



## Simulation des Wasserhaushalts im Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien

Dr.-Ing. Kai Gerlinger  
Ingenieurbüro Dr.-Ing. K. Ludwig, Beratender Ingenieur, Karlsruhe

(Veröffentlicht in: AK KLIWA (Hrsg.): 2. KLIWA-Symposium 03./04.05.2004 in Würzburg, Fachvorträge. KLIWA-Berichte, Heft 4, S. 87 –102).

### 1. Einleitung

Im Rahmen des Kooperationsvorhabens "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft" (KLIWA-Projekt) arbeiten die Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie der Deutsche Wetterdienst (DWD) zusammen, um u.a. die Auswirkungen der zukünftigen Klimaveränderungen auf den regionalen Wasserhaushalt abzuschätzen und Handlungsempfehlungen abzuleiten (Bartels et al. 2004).

Um Aussagen über die zukünftig zu erwartende Veränderung der hydrometeorologischen Größen in Süddeutschland zu erhalten, wurden innerhalb des KLIWA-Projekts die folgenden drei Verfahren zur Ermittlung von regionalen Klimaszenarien ausgewählt (Bartels 2004):

- statistisches Verfahren des Potsdam Instituts für Klimafolgenforschung (PIK, Gerstengarbe et al. 2002),
- statistisches Verfahren der Firma Meteo-Research (MR, Enke 2003),
- dynamisches Modell REMO (Version 5.1) des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI, Jacob et al. 2003).

Mit allen drei Verfahren wurden hydrometeorologische Daten (Lufttemperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit) sowohl für den Ist-Zustand (1971-2000) als auch für ein Zukunftsszenario (2021-2050) simuliert. Basis für die Berechnung des Zukunftsszenarios der drei Verfahren sind die Berechnungsergebnisse des globalen Zirkulationsmodells ECHAM4/OPYC3 unter Annahme des Emissionsszenarios B2 (IPCC 2000).

Die Ergebnisse der regionalen Klimaszenarien wurden als Eingangsdaten für Simulationen mit einem Wasserhaushaltsmodell (WHM) verwendet. Die Resultate dieser Simulationen werden im folgenden vorgestellt. Bei der Verwendung des WHM für die Klimaszenarienberechnung für das Zukunftsszenario wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die zukünftige Landnutzungsverteilung mit der heutigen übereinstimmt, da zum heutigen Zeitpunkt nicht abzuschätzen ist, welche klimatisch oder anthropogen bedingte Landnutzungsveränderung in der Zukunft eintritt. Auch die bei der Kalibrierung des Modells festgelegten Parameter werden unverändert für die Zukunft übernommen.

Im Rahmen des KLIWA-Projekts wurden für die gesamte Fläche von Baden-Württemberg hochaufgelöste WHM (1 km x 1 km-Raster) mit dem Programmsystem LARSIM (Bremicker 2000) erstellt. Diese WHM sind auch für andere Fragestellungen anwendbar, wie z.B. für die operationelle Niedrig- und Mittelwasserberechnung und Hochwasserfrühwarnung für das Neckargebiet (Gerlinger et al. 2003). Im weiteren wird das WHM Neckar ( $A_{EZG} = \text{ca. } 14.000 \text{ km}^2$ ) betrachtet (Abb. 1), da hierfür die ersten Ergebnisse der Umsetzung der Klimaszenarien vorliegen. Für alle anderen Gebiete in Baden-Württemberg werden derzeit Berechnungen auf Grundlage der Klimaszenarien durchgeführt.

Die Ergebnisse des WHM Neckar werden zunächst nur in Hinblick auf das Abflussgeschehen untersucht, da dies den Einfluss der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt insgesamt, integrierend über das Einzugsgebiet, wiedergibt.



Mit einem WHM werden aber außer dem Abfluss auch alle flächenhaft vorliegenden Komponenten des Wasserhaushalts (wie z.B. reale Verdunstung, Bodenfeuchte, Grundwasserneubildung, Wasseräquivalent der Schneedecke) berechnet. Diese bereits vorliegenden Ergebnisse des WHM und ihre Veränderungen werden zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet.

## 2. Simulationsergebnisse des Wasserhaushaltsmodells mit Messdaten

Die Ergebnisse des WHM zeigen auch dann Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Abflüssen, wenn das WHM mit gemessenen Klimadaten angetrieben wird. Um die Genauigkeit einzuschätzen, die bei der Umsetzung der Ergebnisse der Klimaszenarien mit dem WHM erreicht werden kann, ist somit zunächst die Modellgüte des WHM bei Verwendung von gemessenen hydrometeorologischen Eingangsdaten zu überprüfen.

Dies erfolgte für das WHM Neckar für den vierzigjährigen Zeitraum 1961-2000 unter Verwendung von gemessenen Tageswerten. Für die Kalibrierung des Modells wurde der fünfjährige Zeitraum 1987-1991 ausgewählt.

Zur Bewertung der Simulationsgüte des Modells wurden statistische Gütemaße berechnet. Die Modelleffizienz nach Nash-Sutcliffe an den untersuchten Pegeln im WHM Neckar liegt in jedem Jahr des Rechenlaufs in der Regel über 0,7 und belegt eine hohe Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Modellabweichungen treten vor allem bei Hochwasserspitzen auf. Dies liegt daran, dass durch die Verwendung von Tageswerten die gemessenen Hochwasserspitzen nicht korrekt nachgebildet werden können. Die Modelleffizienz für die logarithmierten Abflüsse, die als Maß für die Modellgüte im Niedrig- und Mittelwasserbereich dient und weniger stark die Hochwasser wichtet, liegt daher im allgemeinen sogar höher.

Abb. 2 zeigt exemplarisch für den Pegel Rockenau ( $A_{EZG} = 12.800 \text{ km}^2$ ) den zeitlichen Verlauf der beiden Gütemaße. Die hohen Gütemaße über unterschiedlich trockene und feuchte Jahre innerhalb des 40-Jahreszeitraums belegen, dass das Modell auch bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen verlässliche Ergebnisse liefert.

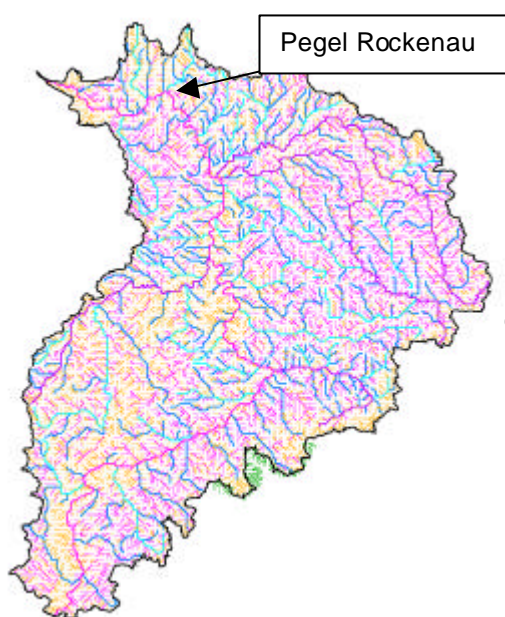


Abb. 1: Modellvernetzung des WHM Neckar

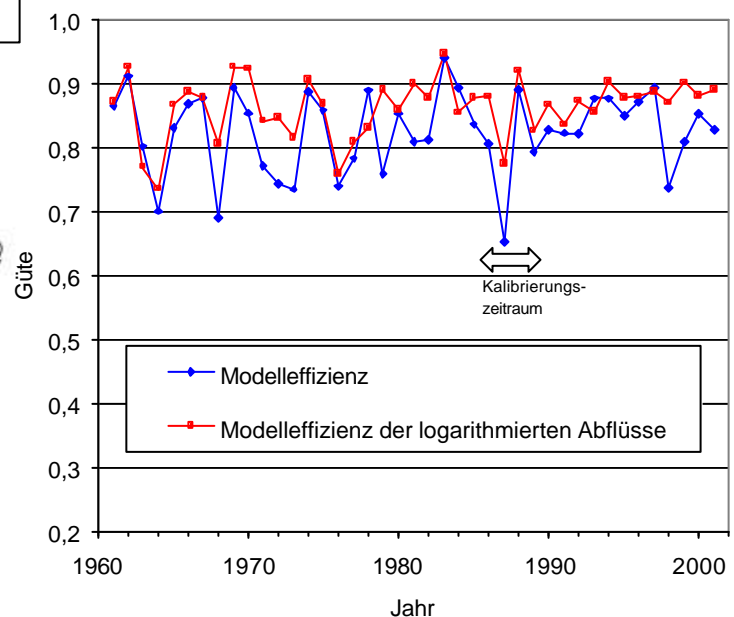


Abb. 2: Modellgüte des WHM Neckar für die Zeitreihe 1961–2000 für den Pegel Rockenau/Neckar



In Abb. 3 sind der Jahresgang der mittleren monatlichen Abflüsse (MoMQ) sowie der mittleren monatlichen Höchstabflüsse (MoMHQ) für die Mess- und für die Simulationen dargestellt. Dabei wurde der Zeitraum 1971-2000 ausgewählt, der im Weiteren bei der Verwendung der Klimaszenarien betrachtet wird. Es zeigt sich, dass auf Grund der Verwendung von Tageswerten die simulierten MoMHQ etwas unterhalb der gemessenen Werte liegen, während die simulierten MoMQ sehr gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Auch die in Abb. 3 dargestellten Standardabweichungen stimmen gut überein, so dass nicht nur das Mittel, sondern auch die Schwankungsbreiten der simulierten und gemessenen Werte vergleichbar sind.

