sie anstrebt, welche Energieträger sie verwenden und wie viel Energie sie verbrauchen wird.

Antworten auf die Klimaentwicklung auf regionaler Ebene mit Hilfe von globalen Klimamodellen können nicht gegeben werden, da diese sehr grobmaschig mit Gitterweiten von 250 km angelegt sind. Deshalb wurden im Projekt KLIWA zunächst regionale Klimamodelle entwickelt. Da es für die Abschätzung der künftigen Klimaentwicklung auf regionalem Maßstab noch kein optimales Verfahren gab, wurden drei verschiedene Institutionen beauftragt, regionale Klimaszenarien mit drei unterschiedlichen Verfahren zu erstellen.

3.1 Lufttemperatur

Die bodennahe Lufttemperatur spielt im Wasserkreislauf eine zentrale Rolle, da sie die Aufnahmefähigkeit für Wasserdampf in einer Luftmasse sowie die Verdunstung beeinflusst. Ein Anstieg der mittleren globalen Temperatur treibt die Intensität des Wasserkreislaufes stärker an. Mit der Erwärmung der Atmosphäre ist ebenso eine Erwärmung der Ozeane und Meere verbunden. Durch den Anstieg der mittleren Wassertemperatur und insbesondere der Wasseroberflächentemperatur steigt auch die Höhe der mittleren Verdunstung. Demnach können atlantische Luftströmungen mehr Feuchtigkeit nach Mitteleuropa transportieren. Bei der Lufttemperatur handelt es sich um eine hydrometeorologische Größe, die im Zusammenhang mit der Klimaänderung in den Klimamodellen am besten simuliert werden kann. Die erwartete Temperaturzunahme im Winter ist außerdem von besonderer Bedeutung, da die Temperatur großen Einfluss auf die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee hat und somit entscheidend für die zukünftig zu erwartenden Abflussverhältnisse sein kann.

Nach den Ergebnissen, die mit Hilfe regionaler Klimamodelle berechnet wurden, wird die Lufttemperatur in Baden-Württemberg auch in der Zukunft weiter deutlich zunehmen. Die Temperaturzunahme bis 2050 beträgt im Jahresdurchschnitt ca. 1,7°C. Im Winter ist die Zunahme mit ca. 2°C am stärksten, während die Zunahme im Sommer ca. 1,4°C beträgt.

3.2 Niederschlag

Die Berechnungsergebnisse der Klimaszenarien prognostizieren ebenfalls gravierende Veränderungen im Niederschlagsverhalten. Die Niederschläge werden sich im hydrologischen Sommerhalbjahr in Baden-Württemberg regional sehr unterschiedlich entwickeln: In manchen Regionen können die Niederschläge bis zu 20% geringer ausfallen. Andererseits ist zu erwarten, dass die Winterniederschläge deutlich zunehmen werden (siehe Abb. 4). Je nach Region kann die unterschiedlich stark ausgeprägte Zunahme bis zu 35% betragen. Markant für die jährlichen Niederschlagssummen mit relativ hohen Änderungen sind die Bereiche Schwarzwald, Kraichgau und Odenwald.

Im Sommer ergeben sich kaum Veränderungen der Anzahl der Nasstage (Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag), im Schwarzwald und Allgäu sogar Abnahmen bei der Anzahl dieser Tage mit hohen Niederschlägen. Im Winter gibt es an fast allen Stationen in Baden-Württemberg Zu-

nahmen. Die deutlichsten Zunahmen gibt es im Schwarzwald an höher gelegenen Stationen (z. B. in den Stationen Freudenstadt, Höchenschwand, Bad Rippoldsau). Hier steigt die Anzahl von 8 auf 14 Tage.

Quantitative Aussagen zur künftigen Entwicklung von konvektiven Kurzzeit-Niederschlägen (Gewitter), die für die Siedlungsentwässerung und für Sommerhochwasser in kleinen Einzugsgebieten von Bedeutung sind, können gegenwärtig von den verfügbaren regionalen Klimamodellen noch nicht erbracht werden.

Um nun Erkenntnisse für mögliche wasserwirtschaftliche Vorsorgeempfehlungen zu gewinnen, wurden die Ergebnisse aus den regionalen Klimamodellen für Berechnungen mit den Wasserhaushaltsmodellen verwendet.

