



**DR.-ING. KARL LUDWIG**

Beratender Ingenieur Wasserwirtschaft - Wasserbau  
76133 Karlsruhe, Herrenstraße 14, Tel. 0721/91251-0

**Auftraggeber:  
Hessische Landesanstalt für Umwelt und Geologie**

**UNTERSUCHUNG ZUM EINFLUSS DER  
KLIMAVARIABILITÄT UND ANTHROPOGEN  
VERURSACHTEN KLIMASCHWANKUNGEN AUF  
ABFLÜSSE FÜR VERSCHIEDENE  
EINZUGSGEBIETE IN HESSEN**

**- ERLÄUTERUNGSBERICHT -**

**Bearbeiter:  
Dr.-Ing. K.-G. Richter  
Dipl. Inform. R. Czesniak**

**Karlsruhe, November 2004**



# UNTERSUCHUNG ZUM EINFLUSS DER KLIMAVARIABILITÄT UND ANTHROPOGEN VERURSACHTEN KLIMASCHWANKUNGEN AUF ABFLÜSSE FÜR VERSCHIEDENE EINZUGSGEBIETE IN HESSEN

## - Erläuterungsbericht -

	Seite
- INHALT -	
1. Auftrag und Veranlassung.....	1
2. Zusammenfassung.....	2
3. Datengrundlagen.....	5
4. Theoretische Grundlagen des Wasserhaushaltsmodells .....	7
5. Voraussetzungen .....	9
5.1 Klimamodelle.....	9
5.2 Wasserhaushaltsmodell .....	10
5.3 Fazit aus den Voraussetzungen .....	11
6. Vorgehensweise.....	12
6.1 Grundsätzliches.....	12
6.2 Durchführung der Simulationen mit LARSIM.....	14
7. Validierung des Modells mit gemessenen Klimazeitreihen .....	15

8. Simulationsergebnisse aus LARSIM und mit den von Enke berechneten Eingangsdaten .....	17
8.1 Analyse der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse .....	18
8.2 Analyse der mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse .....	19
8.3 Analyse der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse.....	20
9. Abflussveränderung der Szenarienzustände gegenüber dem Istzustand .....	22
9.1 Abflussveränderung der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse.....	22
9.2 Abflussveränderung der mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse .....	23
9.3 Abflussveränderung der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse.....	23
10. Ausblick.....	25
11. Literatur.....	26

## VERZEICHNIS DER ANLAGEN

- Anlage A: Validierung von Abflüssen
- Anlage B: Gewässerkundliche Hauptzahlen für den Zeitraum 1981 bis 2000
- Anlage C: Gewässerkundliche Hauptzahlen für den Zeitraum 2011 bis 2020
- Anlage D: Gewässerkundliche Hauptzahlen für den Zeitraum 2021 bis 2030
- Anlage E: Gewässerkundliche Hauptzahlen für den Zeitraum 2031 bis 2040
- Anlage F: Gewässerkundliche Hauptzahlen für den Zeitraum 2041 bis 2050
- Anlage G: Veränderungen der gewässerkundlichen Hauptzahlen für Monate
- Anlage H: Veränderungen der gewässerkundlichen Hauptzahlen für Jahreszeiten

## 1. AUFTRAG UND VERANLASSUNG

Grundlegendes Ziel der hier im Rahmen von INKLIM 2012 (**Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen 2012**) durchgeführten Untersuchung sind Aussagen, wie sich die möglichen Veränderungen des Wasserhaushalts in Folge einer Klimaänderung auf die verschiedenen Bereiche der Wasserwirtschaft in Hessen auswirken bzw. sogar quantifizieren lassen.

Im Vordergrund stehen dabei mögliche Veränderungen der Abflüsse. Hierbei sind neben dem mittleren Abflussverhalten insbesondere extreme Niedrig- und Hochwasserabflüsse von Bedeutung.

Darüber hinaus besteht auch Interesse an möglichen Veränderungen anderer wasserwirtschaftlich relevanter Prozesse bzw. Zustände, wie z.B. der Grundwasserneubildung, der Bodenfeuchte oder der Schneebedeckung.

Durch die Kombination von Klimaszenarien mit Wasserhaushaltsmodellen werden Aussagen über die zu erwartenden Veränderungen der wasserwirtschaftlichen Bedingungen möglich.

Auf Grundlage der bislang vorliegenden Erfahrungen wird nachfolgend aufgezeigt, wie die Ergebnisse von Klimaszenarien sinnvoll für Simulationen mit Wasserhaushaltsmodellen genutzt werden können. Dabei werden sowohl die Möglichkeiten als auch die Grenzen der hieraus abzuleitenden Aussagen erörtert.

Karlsruhe, im November 2004



.....  
(Dr.-Ing. Karl Ludwig)



.....  
(Dr.-Ing. Karl - Gerd Richter)

## 2. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Hessischen Klimaschutzprogramm INKLIM 2012 wird versucht für verschiedenen klimatischen Regionen Hessens anhand von ausgewählten Pegelinzugsgebieten Aussagen über mögliche Veränderung des Abflussverhaltens infolge von Klimaänderungen abzuschätzen.

Die Pegelinzugsgebiete liegen dabei über ganz Hessen verteilt (vgl. Bild 1), um einen möglichst guten Überblick über die Auswirkungen einer möglichen Klimaänderung auf den Abfluss in Hessen zu bekommen.