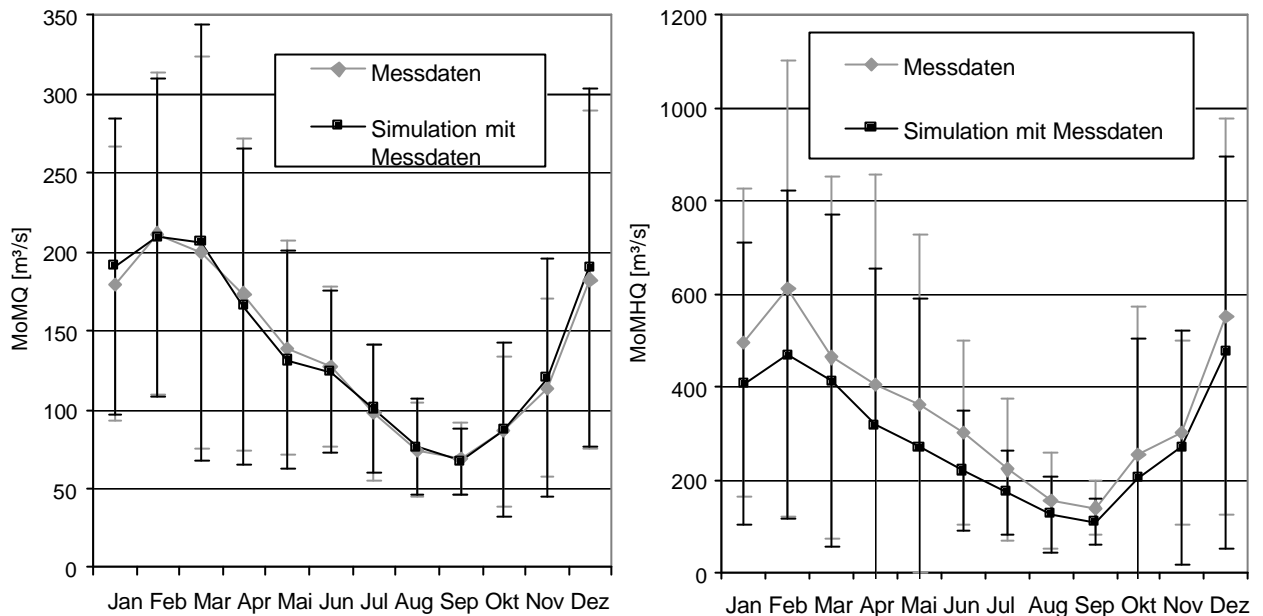


Abb. 3: Mittlere monatliche Mittelwasserabflüsse MoMQ und mittlere monatliche Hochwasserabflüsse MoMHQ (jeweils mit Standardabweichung): Messdaten und simulierte Daten unter Verwendung von gemessenen Klimawerten (Pegel Rockenau/Neckar, Zeitraum 1971-2000)

### 3. Regionalisierung der Klimaszenarien

#### 3.1 Regionalisierung der stationsbezogenen Niederschlagsdaten

Die Ergebnisse der statistischen regionalen Klimamodelle (PIK und Meteo-Research) liegen für alle Klimagrößen punktuell für 70 Klimastationen in Süddeutschland vor. Davon befinden sich nur 18 Klimastationen im Neckargebiet sowie im angrenzenden Bereich.

Alle Klimagrößen außer dem Niederschlag werden mit dem in LARSIM implementierten Inversen-Distanz-Verfahren auf die hohe räumliche Auflösung des WHM interpoliert. Dabei erfolgt auch eine modellinterne Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit der Lufttemperatur.

Da die Verteilung des Niederschlags im allgemeinen wesentlich heterogener ist als die Verteilung der anderer Klimagrößen, wird auf Grund der geringen Stationsdichte für den Niederschlag eine Regionalisierung der Niederschlagsdaten durchgeführt. Die Regionalisierung des Niederschlags wird mit Hilfe von Hintergrundfeldern durchgeführt, die eine höhere räumliche Auflösung besitzen (vgl. Kleinn 2002). Diese räumliche Verteilung wird übernommen und auf die durch die Klimamodelle simulierten Zeitreihen aufgeprägt.



Als Hintergrundfelder werden hier die REGNIE-Daten des DWD verwendet, die als monatliche Mittelwerte des Niederschlags aus dem Zeitraum 1971-2000 im ca. 1 x 1 km<sup>2</sup> Raster vorliegen. Hierzu wurde ein Programm erstellt zur entfernungsgerichteten, stationstreuen Dateninterpolation unter Verwendung der REGNIE-Daten, basierend auf Dietzer (2003).

Die Einschränkung des Verfahrens liegt in der Annahme, dass bei der Regionalisierung der Niederschlagsdaten des Zukunftsszenarios von einer räumlich gleichen Niederschlagsverteilung wie in der heutigen Zeit ausgegangen wird. Zudem können einzelne Niederschlagsereignisse (insbesondere beim Durchgang konvektiver Zellen) vom zugrunde gelegten Muster, wie es sich aus den mittleren Monatswerten ergibt, abweichen.

Um die Wirkung der Regionalisierung zu überprüfen, wurden Vergleichsrechnungen für den Zeitraum 1961-2000 mit dem WHM Neckar durchgeführt (LfU 2003a). Die Simulationsergebnisse bei einer Verwendung der 18 Klimastationen im Bereich des Neckars ohne Regionalisierung der Niederschläge weichen recht deutlich von den gemessenen Abflüssen ab. Die Niederschläge an den 18 Klimastationen repräsentieren daher den Gebietscharakter nur unzureichend. Werden dagegen die Niederschläge der 18 Stationen unter Verwendung der REGNIE-Hintergrundfelder regionalisiert, liegen die Ergebnisse nahe an den gemessenen Abflüssen. Die Regionalisierung trägt somit wesentlich zur Verbesserung der Modellergebnisse bei.

### 3.2 Filterung der rasterbezogenen Niederschlagsdaten

Bei den Ergebnissen des dynamischen Klimamodells REMO kann eine gewisse räumliche Unschärfe bei den advektionsabhängigen Größen (vor allem Wind und Niederschlag) im Bereich von Mittelgebirgen festgestellt werden. So ergibt sich tendenziell im Luv von Mittelgebirgen eine zu hohe Abregnung, im Lee ist dagegen die Abtrocknung zu hoch. Für das Neckargebiet werden daher mit REMO im Lee des Scharzwaldhauptkamms (z.B. Einzugsgebiet der Enz) zu geringe Niederschläge simuliert.

Um diesen Effekt zu mildern, wird ein einfacher Filteralgorithmus angewandt. Dabei wird zuerst der Gebietsniederschlag jeder REMO-Rasterzelle mit dem Faktor 0,6 multipliziert. Dann werden die Gebietsniederschläge der umliegenden acht REMO-Rasterzellen mit dem Faktor 0,05 gewichtet und dazu addiert. Analog wird mit den Windgeschwindigkeiten verfahren.

Vergleichsrechnungen mit und ohne Filterung haben allerdings gezeigt, dass der Einfluss der Filterung auf die Ergebnisse der Umsetzung der REMO-Klimaszenarien mit dem Wasserhaushaltsmodell bei der Betrachtung größerer Einzugsgebiete gering ist. So verringert sich z.B. der mittlere Jahresniederschlag durch die Filterung sowohl für die Simulation des Ist-Zustands als auch für das Zukunftsszenario nur um ca. 2 %. Im weiteren werden die gefilterten REMO-Daten verwendet.

### 3.3 Regionalisierung der rasterbezogenen Niederschlagsdaten

Die REMO-Ergebnisse liegen für alle Klimagrößen als flächige Gebietsmittelwerte für die jeweils 17 x 17 km<sup>2</sup> großen Rasterzellen vor. Daher ist innerhalb einer Rasterzelle der Wert der jeweiligen Klimagröße überall gleich groß. In Abb. 4 links ist beispielhaft für einen Tag die mit REMO simulierte Verteilung des Niederschlags im Neckargebiet dargestellt.



Um die Niederschlagswerte innerhalb der Rasterzellen räumlich zu differenzieren, wurden die Niederschlagswerte ebenfalls unter Verwendung der REGNIE-Hintergrundfelder auf die 1 x 1 km<sup>2</sup> großen Rasterzellen des WHM Neckar regionalisiert. Dazu wurde ein Programm zur räumlichen Gewichtung der flächigen Gebietsmittelwerte der REMO-Daten erstellt. Dabei bleibt der Gebietsniederschlag als Mittelwert der Gebietsfläche innerhalb der 17 x 17 km<sup>2</sup> großen REMO-Zelle erhalten, und auch der zeitliche Verlauf bleibt unverändert. Durch die Hintergrundinformation des REGNIE-Rasters wird aber innerhalb der REMO-Rasterzelle der Niederschlag besser differenziert.

Abb. 4 rechts zeigt den gleichen Tag wie Abb. 4 links, aber diesmal nach Filterung und Regionalisierung. Gerade am südwestlichen Rand des Neckargebietes, im Lee des Schwarzwaldhauptkamms, wird der Niederschlag räumlich differenzierter verteilt.

Die weiteren hydrometeorologischen Klimagrößen aus REMO neben dem Niederschlag werden mit dem in LARSIM implementierten Inversen-Distanz-Verfahren interpoliert.

