



DR.-ING. KARL LUDWIG

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

**Auftraggeber:
Hessisches Landesamt 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
Christian Iber**

Karlsruhe, April 2008

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

- Erläuterungsbericht -

	-Seite-
1. Auftrag und Veranlassung.....	1
2. Zusammenfassung.....	4
3. Theoretische Grundlagen des Wasserhaushaltsmodells	9
4. Voraussetzungen	11
4.1 Klimamodelle.....	11
4.2 Wasserhaushaltsmodelle	13
4.3 Fazit aus den Voraussetzungen	14
5. Vorgehensweise.....	15
5.1 Grundsätzliches.....	15
5.2 Durchführung der Simulation mit LARSIM.....	17
6. Datengrundlage.....	18
7. Validierung von LARSIM mit gemessenen Klimazeitreihen.....	19
8. Abflussberechnungen mit LARSIM mit REMO-ECHAM5-OM Modelldaten.....	20
8.1 Validierung der REMO-ECHAM5-OM Niederschläge.....	20
8.2 Ergebnisse der Abflussberechnungen für den REMO-ECHAM5-OM Kontrolllauf	21
8.3 Ergebnisse der Szenarienberechnungen A1B.....	23
9. Abflussberechnungen mit LARSIM mit ECHAM5-WETTREG Modelldaten	24
9.1 Vorgehensweise	24
9.2 Auswertungen für den Kontrolllauf.....	25
9.2.1 Auswertung der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse	25
9.2.2 Auswertung der mittleren monatlichen Abflüsse	26
9.2.3 Auswertung der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse	27
9.2.4 Fazit aus der Bewertung des Kontrolllaufes.....	28
9.3 Abflussveränderung der Szenarienzustände gegenüber dem Istzustand..	29
9.3.1 Abflussveränderung der jahreszeitlichen Niedrigwasserabflüsse.....	30
9.3.2 Abflussveränderung der jahreszeitlichen Mittelwasserabflüsse	32

9.3.3 Abflussveränderung der jahreszeitlichen Hochwasserabflüsse.....	35
10. Ausblick und Empfehlungen	37
11. Literatur	39

VERZEICHNIS DER ANLAGEN

- ANLAGE A: BERECHNETER UND GEMESSENER MITTLERER MONATLICHER GEBIETSNIEDERSCHLAG (REMO-ECHAM5-OM)
- ANLAGE B: BERECHNETE UND GEMESSENE VERTEILUNG DER MEHRTAGESSUMMEN DER NIEDERSCHLÄGE (REMO-ECHAM5-OM)
- ANLAGE C: VERGLEICH DER ERGEBNISSE DES KONTROLLLAUFES MIT DEM IST-ZUSTAND (REMO-ECHAM5-OM)
- ANLAGE D: ERGEBNISSE DES TRANSIENTEN RECHENLAUFES C20 UND A1B (REMO-ECHAM5-OM)
- ANLAGE E: GEWÄSSERKUNDLICHE HAUPTZAHLEN FÜR DEN ZEITRAUM 1971 BIS 1980 (VALIDIERUNG: ECHAM5-WETTREG 2006)
- ANLAGE F: GEWÄSSERKUNDLICHE HAUPTZAHLEN FÜR DEN ZEITRAUM 2021 BIS 2030 (ECHAM5-WETTREG / SZENARIO A1B)
- ANLAGE G: GEWÄSSERKUNDLICHE HAUPTZAHLEN FÜR DEN ZEITRAUM 1961 BIS 2100 FÜR DAS SZENARIO A1B (ECHAM5-WETTREG / SZENARIO A1B)
- ANLAGE H: GEWÄSSERKUNDLICHE HAUPTZAHLEN FÜR DEN ZEITRAUM 1961 BIS 2100 FÜR DAS SZENARIO A2 (ECHAM5-WETTREG/SZENARIO A2)
- ANLAGE I: GEWÄSSERKUNDLICHE HAUPTZAHLEN FÜR DEN ZEITRAUM 1961 BIS 2100 FÜR DAS SZENARIO B1 (ECHAM5-WETTREG / SZENARIO B1)
- ANLAGE J: GEWÄSSERKUNDLICHE HAUPTZAHLEN FÜR MONATE FÜR DIE SZENARIEN C20, A1B, A2 UND B1 IM VERGLEICH (WETTREG 2006)

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.

Es wurden nun neue Klimaszenarien (auf Basis des REMO-ECHAM5-OM-Laufs) für verschiedene IPCC-Szenarien (A1B, B1, A2) bereitgestellt (siehe Bild 1.1).

In Bild 1.1 ist die globale Temperaturentwicklung für die verschiedenen Szenarien bis 2100 dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die Temperaturprognosen bis 2050 für die einzelnen Szenarien kaum unterscheiden. Größere Unterschiede treten erst ab dem Jahr 2050 auf.

Es standen nun zwei verschiedene Regionalisierungsverfahren zur Verfügung:

1. Das Regionalmodell REMO-ECHAM5-OM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg. Dabei handelt es sich um ein dynamisches Modell, bei dem die Ergebnisse in 10 x 10 km²-Rasterzellen für Mitteleuropa bereitgestellt werden. Vom MPI-M werden die Daten in Stundenzeitschritten zur Verfügung gestellt.
2. Das ECHAM5-WETTREG-Modell der Firma Climate & Environmental Consulting (CEC) Potsdam GmbH. Von CEC Potsdam werden die Daten für die Klimaszenarien stationsbezogen regionalisiert und nur als Tageswerte geliefert.

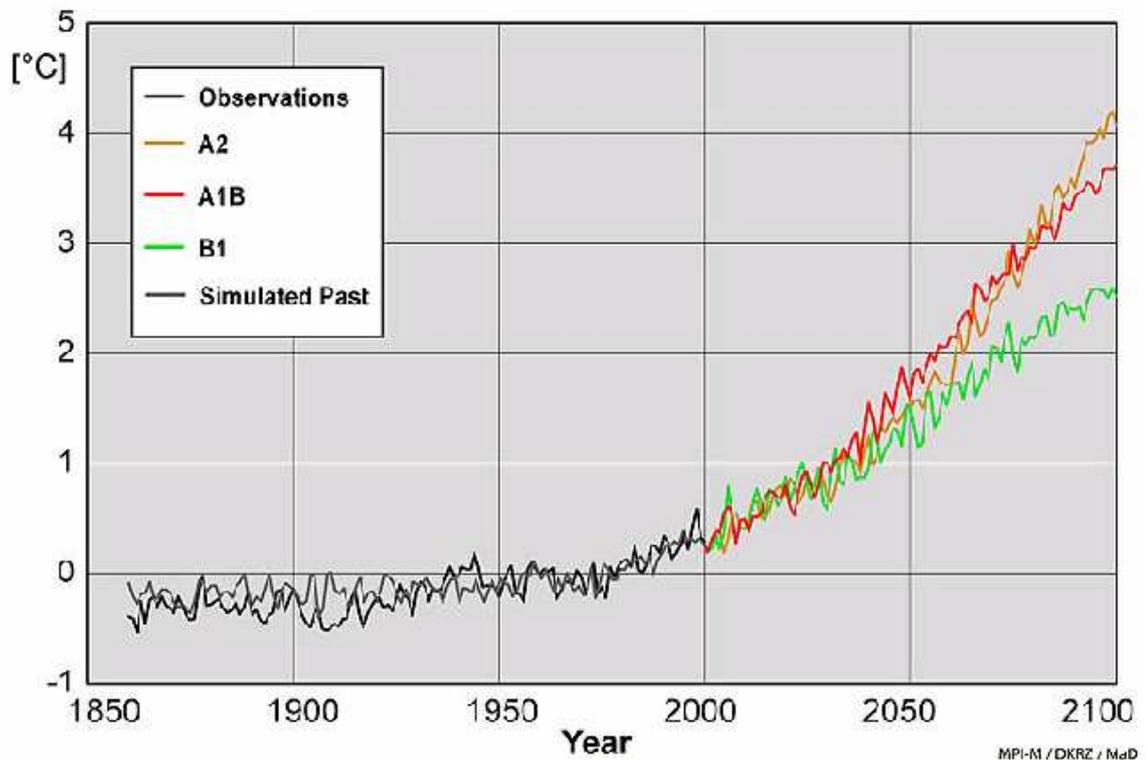


Bild 1.1: Globale Temperaturentwicklung für unterschiedliche Klimaszenarien

Folgende Szenarien standen zur Verfügung:

- Simulation des Ist-Zustands: 1961-2000
- Zukunftsszenario – Emissionsszenario A1B: 2001-2100
- Zukunftsszenario – Emissionsszenario A2: 2001-2100
- Zukunftsszenario – Emissionsszenario B1: 2001-2100

Die Szenariofamilie A2 beschreibt eine heterogene Entwicklung der Welt. Bevölkerungswachstum und wirtschaftliche Entwicklung unterscheiden sich stark für verschiedene Regionen in der Welt. Daher wächst die Bevölkerung weiter und die Einkommensentwicklung sowie technologische Fortschritte driften weit auseinander. Der weltweite Fortschritt ist langsam. Ein solches Szenario fördert den Klimawandel stärker als andere.

Die Szenariofamilie A1 beschreibt eine Welt mit starkem wirtschaftlichen Wachstum und einer Bevölkerungsentwicklung die etwa im Jahr 2050 ihr Maximum erreicht. Die Einführung neuer Technologien erfolgt schnell und effizient. Das Wachstum jedoch kann auf verschiedenen Energiequellen aufbauen: intensive Nutzung fossiler Brennstoffe (A1F), nicht-fossiler Energieträger (A1T) oder einer Mischung von beiden (A1B). Da derzeitige Trends in diese Richtung gehen, ist das Szenario A1B als Beispiel für ein Klimaszenario recht populär. Es gibt aber natürlich keine Garantie, wie sich die Welt in den nächsten Jahrzehnten entwickeln wird.

Die Szenariofamilie B1 geht von einer Bevölkerungsentwicklung wie in A1 aus. Die Gesellschaft wird jedoch recht bald auf Informationstechnologien und Dienstleistungen basieren. Die Intensität in Material- und Energieverbrauch werden durch intelligente Techniken und nachhaltige Prinzipien in Politik und Wirtschaft zurückgeführt. Soziales Gleichgewicht und globale Gerechtigkeit steigen. Allerdings umfasst das Szenario keine besonderen Maßnahmen zum Klimaschutz.

Mittels hochaufgelöster Wasserhaushaltssimulation werden die aus den verschiedenen Klimaszenarien zu erwartenden Verschärfungen hinsichtlich des Auftretens von Hochwasserereignissen quantifiziert.

Die Veränderung von Hochwasserscheitelabflüssen auf dieser Skala ist entscheidend für die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen und geänderten Bemessungsgrößen (Klimafaktoren) für eine nachhaltige Hochwasservorsorge und ein zukunftsweisendes Hochwassermanagement.

