



**DR.-ING. KARL LUDWIG**  
Wasserwirtschaft-Wasserbau GmbH  
76133 Karlsruhe, Herrenstraße 14, Tel. 0721/91251-0

**Auftraggeber:  
Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz  
Nordrhein-Westfalen**

**UNTERSUCHUNG ZUR AUSWIRKUNG DES  
KLIMAWANDELS AUF DAS ABFLUSSVERHALTEN  
IN GEWÄSSERN IN NRW**

**ERLÄUTERUNGSBERICHT**

**Bearbeiter:  
Dr.-Ing. Karl-Gerd Richter  
Dipl.-Geoökol. Stefan Schlaffer  
Dipl.-Inform. Erkin Chomoev  
Dipl.-Geogr. Martin Hunger**

**Karlsruhe, Oktober 2009**

# UNTERSUCHUNG ZUR AUSWIRKUNG DES KLIMAWANDELS AUF DAS ABFLUSSVERHALTEN IN GEWÄSSERN IN NRW

## – ERLÄUTERUNGSBERICHT –

1.	Auftrag und Veranlassung .....	1
2.	Zusammenfassung .....	4
3.	Datengrundlage .....	8
4.	Aufbau des Wasserhaushaltsmodells LARSIM .....	9
4.1	Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM .....	9
4.2	Modellvernetzung .....	11
4.3	Einbeziehung der Landnutzung und der nutzbaren Feldkapazität .....	12
5.	Voraussetzungen .....	16
5.1	Klimamodelle .....	16
5.2	Wasserhaushaltsmodelle .....	18
5.3	Fazit aus den Voraussetzungen .....	19
6.	Vorgehensweise .....	20
6.1	Grundsätzliches .....	20
6.2	Durchführung der Simulation mit LARSIM .....	22
7.	Modellvalidierung .....	23
7.1	Vorbereitung hydrometeorologischer Daten für LARSIM .....	23
7.2	Ergebnisse der Modellvalidierung .....	24
8.	Abflussberechnungen mit LARSIM mit WETTREG-ECHAM5 Modelldaten .....	26
8.1	Vorgehensweise .....	26
8.2	Zeitliche Entwicklung des Niederschlags, der Verdunstung und der Abflüsse für den Kontrolllauf (Zeitraum 1971-2000) .....	28
8.3	Bewertung des Kontrolllaufs (1971-2000) .....	29
8.3.1	Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse für den Kontrolllauf (1971-2000) .....	30
8.3.2	Mittlere monatliche Abflüsse für den Kontrolllauf (1971-2000) .....	31
8.3.3	Mittlere monatliche Hochwasserabflüsse für den Kontrolllauf (1971-2000) .....	32

8.4	Zeitliche entwicklung des Niederschlags, der Verdunstung und der Abflüsse für das Szenario A1B .....	33
8.5	Abflussveränderungen gemäss Szenario A1B gegenüber dem Kontrolllauf .....	34
8.5.1	Abflussveränderung der jahreszeitlichen Niedrigwasserabflüsse .....	34
8.5.2	Abflussveränderung der jahreszeitlichen Mittelwasserabflüsse .....	40
8.5.3	Abflussveränderung der jahreszeitlichen Hochwasserabflüsse .....	46
8.6	Räumliche Darstellung der Wasserhaushaltskomponenten .....	57
8.7	Berechnung von Unterschreitungshäufigkeiten .....	58
9.	Bewertung der Auswirkung des Klimawandels auf das Abflussverhalten der Fließgewässer in NRW .....	59
9.1	Wasserwirtschaftliche Aufgaben .....	59
9.2	Mögliche Auswirkungen der Klimaänderung auf das Abflussverhalten der Fließgewässer IN NRW .....	61
9.2.1	Allgemeine Bewertung .....	62
9.2.2	Flussgebietsspezifische Bewertungen .....	63
10.	Ausblick .....	64
11.	Literatur .....	65
	Verzeichnis der Anlagen .....	67

## 1. AUFTRAG UND VERANLASSUNG

Im Rahmen des Auftrags „Untersuchungen zur Auswirkung des Klimawandels auf das Abflussverhalten in Gewässer in NRW“ im Auftrag der Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) sollte ein Wasserhaushaltsmodell (WHM) auf Basis des Programmsystems LARSIM aufgestellt werden, mit dem Zweck der Berechnung der Auswirkung des Klimawandels auf das Abflussverhalten der Fließgewässer in NRW.

Es stehen verschiedene Klimaszenarien auf Basis des Globalmodells ECHAM5/OM für verschiedene IPCC-Szenarien (A1B, B1, A2) zur Verfügung, die auf statistischen und dynamischen Regionalisierungsmethoden basieren:

1. Das STAR2-Modell von Prof. Gerstengarbe (Firma Climate & Environmental Consulting (CEC), Potsdam). Von CEC Potsdam werden die Daten für die Klimaszenarien stationsbezogen und verfahrensbedingt bis 2055 als Tageswerte bereitgestellt.
2. Das Regionalmodell REMO 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 km<sup>2</sup>-Rasterzellen für Mitteleuropa bereitgestellt werden. Vom MPI-M werden die Daten in Stundenzeitschritten zur Verfügung gestellt.
3. Das WETTREG-Modell, ebenfalls Firma Climate & Environmental Consulting (CEC) Potsdam GmbH. Bei dem von CEC Potsdam eingesetzten Modell handelt es sich um das gleiche Modell wie von Meteo Research GmbH. Von CEC Potsdam werden die Daten für die Klimaszenarien stationsbezogen und nur als Tageswerte geliefert.
4. Das Regionalmodell CLM des Deutschen Wetterdienstes. Dabei handelt es sich um ein dynamisches Modell, bei dem die Ergebnisse in 20 x 20 km<sup>2</sup>-Rasterzellen für Mitteleuropa bereitgestellt werden. Vom DWD werden die Daten in Stundenzeitschritten zur Verfügung gestellt.