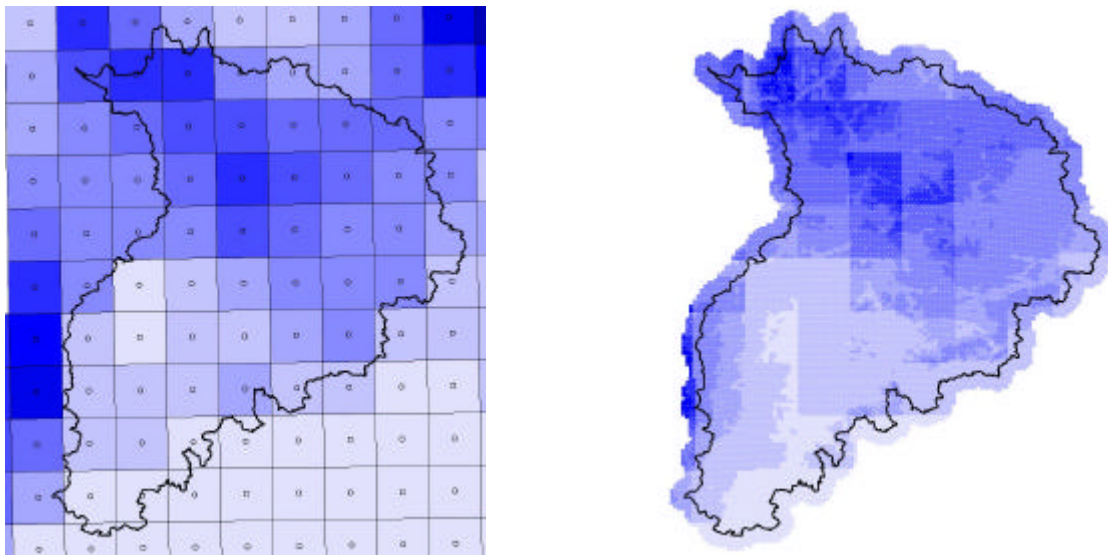


Abb. 4: Niederschlagsverteilung im Neckareinzugsgebiet aus REMO ohne (links) und mit (rechts) Filterung und Regionalisierung (Beispieltag: 26.12.1978)

## 4. Simulationsergebnisse des Wasserhaushaltsmodells mit Klimaszenarien

### 4.1 Vorgehensweise zur Umsetzung der Klimaszenarien

Um Aussagen über die klimatisch bedingte Veränderungen der wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen unter Verwendung der Klima- und Wasserhaushaltsmodelle ableiten zu können, wurde die in Abb. 5 schematisch dargestellte Vorgehensweise gewählt. Diese wird im weiteren in den einzelnen Schritten erläutert.

1) Ergebnisse der Klimamodelle: Die Klimamodelle liefern sowohl für den Ist-Zustand als auch für das Zukunftsszenario Klimadaten als Simulationsergebnisse. Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse der Klimamodelle für den Ist-Zustand...:

- (a) ...mit den gemessenen Klimadaten des selben Zeitraums können die Klimamodelle überprüft werden,
- (b) ...mit dem Zukunftsszenario können Aussagen zu den zukünftig zu erwartenden Veränderungen der Klimadaten (z.B. Niederschlag, Lufttemperatur) gemacht werden.



Sowohl (a) die Überprüfung der Modelle (Vergleich Simulationsergebnisse Ist-Zustand mit gemessenen Klimadaten) als auch (b) die Auswertung der Änderungen im Szenariolauf gegenüber dem Ist-Zustand wurden bereits von den Klimamodellierern für ihr jeweiliges Modell vorgenommen. Eine regionenspezifische Auswertung für Süddeutschland verdeutlicht die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Klimamodelle (LfU-LfW 2003, Bartels 2004).

Für die Übertragung der Ergebnisse regionaler Klimaszenarien in hydrologische Modelle kann der sogenannte „delta change approach“ (z.B. Andréasson et al. 2004) verwendet werden. Dabei werden zunächst die relativen Veränderungen der hydrometeorologischen Variablen, insbesondere des Niederschlags, zwischen der Simulation des Ist-Zustands und des Zukunftsszenarios (Fall (b)) auf die beobachteten Daten übertragen. Anschließend werden Simulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell mit den durch diese sogenannten Änderungsvektoren veränderten Beobachtungswerten durchgeführt, um Aussagen über die zukünftigen Änderungen zu erhalten. Durch den „delta change approach“ können eventuell vorhandene systematische Fehler des Klimamodells verringert werden.

Nachteilig ist allerdings, dass die Verwendung eines Änderungsvektors (z.B. eines multiplikativen Faktors) zu Fehleinschätzungen führen kann, wenn die Häufigkeit von Niederschlagsereignissen zwischen der Simulation des Ist-Zustands und des Zukunftsszenarios differiert. Die erforderliche Linearität zwischen den Variablen ist nicht gegeben.

Im KLIWA-Projekt wird daher im ersten Schritt ein anderes Verfahren durchgeführt, in dem zunächst die Ergebnisse der Klimaszenarien für die Simulation des Ist-Zustands und des Zukunftsszenarios unverändert im Wasserhaushaltsmodell verwendet werden.

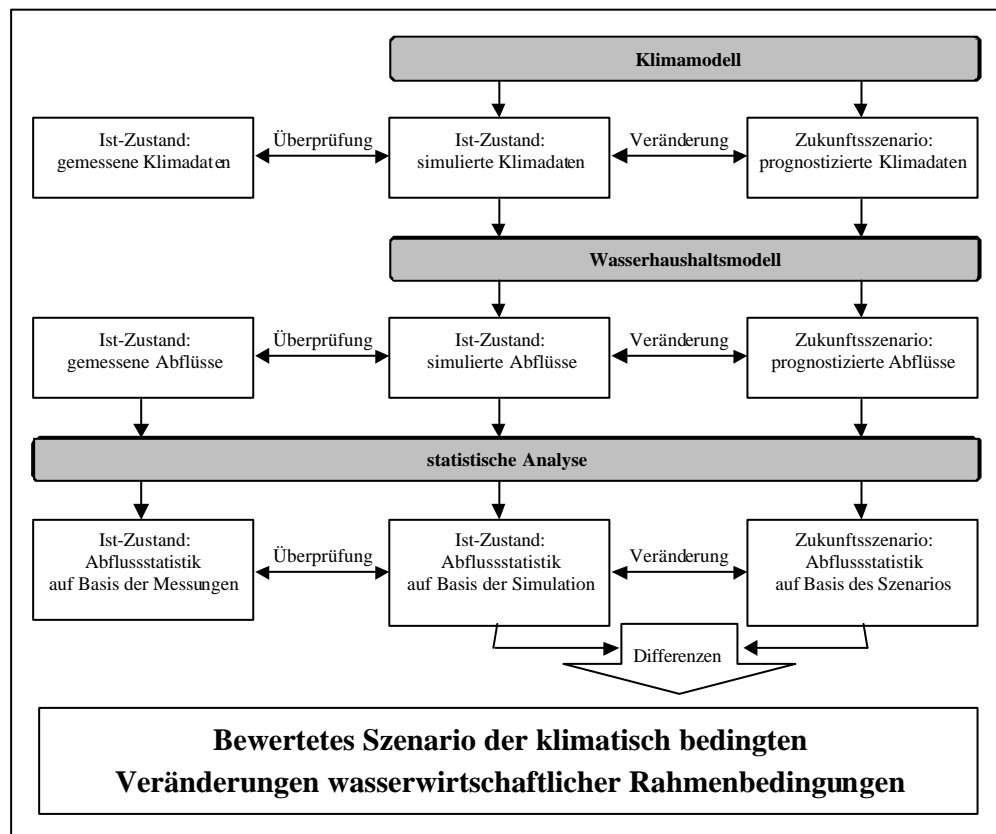


Abb. 5: Vorgehensweise bei der Umsetzung von Klimaszenarien in Wasserhaushaltssimulationen (bezogen auf die Abflüsse) (nach LfU 2003b)



2) Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodelle: Durch den Vergleich der Ergebnisse aus den Wasserhaushaltssimulationen für den Ist-Zustand...:

- (a) ...mit den gemessenen Abflussdaten kann die Vertrauenswürdigkeit der kombinierten Klima- und Wasserhaushaltssimulation überprüft werden, d.h. die Unsicherheiten beider Modelle sind hierin enthalten.
- (b) ...mit dem Zukunftsszenario ergeben sich die auf Basis des Szenarios zu erwartenden Veränderungen, wobei systematische Modellfehler eliminiert werden. Es werden somit die relativen Veränderungen zwischen Simulation des Ist-Zustands und des Szenarienlaufs erst nach der Wasserhaushaltssimulation betrachtet. Diese sind dann auf die Messdaten zu übertragen. Ein direkter Vergleich zwischen Zukunftsszenario und Messdaten des Ist-Zustandes würde zu einer Verfälschung der Aussagen führen.

3) Statistische Analyse: Da die Klimamodelle keine zeitgenauen Prognosen für einen bestimmten Tag liefern, sind für den Abfluss keine zeitgenauen Prognosen für einzelne Ereignisse möglich. Somit sind die Klimagrößen und die wasserwirtschaftlichen Größen bei einer Analyse der Ergebnisse im statistischen Sinne zu betrachten. Daher werden die gemessenen und simulierten Abflüsse statistisch ausgewertet (mittlere jährliche Werte (MHQ, MQ, MNQ), mittlere monatliche Werte (MoMHQ, MoMQ, MoMNP) sowie Dauerlinien und Rangfolgen). Extremwertstatistische Auswertungen unter Verwendung der WHM-Simulationen wurden von Ihringer (2004) durchgeführt.

4) Analyse der relativen Veränderungen: Zur endgültigen Abschätzung der klimatisch bedingten Veränderungen der wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen werden dann im Anschluss an die statistische Analyse die Differenzen zwischen der Simulation des Ist-Zustands und des Zukunftsszenarios betrachtet.

Im folgenden werden somit im Schwerpunkt die relativen Veränderungen der Ergebnisse aus den Wasserhaushaltssimulationen für den Ist-Zustand und für das Zukunftsszenario statistisch ausgewertet. Dies erfolgt am Beispiel des Pegels Rockenau ( $A_{EZG} = 12.800 \text{ km}^2$ , vgl. Abb. 1). Die Analyse weiterer Pegel im Neckargebiet, die hier nicht dargestellt ist, erbrachte vergleichbare Ergebnisse (vgl. auch Ihringer 2004).