Die Veränderungen der Mittel- und Niedrigwassersituationen wird für ausgewählte Pegel in Hessen anhand des bestehenden 1/6 Grad Rheinmodells im Tageswertschritt untersucht. Hierzu werden die aktualisierten ECHAM5-WETTREG Daten (ECHAM5-WETTREG 2006) für die Szenarien A1B, A2 und B1 verwendet, ausgewertet und untersucht.

Karlsruhe, im April 2008



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



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

2. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Hessischen Klimaschutzprogramm INKLIM 2012 wird versucht für verschiedene klimatische Regionen Hessens anhand von ausgewählten Pegel Einzugsgebieten Aussagen über mögliche Veränderung des Abflussverhaltens infolge von Klimaänderungen abzuschätzen.

Die Pegel Einzugsgebiete liegen dabei über Mittel- und Südhessen verteilt (vgl. Bild 2.1), um einen möglichst guten Überblick über die Auswirkungen einer möglichen Klimaänderung auf den Abfluss zu bekommen.

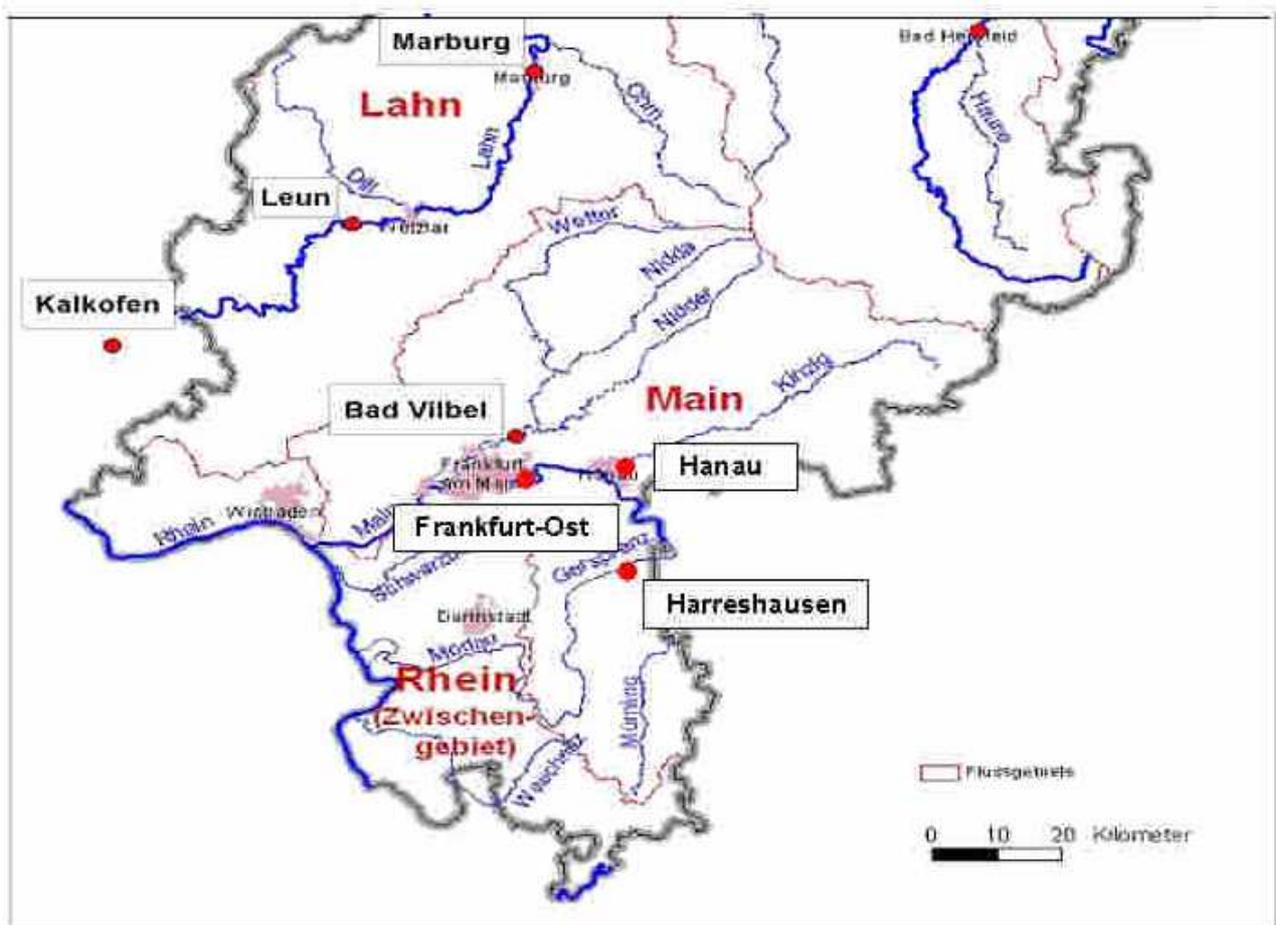


Bild 2.1: Übersicht über die Lage der untersuchten Pegel

Die Untersuchungen wurden mit dem Programmsystem LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) durchgeführt.

Die Untersuchung gliedert sich in zwei Teilbereiche:

- 1) Berechnung von Klimaszenarien mit dem REMO-ECHAM5-OM Modell mit dem hochaufgelösten Teileinzugsgebietsmodell für die Lahn auf Stundenwertbasis.
- 2) Berechnung von Klimaszenarien mit den ECHAM5-WETTREG 2006 Daten für verschiedene Einzugsgebiete mit dem 1/6 Grad Rheinmodell auf Tageswertbasis.

Berechnungen von Klimaszenarien mit dem REMO-ECHAM5-OM Modell für die Lahn:

Als Voruntersuchung wurden für die Lahn die mittleren berechneten Gebietsniederschläge mit aus Messungen abgeleiteten Gebietsniederschlägen verglichen. Beim Vergleich der jährlichen, jahreszeitlichen und monatlichen mittleren Gebietsniederschlägen zeigt sich bezogen auf die Gesamteinzugsgebietssumme in großen Teilen eine gute Übereinstimmung zwischen aus REMO-ECHAM5-OM berechneten und aus Messungen abgeleiteten Gebietsniederschlägen.

Des Weiteren wurden die Häufigkeitsverteilungen für die Mehrtagesummen für die Gebiete berechnet. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung für die Häufigkeitsverteilungen für gemessene und berechnete Gebietsniederschläge in den niedrigeren Klassen (bis 5 Tage). In den höheren Klassen werden die Abweichungen größer.

Diese Untersuchungen gaben Anlass dazu mit dem stündlichen REMO-ECHAM5-OM Daten den Kontrolllauf (1961-2000) und den Szenarienrechenlauf A1B (2001-2100) die Abflüsse mit LARSIM zu simulieren.

Die Simulationsergebnisse der Abflüsse für den Kontrolllauf (1961-2000) zeigten für mittlere monatliche Abflüsse eine Unterschätzung der gemessenen mittleren monatlichen Abflüsse um ca. 25% an den Pegeln Leun und Marburg.

Daraufhin wurde die räumliche Verteilung der Niederschläge für den Zeitraum 1971-2000 für den Kontrollrechenlauf und aus Messdaten räumlich abgeleiteten langjährigen Niederschlag untersucht. Danach ergeben sich örtliche Unterschiede bis zu 300 Prozent. Dieses Erkenntnis führte dazu, dass in Absprache mit dem Auftraggeber lediglich der Kontrolllauf und das Szenarium A1B für die Lahn durchgerechnet und ausgewertet wurde. Die geplante Untersuchung von anlagenbezogenen Hochwasserkenngößen wurde zu Gunsten von weiteren Untersuchungen mit den ECHAM5-WETTREG-Tageswerten verworfen.

Berechnung von Klimaszenarien mit den ECHAM5-WETTREG 2006 Daten für verschiedene Einzugsgebiete:

Für die Untersuchungen standen das beim Auftragnehmer vorliegende Rheinmodell (Ebel, Ludwig, Richter 2001) zur Verfügung, welches bereits bei vergangenen Untersuchungen erstellt und validiert wurde.

Für die Pegel

- 1) Bad Vilbel/Nidda (1.619 km²)
- 2) Marburg/Lahn (1.666 km²)
- 3) Leun/Lahn (3.571 km²)
- 4) Kalkofen/Lahn (5.304 km²)
- 5) Harreshausen/Gersprenz (461 km²)
- 6) Hanau/Kinzig (934 km²)
- 7) Frankfurt-Ost/Main (27.292 km²)

wurden die Untersuchungen durchgeführt.

Dazu wurden zunächst für die vorliegenden Einzugsgebiete mit Hilfe von gemessenen und simulierten Abflüssen an den Pegeln für den Zeitraum 1961 bis 2000 die Modelle nochmals validiert (mit Ausnahme des Pegels Frankfurt-Ost/Main).

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. Einschränkungen ergeben sich bei den kleineren Einzugsgebieten der Kinzig und der Gersprenz.

Im weiteren Verlauf werden mit Hilfe der auf statistischem Wege erzeugten Klimadaten (ECHAM5-WETTREG) für jeweils 10 Realisationen für den Istzustand (1961 bis 2000) und für die Szenarienzustände A1B, A2 sowie B1(2001 bis 2100) Abflusszeitreihen für die Pegel erzeugt und statistisch ausgewertet.

Die statistische Auswertung erfolgt auf Monatsbasis für die Parameter

MoMnQ = mittlerer monatliche Niedrigwasserabfluss

MoMMQ = mittlerer monatliche Mittelwasserabfluss sowie

MoMHQ = mittlerer monatliche Hochwasserabfluss.

Beim Vergleich der Simulationsergebnisse des Istzustandes (1971-2000) mit den gemessenen und validierten Abflüssen zeigt sich bei allen Parametern (MoMnQ, MoMMQ und

MoMHQ) weitgehend eine zufriedenstellende bis gute Übereinstimmung, so dass auf dieser Basis eine Abschätzung der Abflussveränderung unter veränderten Klimabedingungen möglich ist.

Aus dem Zeitraum 2001 bis 2100, für den die Klimaszenarien berechnet wurden, werden der Zeitraum 2021 bis 2050 („nahe Zukunft“) und der Zeitraum 2071 bis 2100 („ferne Zukunft“) ausgewertet. Damit ist es möglich, Aussagen zu den Veränderungen von Abflussverhalten für zwei unterschiedliche Zeithorizonte in diesem Jahrhundert zu treffen. Die Simulationsergebnisse für die übrigen Dekaden wurden ebenfalls ermittelt und bereitgestellt.