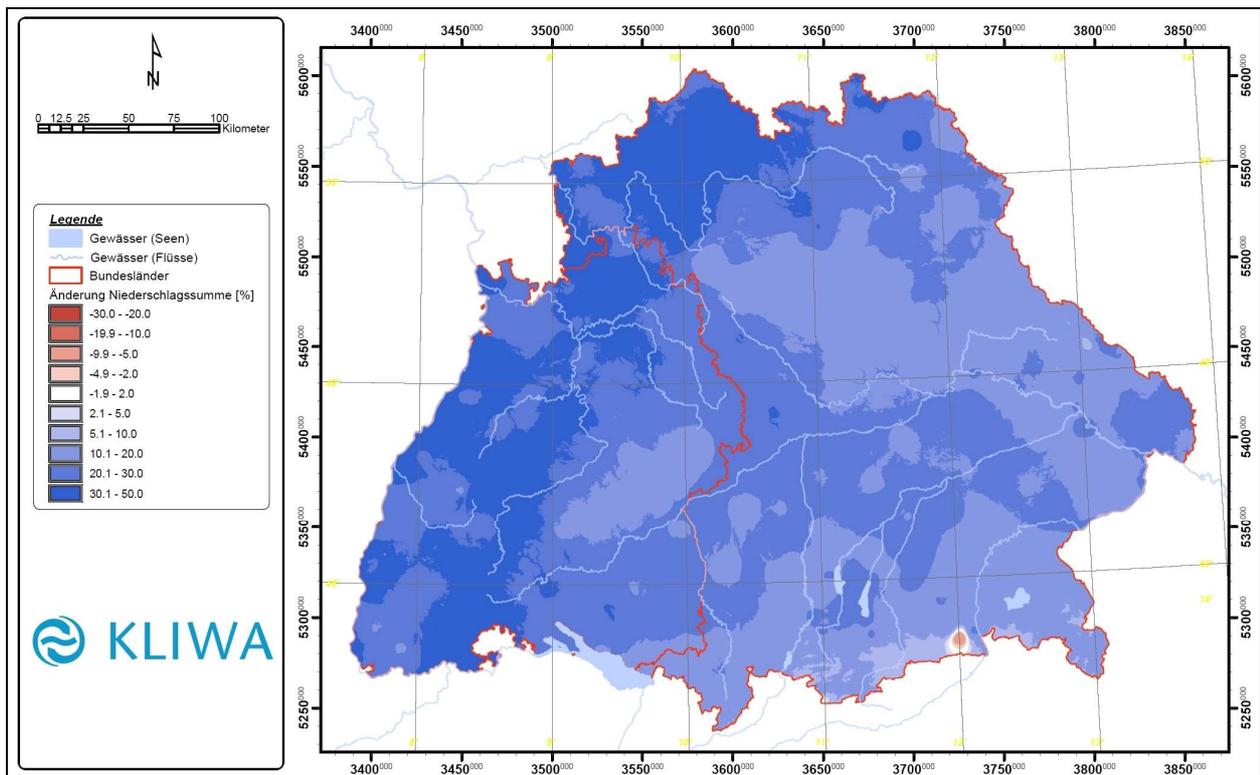


Abb. 3: Änderung der Niederschlagssumme (%) im hydrologischen Winterhalbjahr (November – April)

4. Prognosen für die künftige Entwicklung des Wasserhaushalts

Wasserhaushaltsmodelle liegen für Baden-Württemberg mit einer Auflösung von 1 km² flächendeckend vor. In Baden-Württemberg wird das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) eingesetzt. Für die Höhenangaben wurden die Daten des digitalen Geländemodells Baden-Württemberg verwendet.

Mit Hilfe der Wasserhaushaltsmodelle können alle wesentlichen hydrologischen Komponenten mit den Ergebnissen der regionalen Klimamodelle über die Dauer des Simulationszeitraums berechnet werden.