## 4.2 Verwendung der Klimaszenarien des PIK

Für die Simulation des Ist-Zustands liegt kein Ergebnis von Seiten des PIK vor, so dass die Ergebnisse für das Zukunftsszenario nur direkt mit den Messdaten verglichen werden können. Dieses Vorgehen ist methodisch nur dann zulässig, wenn davon ausgegangen wird, dass die gemessenen und simulierten Daten des Ist-Zustands weitestgehend identisch sind.

Darüber hinaus sind beim PIK-Modell folgende Einschränkungen vorhanden:

- Die für die Zukunft simulierten Extremwerte überschreiten nicht die heutigen Werte.
- Die räumlichen Strukturen der Verteilung der hydrometeorologischen Klimagrößen für den Ist-Zustand werden auch im Zukunftsszenario beibehalten.
- Die Dauer zusammenhängender Perioden mit ähnlichen klimatischen Bedingungen wird generell unterschätzt (mangelnde Persistenz). Daher fehlen z.B. mehrtägige zusammenhängende Feucht- oder Trockenperioden. Demzufolge ergibt sich beim PIK-Modell für das Zukunftsszenario 2021-2050 eine Erhöhung der NQ-Werte und eine Verringerung der HQ-Werte im Vergleich zu den jeweiligen Messdaten des Zeitraums 1971-2000.

Im weiteren wird daher auf die Ergebnisse des PIK-Modells nicht detaillierter eingegangen.



### 4.3 Verwendung der Klimaszenarien von Meteo-Research (MR)

Für das Zukunftsszenario werden von MR für jede Dekade 10 unterschiedliche Realisationen zur Verfügung gestellt. Jede Realisation ist ein mögliches Szenario für die betrachtete Dekade. In Abb. 8 sind für die mittlere Dekade 2031-2040 die Ergebnisse der 10 Realisationen dargestellt, um deren Schwankungsbreite zu verdeutlichen. Um nicht in der weiteren Betrachtung der Ergebnisse des MR-Modells alle 10 Realisationen zu diskutieren, wird ein Lauf als repräsentativ definiert, der sich etwa im oberen Drittel der 10 Realisationen befindet. Dieser Lauf, der in Abb. 8 rot markiert ist, wurde auch von Ihringer (2004) weiter verwendet.

Beim MR-Modell ist anzumerken, dass auf Grund des gewählten Berechnungsverfahrens für das Zukunftsszenario an einigen Stationen sehr hohe Einzelniederschläge an einem Tag auftreten können, die allerdings nicht zu großräumigeren Hochwasserereignissen führen. Hier wird eine gewisse Schwäche des statistischen Verfahrens ersichtlich.

Vergleich Ist-Zustand mit Messdaten: Die mit dem WHM simulierten mittleren monatlichen Niedrig- und Mittelwasserabflüsse (MoM<sub>NQ</sub>, MoM<sub>Q</sub>) unter Verwendung der Ergebnisse des MR-Modells zeigen eine hohe Übereinstimmung mit Messdaten (Abb. 6). Die simulierte Dauerlinie (Abb. 9) weicht etwas stärker von den Messungen ab, v.a. bei den Extremwerten. Bei den mittleren monatlichen Hochwasserabflüssen (MoM<sub>HQ</sub>) treten höhere Abweichungen auf (Abb. 7). Diese sind aber vor allem auf die Abweichungen des Wasserhaushaltsmodells bei der Hochwassersimulation auf Grund der Verwendung von Tageswerten zurückzuführen (vgl. Abb. 3 rechts). Insgesamt wird also der Ist-Zustand relativ gut wiedergegeben.

Vergleich Ist-Zustand mit Zukunftsszenario: Beim MR-Modell ähneln die simulierten sommerlichen MoM<sub>NQ</sub> des Zukunftsszenarios denen des Ist-Zustands. Demzufolge ist zukünftig im Mittel mit keinen niedrigeren Abflüssen im Sommer zu rechnen (Abb. 6 links). Auch die Analyse der Rangfolge der jährlichen NQ-Werte zeigt keine niedrigeren Werte im Zukunftsszenario im Vergleich zur Simulation des Ist-Zustands. Die mittleren Abflüsse MoM<sub>Q</sub> erhöhen sich mit Ausnahme des Sommers (Abb. 6 rechts). Diese Abflusserhöhung zeigt sich auch deutlich bei den Hochwassern, wobei die winterlichen MoM<sub>HQ</sub> im Zukunftsszenario doppelt so hohe Werte wie bei der Simulation des Ist-Zustands erreichen (Abb. 7).

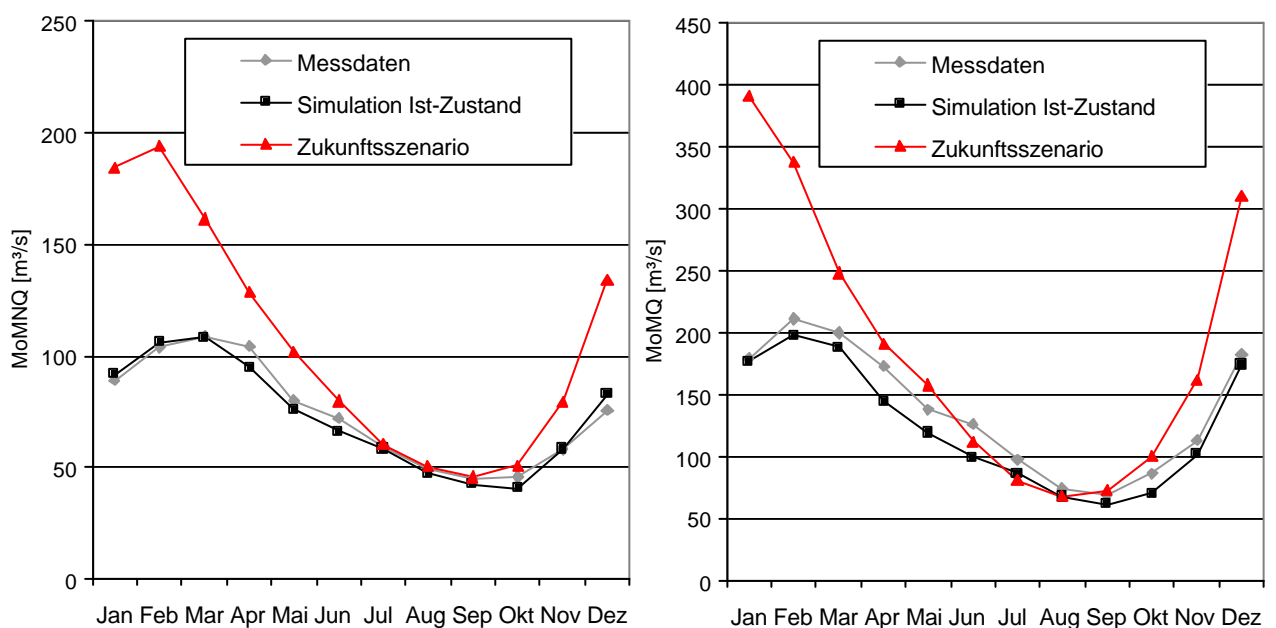


Abb. 6: MoM<sub>NQ</sub> und MoM<sub>Q</sub>: Messwerte und simulierte Daten aus dem WHM unter Verwendung der Klimadaten des MR-Modells



Auch bei Betrachtung der Dauerlinie und der Rangfolge der jährlichen HQ-Werte liegen die Abflüsse des Zukunftsszenarios über denen der Simulation des Ist-Zustands (Abb. 9 und Abb. 10). Allerdings ist der HHQ-Wert des Zukunftsszenarios nicht höher als der des Ist-Zustands. Daher ist v.a. von einer Erhöhung mittlerer Hochwasser auszugehen. Eventuell kann aber auch hier ein systematisches Problem im statistischen Verfahren vorliegen, welches die Möglichkeiten von Extremwerten im Zukunftsszenario begrenzt.

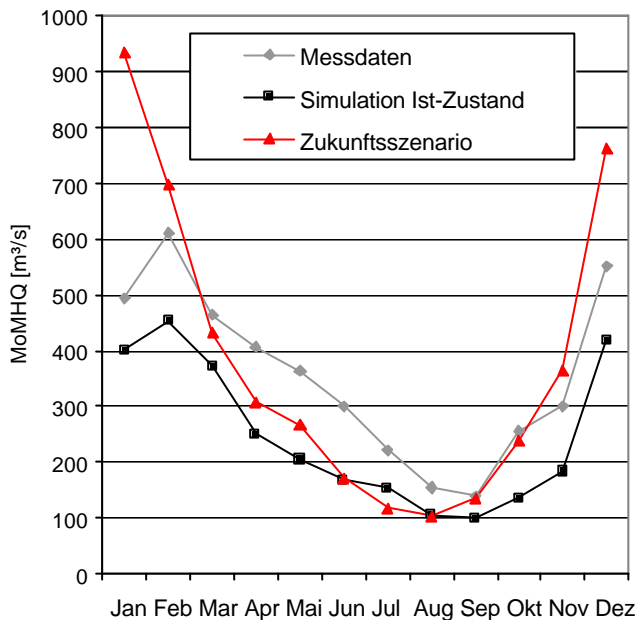


Abb. 7: MoMHQ: Messdaten und simulierte Daten unter Verwendung der Klimadaten des MR-Modells