Für die Zukunftsszenarien kann das Abflussverhalten wie folgt beschrieben werden:

Mittlere monatliche Abflüsse:

In der nahen Zukunft kommt es im Winter zu einer Abflusszunahme um 10 bis 20% im Lahngbiet, um 15 bis 20% an den Pegeln Bad Vilbel/Nidda und Hanau/Kinzig sowie um 10 bis 15% an den Pegeln Harreshausen/Gersprenz und Frankfurt/Main. Im Frühjahr ergeben sich kaum signifikante Veränderungen in den mittleren monatlichen Abflüssen. Für die Sommermonate zeigen sich generell Abflussabnahmen um 10 bis 15%, am Pegel Bad Vilbel/Nidda um bis zu 20%. Auch im Herbst zeigen sich Abflussabnahmen meist um 15 bis 20%.

Für die ferne Zukunft ergeben sich deutliche Verstärkungen der für die nahe Zukunft vorgefundenen Veränderungstendenzen. Winterliche Zunahmen können zwischen 30 und 60% betragen, die sommerlichen Abnahmen liegen zwischen 15 und 30%.

Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse:

Für die untersuchten Pegel ergibt sich für die nahe Zukunft generell eine Abnahme der Niedrigwasserabflüsse im Sommer und Herbst mit einer Verschärfung (Abnahme der MoMNQ-Werte) um etwa 10 bis 15%, lediglich für die Pegel Bad Vilbel/Nidda (Abnahmen um bis zu 20%) und Hanau/Kinzig (Abnahmen bis zu 25%) treten etwas größere Veränderungen auf.

In der „fernen Zukunft“ kommt es an der Lahn zu einer moderaten Verschärfung der Niedrigwassersituation um 15 bis 25%, während es im Main-Einzugsgebiet um eine Verschärfung um etwa 25 bis 30%, am Pegel Hanau/Kinzig um ca. 30 bis zu 40% kommen kann.

Mittlere monatliche Hochwasserabflüsse:

Im Lahn-Einzugsgebiet an den Pegeln Marburg, Leun und Kalkofen kommt es zu einer Verschärfung der Hochwassersituation (Zunahme der MoMHQ-Werte) im Winter in der „nahen“ Zukunft von ca. 5 bis zu 12%. An den Pegeln Hanau, Bad Vilbel, Harreshausen und Frankfurt-Ost (Main-Einzugsgebiet) kommt es zu einer Verschärfung der Hochwassersituation in der nahen Zukunft je nach Szenario um bis zu 15%. Die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse im Sommer gehen um etwa 10 bis 20% zurück.

In der „fernen Zukunft“ kommt es an der Lahn zu einer Verschärfung der Hochwassersituation um 20 bis 35%, im Falle des Pegels Marburg um bis zu 50%. Im Maingebiet kann es zu einer Verschärfung von 25 bis 50% kommen. Das Szenario A1B liefert hierbei die größten Veränderungen.

Die aufgezeigten Veränderungen ergeben sich für mittlere monatliche bzw. jahreszeitliche Hochwasserabflüsse, also für 1 bis 2-jährige Hochwasserereignisse. Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf Hochwasserereignisse mit seltenerer Eintrittswahrscheinlichkeit ist nicht zulässig, dazu sind weitergehende extremwertstatistische Auswertungen erforderlich.

3. THEORETISCHE GRUNDLAGEN DES WASSERHAUSHALTSMODELLS

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 Wasserkreislaufes. Bild 3.1 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 (WHM-Rheingebiet) bzw. Stundenwerten (WHM-Lahn für REMO-Anwendung) 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, Schneeakkumulation und -ablation, sowie der Bodenwasserspeicherung erfolgt in LARSIM separat für die jeweils vorhandenen Landnutzungen innerhalb der Rasterflächen (WHM-Rhein) bzw. Teilgebietsflächen (WHM-Lahn). 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 bzw. Teilgebietsflächen erfolgte mittels inverser Distanzberechnung der vier nächsten umliegenden Niederschlagsstationen. Dabei werden die jeweils nächsten Niederschlagsstationen in den vier umliegenden Quadranten berücksichtigt. Bei der inversen Distanzberechnung wird der Abstand der betrachteten Rasterzelle zu den vier umliegenden Niederschlagsstationen berechnet. Die Niederschlagshöhen an den vier umliegenden Punkten werden mit dem Abstand gewichtet und somit die Gebietsniederschlagshöhe für das Raster 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 bzw. Teilgebietsflächen. Hierzu wird der systematische Niederschlagsmessfehler um die Benetzungs- und Verdunstungsverluste sowie um den Einfluss der Windverdriftung korrigiert. Bei Berechnungen mit Niederschlagsdaten aus den dynamischen Klimamodellen (ECHAM5-REMO) ist eine solche Niederschlagskorrektur nicht erforderlich, da in den Modellen Niederschlagsmengen keinem Messfehler unterliegen. Bei dem Downscalingverfahren nach ECHAM5-WETTREG werden im Ergebnis verfahrensbedingt Werte erzeugt, die „gemessenen“ Stationsdaten entsprechen, demzufolge ist auch hier eine Niederschlagskorrektur erforderlich. 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

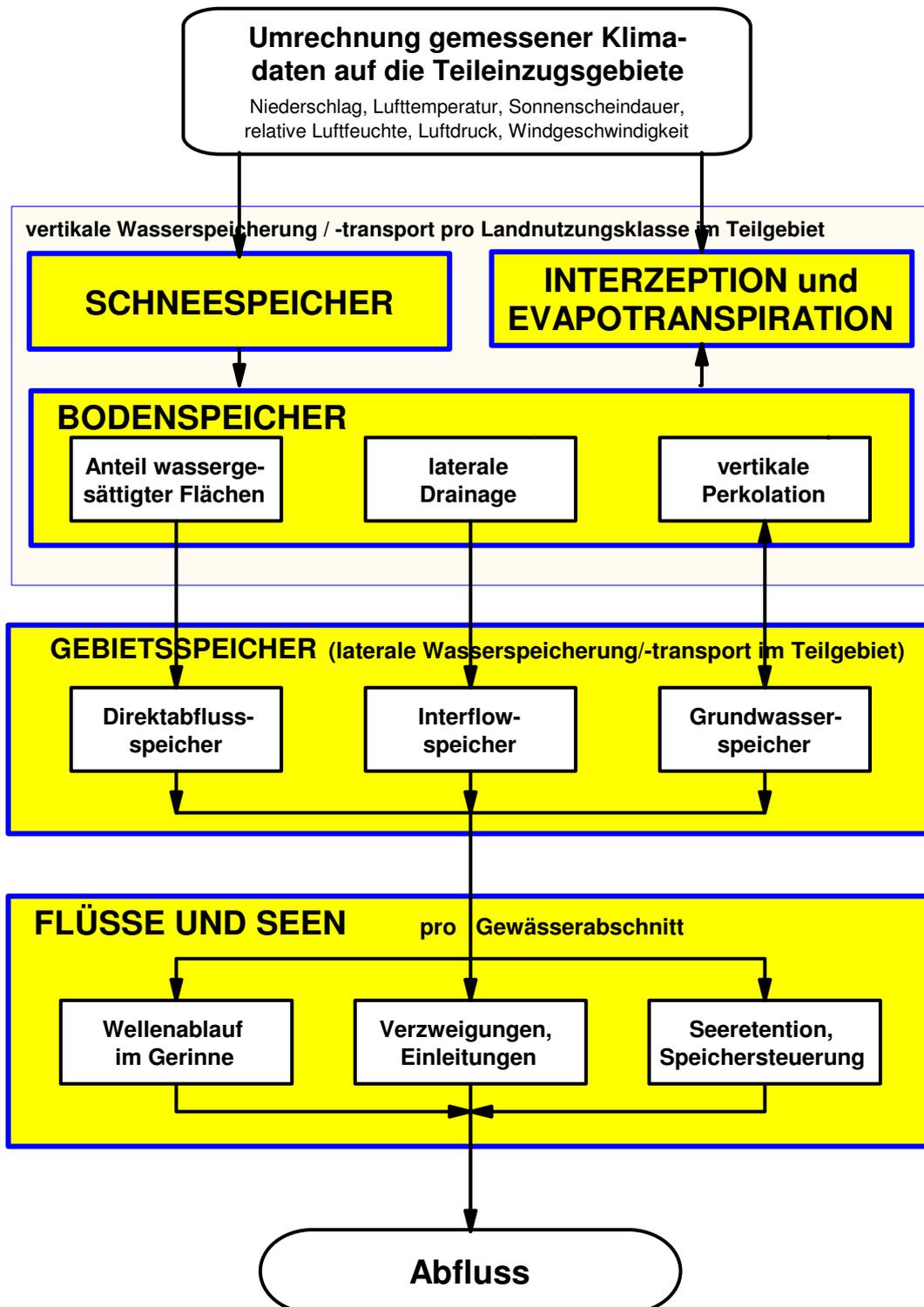


Bild 3.1: Schema des Wasserhaushaltsmodells LARSIM

4. 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 müssen.

Als Untersuchungsgebiete im Rahmen von INKLIM 2012 wurden Einzugsgebiete in Hessen im Bereich des Lahneinzugsgebietes bis zum Rhein und des Niddaeinzugs-, des Kinzig- und des Gersprenzeinzugsgebietes 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.

4.1 KLIMAMODELLE

Für Hessen liegen nun zwei Arten von Klimasimulationen vor:

- 1) ECHAM5-WETTREG-Modell der Firma Climate & Environmental Consulting (CEC) Potsdam GmbH:

Die ECHAM5-WETTREG-Daten 2006 (basierend auf ECHAM5) wurden für die Lahn und das hessische Maingebiet verwendet, um Simulationen der oben genannten Pegel zu berechnen. Mit den ECHAM5-WETTREG-Daten 2004 (basierend auf ECHAM4) wurden bereits Simulationen für die Einzugsgebiete in Hessen durchgeführt (Ludwig 2004, Brahmer 2006). Der Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung liegt auf den Berechnungsergebnissen mit den ECHAM5-WETTREG-Daten 2006.

Es wurden Tageswerte bestimmter Klimagrößen für den Zeitraum 1961-2000 als lückenlose, homogenisierte Zeitreihen zur Verfügung gestellt.

Von der Arbeitsgruppe Meteo-Research wurde sowohl der Ist-Zustand als auch ein Zukunftsszenario mit jeweils 10 Realisationen simuliert. Für die weitere Auswertung werden die beiden Zeiträume dabei wie folgt definiert:

- Ist-Zustand: 1961 bis 2000
- Zukunftsszenario: 2001 bis 2100

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

- Lufttemperatur
- Niederschlag
- Relative Luftfeuchte
- Globalstrahlung
- Windgeschwindigkeit

Zeitliche Auflösung:

Die zeitliche Auflösung wurde entsprechend den Vorgaben in Tageswerte der genannten Klimagrößen simuliert.

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 wichtigsten Klimagröße – liegen die Ergebnisse von Meteo-Research für das Zukunftsszenario für insgesamt ca. 300 Niederschlagsstationen in und um Hessen vor.