4.1 Klimawandel und Hochwasserabflüsse

Die Wasserhaushaltsmodellierungen konzentrierten sich zunächst auf mögliche Veränderungen des Abflussgeschehens in der Zukunft, wobei zuerst die Auswirkungen bei den Hochwasserab-

flüssen im Blickfeld waren. Die ermittelten Abflüsse aus der Wasserhaushaltsmodellierung wurden dafür mit Methoden der Extremwertstatistik vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe analysiert.

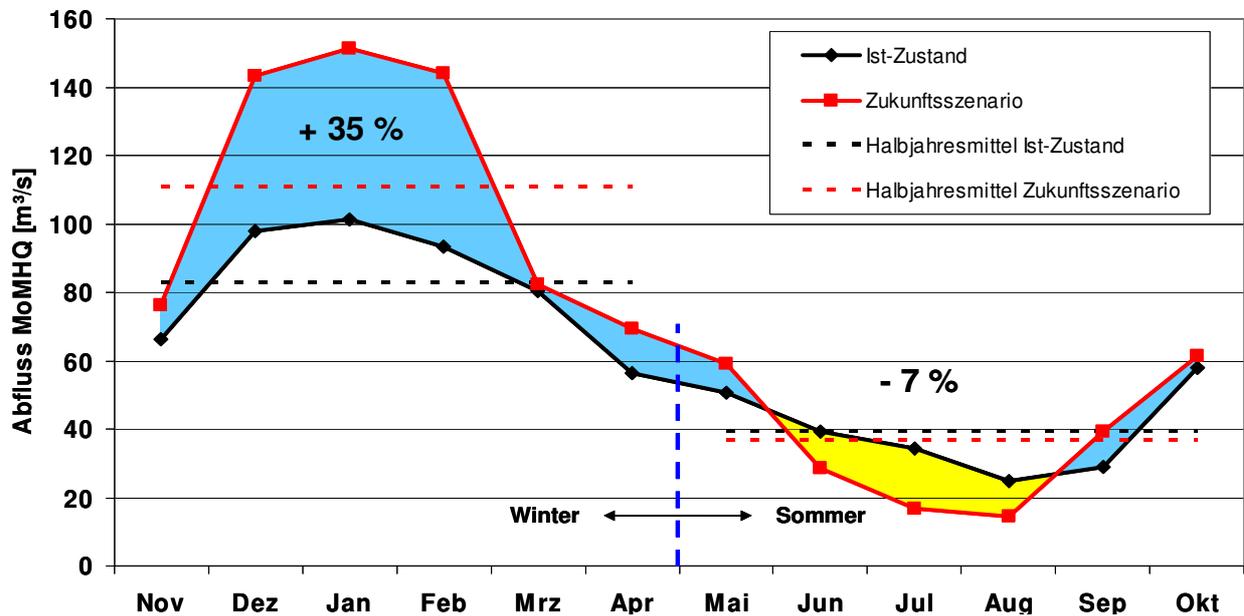


Abb. 4: Jahrgang der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse der Kinzig/Schwarzwald am Pegel Schwaibach: Zunahme der Halbjahresmittel im Winter um 35 %, im Januar sogar 50 %, dagegen Abnahme im Sommer um 7 %, im Juli sogar im 50 %. Damit verändert sich der Jahrgang der Kinzig deutlich.