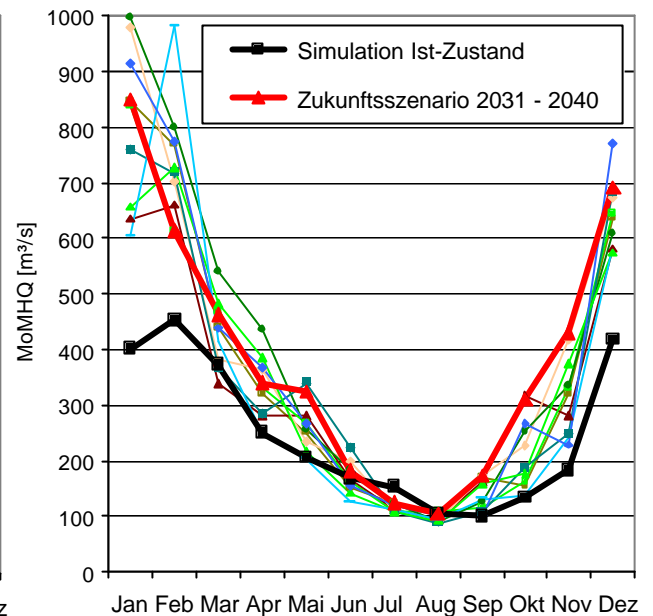


Abb. 8: MoMHQ (Dekade 2031-2040): Simulierte Daten unter Verwendung der 10 Realisationen des MR-Modells sowie der als repräsentativ definierten Realisation (rot)

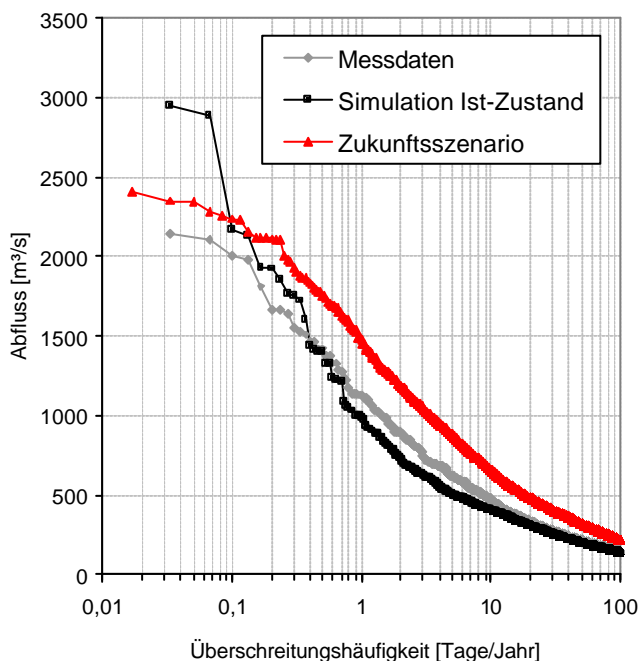


Abb. 9: Der Größe nach sortierte Tagesabflüsse der WHM-Simulationen mit dem MR-Modell

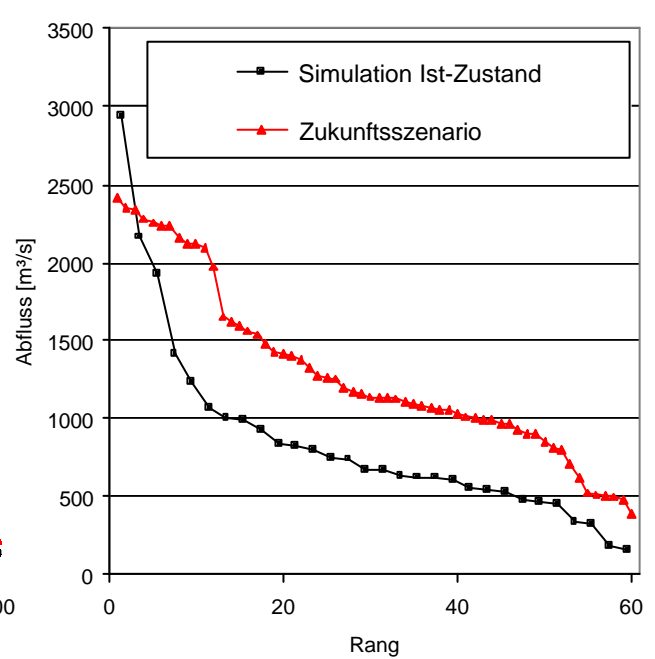


Abb. 10: Der Größe nach sortierte Jahreshöchstwerte der WHM-Simulationen mit dem MR-Modell



#### 4.4 Verwendung der Klimaszenarien des MPI

Für REMO liegen im Unterschied zu den beiden statistischen Modellen zwei Simulationsläufe für den Ist-Zustand vor, die als Validierungslauf und Kontrolllauf bezeichnet werden:

- Beim Validierungslauf wird REMO an den Modellrändern über Reanalysedaten an das reale Wettergeschehen angepasst. Daher sind die Ergebnisse des Validierungslaufs mit Messdaten vergleichbar und erlauben eine unmittelbare Überprüfung der Güte des REMO-Modells. Auf Grund der Verfügbarkeit der Reanalysedaten liegt der Validierungslauf nur für den Zeitraum 1979-2000 vor.
- Beim Kontrolllauf, bei dem der Randantrieb von REMO mit ECHAM4 erfolgt, sind die Unsicherheiten dieses Globalen Zirkulationsmodells (GCM) mit enthalten. Da sich bei der dynamischen Modellierung im Vergleich zu den statistischen Verfahren systematische Abweichungen im GCM am stärksten durchpausen, sollten die Ergebnisse des Zukunftsszenarios insbesondere hier nicht direkt mit Beobachtungen verglichen werden. Die Einschätzung der zukünftig zu erwartenden Veränderungen muss stattdessen aus dem Vergleich zwischen Kontrolllauf und Zukunftsszenario erfolgen, da auch das Zukunftsszenario mit dem GCM angetrieben wird.

Als Randantrieb für den Kontrolllauf liegen die Ergebnisse von ECHAM4 in zwei unterschiedlichen horizontalen Auflösungen T42 (ca. 250 km Raster) und T106 (ca. 100 km Raster) vor. Für das Zukunftsszenario stehen aber als Randantrieb nur Ergebnisse von ECHAM4 T42 zur Verfügung. Zudem ist die vertikale Auflösung des T106-Laufes zu gering. Daher wird im weiteren nur auf die Ergebnisse des Kontrolllaufs unter Verwendung der Ergebnisse von ECHAM4 T42 und nicht von ECHAM4 T106 eingegangen.

Vergleich Ist-Zustand Validierungslauf mit Messdaten: Die simulierten MoMQ unter Verwendung der REMO-Ergebnisse des Validierungslaufs zeigen eine relativ hohe Übereinstimmung mit den Messdaten (Abb. 11 links). Leicht höhere Abweichungen ergeben sich bei MoMHQ (Abb. 11 rechts) und MoMnQ. Auch die Standardabweichungen zeigen bei den MoMHQ größere Abweichungen.

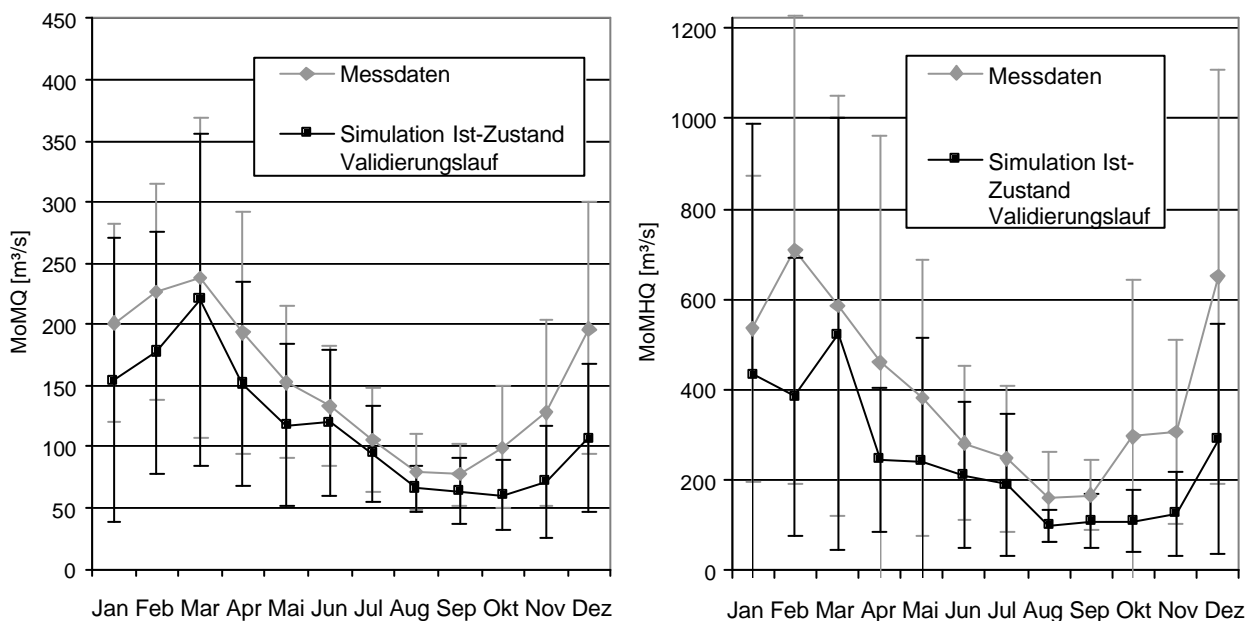


Abb. 11: MoMQ und MoMHQ: Messwerte und simulierte Daten aus dem WHM unter Verwendung der Klimadaten des REMO-Modells für den Validierungslauf (1979-2000)



Dennoch kann die Übereinstimmung zwischen den Messdaten und den Modellergebnissen unter Verwendung der REMO-Ergebnisse insgesamt als hoch eingestuft werden. Offenbar ist REMO geeignet, bei entsprechend richtigem Randantrieb das regionale Klimageschehen im hydrologischen Sinne korrekt wiederzugeben.