2) Regionalmodell REMO-ECHAM5-OM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie:

Die Ergebnisse des REMO-ECHAM5-OM (Run1) Rechenlaufes liegen für den Istzustand (1961-2000) sowie für die Szenarienzustände 2001 bis 2100 für die Szenarien A1B , A2 und B1 vor.

Von der Arbeitsgruppe Jacob et al. wurde sowohl der Ist-Zustand als auch ein Zukunftsszenario simuliert. Für die weitere Auswertung werden die beiden Zeiträume dabei wie folgt definiert:

- Ist-Zustand: 1961 bis 2000
- Zukunftsszenario: 2001 bis 2100

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

- Lufttemperatur
- Niederschlag
- Relative Luftfeuchte
- Globalstrahlung
- Windgeschwindigkeit

Zeitliche Auflösung:

Die zeitliche Auflösung wurde entsprechend den Vorgaben in Stundenwerten der genannten Klimagrößen simuliert.

Räumliche Auflösung:

Die Ergebnisse von REMO-ECHAM5-OM liegen für das Zukunftsszenario für alle Klimagrößen auf einem 10 km Gitter vor.

4.2 WASSERHAUSHALTSMODELLE

Für Hessen liegen flächendeckend Wasserhaushaltsmodelle im 17 x 17 km² Raster für den Rhein und 13 x 13 km² 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 kalibriert und validiert. Für den hessischen Anteil am Rheineinzugsgebiet liegen zudem neue Wasserhaushaltsmodelle auf Basis von Teilgebietsflächen mit einer Kalibrierung für stündliche Zeitschritte vor.

Die Ergebnisse von Langzeitsimulationen mit Messdaten (z.B. 40 Jahre für das Lahn, Nidda-, Kinzig- und Gersprenzeinzugsgebiet, Rechenzeitschritt Tageswerte) verdeutlichen, dass die Abflüsse in den Gewässern mit Hilfe der Wasserhaushaltsmodelle selbst über so lange Zeiträume im allgemeinen gut simuliert werden können, ohne korrigierend eingreifen zu müssen (formale Konsistenz des Modells).

Probleme bei der Umsetzung der Ergebnisse in Wasserhaushaltsmodellen:

Die aus der Klimasimulation vorgegebene zeitliche Auflösung von einem Tag bei den ECHAM5-WETTREG-Daten kann ggf. in kleinen Einzugsgebieten zu Problemen bei der Simulation von Hochwasserspitzen führen. Da in diesem Falle Tageswerte simuliert werden, können kurz andauernde Hochwasserscheitelspitzen nicht nachgebildet werden.

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

Hierbei ergeben sich die folgenden Einschränkungen und Probleme:

- Die Absolutwerte gemessener und simulierter Abflüsse können differieren. Dadurch ergeben sich auch z.T. 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. Für die hier

angestrebte Auswertung im statistischen Sinne spielen die 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 der 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.

4.3 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 jedoch Vorschläge gemacht, wie diese Unsicherheiten minimiert werden können.

5. VORGEHENSWEISE

5.1 GRUNDSÄTZLICHES

Die Klimamodelle liefern sowohl für den Ist-Zustand (Simulation) 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 5.1 schematisch dargestellt.

Wie Bild 5.1 veranschaulicht, liefern die Klimamodelle sowohl für den Ist-Zustand als auch für das Zukunftsszenario Klimadaten als Simulationsergebnisse. Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse für den Ist-Zustand (z.B. 1971-2000) 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 simuliertem Ist-Zustand und Zukunftsszenario gemacht werden. Dadurch können eventuell vorhandene systematische Fehler des Klimamodells eliminiert werden, die bei einem Vergleich zwischen Zukunftsszenario und Messdaten des Ist-Zustandes 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 gemessenen und simulierten Daten des Ist-Zustands weitestgehend identisch sind. In Bild 5.1 entfallen dann die mittleren Kästchen zum simulierten Ist-Zustand, und die Messdaten des Ist-Zustands (links in Bild 5.1) sind direkt mit den prognostizierten Daten des Zukunftsszenarios (rechts in Bild 5.1) zu vergleichen.

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

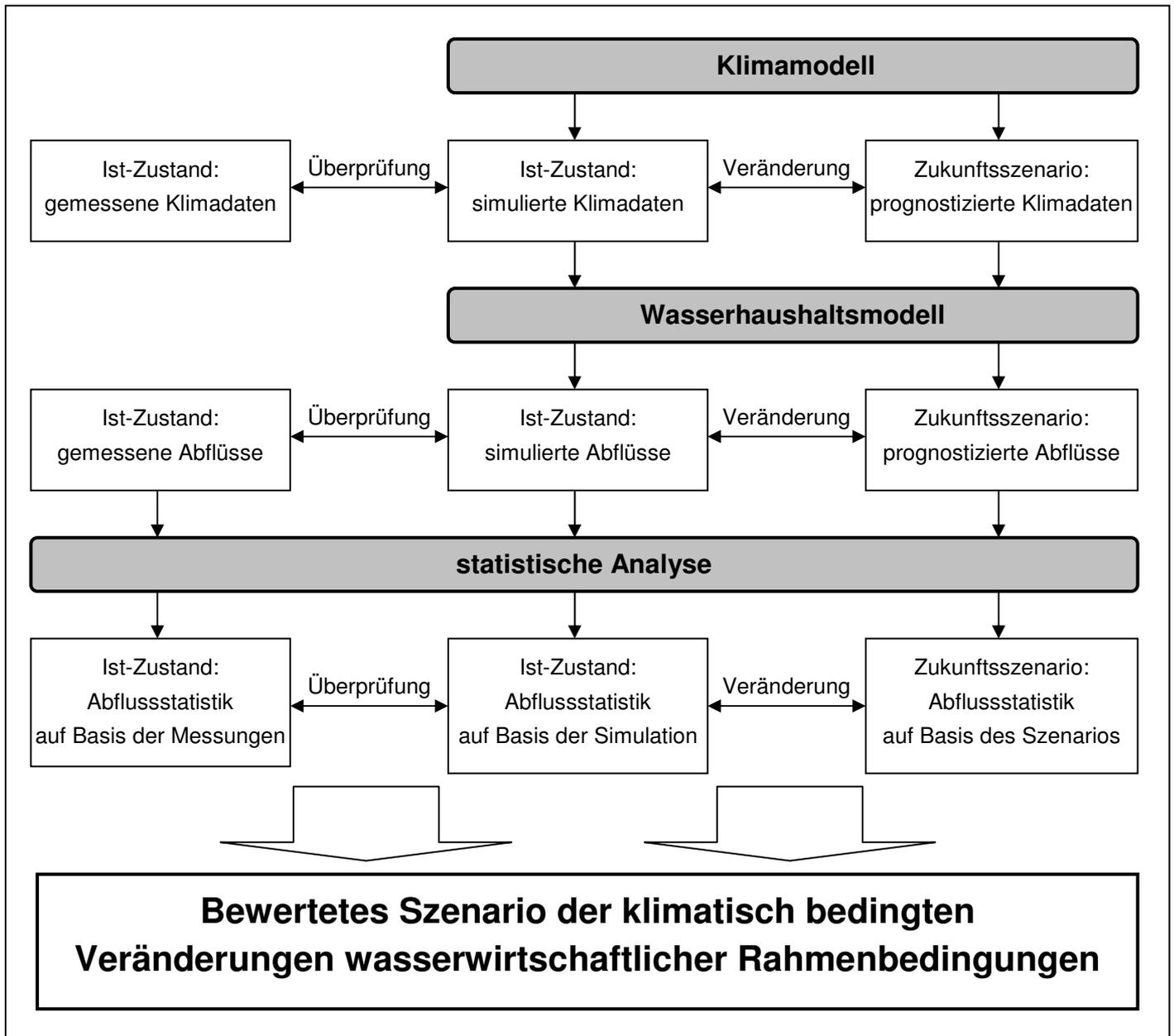


Bild 5.1: Generelle Vorgehensweise bei der Umsetzung von Klimaszenarien in Wasserhaushaltssimulationen (bezogen auf die Abflüsse).

Falls die Daten des simulierten Ist-Zustandes nicht vorliegen, ist eine sorgfältige Dokumentation des Vergleichs des Ist-Zustandes mit simulierten und gemessenen Klimadaten besonders wichtig. Nur bei hoher Ähnlichkeit der Daten kann aushilfsweise ein direkter Vergleich zwischen Messdaten des Ist-Zustandes und prognostizierten Daten des Zukunftsszenario zugelassen werden.

5.2 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 Simulations-Zeitraum Gültigkeit haben.

Mögliche Veränderungen durch eine Klimaänderung z. B. in 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 für das grobe Rheinmodell und die ECHAM5-WETTREG-Daten auf Tageswertbasis und für die hochaufgelösten Wasserhaushaltsmodelle und die REMO-Daten auf Stundenwertbasis.

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 klimatologischen Größen Niederschlag, lagen für die Jahre 1961 bis 2000 Messwerte des Deutschen Wetterdienstes vor.

6. DATENGRUNDLAGE

Als Datengrundlage wurden vom Auftraggeber folgende Unterlagen zur Verfügung gestellt:

- a) Tägliche Abflüsse für die Pegel für den Zeitraum 1961 bis 2000
 - 1) BadVilbel/Nidda (1.619 km²)
 - 2) Marburg/Lahn (1.666 km²)
 - 3) Leun/Lahn (3.571 km²)
 - 4) Kalkofen/Lahn (5.304 km²)
 - 5) Hanau/Kinzig (931 km²)
 - 6) Harreshausen/Gersprenz (461 km²)
 - 7) Frankfurt-Ost/Main (27.292 km²)
- b) Gemessene Niederschläge, Sonnenscheindauer, Wind, Temperatur, relative Feuchte an verschiedenen Stationen für den Zeitraum 1961 bis 2000.
- c) Zusätzlich wurden für die Zeiträume:
 - 1961 bis 1970
 - 1971 bis 1980
 - 1981 bis 1990,
 - 1991 bis 2000,
 - 2011 bis 2020,
 - 2021 bis 2030,
 - 2031 bis 2040,
 - 2041 bis 2050,
 - 2051 bis 2060,
 - 2061 bis 2070,
 - 2071 bis 2080,
 - 2081 bis 2090 sowie
 - 2091 bis 2100

jeweils 10 Realisationen für die Parameter Temperatur, Relative Feuchte, Wind, Sonnenscheindauer sowie Niederschlag (ECHAM5-WETTREG Daten 2006) für den Istzustand und die Szenarienzustände A1B, A2 und B1 zur Verfügung gestellt.

Für die oben genannten Zeiträume wurden ebenfalls die REMO-ECHAM5-OM Rechenläufe zur Verfügung gestellt.