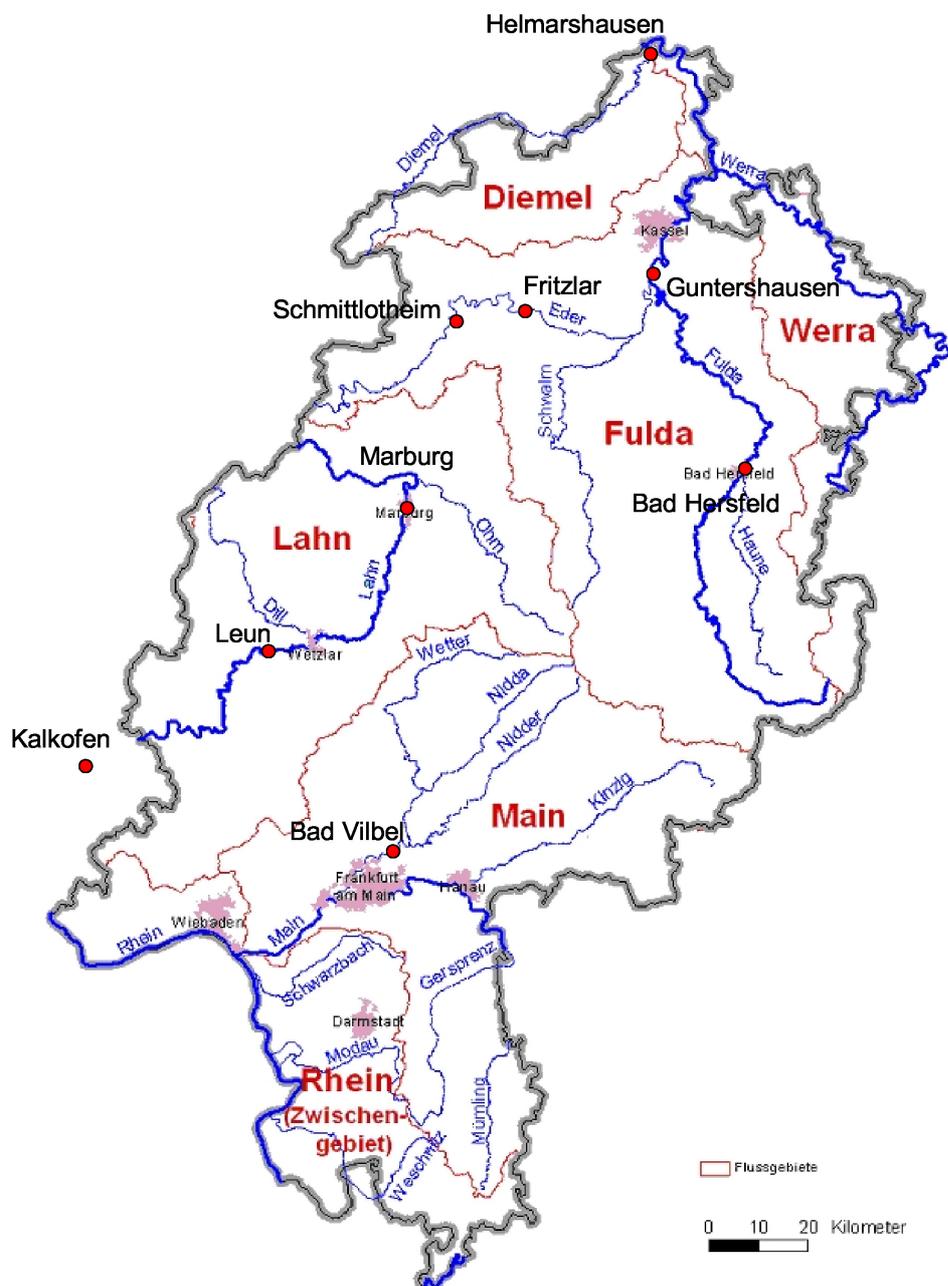


Bild 1: Übersicht über die Lage der untersuchten Pegel

Die Untersuchungen wurden mit dem Programmsystem LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) durchgeführt. Die zeitliche Auflösung beträgt einen Tag.

Für die Untersuchungen standen das beim Auftragnehmer vorliegende Rheinmodell (Ebel, Ludwig, Richter 2001) und das Wesermodell (Bremicker 2000) zur Verfügung welche bereits bei vergangenen Untersuchungen erstellt und validiert wurden. Besonders berücksichtigt wurden die Steuerungen der Edertalsperre/Eder und des Rückhaltebeckens Kirchhain/Ohm im Lahngebiet.

Für die Pegel

BadVilbel/Nidda (1.619 km<sup>2</sup>)  
Marburg/Lahn (1.666 km<sup>2</sup>)  
Leun/Lahn (3.571 km<sup>2</sup>)  
Kalkofen/Lahn (5.304 km<sup>2</sup>)  
Bad Hersfeld/Fulda (2.120 km<sup>2</sup>)  
Schmittlotheim/Eder (1.202 km<sup>2</sup>)  
Fritzlar/Eder (1.804 km<sup>2</sup>)  
Guntershausen/Fulda (6.366 km<sup>2</sup>)  
Helmarshausen/Diemel (1.755 km<sup>2</sup>)

wurden die Untersuchungen durchgeführt.

Dazu wurden zunächst für die vorliegenden Einzugsgebiete mit Hilfe von gemessenen und simulierten Abflüssen an den Pegeln für den Zeitraum 1981 bis 2000 die Modelle nochmals validiert.

Datengrundlage für eine derartige Validierung bilden vom Auftraggeber vorgegebene klimatologische (Niederschlag, Temperatur etc.) und hydrologische (Abfluss) Parameter, mit deren Hilfe die Abflusssimulation erfolgt.

Es zeigt sich eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Abflüssen und den aus den beobachteten klimatologischen Daten modellierten Abflüssen.

Im weiteren Verlauf werden mit Hilfe der auf statistischem Wege erzeugten Klimadaten (Enke 2004, Klimaszenarium B2) für jeweils zehn Realisationen für die Simulation des Istzustands (1981 bis 2000) und für die Szenarienzustände (2011 bis 2020, 2021 bis 2030, 2031 bis 2040 und 2041 bis 2050) Abflusszeitreihen für die Pegel erzeugt und statistisch ausgewertet.

Die statistische Auswertung erfolgt auf Monatsbasis für folgende Parameter:

MoM<sub>NQ</sub> = mittlerer monatliche Niedrigwasserabfluss  
MoM<sub>MMQ</sub> = mittlerer monatliche Mittelwasserabfluss  
MoM<sub>HQ</sub> = mittlerer Monatliche Hochwasserabfluss

Beim Vergleich der Simulationsergebnisse des Istzustands (1981 bis 2000) mit den gemessenen und validierten Abflüssen zeigt sich bei allen Parametern (MoMNO, MoMMQ und MoMHQ) weitgehend eine zufriedenstellende bis gute Übereinstimmung, so dass auf dieser Basis eine Abschätzung der Abflussveränderung unter veränderten Klimabedingungen möglich ist.

Für die Zukunftsszenarien ergibt sich für das Abflussverhalten ein weitgehend landeseinheitlicher Trend, der wie folgt beschrieben werden kann:

#### Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse:

Es kommt zu einer Zunahme der Niedrigwasserabflüsse im Winter und einer Abnahme in den Frühjahrsmonaten in Gesamthessen (alle Pegel). Im Sommer und Herbst kommt es im Fuldaeinzugsgebiet zu einer weiteren Abnahme der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse, während im Lahn- und Niddaeinzugsgebiet die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse nur in geringerem Maße abnehmen.

#### Mittlere monatliche Mittelwasserabflüsse:

Es kommt zu einer Zunahme der Mittelwasserabflüsse im Winter und einer Abnahme in den Frühjahrsmonaten in Gesamthessen (alle Pegel). Im Sommer und Herbst kommt es im Fulda- und Diemeleinzugsgebiet zu einer weiteren Abnahme der mittleren monatlichen Abflüsse, während sich im Lahn- und Niddaeinzugsgebiet die mittleren monatlichen Abflüsse nur geringfügig verändern.

#### Mittlere monatliche Hochwasserabflüsse:

Es kommt zu einer Zunahme der Hochwasserabflüsse im Winter und teilweise im März in Gesamthessen (alle Pegel). Im Sommer und Herbst kommt es im Fuldaeinzugsgebiet zu einer Abnahme der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse, während sich im Lahn- und Niddaeinzugsgebiet die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse nur geringfügig verändern.

### 3. DATENGRUNDLAGEN

Als Datengrundlage wurden vom Auftraggeber folgende Unterlagen zur Verfügung gestellt:

- a) tägliche Abflüsse für die Pegel für den Zeitraum 1981 bis 2000

Bad Vilbel/Nidda (1.619 km<sup>2</sup>)  
Marburg/Lahn (1.666 km<sup>2</sup>)  
Leun/Lahn (3.571 km<sup>2</sup>)  
Kalkofen/Lahn (5.304 km<sup>2</sup>)  
Bad Hersfeld/Fulda (2.120 km<sup>2</sup>)  
Schmittlotheim/Eder (1.202 km<sup>2</sup>)  
Fritzlar/Eder (1.804 km<sup>2</sup>)  
Guntershausen/Fulda (6.366 km<sup>2</sup>)  
Helmarshausen/Diemel (1.755 km<sup>2</sup>)

- b) gemessene Niederschläge, Sonnenscheindauer, Wind Temperatur, relative Feuchte an verschiedenen Stationen für den Zeitraum 1981 bis 2000

- c) jeweils zehn Realisationen für die Parameter Temperatur, Relative Feuchte, Wind, Sonnenscheindauer sowie Niederschlag (Enke 2003) für folgende Zeiträume:

1981 bis 2000  
2011 bis 2020  
2021 bis 2030  
2031 bis 2040  
2041 bis 2050

Zusätzlich wurde vom Auftraggeber eine vereinfachte Steuerungsregel für die Edertalsperre sowie für das Rückhaltebecken Kirchhain/Ohm zur Verfügung gestellt.