Vergleich Ist-Zustand Kontrolllauf mit Messdaten: Die simulierten MoMNQ und MoMQ unter Verwendung der REMO-Ergebnisse des Kontrolllaufs zeigen eine deutliche Überschätzung der Messdaten, v.a. im Winter (Abb. 12). Auch die Werte der Dauerlinie der simulierten Abflüsse liegen immer über den Messwerten (Abb. 14). Durch den Randantrieb mit ECHAM4 berechnet REMO für den Kontrolllauf zu feuchte Bedingungen und der mittlere Gebietsniederschlag im Neckar-Einzugsgebiet wird um fast 20 % überschätzt. Die simulierten MoMHQ unter Verwendung der REMO-Ergebnisse des Kontrolllaufs zeigen geringere, aber immer noch hohe Abweichungen zu den Messdaten (Abb. 13). Hier wird ein gewisser Teil der Unterschätzung der Simulationsergebnisse des WHM (vgl. Abb. 3 rechts) durch die zu feuchten Bedingungen des Kontrolllaufs kompensiert.

Vergleich Ist-Zustand Kontrolllauf mit Zukunftsszenario: Die simulierten MoMNQ unter Verwendung der REMO-Ergebnisse zeigen im Szenariolauf eine gewisse Verminderung der Abflüsse im Frühjahr und in geringem Maße auch im Sommer (Abb. 12 links). Da aber im Sommer nur eine geringe Unterschreitung der MoMNQ-Werte des Kontrolllaufs auftritt, ist auch im Zukunftsszenario des MPI-Modells nicht mit deutlich geringeren mittleren sommerlichen Niedrigwasserabflüssen zu rechnen. Die MoMQ und MoMHQ weisen im Zukunftsszenario einen Anstieg der Werte im Winter und eine Verringerung der Werte im Frühjahr im Vergleich zum Kontrolllauf auf (Abb. 12 rechts und Abb. 13). Dabei wird eine vergleichbare Größenordnung der winterlichen MoMHQ-Werte wie mit dem MR-Modell erreicht. Allerdings sind die relativen Abflusserhöhungen im Winter zwischen Kontrolllauf und Szenariolauf nicht so deutlich wie beim MR-Modell.

In Abb. 15 ist die Rangfolge der simulierten HQ-Werte des Zukunftsszenarios im Vergleich zur Simulation des Ist-Zustands aufgetragen. Im MPI-Modell nehmen relativ zum Ist-Zustand die Hochwasser mittlerer Jährlichkeit nicht zu, wie es beim MR-Modell der Fall ist.

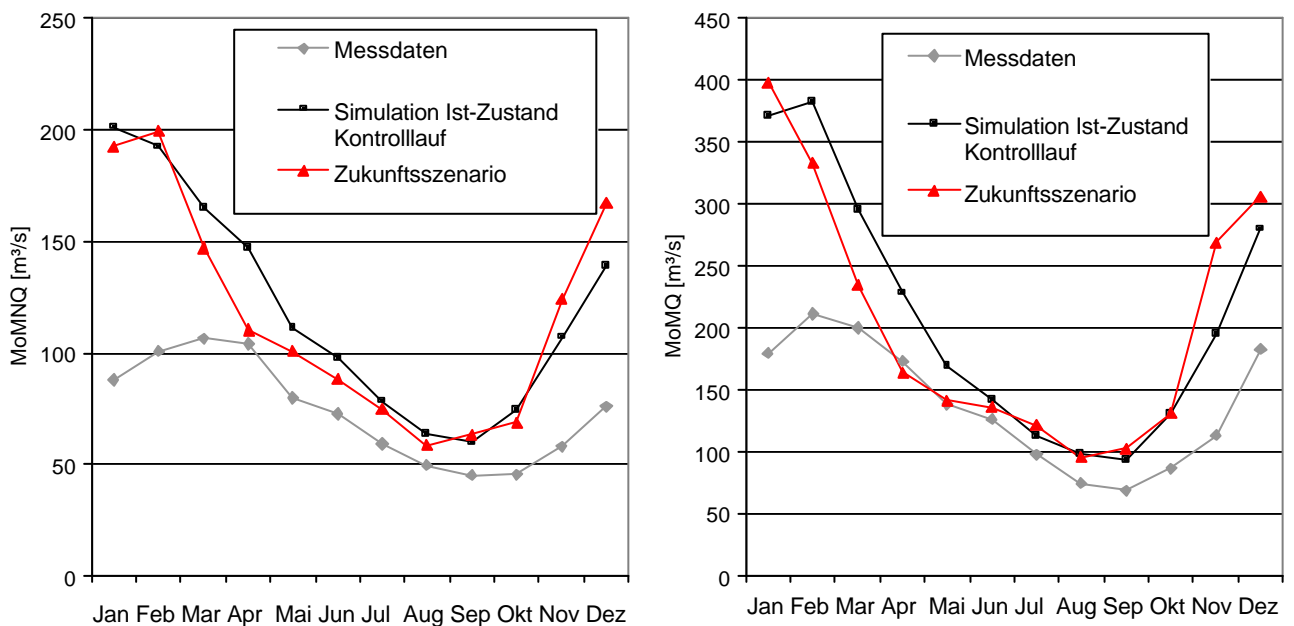


Abb. 12: MoMNQ und MoMQ: Messdaten und simulierte Daten aus dem WHM unter Verwendung der Klimadaten des REMO-Modells



Wie die Dauerlinie zeigt, werden aber mit dem REMO-Modell höhere Extremabflüsse für das Zukunftsszenario simuliert als mit dem MR-Modell (Abb. 9 und 14). Somit ist weniger mit einer generellen Zunahme der mittleren Hochwasserabflüsse zu rechnen wie bei den Ergebnissen des MR-Modells, sondern eher mit stärkeren Extremen.

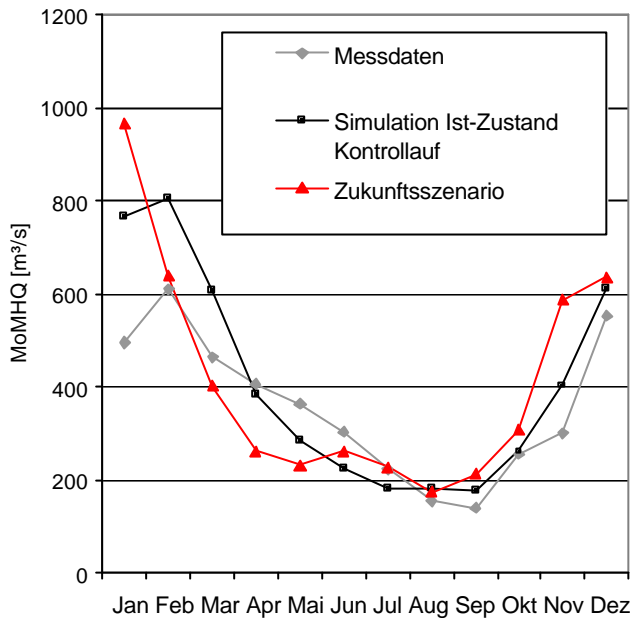


Abb. 13: MoMHQ: Messdaten und simulierte Daten unter Verwendung der Klimadaten des REMO-Modells

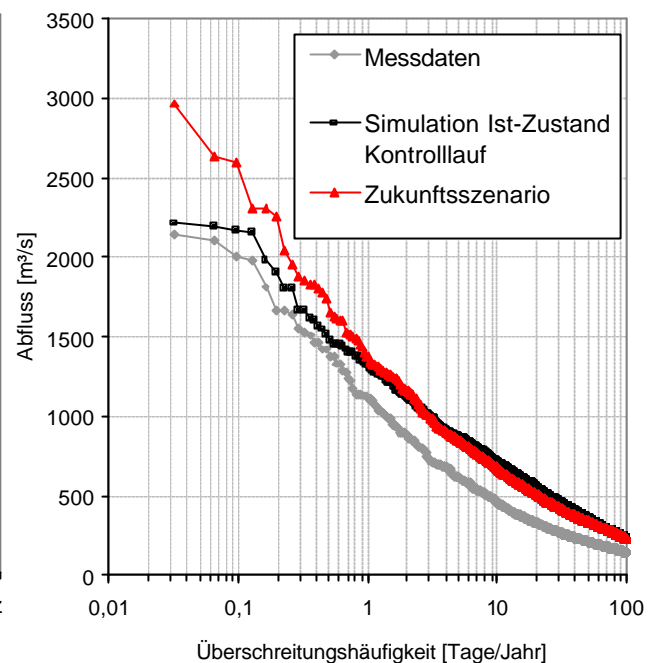


Abb. 14: Der Größe nach sortierte Abflusswerte der WHM-Simulationen des REMO-Modells

#### 4.5 Verwendung von Klimaszenarien mit Stundenwerten

Die in Baden-Württemberg vorliegenden WHM werden schrittweise auch für die Verwendung von Daten in Stunden-Zeitschritten nachkalibriert. So können auch die im Stundenzeitschritt vorliegenden Ergebnisse des MPI-Modells REMO zur WHM-Simulation verwendet werden.

In Abb. 16 sind die Rangfolgen der höchsten simulierten Abflüsse mit Stunden- und Tageswerten dargestellt. Es zeigt sich, dass die WHM-Simulationen mit den Stundenwerten vergleichbare Ergebnisse wie die Tageswertsimulationen ergeben. Da die Spitzenabflüsse bei Stundenwerten besser erfasst werden, sind die absoluten Abflusswerte allerdings höher. Wie die Verhältnisse zwischen den HQ-Werten des Szenario- und des Kontrolllaufs in Abb. 17 verdeutlichen, liegen bei der Stundenwertsimulation die HQ-Werte des Szenariolaufs häufiger über denen des Kontrolllaufs als bei der Tageswertsimulation. Es werden in der Regel größere Verhältnisse von Szenario- zu Kontrolllauf erreicht. Zudem liegen die Verhältnisse bei den Stundenwerten meist über 1, was die relative Zunahme der HQ-Werte im Szenariolauf belegt. Somit weisen die Ergebnisse bei der REMO-Stundenwertsimulation in die gleiche Richtung wie beim MR-Modell, da auch eine Erhöhung der Hochwasser mittlerer Jährlichkeiten auftritt. Allerdings ist diese Erhöhung bei REMO geringer, aber dafür werden höhere Extremwerte des Abflusses erreicht.