Für das hier dokumentierte Vorhaben sind die dynamischen Verfahren REMO und CLM zunächst unberücksichtigt geblieben, weil die absolute Niederschlagsabweichung und die räumlichen Abweichungen des Niederschlags bei REMO die Belastbarkeit der Ergebnisse einer Wasserhaushaltsmodellierung in Frage stellen.

Da STAR2 einen geringeren Datenumfang als WETTREG hat und mit WETTREG im Rahmen von KLIWA erfolgreich Wasserhaushaltsuntersuchungen durchgeführt wurden, ist seitens des Auftraggebers entschieden worden, für diese Untersuchungen nur auf WETTREG zurückzugreifen und das Emissionsszenario A1B zu verwenden.

Folgende Zeitreihen stehen zur Verfügung:

- Kontrolllauf: 1971-2000
- Zukunftsszenario – Emissionsszenario A1B: 2001-2100

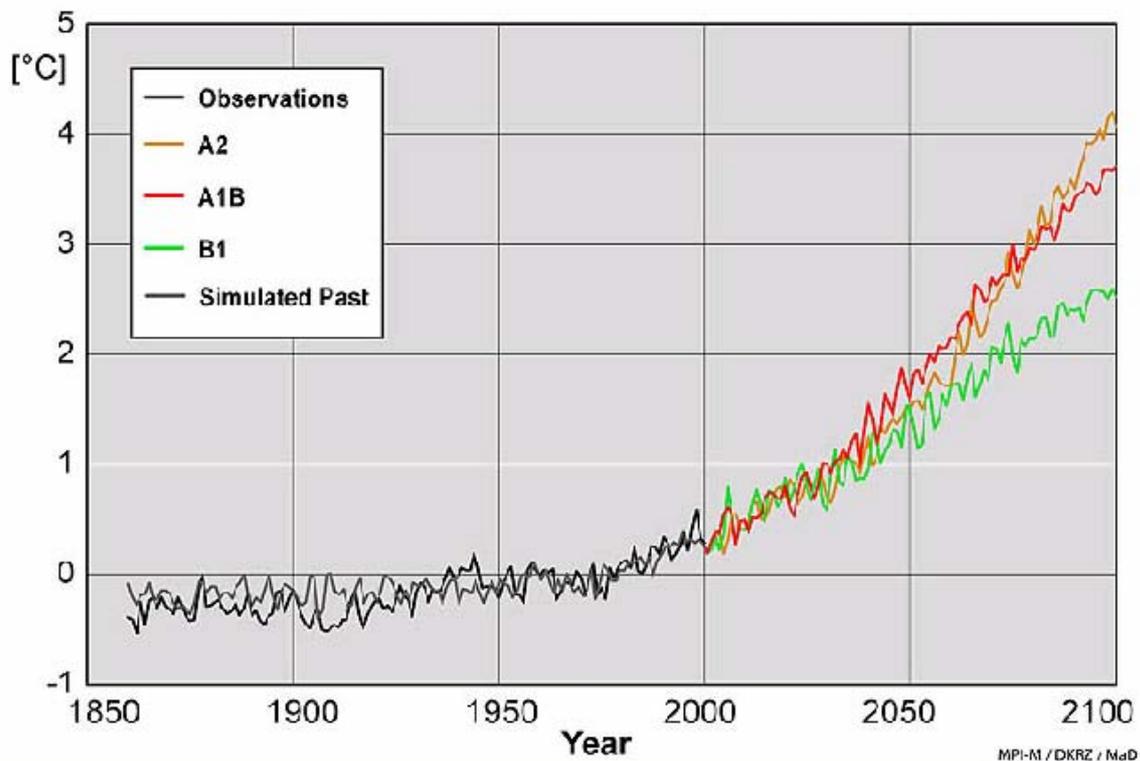


Bild: 1.1: Temperaturentwicklung für unterschiedliche Klimaszenarien

In Bild 1.1 ist die 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.

Um den Berechnungs- und Auswertungsaufwand zu verringern, werden zunächst nur folgende Daten verwendet:

1. Von den drei Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 wird das Emissionsszenario A1B verwendet.
2. Es werden für die Wasserhaushaltssimulationen die Klimaszenarien des WETTREG-Modells der CEC Potsdam GmbH verwendet, da diese gegenüber den Ergebnissen des Regionalmodells REMO die plausibleren Ergebnisse liefern. Bisher durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass die Niederschläge mit dem Regionalmodell nicht lagegetreu wiedergegeben werden.
3. Für die Auswertung der Simulationen wird besonders der Zeitraum 2021-2050 betrachtet. Einzelne Auswertungen werden darüber hinaus auch für den Zeitraum 2071-2100 durchgeführt.