7. VALIDIERUNG VON LARSIM MIT GEMESSENEN KLIMAZEITREIHEN

Sowohl das hochaufgelöste WHM-Modell Lahn für Stundenzeitschritte (siehe Ludwig 2006), als auch das 1/6 Grad WHM-Rheinmodell für Tageswerte (siehe Ebel et. al. 2000) wurden geeicht und validiert. Für das 1/6 Grad WHM-Rheinmodell wurden zusätzlich für den Zeitraum 1961-2000 für Hessen die Abflüsse mit gemessenen meteorologischen Input validiert.

Das großräumige Rheinmodell wurde für den Zeitraum 1980 bis 1997 kalibriert. Im Lahngebiet erfolgte eine Kalibrierung am Pegel Kalkofen und für den Main wurde der Pegel Frankfurt-Osthafen kalibriert. Die Pegel Leun/Lahn und Marburg/Lahn sowie Hanau/Kinzig, Harreshausen/Gersprenz und Bad Vilbel/Nidda wurden nicht kalibriert. Die Modellparameter werden über das in LARSIM integrierte Regionalisierungsverfahren bestimmt.

Für alle genannten Pegel wurde das 1/6 Grad WHM-Rheinmodell zusätzlich für den Zeitraum 1961 bis 2000 validiert.

Die Validierung wurde dekadeweise (1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 sowie 1991-2000) für die Parameter

MoMNO = mittlerer monatliche Niedrigwasserabfluss

MoMMQ = mittlerer monatliche Mittelwasserabfluss

MoMHQ = mittlerer monatliche Hochwasserabfluss

durchgeführt und als Excel Files zur Verfügung gestellt. Die Bilder enthalten jeweils die 10 einzelnen Realisationen, den Mittelwert aus den Realisationen sowie die Ergebnisse des Validierungslaufes und der Messungen. Aus den Ergebnissen wird deutlich dass im allgemeinen für die Pegel Marburg/Lahn Leun/Lahn und Kalkofen/Lahn sowie für Hanau/Kinzig und Bad Vilbel/Nidda die berechneten und gemessenen mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse, mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse und mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse bei der Validierung eine gute Übereinstimmung erzielt wird. Lediglich für den Pegel Harreshausen/Gersprenz werden die berechneten monatlichen Abflüsse überschätzt, sowohl bei der Simulation des Istzustandes als auch beim Validierungslauf.

Insgesamt zeigt sich das mit dem 1/6 Grad WHM-Rheinmodell das charakteristische Abflussverhalten in den Einzugsgebieten gut wiedergegeben wird.

8. ABFLUSSBERECHNUNGEN MIT LARSIM MIT REMO-ECHAM5-OM MODELLDATEN

8.1 VALIDIERUNG DER REMO-ECHAM5-OM NIEDERSCHLÄGE

Für den bisher vorliegenden Zeitraum 1971 bis 2000 sollen Kenngrößen des Niederschlages einzugsgebietsspezifisch bestimmt und mit aus Messungen abgeleiteten Kennwerten verglichen werden. Als Teileinzugsgebiete werden folgende Gebiete verwendet:

- Kalkofen/Lahn
- Bad-Vilbel/Nidda
- Harreshausen/Gersprenz

Die zu berechnenden Kenngrößen je Teileinzugsgebiet sind:

N_{mon} = mittlere monatliche Niederschlagshöhen (Jahresgang)

$N_{\text{Häuf}}$ = Häufigkeitsverteilungen der größten Mehrtagesummen (gleitende Mittel) der Niederschläge (1, 2, 5, 10 und 30 Tage) der meteorologischen Jahreszeiten Winter, Frühjahr, Sommer und Herbst (Klassengrenzen: 0,1, 1, 2, 3, 5, 7,10, 15, 20, 30, 50, 70,100,150, 500, 700 und 1000 mm)

Die Ergebnisse sind in den Anlagen A und B dargestellt.

Für diese Untersuchungsgebiete wurden tägliche Gebietsniederschläge für den Zeitraum 1971 bis 2000 berechnet und ausgewertet.

In der Anlage B sind für die genannten Untersuchungsgebiete die mittleren monatlichen Gebietsniederschläge dargestellt. Für die Gebiete Kalkofen/Lahn und Harreshausen/Gersprenz zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den simulierten und aus Messdaten abgeleiteten mittleren monatlichen Niederschlägen. Ausnahmen bilden die Monate März und Oktober. Hier sind die Ergebnisse für den Kontrolllauf zu niedrig. Für das Gebiet Bad Vilbel/Nidda kommt es zu einer deutlichen Überschätzung beim Kontrolllauf in allen Monaten.

In der Anlage B sind die Häufigkeitsverteilungen für die Mehrtagesummen getrennt für die vier Jahreszeiten für die drei Gebiete dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung für die Häufigkeitsverteilungen für gemessene und berechnete Gebietsniederschläge in den niedrigeren Klassen (bis 5 Tage). In den höheren Klassen werden die Abweichungen größer.

8.2 ERGEBNISSE DER ABFLUSSBERECHNUNGEN MIT LARSIM FÜR DEN REMO-ECHAM5-OM KONTROLLLAUF

Um eine Aussage über die Qualität der Simulationen machen zu können, werden die Ergebnisse des Kontrolllaufes (1971-2000) mit gemessenen Abflüssen und mit aus Messdaten abgeleiteten räumlichen Verteilung der Niederschlagshöhen und Verdunstungshöhen verglichen.

Hierzu standen folgende Datengrundlagen zur Verfügung:

- stündliche Abflussmessungen für die Pegel Marburg/Lahn und Leun/Lahn
- Flächenhafte Darstellung des Niederschlages, der Verdunstung (zur Verfügung gestellt von Herrn Dr. Brahmer) für den Zeitraum 1971-2000

Beide Datensätze wurden zur Validierung verwendet.

In den Anlagen C1 bis C3 sind die räumliche Verteilung der simulierten Niederschläge für den REMO-ECHAM5-OM Kontrolllauf für den Zeitraum 1971 bis 2000, sowie die räumliche Verteilung der mit LARSIM berechneten mittleren jährlichen Abflusshöhe und Verdunstungshöhe für den Zeitraum 1971 bis 2000.

In den Anlagen C4 bis C6 sind die Differenzen zu den aus korrigierten Messdaten abgeleiteten räumlichen Verteilung der Niederschläge, Verdunstung und Abflüsse zu den simulierten Niederschlägen, Verdunstung und Abflüssen dargestellt.

Anlage C-4: Differenz zwischen dem Niederschlag Ist-Zustand und Kontrolllauf

Anlage C-5: Differenz zwischen der Verdunstung (Ist-Zustand) und Verdunstung Kontrolllauf-LARSIM

Anlage C-6: Differenz zwischen dem Abfluss (Ist-Zustand) und dem Abfluss Kontrolllauf-LARSIM

In den Abbildungen sind die positiven Abweichungen blau dargestellt und die negativen Abweichungen rot. Blaue Flächen bedeuten hierbei eine Unterschätzung durch den Kontrolllauf und rote Flächen bedeuten eine Überschätzung des Kontrolllaufes gegenüber dem Ist-Zustand:

Es zeigt sich beim Niederschlag eine deutliche Überschätzung des simulierten Niederschlages gegenüber dem Ist-Zustand im westlichen Bereich und eine Unterschätzung im östlichen Bereich.

Bei der Verdunstung zeigt sich in weiten Bereichen eine Überschätzung der berechneten Verdunstung gegenüber der flächenhaften Darstellung der Verdunstung, die aus Messungen abgeleitet wurde.

Beim Abfluss zeigt sich ein analoges Bild zum Niederschlag. Es kommt zu einer Überschätzung des simulierten Abflusses im westlichen Bereich und zu einer Unterschätzung im östlichen Bereich gegenüber dem Ist-Zustand.

Im Anschluss hieran wurden für die Pegel Leun und Marburg die mittleren monatlichen Niedrigwasser (MOMNQ), Mittelwasser (MoMMQ) und Hochwasserabflüsse (MoMHQ) für den Zeitraum 1961-1990 berechnet. Die Ergebnisse sind in den Anlagen C-7 bis C12 dargestellt.

Für die Pegel Marburg und Leun zeigt sich eine ca. 30 bis 40% Überschätzung der Mittelwasserabflüsse beim Kontrolllauf. Die Überschätzungen sind im Winter deutlich größer. Bei den mittleren monatlichen Niedrigwasser und Hochwasserabflüssen liegen die Abweichungen deutlich darunter (ca. 10 bis 20%).

Fazit:

- 1) Infolge der Überschätzung des Niederschlages in Teilbereichen des Lahneinzugsgebietes kommt es zu einer Überschätzung der Abflüsse sowohl im Mittel und Hochwasserbereich für die Pegel Marburg und Leun.
- 2) Aufgrund der unzureichenden Nachbildung der regionalen Niederschlagsverteilung aus REMO-ECHAM5-OM sind keine realistischen Hochwasserverhältnisse aus der Überlagerung mehrerer Teilgebietsabflüsse zu erwarten.

8.3 ERGEBNISSE DER SZENARIENBERECHNUNGEN A1B

Die Auswertungen des Szenarienrechenlaufes liegen für den Zeitraum 2001 bis 2100 vor. Die Auswertungen wurden in Absprache mit dem Auftraggeber für die „nahe Zukunft“ (2021-2050) und die „ferne Zukunft“ (2071-2100) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Anlage D-1 bis D-3 für den Niederschlag, die Verdunstung und den Abfluss dargestellt.

Für den Niederschlag zeigt sich (siehe Anlage D-1) eine geringfügig zeitlich variierende Struktur der Niederschlagsverteilung, Insbesondere fallen großräumige flächige Niederschläge größer 1.000 mm im unteren Teil des Lahneinzugsgebietes auf. Es scheint sich bei der „nahen Zukunft“ um eine leichte Verstärkung der Niederschläge gegenüber dem Kontrolllauf zu handeln, die bei der „fernen Zukunft“ wieder abnimmt.

Für die berechnete Verdunstung ergibt sich eine geringfügige Zunahme (siehe Anlage D-2) bei der „nahen Zukunft“ als auch bei der „fernen Zukunft“ gegenüber dem Ist-Zustand.

Der Abfluss (siehe Anlage D-3) entwickelt sich entsprechend des Niederschlages und variiert in den einzelnen Dekaden geringfügig.

In den Anlagen D7 bis D18 sind für die Lahnpegel Marburg und Leun die monatlichen und saisonalen sowie jährlichen MOMNQ, MQ und MHQ-Abflüsse dargestellt.

Augenscheinlich ergeben sich geringfügige Zunahmen bei den jährlichen MQ und den MHQ Abflüssen bei beiden Pegeln für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft gegenüber dem Kontrolllauf. Bei den monatlichen und saisonalen Abflüssen ergibt sich eine leicht steigende Zunahme vor allem der MQ und MHQ-Abflüsse während der Winter- und Frühjahrsmonate und eine leichte Abnahme im Sommer.