#### Steuerung der Eder-Talsperre

Die Simulation der Steuerung der Eder-Talsperre hat zum Ziel, aus gegebenen Randbedingungen wie Zuflussganglinie und Wasserstand-Volumen-Beziehung sowie saisonalen Stau-Strategien eine Abflussganglinie zu berechnen. Die vom Auftraggeber gelieferten aktuellen Steuerungsregeln zeigen außerdem noch Abhängigkeiten vom Abflussgeschehen der Weser und der Schwalm-Eder, die in der Simulation nicht berücksichtigt werden können. In Abstimmung mit der Auftraggeberin sind folgende Steuerungsregeln angewendet worden:

- Bis auf unten genannte Ausnahmen ist die Steuerung des Abflusses über eine für das gesamte Kalenderjahr vorgegebene Volumenskurve (Speicherinhaltskurve) vorgegeben. Dabei ist im Zeitraum 01.05. bis 15.08. ein Füllvolumen (Stauziel) von 202,4 Mio. m<sup>3</sup> und zwischen dem 01.11. und 14.12. ein Füllvolumen von 130 Mio. m<sup>3</sup> anzusetzen. In dem Zeitraum 16.08. bis 31.10. ist ein linearer Übergang anzunehmen und zwischen dem 15.12. und 30.04. gelten vom Auftraggeber vorgegebene Füllvolumen.
- Der Abfluss soll 6 m<sup>3</sup>/s nicht unterschreiten, ausgenommen der Speicherinhalt fällt unter 20 Mio. m<sup>3</sup>, dann ist der Abfluss dem Zufluss gleichzusetzen.
- Im Hochwasserfall ist der Abfluss (Grundablass) auf 110 m<sup>3</sup>/s zu begrenzen. Sollte dabei das Füllvolumen von 202,4 Mio. m<sup>3</sup> überschritten werden, ist ein zusätzlicher Abfluss über die Hochwasser-Entlastung entsprechend einer vorgegebener Tabelle anzusetzen.

#### Steuerung für das Rückhaltebecken Kirchhain/Ohm:

Die Steuerung für das Rückhaltebecken Kirchhain/Ohm wird wie folgt beschrieben:

- Die Regelabgabe beträgt 75 m<sup>3</sup>/s, das Stauziel liegt bei 15,6 Mio. m<sup>3</sup> d.h. ab  $Q > 75 \text{ m}^3/\text{s}$  werden 75 m<sup>3</sup>/s abgegeben und zwar solange, bis das Becken wieder leer ist.
- Rückhaltung erfolgt nur im Winter vom 01.11. bis 31.03. des Jahres.

#### 4. THEORETISCHE GRUNDLAGEN DES WASSERHAUSHALTMODELLS

Für die vorliegende Bearbeitung wurde das Programmsystem LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) als Wasserhaushaltsmodell eingesetzt. LARSIM ermöglicht eine prozess- und flächendetaillierte Simulation des landgebundenen Wasserkreislaufs. Bild 2 zeigt das Programmschema von LARSIM. Detaillierte Angaben zu den Modellgrundlagen von LARSIM und Anwendungsbeispiele finden sich in Bremicker (2000).

In der vorliegenden Anwendung werden mit LARSIM die folgenden Prozesse in einer zeitlichen Auflösung von Tageswerten beschrieben: die Interzeption, die aktuelle Evapotranspiration, die Akkumulation, Metamorphose und Ablation von Schnee, die Bodenwasserspeicherung, laterale Transporte zu den Gewässern (Abflusskonzentration) und der Wassertransport im Gerinne.

Die Berechnung von Interzeption, potentieller und aktueller Evapotranspiration, Schneeeakkumulation und -ablation, sowie der Bodenwasserspeicherung erfolgt in LARSIM separat für die jeweils vorhandenen Landnutzungen innerhalb der Rasterflächen. Die Abflusskonzentration sowie der Wassertransport in Gerinnen werden hingegen pro Rasterfläche bzw. pro Hauptvorfluter in der Rasterfläche erfasst.

Die Berechnung der Gebietsniederschläge für die einzelnen Rasterzellen erfolgt mittels inverser Distanzberechnung aus den umliegenden Niederschlagsstationen. Dabei werden jeweils die nächsten Niederschlagsstationen in den vier umliegenden Quadranten berücksichtigt und der Abstand der betrachteten Rasterzelle zu diesen Niederschlagsstationen berechnet. Die Niederschlagshöhen dieser Niederschlagsstationen werden mit dem Abstand gewichtet und somit die Gebietsniederschlagshöhe für die betrachtete Rasterzelle berechnet. Diese Berechnungsweise wird ebenfalls für die anderen meteorologischen Parameter (Feuchte, Temperatur, Wind etc.) angewendet.

Bei einer Anwendung von LARSIM mit gemessenen meteorologischen Zeitreihen erfolgt eine Umrechnung der Punktmessungen an Stationen auf mittlere Verhältnisse in den Rasterflächen. Hierzu wird der systematische Niederschlagsmessfehler um die Benetzungs- und Verdunstungsverluste sowie um den Einfluss der Windverdriftung korrigiert. Die gemessenen Werte für Lufttemperatur und Luftdruck werden unter Berücksichtigung von höhenabhängigen Gradienten auf mittlere Werte für Rasterflächen umgerechnet.