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 (wird hier nicht verwendet) 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.

Mit den Szenariendaten A1B werden für Nordrhein-Westfalen mit dem Wasserhaushaltsmodell die Veränderung der Abflüsse in Folge des Klimawandels abgeschätzt. Dabei kann die Änderung der Abflüsse zwischen der Simulation des Ist-Zustands und des Zukunftsszenarios ausgewertet werden.

Die Vorgehensweise und die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten sind im vorliegenden Bericht dargestellt.

Karlsruhe, im Oktober 2009



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



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

## 2. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der hier durchgeführten Untersuchungen ist die Abschätzung der Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt in Gewässern in NRW.

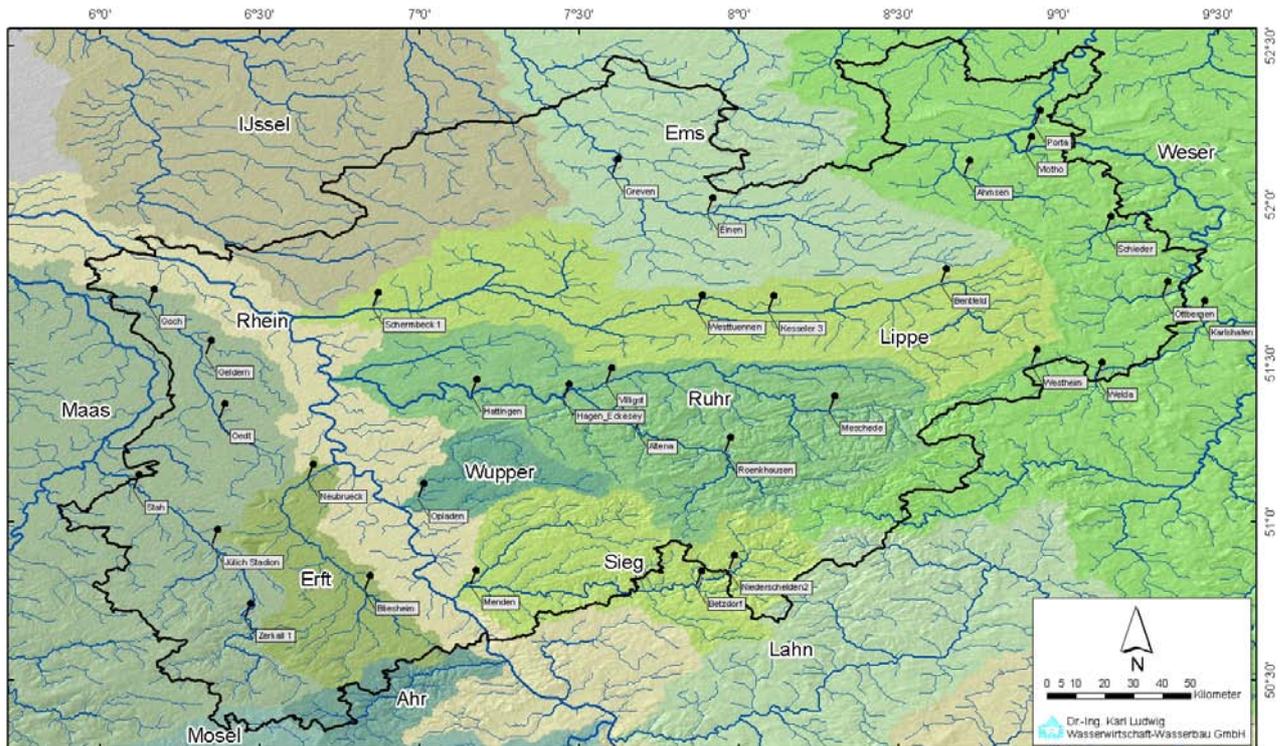
Für das Land NRW liegt auf Basis eines 2,5 Minutenrasters ein Wasserhaushaltsmodell für die Landesfläche von Nordrhein-Westfalen mit den Einzugsgebieten Rur, Niers, Sieg, Wupper, Ruhr, Lippe, Emscher sowie für Teile der Ems und der Weser vor (siehe Kapitel 4).

Für die vorliegende Bearbeitung wurde dieser Modelldatensatz mit dem Programmsystem LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) als Wasserhaushaltsmodell eingesetzt. LARSIM ermöglicht eine prozess- und flächendetaillierte Simulation des landgebundenen Wasserkreislaufes. Bild 4.1 zeigt das Programmschema von LARSIM.