Beim Vergleich der MoMHQ, MoMQ und MoMNQ ergeben sich bei den Stundenwertsimulationen entsprechend höhere absolute Werte als bei den Tageswertsimulationen. Das prinzipielle Verhalten mit einer Zunahme des mittleren Hochwasser-Abflusses (mit Ausnahme des Frühjahrs) zeigt sich bei der Stunden- wie bei der Tageswertsimulation (Abb. 18).

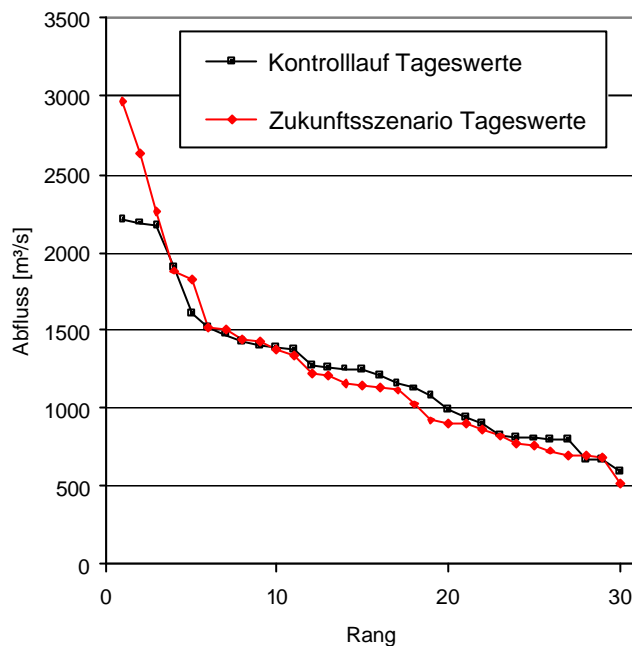


Abb. 15: Der Größe nach sortierte Jahreshöchstwerte der simulierten Abflüsse unter Verwendung der Klimadaten des REMO-Modells für den Kontrolllauf und für das Zukunftsszenario.

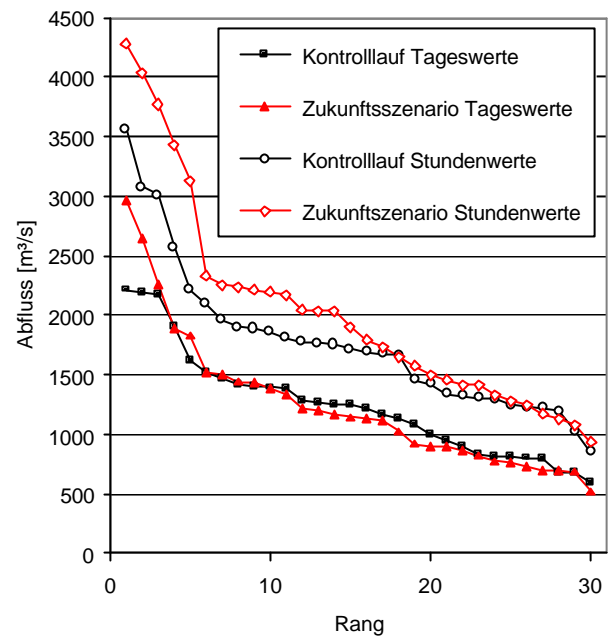


Abb. 16: Vergleich zwischen den ermittelten Rangfolgen des Zukunftsszenarios mit dem Kontrolllauf bei Verwendung von Tages- und Stundenwerten des REMO-Modells

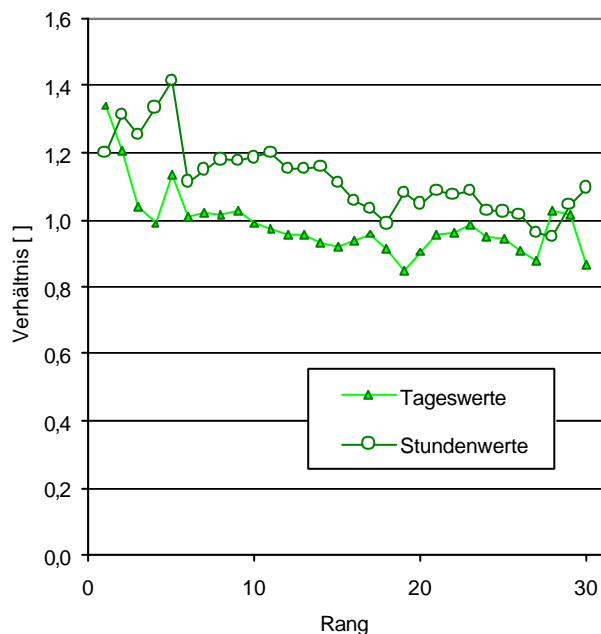


Abb. 17: Verhältnis zwischen den HQ-Werten der Rangfolge des REMO-Szenario- und Kontrolllaufs mit Tages- und mit Stundenwerten

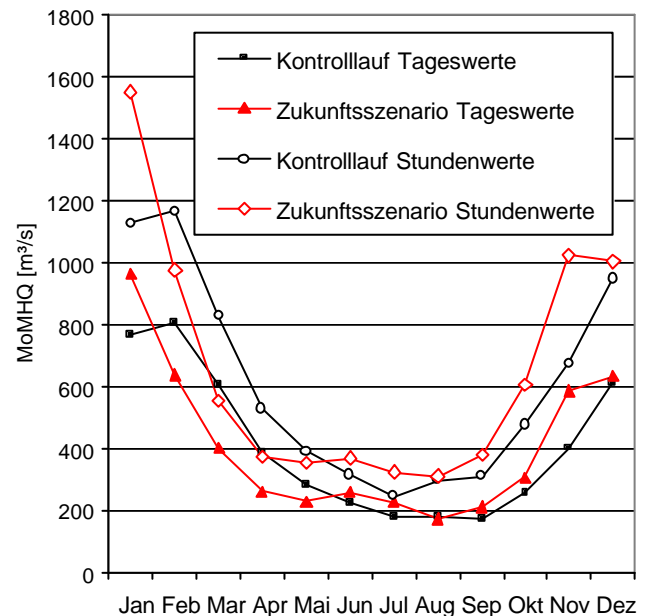


Abb. 18: MoMHQ: simulierte Daten unter Verwendung der Klimadaten des REMO-Modells bei Verwendung von Tages- und Stundenwerten



## 5. Zusammenfassung und Fazit

Die Ergebnisse aus drei unterschiedlichen regionalen Klimamodellen für die Simulation des Ist-Zustands (1971-2000) und des Zukunftsszenarios (2021-2050) werden verwendet, um mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells Neckar auf Grundlage des Programmsystems LARSIM Aussagen über die Änderung des Abflussverhaltens in Folge der Klimaänderung abzuleiten. Grundlage der drei regionalen Klimamodelle sind die Simulationsergebnisse des Globalen Zirkulationsmodells ECHAM4 T42.

Das Wasserhaushaltsmodell kann die gemessenen Abflüsse bei Verwendung von hydrometeorologischen Messdaten als Eingabegröße gut nachbilden, wie die Simulation über einen vierzigjährigen Zeitraum (1961-2000) zeigt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass in der Modellkette Klimamodell-Wasserhaushaltsmodell durch das Wasserhaushaltsmodell die Unschärfe der Ergebnisse nicht deutlich vergrößert wird.

Bevor die Ausgabedaten der regionalen Klimamodelle im Wasserhaushaltsmodell als Eingabedaten verwendet werden, sind diese auf die hohe räumliche Auflösung des Wasserhaushaltsmodells (1 x 1 km<sup>2</sup>-Raster) umzurechnen. Für den Niederschlag werden dazu Regionalisierungsverfahren unter Verwendung von Hintergrundfeldern angewandt. Alle anderen Klimagrößen werden mit einem Inversen-Distanz-Verfahren interpoliert.

Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse des Wasserhaushaltsmodells sind die relativen Unterschiede zwischen den Ergebnissen für den simulierten Ist-Zustand und für das Zukunftsszenario zu vergleichen, um systematische Modellfehler zu minimieren. Zudem sind die Ergebnisse des Wasserhaushaltsmodells im statistischen Sinne (z.B. mittlere monatliche Abflüsse, Rangfolgen) auszuwerten.

Die Ansätze der drei Klimamodelle werden wie folgt eingeschätzt:

- Das PIK-Modell kann auf Grund der systematischen Schwächen des derzeit vorliegenden Verfahrens (v.a. mangelnde Persistenz) nur als bedingt geeignet angesehen werden, weswegen es nicht weiter betrachtet wird.
- Die Simulation des Ist-Zustands zeigt beim MR-Modell eine hohe Übereinstimmung mit den Messdaten. Das Modell stellt für das Zukunftsszenario mehrere Simulationsergebnisse zur Verfügung. Dadurch wird die Schwankungsbreite der Ergebnisse besser einschätzbar und es kann ein repräsentativer Lauf ausgewählt werden. Durch die Simulation von häufigeren extremen Wetterlagen ist die Entstehung von neuen Extrema mit diesem statistischen Verfahren in gewissen Maßen möglich. Allerdings werden in dem Verfahren auch gewisse Faktoren und Annahmen für die Berechnung des Zukunftsszenarios verwendet, die nicht nachvollziehbar und somit subjektiv sind.
- Der REMO-Validierungslauf stimmt recht gut mit den Messdaten überein und zeigt die Eignung des Modells zur regionalen Klimamodellierung. Der REMO-Kontrolllauf, bei dem der Randantrieb des Modells mit den zu feuchten Ergebnissen des ECHAM4 T42 erfolgt, weist jedoch hohe Abweichungen zu den Messwerten auf. Hier ist der relative Vergleich der Modellergebnisse zwischen Kontrolllauf und Zukunftsszenario besonders wichtig, da dadurch der zu feuchte Randantrieb durch das ECHAM4 als systematischer Fehler minimiert wird. Von allen drei Klimamodellen pausen sich Modellunsicherheiten beim ECHAM4 bei der dynamischen Modellierung am stärksten auf die Simulationsergebnisse durch.