# Large Area Runoff Simulation Model LARSIM

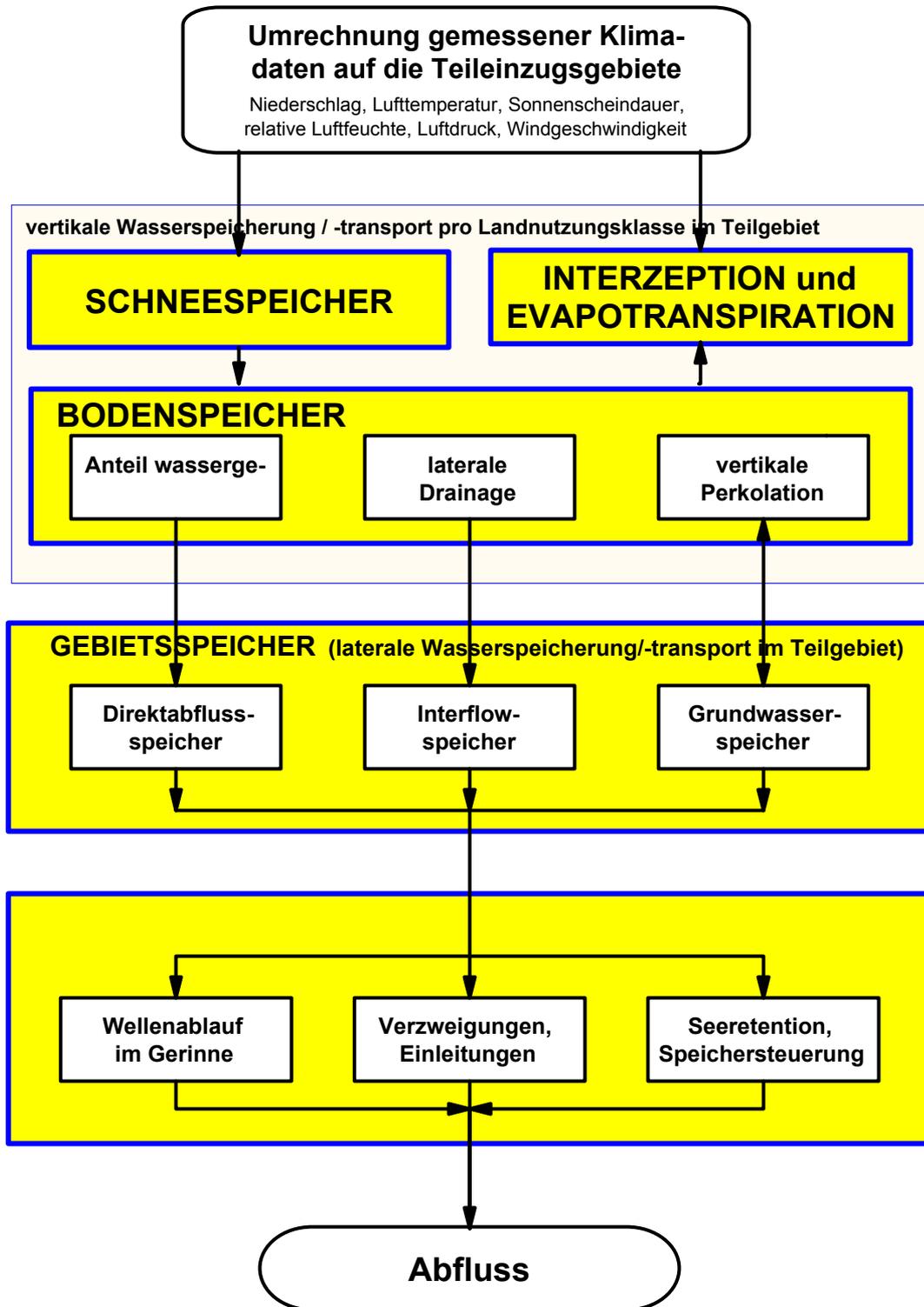


Bild 2: Schema des Wasserhaushaltsmodells LARSIM

## 5. VORAUSSETZUNGEN

Im Rahmen der hier vorzunehmenden Untersuchungen werden die Klimagrößen und die wasserwirtschaftlichen Größen im statistischen Sinne betrachtet. Da die Klimamodelle keine zeitgenauen Prognosen für einen bestimmten Tag liefern, sind folglich bezüglich des Abflusses keine zeitgenauen Prognosen für einzelne Ereignisse möglich.

Des Weiteren ist zu beachten, dass derzeit alle Modellansätze für die Berechnung von Klimaszenarien noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind und somit lediglich als Schätzwerte betrachtet werden können.

Als Untersuchungsgebiete im Rahmen von INKLIM 2012 wurden Flächen in Hessen im Bereich der Einzugsgebiete der Fulda bis zur niedersächsischen Grenze, der Lahn bis zur Mündung in den Rhein und der Nidda vorgegeben.

Nachfolgend wird der aktuelle Stand der Klimamodellierungen im Rahmen von INKLIM 2012 und der Wasserhaushaltsmodellierung kurz erläutert. Hierbei wird besonderes Augenmerk auf die Probleme und Grenzen der Modellanwendungen gelegt.

### 5.1 KLIMAMODELLE

Das Land Hessen hat die Arbeitsgruppe Meteo-Research (Dr. Enke) beauftragt, Klimaszenarien mit einem speziellen statistischen Modell zu berechnen (Enke 2003).

Es wurden Tageswerte bestimmter Klimagrößen für den Zeitraum 1981-2000 als lückenlose, homogenisierte Zeitreihen zur Verfügung gestellt.

Von der Arbeitsgruppe Meteo-Research wurde sowohl eine Simulation des Ist-Zustands als auch ein Zukunftsszenario mit jeweils zehn Realisationen simuliert. Für die weitere Auswertung werden die beiden Zeiträume dabei wie folgt definiert:

- Ist-Zustand: 1981 bis 2000
- Zukunftsszenario: 2011 bis 2020, 2021 bis 2030, 2031 bis 2040 sowie 2041 bis 2050

Mit den Modellen wurden Klimagrößen berechnet, die in folgende für die Wasserhaushaltsmodelle notwendigen Eingangsdaten umgerechnet werden können:

- Lufttemperatur
- Niederschlag
- Relative Luftfeuchte
- Globalstrahlung
- Windgeschwindigkeit

### Zeitliche Auflösung:

Die zeitliche Auflösung der genannten Klimagrößen in Tageswerte entspricht den Vorgaben der Auftraggeberin.

### Räumliche Auflösung:

Die Ergebnisse von Meteo-Research liegen für das Zukunftsszenario für alle Klimagrößen mit Ausnahme des Niederschlags punktuell für 60 Klimastationen vor. Für den Niederschlag – der im Hinblick auf die Zielsetzung wichtigste Klimagröße – liegen die Ergebnisse von Meteo-Research für das Zukunftsszenario für insgesamt ca. 540 Niederschlagsstationen in und um Hessen vor.

### Probleme bei der Umsetzung der Ergebnisse in Wasserhaushaltsmodellen:

Die aus der Klimasimulation vorgegebene zeitliche Auflösung von einem Tag kann ggf. in kleinen Einzugsgebieten zu Problemen bei der Simulation von Hochwasserspitzen führen. Da generell Tageswerte simuliert werden, können kurz andauernde Hochwasserspitzen nicht ausreichend nachgebildet werden.

Die genannten Probleme bedingen einige Einschränkungen für die Aussagen, die aus der Kombination der Klimamodelle mit Wasserhaushaltssimulationen gewonnen werden können.

## **5.2 WASSERHAUSHALTSMODELLE**

Für Hessen liegen flächendeckend Wasserhaushaltsmodelle im 17 x 17 km<sup>2</sup> Raster für den Rhein und im 13 x 13 km<sup>2</sup> Raster für die Weser vor, wobei das Modellsystem LARSIM (Bremicker 2000) verwendet wurde. Beide Modelle wurden auf Grund der Verwendung von Tageswertdaten mit einer Rechenzeitschrittweite von einem Tag im Rahmen von früheren Untersuchungen kalibriert und validiert.

Die Ergebnisse von Langzeitsimulationen mit Messdaten (z.B. 20 Jahre für das Lahn-, Nidda- und Wesereinzugsgebiet, Rechenzeitschritt Tageswerte) verdeutlichen, dass die Abflüsse in den Gewässern mit Hilfe der Wasserhaushaltsmodelle auch über lange Zeiträume im Allgemeinen gut simuliert werden können, ohne korrigierend eingreifen zu müssen (formale Konsistenz des Modells).

Hierbei ergeben sich dennoch folgende Einschränkungen und Probleme:

- Die Absolutwerte gemessener und simulierter Abflüsse können differieren. Dadurch ergeben sich z.T. auch Bilanzunterschiede zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen. Vor allem bei der Simulation von Hochwasser können auf Grund der Verwendung von Tageswerten des Niederschlags höhere Abweichungen zwischen Simulation und Messung auftreten. Über längere Zeiträume hinweg gleichen sich diese

nicht systematischen Unterschiede jedoch im statistischen Sinne aus (vgl. Anlage A). Für die hier angestrebte Auswertung spielen die hier genannten Fehleinschätzungen daher eine untergeordnete Rolle.

- Insbesondere bei schneebeeinflussten Hochwassern kann es zu zeitlichen Diskrepanzen zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen kommen. Die modelltechnische Erfassung der Prozesse bei Schneeakkumulation und -schmelze ist sehr komplex, so dass z.T. höhere Abweichungen auftreten können.
- Die Güte der Simulationsergebnisse ist neben den Modellansätzen auch von Qualität und Dichte (räumliche Auflösung) der Eingangsdaten abhängig. Die genannten Probleme müssen bei der Bewertung von Aussagen aus der Kombination von Klima- und Wasserhaushaltsmodellen berücksichtigt werden.

### **5.3 FAZIT AUS DEN VORAUSSETZUNGEN**

Mit den existierenden Klima- und Wasserhaushaltsmodellen sind die prinzipiellen Voraussetzungen für Aussagen über klimatisch bedingte Veränderungen der wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen gegeben.

Aufgrund der den verschiedenen Modelltypen inhärenten Probleme sind die zu erwartenden Aussagen allerdings mit Unsicherheiten behaftet. Nachfolgend werden Vorschläge gemacht, wie diese Unsicherheiten minimiert werden können.

## **6. VORGEHENSWEISE**

### **6.1 GRUNDSÄTZLICHES**

Die Klimamodelle liefern sowohl für die Simulation des Ist-Zustands als auch für das Zukunftsszenario Daten für jene Klimagrößen, die als Eingangsdaten für die Wasserhaushaltssimulation benötigt werden. Damit sind die Ergebnisse der Klimamodelle prinzipiell geeignet, die Wasserhaushaltsmodelle anzutreiben.