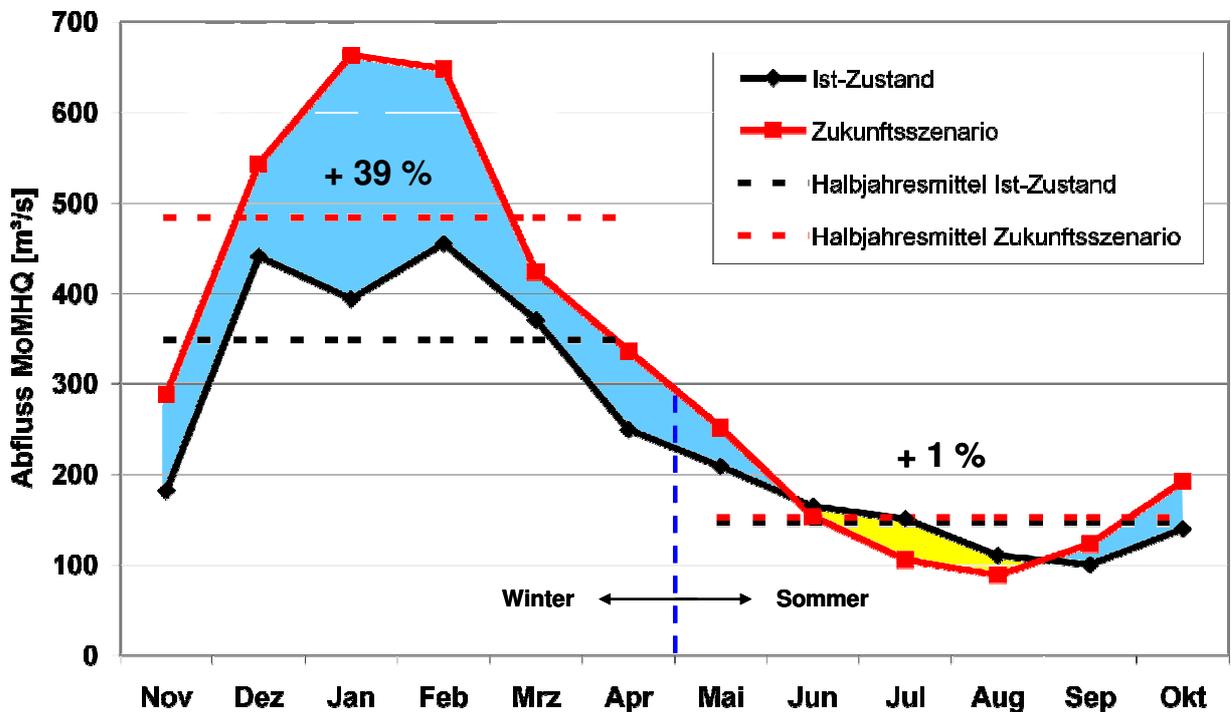


Abb. 5: Jahrgang der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse des Neckar am Pegel Rockenau: Zunahme der Halbjahresmittel im Winter um 39 %, im Januar sogar 50 %. Dagegen ist das Halbjahresmittel im Sommer nahezu unverändert, im Juli jedoch Abnahme um 33 %. Damit verändert sich der Jahrgang des Neckars am Pegel Rockenau deutlich.

Um die Änderungen der Extremwerte der Hochwasserabflüsse im Zukunftsszenario und gegenwärtigem Zustand zu quantifizieren, wurden sogenannte Klimaänderungsfaktoren für das

mittlere Hochwasser MHQ und für die Hochwasserkennwerte der Jährlichkeiten 2, 5, 10, 20, 50, 100 und 200 Jahre gebildet. Faktoren größer 1 bedeuten demnach eine Zunahme des Hochwasserkennwertes, Faktoren kleiner 1 eine Abnahme. Die Ergebnisse in Abbildung 5 lassen eine deutliche Zunahme der mittleren Hochwasser (MHQ), aber auch der extremen Abflüsse, erwarten. Auch wenn die Ergebnisse aus der Modellkette (Globalmodell – regionales Klimamodell – Wasserhaushaltsmodelle) und den Modellannahmen noch mit Unsicherheiten behaftet sind, zeigen die Faktoren alle in dieselbe Richtung, so dass von einer Hochwasserverschärfung durch die Klimaveränderung für den betrachteten Zeitraum bis zum Jahr 2050 in Baden-Württemberg auszugehen ist.