Für 32 Pegel (siehe Bild 2.1 und Tabelle 2.1) in verschiedenen Einzugsgebieten wurden zunächst die Abflüsse mit gemessenen Niederschlägen und Klimadaten (siehe Kapitel 7) simuliert und auf zwei unterschiedliche Arten validiert:

1. Zum einen wurden für die kontinuierlichen täglichen gemessenen und berechneten Abflüsse Abweichungsmaße (Bestimmtheitsmaß, Güte etc.) berechnet. Die Güte- maße zeigen im Allgemeinen eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Abflussganglinien. Größere Abweichungen gibt es bei den Pegeln an der Erft und Weser. Dieses Gewässer sind durch den Braunkohletagebau stark beeinflusst, sowie durch den Betrieb von Talsperren beeinflusst, die im Modell nicht berücksichtigt wurden.
2. Es wurden mittlere monatliche Niedrig, Mittel- und Hochwasserabflüsse mit gemessenen Niederschlägen und Klimadaten und validiert. Die Validierung zeigt in den meisten Fällen eine gute Übereinstimmung zwischen aus Messwerten und Berechnungen abgeleiteten mittleren monatlichen Niedrig-, Mittel- und Hochwasserabflüssen.

Die Validierung führte zur Bewertung, dass der vorliegende Modelldatensatz geeignet ist, im Sinne der Aufgabenstellung klimawandelbedingte Veränderungen der mittleren Abflussverhältnisse im Niedrig-, Mittel- und Hochwasserbereich zu bestimmen.



**Bild 2.1:** Lage der Einzugsgebiete und untersuchten Pegel

**Tabelle 2.1:** Liste der untersuchten Pegel

Nr.	Name	Größe des EZG [km <sup>2</sup> ]	
1	Westtünnen	414.90	Ahse
2	Westheim	357.50	Diemel
3	Welda	433.73	Diemel
4	Schieder-Stausee	362.59	Emmer
5	Einen	1485.77	Ems
6	Greven	2842.10	Ems
7	Bliesheim	604.00	Erft
8	Neubruck	1595.43	Erft
9	Geldern	167.84	Gelderner Fleuth
10	Roenkhausen	884.00	Lenne
11	Altena	1190.00	Lenne
12	Bentfeld	1049.80	Lippe
13	Kessler 3	2002.97	Lippe
14	Schermbeck 1	4783.00	Lippe
15	Ottbergen	431.05	Nethe
16	Oedt	333.08	Niers
17	Goch	1203.21	Niers
18	Meschede	426.06	Ruhr
19	Villigst	2012.76	Ruhr
20	Hattingen	4117.90	Ruhr
21	Zerkall 1	787.00	Rur
22	Jülich Stadion	1334.57	Rur
23	Stah	2135.15	Rur
24	Niederschelden2	431.00	Sieg
25	Betzdorf	754.50	Sieg
26	Menden	2825.00	Sieg
27	Hagen-Eckesey	425.00	Volme
28	Ahmsen	593.00	Werre
29	Karlshafen	14794.00	Weser
30	Vlotho	17618.00	Weser
31	Porta Westfalica	19162.00	Weser
32	Opladen	606.00	Wupper

Die zukünftig erwarteten Änderungen im Wasserhaushalt, sowie Auswirkungen auf das Abflussverhalten, werden durch den Vergleich von Abflüssen des Kontrolllaufs (1971-2000) und dem Szenarienzustand A1B für die „nahe“ Zukunft 2021-2050 und „ferne“ Zukunft 2071-2100 abgeleitet.

Hierzu standen Szenariendaten (Klimadaten) des WETTREG-Modells der Firma CEC Potsdam GmbH für den Zeitraum 1971-2100 zur Verfügung. Basierend auf diesen Szenariendaten wurden die Wasserhaushaltsprojektionen durchgeführt.

Für den Kontrolllauf wurden für den Zeitraum 1971 bis 2000 jeweils die Daten aus zehn Realisationen des Modells WETTREG-ECHAM5 verwendet. Dabei umfasst jede Dekade einer Realisation die Daten von 20 Jahren. Dies ist im statistischen Sinn gleichbedeutend mit 20 Realisationen à 10 Jahren.

Für diese Zeitreihen wurden die Pardé-Koeffizienten für die mittleren monatlichen Niedrigwasser- (MoMNQ), Mittelwasser- (MoMMQ) und Hochwasserabflüsse (MoMHQ) berechnet und mit den Koeffizienten der gemessenen Abflusszeitreihen verglichen, soweit diese für mindestens 20 Jahre verfügbar waren. Durch die Verwendung der Pardé-Koeffizienten konnten die gemessenen und modellierten Jahresgänge des Abflusses verglichen werden, ohne die Absolutwerte in Betracht zu ziehen.

Der Vergleich ergab eine durchweg gute Übereinstimmung an den Gewässern Niers, Ruhr, Weser und Wupper. Einige Besonderheiten, wie z.B. die im Vergleich zu den Monaten Januar und März niedrigeren Pardé-Werte im Februar, wie sie an Ruhr, Emmer, Lippe, Sieg und Wupper zu beobachten waren, konnten nicht nachgebildet werden. Die im Jahresverlauf nahezu konstanten Pardé-Koeffizienten an der Erft konnten dagegen, v.a. im Hochwasserbereich, nur schlecht durch den Kontrolllauf reproduziert werden. An der Diemel wurde die Amplitude des Jahresgangs deutlich überschätzt. Diese Überschätzung kann durch die nicht im Modell berücksichtigte Diemeltalsperre verursacht sein. Bezüglich der Veränderungen im mittleren- und Niedrigwasserbereich erscheinen Aussagen jedoch zulässig.