- Fazit:
- 1) Es zeigt sich eine geringfügige Erhöhung von Niederschlag und Abfluss (bei noch geringfügigerer Zunahme der Verdunstung) beim Szenariorechenlauf gegenüber dem Kontrolllauf.
 - 2) Eine signifikante räumliche Verlagerung von Niederschlagszentren, bzw. Verdunstungszentren ist nicht ableitbar.
 - 3) Es gibt eine Verstärkung der MQ und MHQ-Abflüsse im Winter und Frühjahr und eine leichte Abnahme der Niedrigwasserabflüsse im Sommer.

9. ABFLUSSBERECHNUNGEN MIT LARSIM MIT ECHAM5-WETTREG MODELLDATEN

9.1 VORGEHENSWEISE

Mit dem 1/6 Grad WHM-Rheinmodell werden Berechnungen durchgeführt, wobei als Eingabedaten die Klimadaten der jeweils 10 Realisationen für den Istzustand (1961 bis 2000) als auch die Daten aus den jeweils 10 Realisationen für die Szenarienzustände A1B, A2 und B1 (2001-2010...2091-2100) 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 wurden für jede Realisation mittlere monatliche Abflüsse MoMMQ, sowie die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MoMnQ als auch die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse MoMHQ berechnet. Die Ergebnisse sind exemplarisch in der Anlage E und in EXCEL-Dateien auf der beiliegenden CD für die mittleren Monatsabflüsse MoMMQ, für die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse MoMnQ sowie für die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse MoMHQ dargestellt.

Prinzipiell enthalten die Bilder den Jahresgang für alle 10 Einzelrealisationen sowie den mittleren Jahresgang aus den 10 Einzelrealisationen.

In den Bildern für den Istzustand (1961 bis 2000) werden zusätzlich der mittlere Jahresgang für die Messwerte und den Validierungslauf dargestellt.

In den Bildern für die Szenarienrechenläufe wird zum Vergleich der Mittelwert aus den 10 Realisationen des Istzustandes dargestellt, so dass die Unterschiede deutlich werden.

9.2 AUSWERTUNGEN FÜR DEN KONTROLLLAUF

9.2.1 AUSWERTUNG DER MITTLEREN MONATLICHEN NIEDRIGWASSERABFLÜSSE

Die Bewertung der Modellergebnisse erfolgt für die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse anhand der Mittelwerte aus den jeweils 10 Realisationen für den Istzustand (1971-2000) und den mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüssen für die Messung.

Die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse sind für alle Pegel im zeitlichen Verlauf für die 10 Realisationen des Istzustandes gegenüber der Validierung und Messung für den Zeitraum 1971-2000 in der Anlage E dargestellt. In der Tabelle 9.1 ist auf Grund einer visuellen Betrachtung der Ergebnisse eine Bewertung durchgeführt worden.

In den meisten Fällen können für die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse gute bis zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Lediglich beim Pegel Bad Vilbel werden im Winter und Frühjahr die gemessenen monatlichen Niedrigwasserabflüsse unterschätzt.

Pegel	Güte der Simulation			
	DJF	MAM	JJA	SON
Marburg	O	o	+	+
Leun	+	+	+	+
Kalkofen	+	+	+	+
Bad Vilbel	-	-	o	o
Hanau	+	+	+	+
Harreshausen	+	+	+	+

+ gute Übereinstimmung, o zufriedenstellende Übereinstimmung, – schlechte Übereinstimmung

Tabelle 9.1: Güte der Anpassung für den Mittelwert der 10 Realisationen des Istzustandes für Niedrigwasserabflüsse und Messungen

Weitere Ergebnisse für die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse sind in den beiliegenden Exceltabellen für die Zeiträume 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 sowie 1991-2000 dargestellt.

9.2.2 AUSWERTUNG DER MITTLEREN MONATLICHEN ABFLÜSSE

Die Bewertung der Modellergebnisse erfolgt für die mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse anhand der Mittelwerte aus den jeweils 10 Realisationen für den Istzustand (1971 - 2000) und den mittleren monatlichen Mittelwasserabflüssen für die Messung.

Die mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse sind für alle Pegel im zeitlichen Verlauf für die 10 Realisationen des Istzustandes gegenüber der Validierung und Messung für den Zeitraum 1971-2000 in der Anlage E dargestellt. In der Tabelle 9.2 ist auf Grund einer visuellen Betrachtung der Ergebnisse eine Bewertung durchgeführt worden.

In den meisten Fällen können für die mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse gute bis zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Lediglich beim Pegel Bad Vilbel werden im gesamten Jahr die gemessenen monatlichen Mittelwasserabflüsse überschätzt. Beim Pegel Harreshausen werden die gemessenen mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse leicht überschätzt.

Pegel	Güte der Simulation			
	DJF	MAM	JJA	SON
Marburg	o	+	+	+
Leun	o	o	+	+
Kalkofen	+	+	+	+
Bad Vilbel	-	-	-	-
Hanau	+	+	+	+
Harreshausen	-	-	o	+

+ gute Übereinstimmung, o zufriedenstellende Übereinstimmung, – schlechte Übereinstimmung

Tabelle 9.2: Güte der Anpassung für den Mittelwert der 10 Realisationen an Messungen für Mittelwasserabflüsse

Weitere Ergebnisse für die mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse sind in den beiliegenden Exceltabellen für die Zeiträume 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 sowie 1991-2000 dargestellt.

9.2.3 AUSWERTUNG DER MITTLEREN MONATLICHEN HOCHWASSERABFLÜSSE

Die Bewertung der Modellergebnisse erfolgt für die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse anhand der Mittelwerte aus den jeweils 10 Realisationen für den Istzustand (1971 - 2000) und den mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse für die Messung.

Die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse werden für alle Pegel im zeitlichen Verlauf für die 10 Realisationen des Istzustandes gegenüber der Validierung und Messung in der Anlage E dargestellt.

In der Tabelle 9.3 ist auf Grund einer visuellen Betrachtung der Ergebnisse eine Bewertung durchgeführt worden.

Pegel	Güte der Simulation			
	DJF	MAM	JJA	SON
Marburg	o	+	+	+
Leun	+	+	+	+
Kalkofen	o	+	+	+
Bad Vilbel	-	-	o	+
Hanau	-	o	+	+
Harreshausen	-	-	+	+

+ gute Übereinstimmung, o zufriedenstellende Übereinstimmung, – schlechte Übereinstimmung

Tabelle 9.3: Güte der Anpassung für den Mittelwert der 10 Realisationen an Validierung und Messung für Hochwasserabflüsse

In den meisten Fällen können für die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse gute bis zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Lediglich beim Pegel Bad Vilbel und beim Pegel Harreshausen werden im Frühjahr die gemessenen monatlichen Hochwasserabflüsse überschätzt.

Weitere Ergebnisse für die mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse sind in den beiliegenden Exceltabellen für die Zeiträume 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990 sowie 1991-2000 dargestellt.

9.2.4 FAZIT AUS DER BEWERTUNG DES KONTROLLAUFES

Für den Kontrolllauf wurden für den Zeitraum 1961 bis 2000 jeweils 10 Realisationen berechnet. Hierbei handelt es sich im statistischen Sinne um einen Zeithorizont, in dem möglichst viele Daten vorliegen sollten. Dabei umfasst jede Dekade einer Realisation die Daten von 20 Jahren. Dieses ist im statistischen Sinne gleichbedeutend mit 20 Realisationen à 10 Jahren.

Für diese Zeitreihen wurden mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse, mittlere monatliche Abflüsse und mittlere monatliche Hochwasserabflüsse berechnet und mit Messungen verglichen.

Für die Pegel Marburg, Leun, Kalkofen und Hanau ergeben sich gute bis zufriedenstellende Übereinstimmungen zwischen aus Messungen und Berechnungen abgeleiteten mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse, mittleren monatlichen Abflüsse, sowie mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse.

Für die Pegel Bad Vilbel sind die Simulationsergebnisse für alle drei Abflussbereiche nicht zufriedenstellend. Für den Pegel Harreshausen sind die Ergebnisse in den Winter- und Frühjahrsmonaten für die mittleren monatlichen Abflüsse und mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse nicht zufriedenstellend.

Bei beiden der letzt genannten Pegel sind die Ursachen für die nicht zufriedenstellende Übereinstimmung in den meteorologischen Inputdaten der ECHAM5-WETTREG-Daten zu suchen. Die Simulationsqualität für den Validierungslauf (Antrieb mit Messdaten, siehe Kapitel 7) ist in allen drei mittleren monatlichen Abflussbereichen als zufriedenstellend bis gut zu bezeichnen.

9.3 ABFLUSSVERÄNDERUNG DER SZENARIENZUSTÄNDE GEGENÜBER DEM ISTZUSTAND

Aus dem Zeitraum 2001 bis 2100, für den die Klimaszenarien berechnet wurden, werden der Zeitraum 2021 bis 2050 („nahe Zukunft“) und der Zeitraum 2071 bis 2100 („ferne Zukunft“) ausgewertet. Damit ist es möglich, Aussagen zu den Veränderungen von Abflüssen für zwei unterschiedliche Zeithorizonte in diesem Jahrhundert zu treffen.

Um die Abflussveränderung gegenüber dem Istzustand zu demonstrieren werden in der Anlage G die mittleren monatlichen Gewässerhauptzahlen (MoMNQ, MoMMQ sowie MoMHQ) dekadeweise für den Zeitraum 1961-1970, 1971-1980....2091-2100 für das Szenario A1B dargestellt sowie entsprechendes für das Szenario A2 in Anlage H und für das Szenario B1 in Anlage I.

Zusätzlich werden in Anlage F exemplarisch die mittleren jahreszeitlichen Gewässerhauptzahlen für die Szenarienzustände 2031 bis 2040 gegenüber dem Istzustand (1961 bis 1990) dargestellt.

9.3.1 ABFLUSSVERÄNDERUNG DER JAHRESZEITLICHEN NIEDRIGWASSERABFLÜSSE

In der Tabelle 9.4 sind für die einzelnen Pegel und Jahreszeiten die mittleren Veränderungen gegenüber dem Istzustand (1961-1990) für alle Szenarien dargestellt.