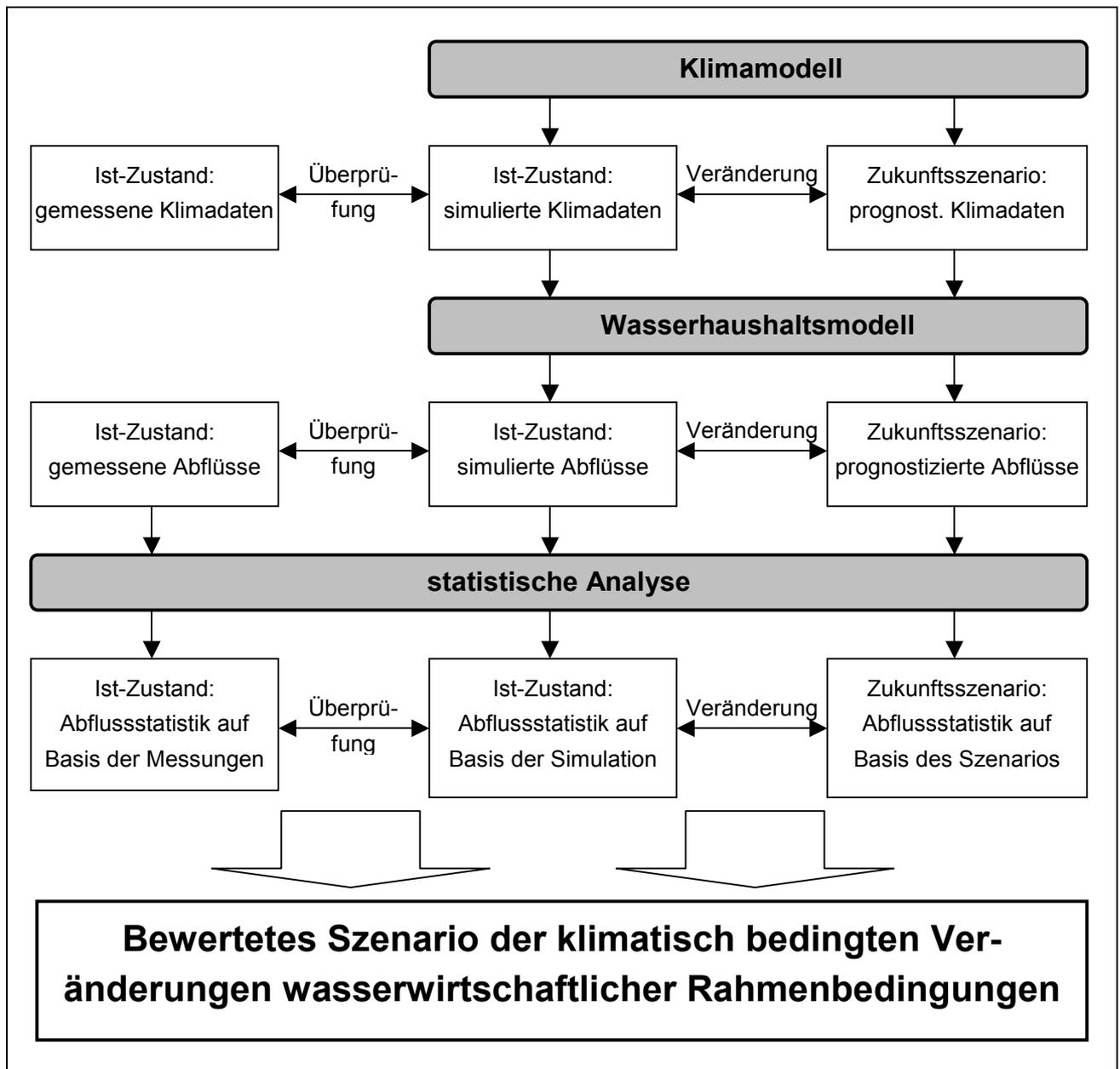
Für die Wasserhaushaltssimulation wird generell vorausgesetzt, dass sich die Landnutzung in Zukunft nicht ändert (weder klimatisch noch anthropogen bedingt) und dass die Parameterwerte der Wasserhaushaltsmodelle für den Szenariolauf konstant bleiben. Diese Annahmen müssen getroffen werden, so lange keine anderen Informationen über zu erwartende Veränderungen der Landnutzung in der Zukunft vorliegen.

Die generelle Vorgehensweise für Aussagen über klimatisch bedingte Veränderungen der wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen unter Verwendung der Klima- und Wasserhaushaltsmodelle ist in Bild 3 schematisch dargestellt.

Wie Bild 3 veranschaulicht, liefern die Klimamodelle sowohl für die Simulation des Ist-Zustands als auch für das Zukunftsszenario Klimadaten als Simulationsergebnisse. Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse für die Simulation des Ist-Zustands (1981-2000) mit den gemessenen Klimadaten desselben Zeitraums können die Klimamodelle überprüft werden.

Aussagen zu den auf Grundlage des Szenarios zukünftig zu erwartenden Veränderungen der Klimadaten (z.B. Niederschlag, Lufttemperatur) können durch den Vergleich zwischen Simulation des Ist-Zustands und Zukunftsszenario gemacht werden. Dadurch können eventuell vorhandene systematische Fehler des Klimamodells eliminiert werden, die bei einem Vergleich zwischen Zukunftsszenario und Messdaten zu einer Verfälschung der Aussage führen würden.

Falls keine Simulation des Ist-Zustands von Seiten der Klimamodellierer vorliegt, kann behelfsweise das Zukunftsszenario mit den Messdaten verglichen werden. Dieses Vorgehen ist methodisch nur dann annähernd akzeptabel, wenn davon ausgegangen werden kann, dass die Messdaten und die Ergebnisse der Simulation des Ist-Zustands weitestgehend identisch sind. In Bild 3 entfallen dann die mittleren Kästchen zur Simulation des Ist-Zustands und die Messdaten (links in Bild 3) sind direkt mit den prognostizierten Daten des Zukunftsszenarios (rechts in Bild 3) zu vergleichen.



**Bild 3:** Generelle Vorgehensweise bei der Umsetzung von Klimaszenarien in Wasserhaushaltssimulationen (bezogen auf die Abflüsse).

Sowohl die Überprüfung der Modelle (Vergleich Simulation des Ist-Zustands mit gemessenen Klimadaten) als auch die Auswertung der Änderungen im Szenariolauf gegenüber der Simulation des Ist-Zustands wurden von den Arbeitsgruppen der Klimamodellierer für ihr jeweiliges Modell vorgenommen.

## **6.2 DURCHFÜHRUNG DER SIMULATION MIT LARSIM**

Um Klimaszenarien berechnen zu können, muss davon ausgegangen werden, dass für die Simulation mit LARSIM die kalibrierten Modellparameter über den Simulationszeitraum Gültigkeit haben.

Mögliche Veränderungen durch eine Klimaänderung z.B. in Vegetation und Landnutzung und somit den Bodeneigenschaften, die das Wasserspeichervermögen beeinflussen und eine neue Eichung des Modells erforderlich machen, sind derzeit nicht quantifizierbar. Daher wird mangels anderer Alternativen vorgeschlagen, in LARSIM für die Berechnung der Klimaszenarien von gleichen Modellparametern wie beim Simulationslauf auszugehen. Die Berechnungen erfolgen auf Tageswertbasis.

Für die Durchführung der Simulationen benötigt LARSIM zur Initialisierung der Berechnung für die drei Abflusskomponenten Anfangsfüllungen der internen Modellspeicher. Diese Anfangsfüllungen werden bei allen Berechnungen mit einheitlichen mittleren Zuständen initialisiert.

Als Messwerte für die klimatologische Größe Niederschlag lagen für die Jahre 1981 bis 2000 Messwerte des Deutschen Wetterdienstes vor.

## 7. VALIDIERUNG DES MODELLS MIT GEMESSENEN KLIMAZEITREIHEN

Das Wesermodell wurde für den Zeitraum 1981 bis 1985 und das Rheinmodell für den Zeitraum 1980 bis 1997 kalibriert.