Die v.a. im Niedrigwasserbereich geringen Übereinstimmungen an der Rur lassen sich durch das Fehlen der Steuerung der Rurtalsperre erklären, die nicht mehr ins Modell integriert werden konnte. An der Ems, Lippe und Niers konnten zufriedenstellende Übereinstimmungen zwischen den beobachteten und modellierten Abflussregimes festgestellt werden.

Insgesamt ist festzustellen, dass der Kontrolllauf des Modells WETTREG-ECHAM5 zur Beschreibung der mittleren Abflussverhältnisse im Zeitraum 1971-2000 herangezogen werden kann.

Für die Auswertungen wurden drei Zeiträume berücksichtigt: der Kontrolllauf 1971-2000, „nahe“ Zukunft 2021-2050 und „ferne“ Zukunft (2071-2100). Die größten Änderungen in der fernen Zukunft ergeben sich bei den Hochwasserabflüssen, wo in den Wintermonaten starke Zunahmen und im Sommer starke Abnahmen möglich sind. Bei den Einzugsgebiete-

ten mit Mittelgebirgscharakter sind stärkere Zunahmen zu erwarten als bei den Einzugsgebieten im Tiefland.

Für die „ferne“ Zukunft ergeben sich infolge von Verstärkung der Niederschläge bei Niedrig-, Mittel- und Hochwasserabflüssen starke Zunahmen während der Wintermonate. Geringere Niederschläge führen zu Abnahmen während der Sommermonate.

Für die Bewertung der Ergebnisse werden vier unterschiedliche Regionen in NRW (Region 1: Rur, Sieg, Wupper, Ruhr, Region 2: Erft und Niers, Region 3: Lippe und Ems, Region 4: Weser, Diemel, Emmer und Werre) gewählt, in denen die allgemeinen wasserwirtschaftlichen Handlungsfelder

- Integrierte Flussgebietsbewirtschaftung von Fließgewässern und Wasserstraßen
- Ortsentwässerung
- Wasserversorgung
- Landwirtschaftlicher Wasserbau
- Abfallwirtschaft sowie
- Bergbau

hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels - soweit es im Sinne der Aufgabenstellung, der räumlichen Skalierung und der erzielten Ergebnisse fachlich sinnvoll und möglich ist - betrachtet werden,

### 3. DATENGRUNDLAGE

Die nachfolgend aufgestellten Daten und Unterlagen wurden vom LANUV NRW für das vorliegende Projekt zur Verfügung gestellt und verwendet:

#### Ereignisdaten:

- Abflussdaten als Tageswerte für 32 Pegel in verschiedenen Einzugsgebieten von NRW für unterschiedliche Zeitperioden zwischen 1961 und 2005.
- meteorologische Daten als Tageswerte für folgende sechs meteorologische Größen: Niederschlag, Sonnenscheindauer, Luftdruck, Luftfeuchte, Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit für den Zeitraum von 1961 bis 2006
- Szenariendaten von der Firma CEC Potsdam GmbH für den Kontrolllauf (C20) für den Zeitraum 1961 bis 2000 sowie den Szenarienzustand A1B (2001 bis 2100)

#### Zusatzdaten:

- detaillierte Angaben zu Wasserständen, Volumina, Regelabflüssen und Hochwasserentlastungen für Hochwasserrückhaltebecken (HRB) sowie Steuerungsregeln für die Talsperren:
- HQ<sub>2</sub>-Werte für 32 Pegel in NRW
- Flächendifferenzierte Daten zur nutzbaren Feldkapazität (nFK) für die Landesfläche Nordrhein-Westfalens

## **4. AUFBAU DES WASSERHAUSHALTSMODELLS LARSIM**

### **4.1 DAS WASSERHAUSHALTSMODELL LARSIM**

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 4.1 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 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. 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 dem Downscalingverfahren nach ECHAM5-WETTREG werden 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