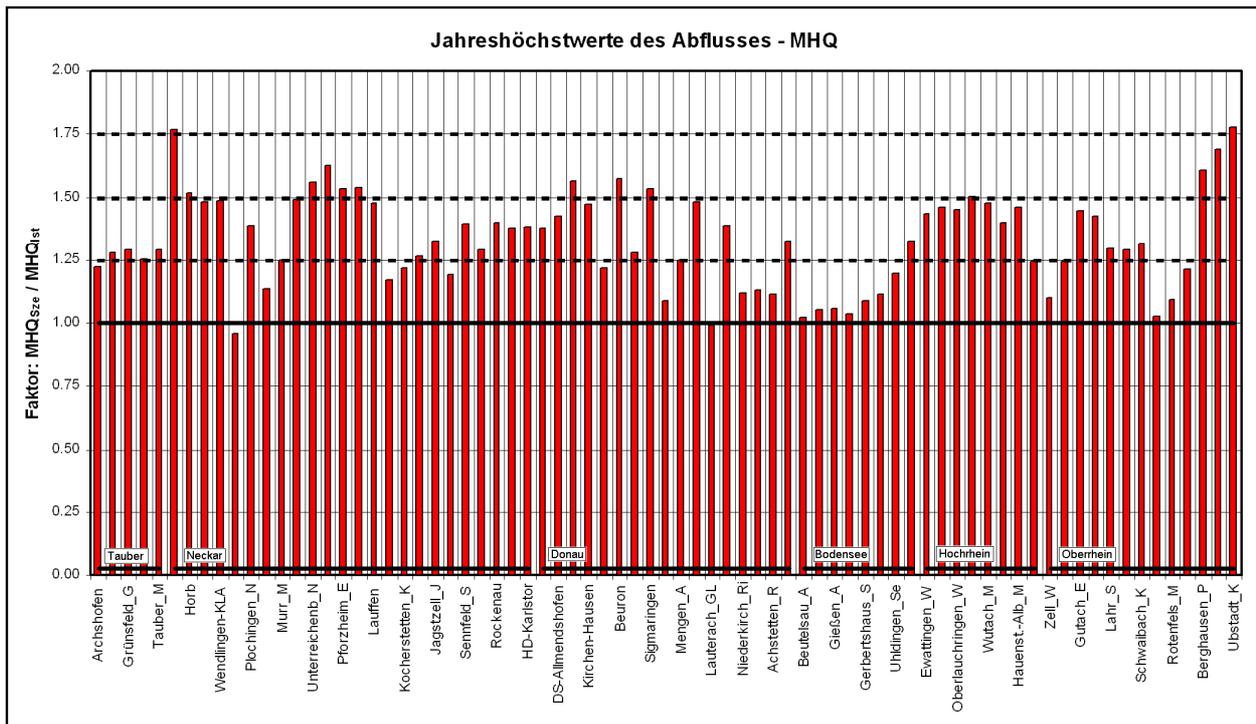


Abb. 6: Zukünftige Veränderung der mittleren Hochwasserabflüsse infolge des Klimawandels

Die Ergebnisse wurden für die genannten Jährlichkeiten in Karten übertragen. Die Ergebnisse der einzelnen Karten wurden anschließend zu einer Gesamtkarte und einer Tabelle zusammengefasst. Damit ergeben sich für Baden-Württemberg die in Abbildung 6 dargestellten fünf Bereiche mit jeweils unterschiedlichen Klimaänderungsfaktoren. Durch räumliche Zuordnung zu einem der fünf Bereiche stehen Klimaänderungsfaktoren für Einzugsgebiete im Land und für die jeweiligen Jährlichkeiten zur Verfügung. Die entsprechenden Werte sind in der Abbildung 6 zusammengestellt. Gemäß der dort abgebildeten Tabelle können folgende Ergebnisse für die zukünftige Entwicklung der Hochwasserabflüsse festgehalten werden:

- Insbesondere die kleineren und mittleren Hochwasserereignisse werden voraussichtlich landesweit deutlich zunehmen.
- Der Hochwasserkennwert für die Jährlichkeit 100 Jahre erhält einen Zuschlag von 15 % bzw. 25 %.
- Das Extremereignis HQ_{1000} ist für das Zukunftsszenario im Vergleich zu den gegenwärtigen Verhältnissen unverändert, da die Extremwertstatistik auf der vorhandenen Datenbasis eine Änderung dieses Kennwertes gegenwärtig nicht rechtfertigen würde.