Für die Weser wurde die Kalibrierung an den Pegeln Schmittlotheim/Eder, Gunterhausen/Fulda sowie Hannoversch-Münden durchgeführt. Im Lahnggebiet erfolgte eine Kalibrierung für den Pegel Kalkofen/Lahn. Die Pegel Bad Vilbel/Nidda, Leun/Lahn und Marburg/Lahn wurde nicht kalibriert. Die Modellparameter werden über das in LARSIM integrierte Regionalisierungsverfahren bestimmt.

Für alle genannten Pegel wurden die Modelle zusätzlich für den Zeitraum 1981 bis 2000 validiert. In der nachfolgenden Tabelle sind für die Pegel die Modelleffizienz und Modellgüte für den genannten Zeitraum dargestellt.

Das Bestimmtheitsmaß beschreibt den Anteil der durch eine Regression erklärbaren Streuung an der Gesamtstreuung, hier angewendet auf den Vergleich von gemessenen mit berechneten Abflüssen. Es wird zwar oft in der Literatur verwendet, ist aber dennoch in der Anwendung als hydrologisches Gütemaß problematisch, da systematische Ordinatenverschiebungen zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen über dieses Gütemaß nicht erkannt werden. Das bedeutet beispielsweise, dass eine über die Zeitreihe konstante Differenz zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen, unabhängig von der Größe der Differenz, keine Auswirkungen auf den Wert des Bestimmtheitsmaßes hat.

Bei der Modelleffizienz wirken sich im Gegensatz dazu auch über die Zeitreihe konstante Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen abmindernd auf das ermittelte Gütemaß aus. Da für die vorliegende Bearbeitung insbesondere die Simulationsqualität im Niedrig- und Mittelwasserbereich von Bedeutung ist, wurde die Modelleffizienz auch für logarithmierte Abflusswerte ausgewertet, wodurch die Auswirkungen des Niedrig- und Mittelwasserbereichs auf den Wert des Gütemaßes erhöht wird. Dieses Maß wird im Folgenden als Modelleffizienz LnQ bezeichnet.

Sowohl das Bestimmtheitsmaß als auch die Effizienz nehmen den Wert 1,0 bei einer genauen Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen an. Das Bestimmtheitsmaß hat den Wert Null, sofern keine Korrelation zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen mehr gegeben ist, für die Effizienz sind bei sehr schlechter Simulationsqualität auch negative Werte möglich.

Tabelle 7.1: Gütemaße der Abflüsse des validierten Modells

Pegel	Gewässer	Bestimmtheitsmass $r^2$	Modelleffizienz	Modelleffizienz $\ln Q$	Bilanz $Q_{\text{ber}}/Q_{\text{gem}}$
Systemdaten		Validierungszeitraum 1.1.1981 – 31.12.2000			
Bad Hersfeld	Fulda	0,84	0,83	0,82	1,02
Schmittlotheim	Eder	0,88	0,87	0,83	0,95
Fritzlar <sup>1)</sup>	Eder	–	–	–	–
Guntershausen <sup>1)</sup>	Fulda	0,86	0,58	0,7	1,05
Helmarshausen	Diemel	0,85	0,69	0,73	1,06
Bad Vilbel	Nidda	0,82	0,77	0,83	1,06
Marburg	Lahn	0,81	0,8	0,8	0,99
Leun	Lahn	0,88	0,87	0,88	1,07
Kalkofen	Lahn	0,92	0,93	0,91	0,98

<sup>1)</sup> Durch die Edertalsperre beeinflusst

Aus Tabelle 7.1 wird deutlich, dass für die meisten Pegel zufriedenstellende bis gute, teilweise sogar sehr gute Simulationsergebnisse erzielt werden können. In den Anlagen A-1 bis A-9 sind die gemessenen und berechneten Abflussganglinien für die einzelnen Pegel in vier Bildern zu je fünf Jahren dargestellt.

Anhand der Abbildungen sind Unterschiede zwischen den gemessenen Abflüssen und den mit LARSIM aus den Messdaten berechneten Abflüssen kaum erkennbar.

Für die Edertalsperre wurde eine vereinfachte Steuerungsregel (siehe Kapitel 3) aus dem Jahr 1999 verwendet, die im Wesentlichen auf den Hochwasserschutz steuert. Diese Regel wurde auf die Jahre 1981 bis 2000 angewendet. Daher ist eine genaue Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Abflussganglinie nicht zu erwarten.

## **8. SIMULATIONSERGEBNISSE AUS LARSIM MIT NACH ENKE BERECHNETEN EINGANGSDATEN**

Es wurden mit den Wasserhaushaltsmodellen Weser und Rhein Berechnungen durchgeführt, wobei als Eingabedaten die Klimadaten der jeweils zehn Realisationen für die Simulation des Istzustands (1981 bis 2000) als auch die Daten aus den jeweils zehn Realisationen für die vier Dekaden des Zukunftsszenarios (2011 bis 2020, 2021 bis 2030, 2031 bis 2040 und 2041 bis 2050) verwendet wurden. Die Untersuchung der Ergebnisse der Simulationen wurden für die oben genannten Pegel durchgeführt.

Das Wasserhaushaltsmodell ist derzeit auf der Basis von Tageswerten geeicht. Zudem sind die hier verwendeten Eingangsdaten Tageswerte, so dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass das Modell zum derzeitigen Zeitpunkt und mit den verwendeten Eingabedaten geeignet ist, Hochwassersituationen genau zu simulieren. Es werden im Folgenden dennoch die Hochwasserperioden ausgewertet, um einen ersten Eindruck über die Simulationsergebnisse mit den verschiedenen Eingangsdaten auch in diesem Abflussbereich zu erhalten. Darüber hinaus werden die Niedrigwasserperioden analysiert.

Zur Auswertung werden für jede Realisation die mittleren monatlichen Abflüsse MoMQ, die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MoMnQ und die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse MoMHQ berechnet. Die Ergebnisse sind in den Anlagen B bis F dargestellt.

Prinzipiell enthalten die Bilder den Jahresgang für alle zehn Einzelrealisationen sowie den mittleren Jahresgang aus den zehn Einzelrealisationen.

In den Bildern für die Simulation des Istzustands (1981 bis 2000) ist zusätzlich der mittlere Jahresgang für die Messwerte und den Validierungslauf dargestellt.

In den Bildern für die Szenarienrechenläufe werden als Vergleich die Mittelwerte aus den zehn Realisationen der Simulation des Istzustands dargestellt, so dass der Unterschied deutlich wird.

Für die Pegel Fritzlar und Guntershausen, die durch die Steuerung der Edertalsperre beeinflusst wurden, sind die Auswertungen nur für monatliche Hochwasserabflüsse durchgeführt, da die vereinfachte Steuerungsregel (siehe Kapitel 3) im Wesentlichen auf den Hochwasserschutz abzielt.

## 8.1 AUSWERTUNG DER MITTLEREN MONATLICHEN NIEDRIGWASSER-ABFLÜSSE

Die Bewertung der Modellergebnisse erfolgt für die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse anhand der Mittelwerte aus den jeweils zehn Realisationen für die Simulation des Istzustands (1981 bis 2000) und den mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüssen der Messwerte und der Validierung.

Die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse sind für alle Pegel im zeitlichen Verlauf für die zehn Realisationen der Simulation des Istzustands gegenüber der Validierung und der Messdaten in Anlage B dargestellt. In Tabelle 8.1 ist eine Bewertung auf Grund einer visuellen Betrachtung der Ergebnisse enthalten.

In den meisten Fällen können für die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse gute bis zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Lediglich beim Pegel Bad Hersfeld/Fulda werden die gemessenen monatlichen Niedrigwasserabflüsse im Frühjahr unterschätzt und in den Sommermonaten überschätzt. Beim Pegel Schmittlotheim/Eder werden die gemessenen und validierten mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse leicht überschätzt. Beim Pegel Bad Vilbel/Nidda werden die gemessenen und validierten mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse bei der Simulation des Istzustands unterschätzt.