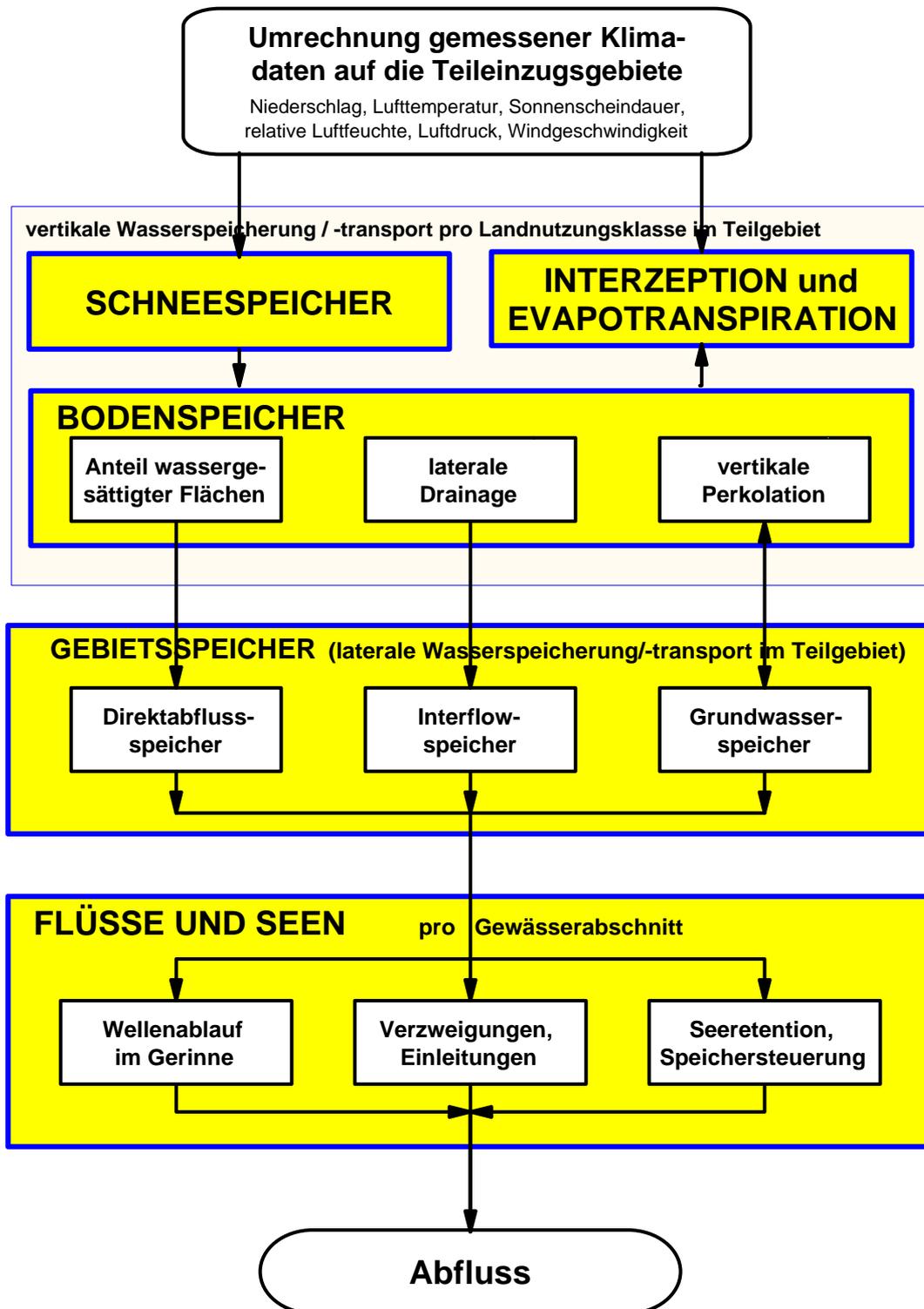


Bild 4.1: Schema des Wasserhaushaltsmodells LARSIM

## 4.2 MODELLVERNETZUNG

Die Modellerstellung wurde bereits in einer gröberen Form (horizontale Auflösung 15 x 15 Bogenminuten) in den Jahren 1999 bis 2000 im Rahmen eines Forschungsprojektes durchgeführt. Für das vorliegende Projekt wurde für Nordrhein-Westfalen ein neues Wasserhaushaltsmodell (WHM-NRW) mit einer Rasterweite von 2,5 x 2,5 Bogenminuten und einer durchschnittlichen Rasterfläche von ca. 13,5 km<sup>2</sup> erstellt. Die Modellvernetzung basiert auf Höhen- und Fließrichtungsdaten (Auflösung: 15 Bogensekunden), die vom World Wildlife Fund (WWF) als Bestandteil des Datensatzes HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales) zur Verfügung gestellt werden (Lehner et al., 2008). Das Wasserhaushaltsmodell NRW umfasst Teilbereiche der Einzugsgebiete der Maas (u.a. Rur, Niers, Erft), des Rheins (u.a. Sieg, Wupper, Ruhr, Emscher, Lippe), der IJssel, der Ems und der Weser. Die 5684 Modellelemente decken eine Fläche von rund 76.000 km<sup>2</sup> ab.

Die resultierenden Modellvernetzungen, wie sie in den jeweiligen Gebietsdateien wiedergegeben sind, sind in den Anlagen A-01 bis A-02 abgebildet.

### Berücksichtigung von Talsperren:

Im Rahmen des Modellaufbaus wurden lediglich je nach Vorlage von Unterlagen einige Talsperren in der Sieg, der Ruhr und der Wupper berücksichtigt. Der Betrieb der Sperren wurde versucht näherungsweise zu berücksichtigen, ohne die Steuerungen im Detail nachzufahren.

### 4.3 EINBEZIEHUNG DER LANDNUTZUNG UND DER NUTZBAREN FELDKAPAZITÄT

#### Landnutzung:

Für das WHM-NRW wurde die Landnutzung aus Vektordaten (Polygone im ESRI-Shapefile-Format) des CORINE Projekts der EU (Corine land cover 2000, Level 3) abgeleitet. Der Datensatz deckt das Modellgebiet vollständig ab. Von insgesamt 44 CORINE-Landnutzungsclassen kommen 30 im Modellgebiet vor. Für eine effiziente Verarbeitung in LARSIM wurden die Daten zu 16 Landnutzungsclassen aggregiert. Die Zuordnung ist in Tabelle 4.3 dargestellt. Die Klasse 8 (Gletscher), die im Modellgebiet nicht vorkommt, ist in der Klassifikation enthalten um die Kompatibilität zu angrenzenden Modellen zu gewährleisten. Die aggregierten Daten wurden mit dem Modellraster verschnitten und so der Anteil jeder Landnutzungsclassen an den einzelnen Modellelementen bestimmt.