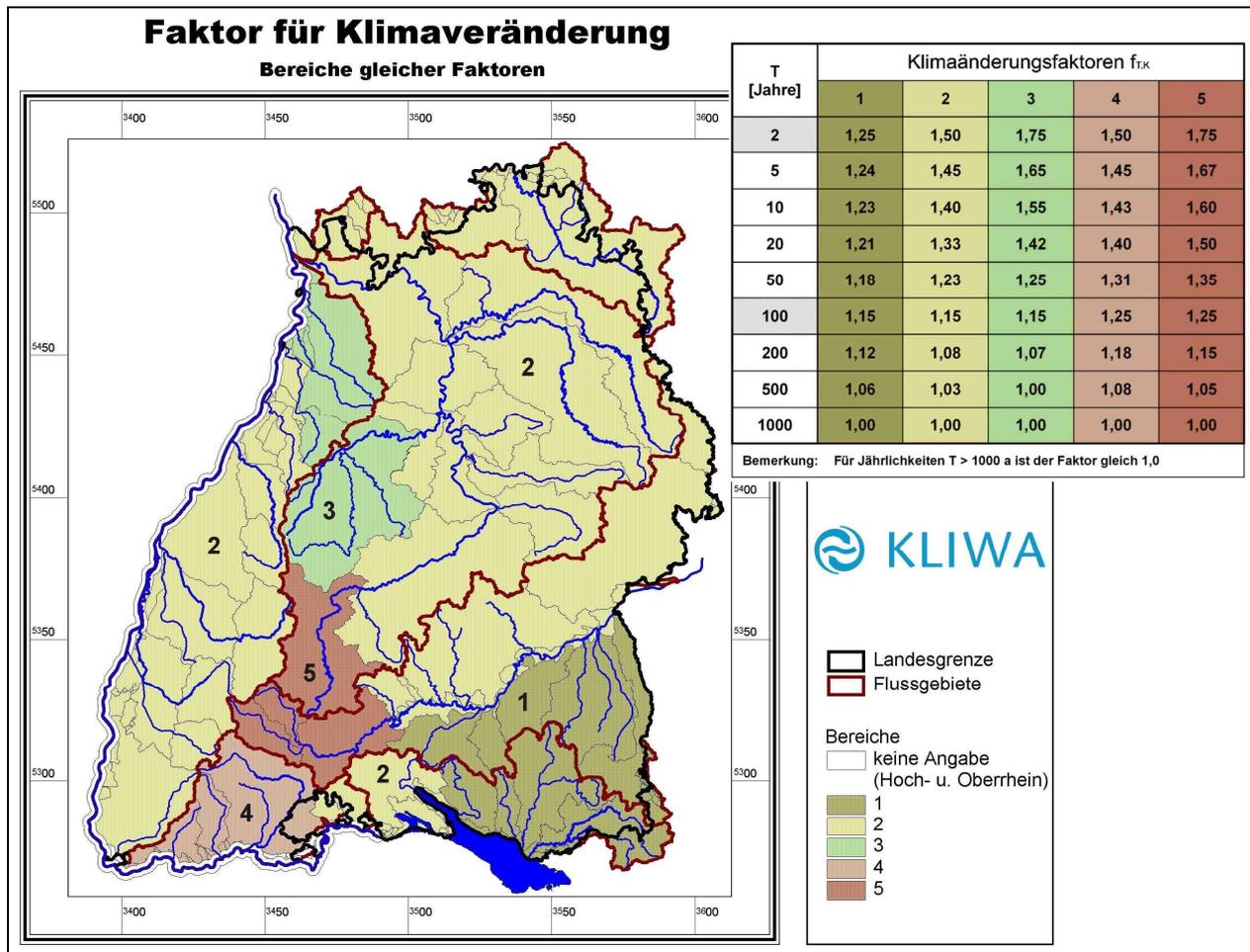


Abb. 7: Regionale Klimaänderungsfaktoren in Baden-Württemberg

5. Anpassung der Hochwasserschutzplanungen

Vor diesem Hintergrund galt es aus Vorsorgegründen, für den Bereich des Hochwasserschutzes eine Anpassungsstrategie zu entwickeln, die zwar die mögliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte berücksichtigt, aber auch den bestehenden Unsicherheiten Rechnung trägt. Festlegungen sollten daher als Kernpunkt enthalten, dass sie einerseits langfristig unschädlich und gleichzeitig bei Bedarf (z.B. bei neuen Erkenntnissen der Klimaforschung) anpassbar sind.