	Änderung der jahreszeitlichen MNQ Abflüsse in%					
	„nahe Zukunft“			„ferne Zukunft“		
	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
<i>Pegel Marburg</i>						
DJF	16.3	23.1	21.9	73.1	50.0	48.6
MAM	-1.6	1.6	0.9	1.7	2.3	7.2
JJA	-11.9	-8.2	-9.8	-18.3	-16.8	-16.3
SON	-13.7	-10.5	-4.2	-16.9	-21.8	-15.4
<i>Pegel Leun</i>						
DJF	14.6	21.8	20.6	66.0	46.4	45.7
MAM	-1.6	0.9	1.2	-0.7	0.2	3.6
JJA	-12.4	-9.4	-9.7	-19.5	-18.9	-17.9
SON	-15.0	-12.0	-5.2	-19.9	-23.3	-16.7
<i>Pegel Kalkofen</i>						
DJF	14.6	21.7	20.6	64.7	45.7	44.5
MAM	-0.9	1.0	1.7	-0.3	0.4	3.5
JJA	-12.7	-9.7	-10.1	-19.9	-19.1	-18.3
SON	-14.8	-12.1	-4.8	-19.4	-22.7	-16.9
<i>Pegel Hanau</i>						
DJF	17.5	23.0	24.8	76.4	50.7	45.8
MAM	1.2	5.1	7.4	9.0	7.2	7.2
JJA	-24.5	-23.9	-19.6	-34.8	-33.3	-34.8
SON	-23.7	-19.7	-9.2	-34.2	-38.5	-29.5
<i>Pegel Bad Vilbel</i>						
DJF	17.2	22.0	22.9	72.0	48.8	46.6
MAM	1.7	3.4	6.5	9.8	7.4	9.1
JJA	-19.3	-18.5	-15.5	-30.8	-28.9	-27.8
SON	-18.9	-18.3	-5.4	-27.5	-31.3	-22.6

	Änderung der jahreszeitlichen MNQ Abflüsse in%					
	„nahe Zukunft“			„ferne Zukunft“		
	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
<i>Pegel Harreshausen</i>						
DJF	14.5	23.9	27.6	82.0	50.9	51.0
MAM	0.4	3.5	5.1	7.2	5.4	3.2
JJA	-13.3	-13.0	-10.3	-27.2	-22.2	-24.4
SON	-15.1	-12.4	-3.5	-22.6	-28.4	-18.9
<i>Pegel Frankfurt-Ost</i>						
DJF	6.8	12.1	14.3	53.2	25.7	26.4
MAM	-2.6	0.8	3.6	5.1	-3.6	-0.8
JJA	-13.1	-12.0	-8.0	-23.0	-24.4	-23.6
SON	-15.7	-13.3	-5.9	-22.1	-29.0	-22.5

Tabelle 9.4: Prozentuale Änderung der mittleren jahreszeitlichen MoMNQ Abflüsse für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft

Für die mittleren jahreszeitlichen Niedrigwasserabflüsse ergeben sich folgende Veränderungen für den Sommer und Herbst:

Die mittleren jahreszeitlichen Niedrigwasserabflüsse nehmen im Sommer und Herbst für die Pegel an der Lahn für die „nahe Zukunft“ ab. Die Abnahme liegt je nach Szenario zwischen ca. -5% und ca. -15%. In der „fernen Zukunft“ kommt es zu einer weiteren Verschärfung der Niedrigwassersituation, die je nach Szenario zwischen ca. -16% und ca. -23% liegen

Für die Pegel im Einzugsgebiet des Mains (Pegel Hanau, Bad Vilbel, Harreshausen und Frankfurt-Ost) ergeben sich bereits in der „nahen Zukunft“ Verschärfungen der Niedrigwassersituationen im Sommer und Herbst, die je nach Szenario zwischen ca. -5% und ca. -25% betragen können. In der „fernen“ Zukunft kommt es an diesen Pegeln zu einer weiteren Verschärfung der Niedrigwassersituation, die je nach Szenario bis zu ca. -40% betragen kann.

Weitere Details sind in den Anlagen G und H, sowie in den Excelgraphiken dargestellt.

9.3.2 ABFLUSSVERÄNDERUNG DER JAHRESZEITLICHEN MITTELWASSERABFLÜSSE

In der Tabelle 9.5 sind für die einzelnen Pegel und Jahreszeiten die mittleren Veränderungen der mittleren MQ-Abflüsse gegenüber dem Istzustand (1961-1990) für alle drei Szenarien dargestellt.

	Änderung der jahreszeitlichen MQ Abflüsse in%					
	„nahe Zukunft“			„ferne Zukunft“		
	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
<i>Pegel Marburg</i>						
DJF	14.4	16.5	18.5	66.6	46.8	44.9
MAM	-2.4	-0.4	-3.2	4.1	5.2	6.4
JJA	-10.4	-8.7	-9.5	-19.4	-15.4	-16.1
SON	-17.7	-11.7	-4.0	-17.6	-22.6	-15.7
<i>Pegel Leun</i>						
DJF	11.8	13.8	17.1	56.7	38.7	37.8
MAM	-2.6	-0.9	-1.7	-2.5	0.8	1.9
JJA	-14.6	-11.4	-12.1	-25.0	-21.3	-21.0
SON	-18.7	-14.7	-5.4	-20.3	-26.4	-18.7
<i>Pegel Kalkofen</i>						
DJF	10.6	12.6	16.5	55.6	36.8	36.0
MAM	-1.7	0.0	-0.5	-0.9	1.7	3.1
JJA	-14.5	-11.3	-12.1	-24.3	-21.0	-20.9
SON	-18.2	-14.8	-5.6	-19.4	-25.9	-18.4
<i>Pegel Hanau</i>						
DJF	14.4	15.7	18.8	65.5	44.1	33.6
MAM	-1.2	2.8	3.5	5.0	5.3	2.9
JJA	-21.1	-21.2	-17.4	-27.5	-25.3	-30.9
SON	-20.2	-17.1	-6.4	-25.8	-33.8	-23.4
<i>Pegel Bad Vilbel</i>						
DJF	15.3	15.3	18.6	67.9	44.0	37.9
MAM	-1.0	0.5	1.7	3.9	4.1	4.0
JJA	-19.3	-19.1	-15.5	-32.7	-28.4	-27.9
SON	-18.1	-16.8	-5.2	-20.9	-28.9	-18.4

	Änderung der jahreszeitlichen MQ Abflüsse in%					
	„nahe Zukunft“			„ferne Zukunft“		
	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
<i>Pegel Harreshausen</i>						
DJF	9.4	11.7	14.8	57.1	32.2	28.0
MAM	-0.7	1.7	3.0	2.2	6.1	2.1
JJA	-12.7	-12.8	-10.2	-22.8	-17.8	-22.0
SON	-14.3	-13.8	-6.6	-14.0	-26.0	-16.5
<i>Pegel Frankfurt-Ost</i>						
DJF	6.7	10.2	13.8	58.0	28.7	25.5
MAM	-4.2	-0.1	1.1	4.1	-3.9	-1.6
JJA	-15.5	-14.2	-10.5	-27.4	-27.4	-27.8
SON	-18.3	-15.2	-7.9	-23.9	-33.3	-23.9

Tabelle 9.5: Prozentuale Änderung der mittleren jahreszeitlichen MQ-Abflüsse für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft

Für die mittleren jahreszeitlichen Mittelwasserabflüsse ergeben sich folgende Veränderungen für den Sommer und Herbst:

Die mittleren jahreszeitlichen Mittelwasserabflüsse nehmen im Sommer und Herbst für die Pegel an der Lahn für die „nahe Zukunft“ je nach Szenario um bis zu ca. -18% ab. Bei der „fernen“ Zukunft ergibt eine zusätzliche Abnahme bei der Mittelwassersituation bei den Pegeln an der Lahn (Abnahme bis zu ca. -26%).

Für die Pegel im Einzugsgebiet des Mains (Pegel Hanau, Bad Vilbel, Harreshausen und Frankfurt-Ost) ergeben sich bereits in der „nahen Zukunft“ Abflussabnahmen bei der Mittelwassersituation im Sommer und Herbst, die je nach Szenario bis zu ca. 22% betragen können. In der „fernen“ Zukunft kommt es an diesen Pegeln zu einer weiteren Abflussabnahme bei der Mittelwassersituation, die je nach Szenario bis zu ca. 35% betragen kann.

Für die mittleren jahreszeitlichen Mittelwasserabflüsse ergeben sich folgende Veränderungen für den Winter:

Die mittleren jahreszeitlichen Mittelwasserabflüsse nehmen im Winter für die Pegel an der Lahn für die „nahe Zukunft“ je nach Szenario um ca. 10 bis 20% und bei der „fernen Zukunft“ um 36 bis 66% zu.

Für die Pegel im Einzugsgebiet des Mains (Pegel Hanau, Bad Vilbel und Harreshausen) ergeben sich in der „nahen Zukunft“ Zunahmen der Mittelwasserabflüsse im Winter, die je nach Szenario für Hanau und Bad Vilbel ca. 15 bis 20% und für Harreshausen und Frankfurt 10 bis 15% betragen können. In der „fernen Zukunft“ kommt es an diesen Pegeln im

Winter zu einer weiteren Zunahme, die je nach Szenario für Hanau und Bad Vilbel etwa 34 bis 68% und für Harreshausen und Frankfurt ca. 26 bis 58% betragen kann.

Für das Frühjahr ergeben sich nur geringfügige Veränderungen.

Weitere Details sind in den Anlagen G und H sowie in den Excelgraphiken dargestellt.

9.3.3 ABFLUSSVERÄNDERUNG DER JAHRESZEITLICHEN HOCHWASSERABFLÜSSE

In der Tabelle 9.6 sind für die einzelnen Pegel und Jahreszeiten die Veränderungen der mittleren MHQ-Abflüsse gegenüber dem Istzustand (1961-1990) für alle drei Szenarien dargestellt.