Tabelle 8.1: Güte der Anpassung für den Mittelwert der zehn Realisationen der Simulation des Istzustands an Validierung und Messdaten für Niedrigwasserabflüsse

Pegel/Einzugsgebiet	Güte der Simulation			
	Dez. – Febr.	Mär. – Mai	Jun. – Aug.	Sep. – Nov.
Bad Hersfeld/Fulda	o	–	–	+
Schmittlotheim/Eder	+	o	+	+
Helmarshausen/Diemel	+	+	+	+
Marburg/Lahn	+	+	+	+
Leun/Lahn	+	+	+	+
Kalkofen/Lahn	+	+	+	+
Bad Vilbel/Nidda	–	+	+	+

+ gute Übereinstimmung, o zufriedenstellende Übereinstimmung, – schlechte Übereinstimmung

Weitere Ergebnisse für die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse sind in den

Anlagen C für den Zeitraum 2011 bis 2020,  
 Anlagen D für den Zeitraum 2021 bis 2030,  
 Anlagen E für den Zeitraum 2031 bis 2040 sowie  
 Anlagen F für den Zeitraum 2041 bis 2050

dargestellt.

Diese Darstellungen enthalten die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse aus den zehn Einzelrealisationen für die Szenarien, den Mittelwert für jeden Monat aus den zehn Szenarien sowie die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse für die Simulation des Istzustands (1981 bis 2000).

Die Differenz zwischen dem größten und kleinsten Mittelwert eines jeden Monats ist ein Maß für die Variabilität. In den Wintermonaten ist diese Variabilität in der Regel für alle Pegel größer als in den Sommermonaten.

## 8.2 AUSWERTUNG DER MITTLEREN MONATLICHEN ABFLÜSSE

Die Bewertung der Modellergebnisse erfolgt für die mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse anhand der Mittelwerte aus den jeweils zehn Realisationen für die Simulation des Istzustands (1981 bis 2000) und den mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse für die Messdaten und die Validierung.

Die mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse sind für alle Pegel im zeitlichen Verlauf für die zehn Realisationen der Simulation des Istzustands gegenüber der Validierung und den Messwerten in Anlage B dargestellt. In Tabelle 8.2 ist eine Bewertung auf Grund einer visuellen Betrachtung der Ergebnisse enthalten.

In den meisten Fällen können für die mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse gute Ergebnisse erzielt werden. Lediglich beim Pegel Schmittlotheim/Eder werden im Frühjahr die gemessenen monatlichen Mittelwasserabflüsse bei der Simulation des Istzustandes überschätzt.

**Tabelle 8.2:** Güte der Anpassung für den Mittelwert der zehn Realisationen der Simulation des Istzustands an Validierung und Messdaten für Mittelwasserabflüsse

Pegel/Einzugsgebiet	Güte der Simulation			
	Dez. – Febr.	Mär. – Mai	Jun. – Aug.	Sep. – Nov.
Bad Hersfeld/Fulda	+	o	+	+
Schmittlotheim/Eder	+	–	+	+
Helmarshausen/Diemel	+	o	+	+
Marburg/Lahn	+	o	+	+
Leun/Lahn	+	o	+	+
Kalkofen/Lahn	+	o	+	+
Bad Vilbel/Nidda	o	+	+	+

+ gute Übereinstimmung, o zufriedenstellende Übereinstimmung, – schlechte Übereinstimmung

Weitere Ergebnisse für die mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse sind in den

Anlagen C für den Zeitraum 2011 bis 2020,  
Anlagen D für den Zeitraum 2021 bis 2030,  
Anlagen E für den Zeitraum 2031 bis 2040 sowie  
Anlagen F für den Zeitraum 2041 bis 2050

dargestellt.

Diese Darstellungen enthalten die mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse aus den zehn Einzelrealisationen für die Szenarien, den Mittelwert für jeden Monat aus den zehn Szenarien sowie die mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse für die Simulation des Istzustands (1981 bis 2000).

Die Differenz zwischen dem größten und kleinsten Mittelwert eines jeden Monats ist ein Maß für die Variabilität. In den Wintermonaten ist diese Variabilität in der Regel größer als in den Sommermonaten.

### **8.3 AUSWERTUNG DER MITTLEREN MONATLICHEN HOCHWASSERABFLÜSSE**

Die Bewertung der Modellergebnisse erfolgt für die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse anhand der Mittelwerte aus den jeweils zehn Realisationen für die Simulation des Istzustands (1981 bis 2000) und den mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse für die Messdaten und die Validierung.

Die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse werden für alle Pegel im zeitlichen Verlauf für die zehn Realisationen der Simulation des Istzustands gegenüber der Validierung und den Messwerten in Anlage B dargestellt. In Tabelle 8.3 ist eine Bewertung auf Grund einer visuellen Betrachtung der Ergebnisse enthalten.

In den meisten Fällen können für die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse zufriedenstellende bis gute Ergebnisse erzielt werden. Beim Pegel Schmittlotheim/Eder werden die gemessenen und validierten mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse gegenüber den mittleren monatlichen Hochwasserabflüssen aus der Simulation des Istzustands im März unterschätzt und im April und Mai überschätzt.

Für den durch die Edersteuerung beeinflussten Pegel Fritzlar/Eder (siehe Anlage B-7) werden die gemessenen und validierten mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse im März überschätzt und in den Sommer und Herbstmonaten unterschätzt.

Diese Abweichungen sind durch die vereinfachte Steuerung der Edertalsperre bedingt, die auf größere Hochwasser abzielt und nicht die Mehrfachzielsetzung (Niedrigwasseraufhöhung, Freizeit etc.) berücksichtigt, die im Sommer eine besondere Rolle spielt. Daher weichen im Sommer auch die validierten und gemessenen mittleren monatlichen Hochwässer deutlich voneinander ab.

Ebenso werden die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse des Pegels Guntershausen (Anlage B-8) durch die Edersteuerung beeinflusst. Hier sind Abweichungen zwischen Validierung und Messung und den Istzustandsimulationen im Winter zu verzeichnen.

Tabelle 8.3: Güte der Anpassung für den Mittelwert der zehn Realisationen der Simulation des Istzustands an Validierung und Messdaten für Hochwasserabflüsse

Pegel/Einzugsgebiet	Güte der Simulation			
	Dez. – Febr.	Mär. – Mai	Jun. – Aug.	Sep. – Nov.
Bad Hersfeld/Fulda	o	o	+	+
Schmittlotheim/Eder	o	–	+	+
Fritzlar/Eder	+	–	–	+
Guntershausen/Fulda	+	–	+	+
Helmarshausen/Diemel	+	o	+	+
Marburg/Lahn	+	o	+	+
Leun/Lahn	+	+	+	+
Kalkofen/Lahn	o	o	+	+
Bad Vilbel/Nidda	o	+	+	+

+ gute Übereinstimmung, o zufriedenstellende Übereinstimmung, – schlechte Übereinstimmung

Weitere Ergebnisse für die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse sind in den

- Anlagen C für den Zeitraum 2011 bis 2020,
- Anlagen D für den Zeitraum 2021 bis 2030,
- Anlagen E für den Zeitraum 2031 bis 2040 sowie
- Anlagen F für den Zeitraum 2041 bis 2050

dargestellt.

Diese Darstellungen enthalten die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse aus den zehn Einzelrealisationen für die Szenarien, den Mittelwert für jeden Monat aus den zehn Szenarien sowie die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse für die Simulation des Istzustands (1981 bis 2000).

Die Differenz zwischen dem grössten und kleinsten Mittelwert eines jeden Monats ist ein Maß für die Variabilität. In den Wintermonaten ist diese Variabilität in der Regel größer als in den Sommermonaten.

## 9. ABFLUSSVERÄNDERUNG DER SZENARIENZUSTÄNDE GEGENÜBER DEM ISTZUSTAND

Um die Abflussveränderung gegenüber der Simulation des Istzustands zu demonstrieren, werden in Anlage G die mittleren monatlichen Gewässerhauptzahlen (MoMNP, MoMMQ und MoMHQ) für die Szenarienzustände 2011 bis 2020, 2021 bis 2030, 2031 bis 2040 sowie 2041 bis 2050 gegenüber der Simulation des Istzustands dargestellt.