Die Auswertungen gaben Anlass, den bisherigen Weg bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen zu modifizieren und auf Grund des Klimawandels einen „Lastfall Klimaänderung“ zu berücksichtigen. Anhand von Fallbeispielen aus der Praxis wurde dazu nachgewiesen, dass eine Berücksichtigung der Auswirkungen der Klimaänderung bei technischen Hochwasserschutzmaßnahmen in den meisten Fällen zu relativ moderaten Kostensteigerungen geführt hätte, wenn dieser Lastfall bereits bei der Planung berücksichtigt und beim Bau zumindest entsprechende Vorkehrungen für eine spätere Anpassung getroffen worden wären. Nachträgliche Anpassungen sind hingegen meist mit sehr hohen Kosten verbunden.

Der Lastfall Klimaänderung soll deshalb künftig bei Planungen von neuen technischen Hochwasserschutzmaßnahmen mit untersucht werden. Dabei ist aufzuzeigen, welche Konsequenzen sich durch den Lastfall auf die Auslegung der Maßnahmen ergeben und welche Mehrkosten dadurch zu erwarten sind. Auf Grund der dann vorliegenden Erkenntnisse soll entschieden werden, inwieweit die notwendige Anpassung an den künftigen Klimawandel bereits jetzt bei

der Ausführung berücksichtigt werden soll. Dabei sind auch Möglichkeiten für eine spätere Nachrüstung in Betracht zu ziehen.

5.1 Erhöhung der Bemessungsabflüsse

Dem Lastfall Klimaänderung müssen erhöhte Bemessungsabflüsse zugrunde gelegt werden. Dies erfolgt durch einen Zuschlag („Klimaänderungsfaktor“) zum derzeit gültigen Bemessungswert (z.B. HQ_{100}). In Baden-Württemberg ergeben sich gemäß Abb. 6 je nach Wiederkehrzeit (Jährlichkeit T_n) regional unterschiedliche Klimaänderungsfaktoren.

Für die Abflüsse beim Lastfall Klimaänderung ($HQ_{T_n, \text{Klima}}$) können die aus der Hochwasserregionalisierung oder hydrologischen Modellberechnung vorliegenden Hochwasserkennwerte HQ_{T_n} direkt mit dem Klimaänderungsfaktor $f_{T, \text{Klima}}$ erhöht werden:

$$HQ_{T_n, \text{Klima}} = f_{T, \text{Klima}} \cdot HQ_{T_n}$$

HQ _T (Regionalisierung)		Klimaänderung $HQ_{T, \text{Klima}} = f_{T, \text{Klima}} \times HQ_T$	
T (Jahre)	HQ _T (m ³ /s)	Klimaänderungsfaktor	HQ _{T, Klima} (m ³ /s)
2	140	1,50	210
5	205	1,45	298
10	250	1,40	350
20	292	1,23	388
50	346	1,23	425
100	388	1,15	446
200	434	1,08	468
500	504	1,03	519
1000	543	1,00	543

Abb. 8: Lastfall Klimaänderung Beispiel Forbach/Murg

5.2 Beispiele

Die nachfolgend aufgeführten Beispiele sollen verdeutlichen, wie unter dem Aspekt erhöhter Bemessungswerte, also der Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung, bei der Umsetzung von Planungen vorgegangen werden kann:

- Planung von Hochwasserrückhaltebecken: Eine spätere Anpassung eines Hochwasserrückhaltebeckens (HRB), das nicht auf die hydrologischen Änderungen infolge des Klimawandels ausgelegt ist, ist in der Regel sehr kostenträchtig, sofern eine Anpassung überhaupt technisch möglich ist. Es sind nicht nur die technischen Einzelbauwerke eines HRB anzupassen, sondern auch das notwendige Beckenspeichervolumen, das bei Zunahmen der Niederschlagshöhen und Niederschlagsdauern sich deutlich vergrößern kann.
- Planung eines Hochwasserdammes: Der Damm wird nach derzeitigen Vorgaben gebaut, es werden jedoch zusätzliche Maßnahmen vorgenommen, die nach bisherigen Planungsgesichtspunkten nicht erforderlich wären. Zum Beispiel wird zusätzlich ein Geländestreifen auf der Luftseite beansprucht und freigehalten, der eine zukünftige notwendige Dammerhöhung ohne zusätzliche Probleme ermöglicht.