Tabelle 4.3: Reklassifizierung der CORINE-Landnutzungsclassen für das WHM-NRW

Landnutzungsclassen CORINE	zugeordnete Landnutzungsclassen LARSIM
1.1.1. durchgängig städtische Prägung	1 Siedlung, dicht
1.1.2. nicht durchgängig städtische Prägung	2 Siedlung, locker
1.2.1. Industrie/Gewerbeflächen	3 großflächig versiegelte Bereiche
1.2.2. Straßen/Eisenbahnnetze, funktionell zugeordnete Flächen	3 großflächig versiegelte Bereiche
1.2.3. Hafengebiete	3 großflächig versiegelte Bereiche
1.2.4. Flughäfen	3 großflächig versiegelte Bereiche
1.3.1. Abbauflächen	7 unversiegelte, unbewachsene Flächen / Felsflächen
1.3.2. Deponien, Abraumhalden	7 unversiegelte, unbewachsene Flächen / Felsflächen
1.3.3. Baustellen	7 unversiegelte, unbewachsene Flächen / Felsflächen
1.4.1. Städtische Grünflächen	2 Siedlung, locker
1.4.2. Sport/Freizeitanlagen	12 locker baumbestanden
2.1.1. Nicht bewässertes Ackerland	4 Ackerflächen
2.2.1. Weinbauflächen	5 Weinbau
2.2.2. Obst- und Beerenobstbestände	6 Obstbau
2.3.1. Wiesen und Weiden	9 Grünland, intensiv
2.4.2. Komplexe Parzellenstrukturen	12 locker baumbestanden
2.4.3. Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe	12 locker baumbestanden

Landnutzungs-kategorie CORINE	zugeordnete Landnutzungs-kategorie LARSIM
3.1.1. Laubwälder	14 Laubwald
3.1.2. Nadelwälder	13 Nadelwald
3.1.3. Mischwälder	15 Mischwald
3.2.1. Natürliches Grünland	11 Grünland, extensiv
3.2.2. Heiden und Moorheiden	11 Grünland, extensiv
3.2.4. Wald-Strauch-Übergangsstadien	12 locker baumbestanden
3.3.1. Strände, Dünen und Sandflächen	7 unversiegelte, unbewachsene Flächen/Felsflächen
3.3.2. Felsflächen ohne Vegetation	7 unversiegelte, unbewachsene Flächen/Felsflächen
3.3.3. Flächen mit spärlicher Vegetation	7 unversiegelte, unbewachsene Flächen/Felsflächen
4.1.1. Sümpfe	10 Feuchtflächen
4.1.2. Torfmoore	10 Feuchtflächen
5.1.1. Gewässerläufe	16 Wasserflächen
5.1.2. Wasserflächen	16 Wasserflächen

Die Parametrisierung des Verdunstungsmodells für die 16 Landnutzungs-klassen über den Blattflächenindex, die Albedo, die effektive Bestandshöhe und den Oberflächenwiderstand (siehe Systemdatei „lanu.par“) erfolgte mit monats-spezifischen Werten, die auf Grundlage einer intensiven Literaturrecherche abgeleitet wurden (LfU 1999).

Der fertige Landnutzungsdatensatz beinhaltet folgende Landnutzungs-klassen (mit ihrem jeweiligem Flächenanteil am Modellgebiet, siehe auch Anlage A11):

**Tabelle 4.4:** Landnutzungs-klassen des WHM-NRW und deren Flächenanteil am Modell-gebiet

LARSIM Landnutzungs-kategorie	Flächenanteil [%]
1 Siedlung, dicht	0,06
2 Siedlung, locker	9,20
3 versiegelt	1,71
4 Acker	35,08
5 Weinbau	0,01
6 Obstbau	0,09
7 Fels / unversiegelte, unbewachsene Fläche	0,51
8 Gletscher	-
9 Grünland, intensiv	13,72
10 Feuchtflächen	0,43
11 Grünland, extensiv	0,52
12 locker baumbestanden	12,33
13 Nadelwald	9,57
14 Laubwald	8,87
15 Mischwald	7,07
16 Wasserflächen	0,84

### Nutzbare Feldkapazität (nFK):

Daten zur nutzbaren Feldkapazität (nFK) wurden vom Auftraggeber für die Landesfläche von NRW zur Verfügung gestellt (Digitale Bodenkarte NRW 1:50.000). Der Polygon-Datensatz beinhaltet nFK-Werte in mm über die jeweilige Bezugstiefe (standardmäßig effektiver Wurzelraum; ggf. gekürzt auf mittlere Grundwasserstandstiefe oder Lockergesteinsmächtigkeit) für die Bodeneinheiten (Polygone). Für die Fläche jeder LARSIM-Landnutzungs-kategorie innerhalb einer Modellzelle wurde ein flächengewichtetes Mittel dieser nFK-Werte berechnet und in das Modell übernommen.