	Änderung der jahreszeitlichen MHQ Abflüsse in%					
	„nahe Zukunft“			„ferne Zukunft“		
	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
<i>Pegel Marburg</i>						
DJF	6.6	8.6	12.2	51.2	31.6	33.3
MAM	-5.5	-0.9	-7.4	1.8	9.9	5.9
JJA	-9.5	-6.7	-6.3	-19.6	-9.7	-10.1
SON	-22.0	-15.4	-8.6	-15.8	-26.7	-19.0
<i>Pegel Leun</i>						
DJF	2.7	5.2	10.2	35.9	20.3	23.6
MAM	-3.5	-0.8	-3.9	-3.0	3.9	1.0
JJA	-15.2	-11.3	-11.2	-26.5	-20.2	-19.5
SON	-23.4	-18.0	-9.1	-20.1	-29.8	-21.3
<i>Pegel Kalkofen</i>						
DJF	2.3	4.0	10.4	37.6	20.9	24.2
MAM	-1.9	0.0	-2.3	-0.1	5.3	3.2
JJA	-14.7	-11.1	-11.3	-26.2	-20.5	-20.8
SON	-22.6	-18.6	-8.8	-19.9	-30.2	-21.4
<i>Pegel Hanau</i>						
DJF	9.6	9.8	15.8	51.5	32.7	23.7
MAM	-2.3	2.8	3.3	3.4	7.1	0.9
JJA	-25.7	-25.5	-21.3	-24.9	-21.0	-36.7
SON	-22.3	-20.2	-7.0	-22.9	-36.9	-24.7
<i>Pegel Bad Vilbel</i>						
DJF	8.3	7.5	12.0	45.5	26.0	23.6
MAM	-3.2	-0.1	-1.7	-1.0	2.9	-0.1
JJA	-21.1	-20.8	-15.4	-36.7	-29.4	-28.5
SON	-20.9	-19.5	-6.8	-16.9	-31.5	-18.2

	Änderung der jahreszeitlichen MHQ Abflüsse in%					
	„nahe Zukunft“			„ferne Zukunft“		
	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
<i>Pegel Harreshausen</i>						
DJF	2.2	4.3	9.2	32.4	14.7	14.8
MAM	-1.6	-2.4	2.5	-0.9	9.3	0.6
JJA	-22.3	-21.4	-14.5	-34.2	-25.8	-34.9
SON	-21.7	-21.3	-12.7	-13.6	-36.1	-23.2
<i>Pegel Frankfurt-Ost</i>						
DJF	3.0	6.2	11.6	49.6	22.9	21.1
MAM	-5.8	-1.3	0.1	4.6	-3.0	-1.5
JJA	-17.6	-15.8	-12.0	-30.5	-28.8	-31.2
SON	-19.8	-17.5	-9.9	-23.7	-35.4	-25.0

Tabelle 9.5: Prozentuale Änderung der mittleren jahreszeitlichen MHQ-Abflüsse für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft

Für die mittleren jahreszeitlichen Hochwasserabflüsse ergeben sich folgende Veränderungen für den Winter:

Die mittleren jahreszeitlichen Hochwasserabflüsse nehmen im Winter für die Pegel an der Lahn für die „nahe Zukunft“ zu. Die Zunahme liegt je nach Szenario zwischen 2% und 12%. In der „fernen Zukunft“ nehmen die winterlichen Hochwasserabflüsse um ca. 20 bis 50% zu. Die Zunahme ist bei dem Szenario A1B am größten.

Für die Pegel im Einzugsgebiet des Mains (Pegel Hanau, Bad Vilbel, Harreshausen und Frankfurt-Ost) ergeben sich in der „nahen Zukunft“ Verschärfungen der Hochwassersituationen im Winter um moderate 15%. In der „fernen Zukunft“ kommt es an diesen Pegeln zu einer weiteren Verschärfung der Hochwassersituation, die je nach Szenario 25 bis 50% betragen kann. Die Zunahme ist bei dem Szenario A1B am größten.

Weitere Details sind in den Anlagen G und H sowie in den Excelgraphiken dargestellt.

10. AUSBLICK UND EMPFEHLUNGEN

Abflusssimulation mit den REMO-ECHAM5-OM Modelldaten:

Klimasimulationen:

Das Wasserhaushaltsmodell Lahn erfüllt nach Durchführung der Modelleichung die Voraussetzungen für Prognoserechnungen für den Kontroll-Zustand und für Szenarienrechnungen.

Infolge der hohen Auflösung des Modellaufbaus sowohl in Raum- als auch in Zeitskala und den gestellten Anspruch zur subskaligen Modellierung des Wasserhaushaltes in strukturierten Einzugsgebieten, werden an die räumliche und zeitliche Auflösung des zu verwendenden Klimamodells höchste Ansprüche gestellt.

Simulation des Wasserkreislaufes:

Bei der Simulation des Kontrolllaufes ohne Anpassungen (siehe Absatz vorher) ergeben sich zur Zeit noch Defizite bei der räumlich korrekten Wiedergabe der Lage der Niederschlags- und Abflusszentren. Niederschlag, Verdunstung und Abfluss werden in großen Bereichen räumlich überschätzt, in anderen Bereichen deutlich unterschätzt. Der Ist-Zustand wird demzufolge nicht hinreichend genau wiedergegeben.

Hieraus stellt sich die Frage, ob Änderungen allein auf Basis der Änderung des Abflusses im Szenariorechenlauf gegenüber dem Kontrolllauf ableitbar sind - nach Auffassung des Verfassers nicht. Obwohl sich in den bisherigen Auswertungen keine bzw. nur geringfügige Veränderungen des Wasserkreislaufes bis Mitte dieses Jahrhunderts zeigen sind Aussagen, ob es eine Auswirkung der Klimaänderung auf den Abfluss gibt oder nicht, derzeit nicht genau möglich.

Lösungsvorschläge:

Ein sehr grundsätzliches Problem der meteorologischen Modelle ist eine Angabe über die Modellfehler. Eine derartige Angabe ist notwendig, um abschätzen zu können, wie stark bzw. welche Relevanz das Klimaänderungssignal hat. Um dieses abschätzen zu können sind von Seiten der Klimamodelle Ensemble-Rechnungen notwendig. Mit Hilfe ausgefeilter statistischer Methoden ist es möglich aus den verschiedenen Ensemblerechnungen das Klimaänderungssignal zu filtern. Dennoch darf man nicht erwarten, dass bei den Kontrollläufen zum Beispiel der berechnete Niederschlag dem gemessenen Niederschlag entspricht. Der Output aus den meteorologischen Modellen darf und sollte auf die statistische Verteilung der Messwerte adjustiert werden. Mit diesen Adjustierungsfaktoren kann dann das Zukunftsszenario gerechnet werden.

Betreffs der räumlichen Auflösung zur Erfassung der genaueren Lage des Niederschlages gibt es erste Untersuchungen der Universität Bonn, dass hierzu meteorologische Modelle mit einer Maschenweite von 1 km Auflösung notwendig sind. Solche Berechnungen über größere Modellbereiche erfordern einen sehr hohen Berechnungsaufwand der nur mit Supercomputern zu leisten ist. Hierfür wären ebenfalls Ensembleberechnungen sinnvoll.

Eine Möglichkeit ist eine MOS (model-output statistik) auf den Output aus meteorologischen Modellen anzuwenden. Hierzu ist in Verbindung mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Herr Peter Krahe), der Universität Bonn (Herr Prof. Hense), der Firma Weather-Online (Herr Dr. Römer) und dem Ingenieurbüro Dr.-Ing. Karl Ludwig (Herr Dr.-Ing. Karl-Gerd Richter) ein Projekt in Vorbereitung, welches eines solches Modell entwickelt.

Abflusssimulation mit den ECHAM5-WETTREG Modelldaten:

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden für verschiedene Einzugsgebiete in Hessen die Auswirkungen von aktuell vorliegenden Klimaszenarien (A1B, A2, 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.

Für die Verschärfung von Hochwasser wäre es jedoch sinnvoll derartige Studien auf einer kleineren Zeitskala (Stundenwerte) durchzuführen, um dem raumzeitlichen Entstehen von Hochwasserwellen auf der gewünschten räumlichen Skala gerecht zu werden. Hierzu wurden Modellergebnisse aus dynamischen Klimamodellen wie zum Beispiel REMO-ECHAM5-OM verwendet (s.o.), die allerdings derzeit noch keine ausreichende räumliche Repräsentativität für die Klimaparameter aufzeigten.

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

11. LITERATUR

- Bartels H., B. Katzenberger & H. Weber (2004): Klimaveränderung und Wasserwirtschaft in Süddeutschland. – *Wasserwirtschaft*, 94 (4), 15 – 19.
- Brahmer G. (2006): Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussverhältnisse hessischer Gewässer. *Wasser und Abfall* 12, 19-24.
- Bremicker M. (1998): Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser- und das Ostsee-Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells. Dissertation an der Geowissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.
- Bremicker M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Band 11. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.
- Bremicker M., P. Homagk & K. Ludwig (2004): Operationelle Niedrigwasservorhersage für das Neckareinzugsgebiet. – *Wasserwirtschaft*, 94 (7/8), 40-46.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 238. DVWK, Bonn.
- Ebel M., K. Ludwig & K.-G. Richter (2000): Mesoskalige Modellierung des Wasserhaushaltes im Rheineinzugsgebiet mit LARSIM. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 44 (6), 308-312.
- Gathenya M. (1999): Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur Wasserbewirtschaftung am Beispiel des Thike-Chanie-Gebietes in Kenya. Dissertation, Universität Kaiserslautern.
- Gerlinger K. (2004): Simulation des Wasserhaushalts im Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien. In AK KLIWA (Hrsg.): 2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg, Fachvorträge. KLIWA-Berichte, Heft 4.
- Haag I., K. Gerlinger & V. Kolokotronis (2005a): Auswirkungen von Windwurfschäden auf Hochwasserabflüsse am Beispiel des Enz-Nagold-Gebietes. – *Wasserwirtschaft*, 95(10), 8-14.
- Haag I., A. Luce & U. Badde (2005b): Ein operationelles Vorhersagemodell für die Wassertemperatur im Neckar. – *Wasserwirtschaft*, 95(7/8), 45-51.
- Haag I., A. Luce & K. Gerlinger (2006): Effects of conservation tillage on storm flow: a model-based assessment for a meso-scale watershed in Germany. – *IAHS-Publications* 303, 342-350.
- Knauf D. (1980): Die Berechnung des Abflusses aus einer Schneedecke. In: DVWK-LfU & IBL (2005): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen –. Modelldokumentation, Stand: 20.08.2005 (unveröffentlicht).
- Luce A., I. Haag & M. Bremicker (2006): Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur kontinuierlichen Abflussvorhersage in Baden-Württemberg. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50(2), 58-66.

- Ludwig K. (1982): The program system FGMOD for calculation of runoff processes in river basins. – Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 23, 25-37.
- Ludwig K., M. Bremicker & I. Haag (2006): Operationeller Vorhersagebetrieb mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM in Baden-Württemberg. In: Krahe, P. (Hrsg.), Niederschlags-Abfluss-Modellierung zur Verlängerung des Vorhersagezeitraumes operationeller Wasserstands- und Abflussvorhersagen, BfG-Veranstaltungen, (im Druck).
- Ludwig 2004: Untersuchung zum Einfluss der Klimavariabilität und anthropogen verursachten Klimaschwankungen auf Abflüsse für verschiedene Einzugsgebiete in Hessen, im Auftrag des HLUG, unveröffentlicht.
- Ludwig 2006: Aufstellung eines Wasserhaushaltsmodells für das Einzugsgebiet der Lahn in Hessen, Erläuterungsbericht, im Auftrag des HLUG, unveröffentlicht.
- Richter K.-G. & K. Ludwig (2003): Analyse des Wasserkreislaufes für das BALTEX Einzugsgebiet unter gegenwärtigen und zukünftigen klimatologischen Bedingungen. In: Kleeberg, H. (Hrsg.), Klima, Wasser, Flussgebietsmanagement im Lichte der Flut, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 4/2003, 27 – 34.
- Todini E. (1996): The ARNO rainfall-runoff model. – Journal of Hydrology, 175, 339-382.
- Williams J.R. (1969): Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. – Transactions of the ASAE, 100.
- Zhao R.J. (1977): Flood forecasting method for humid regions of China. East China Institute of Hydraulic Engineering, Nanjing, China.