- Neue Bauobjekte, bei denen eine zukünftige Änderung und Anpassung nicht oder nur sehr aufwändig möglich ist (z.B. Brücken, Durchlässe), sollten sofort auf zukünftige erhöhte Bemessungsgrößen beim Wasserstand ausgelegt werden.
- Neue Bauobjekte, bei denen eine zukünftige Anpassung weniger problematisch ist (z.B. Ufermauern), sollten hinsichtlich ihrer Konstruktionsmerkmale (z.B. der Statik) über den derzeitigen Bedarf hinaus so ausgelegt werden, dass eine ggf. später notwendig werdende Anpassung (z. B. Erhöhung durch feste oder mobile Elemente) kostengünstig möglich ist.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Kleinere und mittlere Hochwasserereignisse werden voraussichtlich infolge des Klimawandels landesweit zunehmen. Für den Hochwasserabfluss der Wiederkehrzeit 100 Jahre wird zu einem Zuschlag von 15 % bzw. 25 % zu den bisherigen Hochwasserkennwerten bei der Bemessung von neuen Hochwasserschutzanlagen geraten.

Die Vorgehensweise beim Lastfall Klimaänderung bei neuen Hochwasserschutzplanungen ist in Baden-Württemberg in den Leitfaden „Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“ mit einer Sammlung von Beispielen aufgenommen worden. Zusammen mit der Regionalisierung der Hochwasserkennwerte „Abflusskennwerte in Baden-Württemberg“, die flächendeckend für Baden-Württemberg vorliegt, ist damit die Berücksichtigung des Klimawandels bei den Auswirkungen auf die Hochwasserabflüsse auf eine landeseinheitliche Basis, die in der Praxis leicht zu handhaben ist, gestellt worden.

In Zeiten des Klimawandels ist dem Vorsorgeprinzip der Wasserwirtschaft verstärkt Beachtung zu schenken. Mit KLIWA werden Grundlagen für eine vorausschauende Daseinsorge entwickelt. Da auch neue Hochwasserschutzplanungen wirtschaftlich sein müssen, sind insbesondere flexible Lösungsansätze, die genauso Möglichkeiten zum Nachjustieren offen lassen, gefragt. Insgesamt ist in der Wasserwirtschaft zur Lösung der kommenden Aufgaben, die durch den Klimawandel ausgelöst werden, ein pragmatisches Vorgehen erforderlich.

Die bisherigen Erkenntnisse haben nicht zuletzt auch unter Vorsorgegesichtspunkten bereits zu konkreten Konsequenzen geführt. Bei der Bemessung von neuen Hochwasserschutzplanungen können die erwarteten Folgen des Klimawandels bereits jetzt berücksichtigt werden.

Die bislang gewonnenen Erkenntnisse beinhalten noch Unsicherheiten. Mit den Fortschritten der weltweiten Klimaforschung und der Verbesserung der Modellierungsinstrumente werden sich die bisherigen Erkenntnisse zwangsläufig auch fortentwickeln müssen. Mit der Aufstellung von Wasserhaushaltsmodellen für die einzelnen Flussgebiete können weitere Untersuchungen verhältnismäßig einfach weitergeführt werden.

Die durch den Klimawandel verschärfte Hochwasserproblematik zeigt aber auch, dass eine Hochwasserschutz-Strategie nicht nur auf der Säule des technischen Hochwasserschutzes gegründet sein sollte, sondern dass die beiden anderen Elemente Hochwasser-Flächenmanagement und Hochwasservorsorge verstärkt verfolgt werden müssen, damit Land, Gemeinden und jede(r) betroffene Bürger(in) vor den zunehmenden Hochwassergefahren gut gerüstet sind.

Hinweis

Zu diesem Thema ist die Broschüre „Unser Klima ändert sich: Folgen – Ausmaß - Startegien“ erschienen. Die Broschüre ist bei der LUBW, Griesbachstraße 1, 76185 Karlsruhe erhältlich und steht neben anderen Informationen auf der KLIWA-Homepage www.kliwa.de als Download zur Verfügung.