Vorteilhaft ist, dass REMO als einziges der drei Klimamodelle Daten in Stundenzeitschritten zur Verfügung stellen kann.



Als Fazit aus den Abflusssimulationen mit dem MPI-Modell und dem MR-Modell am Beispiel des Pegels Rockenau/Neckar ergibt sich:

- **Niedrigwasser:** Für das Neckargebiet ergibt sich bei beiden Modellen für das Zukunftsszenario keine Verringerung der Niedrigwasser-Extremwerte, wie die Untersuchung der NQ-Rangfolgen zeigt. Auch die mittleren Abflüsse in den Sommermonaten nehmen nicht ab (Abb. 6 und 12). Dies zeigt sich zusammenfassend auch in Abb. 19, in der die Verhältnisse der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse von Szenario- zu Kontrolllauf für beide Modelle aufgetragen sind. Für REMO ergeben sich zwar im Frühjahr Verhältnisse deutlich kleiner 1, aber in der sommerlichen Niedrigwasserperiode liegen die Verhältnisse nahe 1.

Auf Grundlage der bisherigen Modellergebnisse scheint demnach eine zukünftige Zuspitzung der Niedrigwasserproblematik weniger wahrscheinlich. Allerdings wird bei dieser Untersuchung nur der Zeitraum bis 2050 betrachtet, so dass durch vermutlich weiter ansteigende Temperaturen nach 2050 eine Verschärfung der Niedrigwassersituation möglich ist.

- **Hochwasser:** Bei beiden Modellen ist eine Zunahme der mittleren Winterhochwasser erkennbar (Abb. 7 und 13). Beim MPI-Modell ist die relative Erhöhung der mittleren Winterhochwasser zwischen Kontroll- und Szenariolauf nicht so stark ausgeprägt. Dies zeigt sich auch im Verhältnis zwischen Szenario- und Kontrolllauf (Abb. 19). Dafür nehmen einzelne Hochwasser-Extreme im MPI-Modell deutlicher zu (Abb. 14 und 15). Dies zeigt sich v.a. bei Betrachtung der Ergebnisse der Stundenwert-Simulationen (Abb. 16), wobei auch eine Erhöhung der Abflüsse mittlerer Jährlichkeiten erkennbar ist. Beim MR-Modell dagegen ergibt sich eine sehr deutliche Erhöhung der mittleren Winterhochwasser (Abb. 19). Hier nehmen die Hochwasser-Extreme mittlerer Jährlichkeiten besonders stark zu (Abb. 9 und 10).

Zusammenfassend zeigt sich, dass Wasserhaushaltsmodelle geeignete Werkzeuge sind, um in Kombination mit regionalen Klimamodellen die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt abzuschätzen. Auf Grund der Ergebnisse der WHM-Simulationen sowohl mit den Daten des statistischen MR-Modells als auch mit denen des dynamischen MPI-Modells kann davon ausgegangen werden, dass die Hochwassergefahr für das Neckargebiet zunimmt.

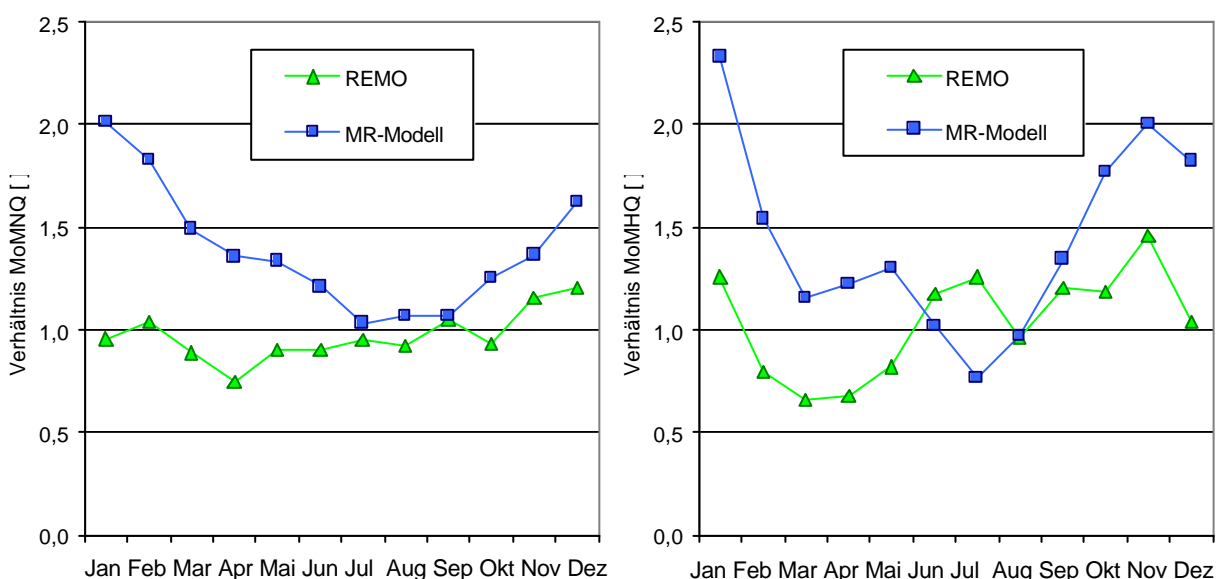


Abb. 19: Verhältnis zwischen Szenariolauf und Kontrolllauf mit den simulierten Daten aus dem WHM unter Verwendung der Klimadaten des REMO-Modells und des MR-Modells für die MoMnQ (links) und die MoMHQ (rechts)



Daher erscheint eine rechtzeitige Adaptation an mögliche höhere Wasserstände in diesem Gebiet in Folge der Klimaänderung ratsam.

Vorgesehen sind in nächster Zukunft regional differenziertere Auswertungen durch Anwendung der Wasserhaushaltsmodelle mit den Klimaszenarien als Eingabewerte in verschiedenen Einzugsgebieten in Baden-Württemberg. Darüber hinaus ist die Analyse weiterer Ausgabegrößen der Wasserhaushaltsmodelle (flächenhafte Werte wie Verdunstung, Schneedecke, Grundwasser-Neubildung, etc.) geplant.

## 6. Literatur

- Andréasson J., Bergström S., Carlsson B., Graham L.P., Lindström G. (2004): Hydrological Change – Climate Change Impact Simulations for Sweden. *Ambio* Vol. 33 No. 4-5, Royal Swedish Academy of Sciences
- Bartels H. (2004): Vergleich regionaler Klimaszenarienrechnungen für Süddeutschland – Vorgehensweise und Ergebnisse. (in diesem Band)
- Bartels H., Katzenberger B., Weber H. (2004): Klimaveränderung und Wasserwirtschaft in Süddeutschland. - *Wasserwirtschaft* Heft 4, S. 15 - 19
- Bremicker M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Band 11. Institut für Hydrologie, Universität Freiburg
- Dietzer B. (2003): Das Programm INTPRR zur Übertragung von Werten an Stationen auf das Raster von REGNIE. Programm Deutscher Wetterdienst Offenbach (unveröffentlicht)
- Enke W. (2003): Anwendung einer Wetterlagenklassifikation für Süddeutschland auf Kontrolllauf und Szenario eines transienten ECHAM4 Klimasimulationslaufes (Szenario B) zur Abschätzung regionaler Klimaveränderungen für Süddeutschland - Abschlussbericht zum Werkvertrag (unveröffentlicht)
- Gerstengarbe F.-W., Werner P.C., Österle H., Zenker T. (2002): Abschlussbericht zum Werkvertrag B.-Nr. 10029524/13 (unveröffentlicht).
- Gerlinger K., Bremicker M., Haag I. (2003): Echtzeit-Vorhersagen des Abflusses mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM am Beispiel des Neckargebiets. – In: Kleeberg, H. (Hrsg.): *Klima, Wasser, Flussgebietsmanagement im Lichte der Flut*, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 4.2003, S. 163 – 166
- Ihringer J. (2004): Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasserstatistik. (in diesem Band)
- IPCC (2000): *IPCC Special Report on Emission Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge
- Jacob D., Bülow K., Milliez M. (2003): Dynamische und statistische Erstellung von hochaufgelösten Klimaszenarien (1/6°) als Basis für wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen im KLIWA-Projekt B 1.1.1 ‚Klimaszenarien‘ - KLIWA-Abschlussbericht Mai 2003 (unveröffentlicht).
- Kleinn J. (2002): *Climate Change and runoff statistics in the Rhine basin: a process study with a coupled climate – runoff model*. Dissertation ETH Zürich No. 14663
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (2003a): Überprüfung der Repräsentativität der in KLIWA verwendeten Klimastationen für das Neckar-Einzugsgebiet. Untersuchungsbericht des Ingenieurbüros Dr. Ludwig, Karlsruhe (unveröffentlicht)
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (2003b): Vorschlag zur Umsetzung der Klimaszenarien in Wasserhaushaltsmodellen Untersuchungsbericht des Ingenieurbüros Dr. Ludwig, Karlsruhe (unveröffentlicht)
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) und Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW) (2003): Regionenspezifische Auswertung der KLIWA-Klimaszenarien. Untersuchungsbericht des Ingenieurbüros Dr. Ludwig, Karlsruhe (unveröffentlicht)