Zusätzlich werden die mittleren jahreszeitlichen Gewässerhauptzahlen (Anlage F) für die Szenarienzustände 2011 bis 2020, 2021 bis 2030, 2031 bis 2040 sowie 2041 bis 2050 gegenüber der Simulation des Istzustands (1981 bis 2000) dargestellt.

### 9.1 ABFLUSSVERÄNDERUNG DER MITTLEREN MONATLICHEN NIEDRIGWASSERABFLÜSSE

In Tabelle 9.1 sind für die einzelnen Pegel und Jahreszeiten die mittleren Trends der Veränderung gegenüber der Simulation des Istzustands dargestellt. Der Trend wurde dabei visuell anhand der Bilder in den Anlagen G und H abgeschätzt.

Tabelle 9.1: Veränderung der mittleren jahreszeitlichen Niedrigwasserabflüsse gegenüber der Simulation des Istzustands

Pegel/Einzugsgebiet	Veränderung Szenarium gegenüber Istzustand			
	Dez. – Febr.	Mär. – Mai	Jun. – Aug.	Sep. – Nov.
Bad Hersfeld/Fulda	+	–	–	–
Schmittlotheim/Eder	+	–	–	–
Helmarshausen/Diemel	o	–	–	–
Marburg/Lahn	+	–	o	o
Leun/Lahn	+	–	o/–	o/–
Kalkofen/Lahn	+	–	o/–	o/–
Bad Vilbel/Nidda	+	o/–	o/–	o

+ Zunahme, o keine wesentlichen Veränderungen, – Abnahme

#### Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse:

Es kommt zu einer Zunahme der Niedrigwasserabflüsse im Winter und eine Abnahme in den Frühjahrsmonaten in Gesamthessen (alle Pegel). Im Sommer und Herbst kommt es im Fuldaeinzugsgebiet zu einer weiteren Abnahme der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse, während im Lahn- und Niddaeinzugsgebiet die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse nur in geringerem Maße abnehmen.

Weitere Details sind in den Anlagen G und H dargestellt.

## 9.2 ABFLUSSVERÄNDERUNG DER MITTLEREN MONATLICHEN MITTELWASSERABFLÜSSE

In Tabelle 9.2 sind für die einzelnen Pegel und Jahreszeiten die mittlere Trends der Veränderung gegenüber der Simulation des Istzustands dargestellt. Der Trend wurde dabei visuell anhand der Bilder in den Anlagen G und H abgeschätzt.

Tabelle 9.2: Veränderung der mittleren jahreszeitlichen Mittelwasserabflüsse gegenüber der Simulation des Istzustands

Pegel/Einzugsgebiet	Veränderung Szenarium gegenüber Istzustand			
	Dez. – Febr.	Mär. – Mai	Jun. – Aug.	Sep. – Nov.
Bad Hersfeld/Fulda	+	o/–	–	o
Schmittlotheim/Eder	+	–	–	–
Helmarshausen/Diemel	o	o/–	–	–
Marburg/Lahn	+	o	o	o
Leun/Lahn	+	o/–	–	o
Kalkofen/Lahn	+	o/–	–	o
Bad Vilbel/Nidda	+	o	o	o

+ Zunahme, o keine wesentlichen Veränderungen, – Abnahme

Es kommt zu einer Zunahme der Mittelwasserabflüsse im Winter und eine Abnahme in den Frühjahrsmonaten in Gesamthessen (alle Pegel). Im Sommer und Herbst kommt es im Fulda- und Diemeleinzugsgebiet zu einer weiteren Abnahme der mittleren monatlichen Abflüsse, während sich im Lahn- und Niddaeinzugsgebiet die mittleren monatlichen Abflüsse nur geringfügig verändern.

Weitere Details sind in den Anlagen G und H dargestellt.

## 9.3 ABFLUSSVERÄNDERUNG DER MITTLEREN MONATLICHEN HOCHWASSERABFLÜSSE

In Tabelle 9.3 sind für die einzelnen Pegel und Jahreszeiten die mittlere Trends der Veränderung gegenüber der Simulation des Istzustands dargestellt. Der Trend wurde dabei visuell anhand der Bilder in den Anlagen G und H abgeschätzt.

Die genauen Zahlenwerte sowohl für die jahreszeitlichen Abflussveränderungen als auch für die monatlichen Veränderungen können aus den einzelnen Anlagen G und H entnommen werden.

Tabelle 9.3: Veränderung der mittleren jahreszeitlichen Hochwasserabflüsse gegenüber der Simulation des Istzustands

Pegel/Einzugsgebiet	Veränderung Szenarium gegenüber Istzustand			
	Dez. – Febr.	Mär. – Mai	Jun. – Aug.	Sep. – Nov.
Bad Hersfeld/Fulda	+	o	–	o
Schmittlotheim/Eder	+	–	–	–
Fritzlar/Eder	+	o	o	o
Guntershausen/Fulda	+	o/–	–	o
Helmarshausen/Diemel	+	o	o	o
Marburg/Lahn	+	+/o	o	o
Leun/Lahn	+	+/o	–/o	o
Kalkofen/Lahn	+	+/o	–/o	o
Bad Vilbel/Nidda	+	+/o	o	o

+ Zunahme, o keine wesentlichen Veränderungen, – Abnahme

Es kommt zu einer Zunahme der mittleren monatlichen Hochwasser im Winter in Gesamthessen (alle Pegel). Auch im März tritt in der Regel eine Zunahme der MoMHQ ein, während ab April eine Abnahme der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse zu verzeichnen ist. Im Sommer und Herbst kommt es im Fuldaeinzugsgebiet zum Teil zu einer weiteren Abnahme der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse, während sich im Lahn- und Niddaeinzugsgebiet die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse nur in geringfügigem Umfang verändern.

Die Steuerung der Edertalsperre dürfte im Wesentlichen ursächlich dafür sein, dass sich an den Pegeln Fritzlar und Guntershausen die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse nicht besonders verändern.

Weitere Details sind in den Anlagen G und H dargestellt.

## 10. AUSBLICK

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden für verschiedene Einzugsgebiete in Hessen die Auswirkungen von einem Klimaszenarium (B2) auf mögliche Abflussveränderungen untersucht.

Hierbei hat sich gezeigt, dass die durchgeführte Methodik eine Möglichkeit ist, die Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf das Abflussgeschehen zu beschreiben.

Mit der hier vorgelegten Methodik ist es möglich die Auswirkungen weiterer Klimaszenarien (A1, B1 etc) auf das Abflussgeschehen mit vertretbarem Aufwand abzuschätzen.

Für die Verschärfung von Hochwässern wäre es jedoch sinnvoll derartige Studien auf einer kleineren Zeitskala (Stundenwerte) durchzuführen. Hierzu können Modellergebnisse aus dynamischen Klimamodellen wie zum Beispiel REMO verwendet werden. Auch hierfür dürfte das vorliegende Instrumentarium geeignet sein.

Im Hinblick auf das vorliegende Zahlenmaterial wäre eine pegelspezifische Auswertung von Niederschlagszeitreihen, Verdunstungszeitreihen, Bodenfeuchtezeitreihen als auch von Schneehöhenzeitreihen zu empfehlen.

## 11. LITERATUR

Bremicker M., 2000: Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM, Modellgrundlagen und Abwendungsbeispiele, Freiburger Schriften zur Hydrologie. Bd. 11.

Ebel M, Ludwig K., Richter K.-G., 2000: Mesoskalige Wasserhaushaltsmodellierung im Rheineinzugsgebiet mit LARSIM, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 6, Koblenz.

Enke W., 2003: Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM4 OPYC3 Klima-Simulationslaufes bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen, Abschlussbericht Stahnsdorf 2003.