In den nicht durch die Karte abgedeckten Gebieten, für die keine flächendeckenden Informationen zur nFK vorlagen, wurde die nFK aus den verfügbaren Gelände- und Landnutzungs-informationen abgeleitet. Grundlage dafür ist folgende, empirisch ermittelte Regressionsbeziehung, die bereits in anderen Wasserhaushaltsmodellen erfolgreich eingesetzt wurde.

$$nFK [mm] = (nFK_{max} * e^{(-b * Gef\ddot{a}lle [\%])}) - (H\ddot{o}he / H\ddot{o}he_{max}) * (nFK_{max} * e^{(-b * Gef\ddot{a}lle [\%])})$$

$$\text{mit } b = 0,015$$

$$nFK_{max} = \text{landnutzungsspezifische maximale nFK}$$

$$H\ddot{o}he_{max} = 5000 \text{ m \u00f6. NN}$$

Diese Vorgehensweise entspricht der Vorstellung, dass sich die landnutzungsspezifische nFK mit zunehmender Gel\u00e4ndeh\u00f6he und zunehmendem Gef\u00e4lle im Vergleich zur maximal m\u00f6glichen nFK verringert. Die Werte f\u00fcr die maximale nFK der einzelnen Landnutzungs-klassen wurden auf Basis von Literaturrecherchen abgesch\u00e4tzt und sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst. Die Berechnung erfolgte f\u00fcr jede LARSIM-Landnutzungs-einheit innerhalb eines Modellelements. Das mittlere Gef\u00e4lle [%] und die mittlere H\u00f6he [m \u00f6. NN] der Teilfl\u00e4chen wurden aus dem Digitalen Gel\u00e4ndemodell (Aufl\u00f6sung: 3 Sekunden) bestimmt.

Tabelle 4.5: Maximalwerte der nutzbaren Feldkapazität für die Landnutzungsklassen des WHM-NRW [mm]

LARSIM Landnutzungsklasse		max. nFK [mm]
1	Siedlung, dicht	*
2	Siedlung, locker	*
3	versiegelt	0
4	Acker	120
5	Weinbau	120
6	Obstbau	120
7	Fels / unversiegelte, unbewachsene Fläche	15
8	Gletscher	-
9	Grünland, intensiv	75
10	Feuchtflächen	250
11	Grünland, extensiv	45
12	locker baumbestanden	120
13	Nadelwald	150
14	Laubwald	180
15	Mischwald	165
16	Wasserflächen	0

\* unversiegelte Anteile von Siedlungsflächen werden in LARSIM wie eine Kombination aus Grünland und Mischwald behandelt - versiegelte Anteile besitzen die max. nFK 0

## 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 müssen.

Als Untersuchungsgebiete wurden folgende Einzugsgebiete in NRW berücksichtigt: Rur, Niers, Erft, Sieg, Wupper, Ruhr, Emscher, Lippe, sowie die nordrhein-westfälischen Anteile der Ems und Weser.

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

### 5.1 KLIMAMODELLE

Für Nordrhein-Westfalen 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 NRW verwendet, um Simulationen der oben genannten Pegel zu berechnen.

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

Von der Arbeitsgruppe CEC Potsdam wurden sowohl der Ist-Zustand als auch ein Zukunftsszenario mit jeweils zehn Realisationen simuliert. Für die weitere Auswertung werden die beiden Zeiträume dabei wie folgt definiert:

- Kontrolllauf: 1971 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
- Sonnenscheindauer
- Windgeschwindigkeit
- Luftdruck

Zeitliche Auflösung:

Die Zielgrößen wurden entsprechend der Vorgaben in täglicher Auflösung simuliert.

Räumliche Auflösung:

Die Ergebnisse von CEC Potsdam 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 CEC Potsdam für das Zukunftsszenario für insgesamt ca. 300 Niederschlagsstationen in und um NRW vor.

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

Die Ergebnisse des REMO-ECHAM5-OM (Run1) Rechenlaufes liegen für den Ist-Zustand (1971-2000) 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:

- Kontrolllauf: 1971 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 Simulationen wurden entsprechend der Vorgaben auf Stundenwertbasis durchgeführt.

Räumliche Auflösung:

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

## 5.2 WASSERHAUSHALTSMODELLE

Für Nordrhein-Westfalen liegt flächendeckend ein Wasserhaushaltsmodell im ca. 3 x 3 km<sup>2</sup> Raster für NRW 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.

Die Ergebnisse von Langzeitsimulationen mit Messdaten (z.B. 40 Jahre für das Sieg, Rur, Lippe etc.) 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. Hochwasserscheitel von kurzer Dauer können in diesem Fall 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.

### **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 jedoch Vorschläge gemacht, wie diese Unsicherheiten minimiert werden können.

## 6. VORGEHENSWEISE

### 6.1 GRUNDSÄTZLICHES

Die Klimamodelle liefern sowohl für den Kontrolllauf 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. Durch den Vergleich der Ergebnisse des Kontrolllaufs (z.B. 1971-2000) mit den gemessenen Klimadaten desselben Zeitraums können die Klimamodelle überprüft werden.

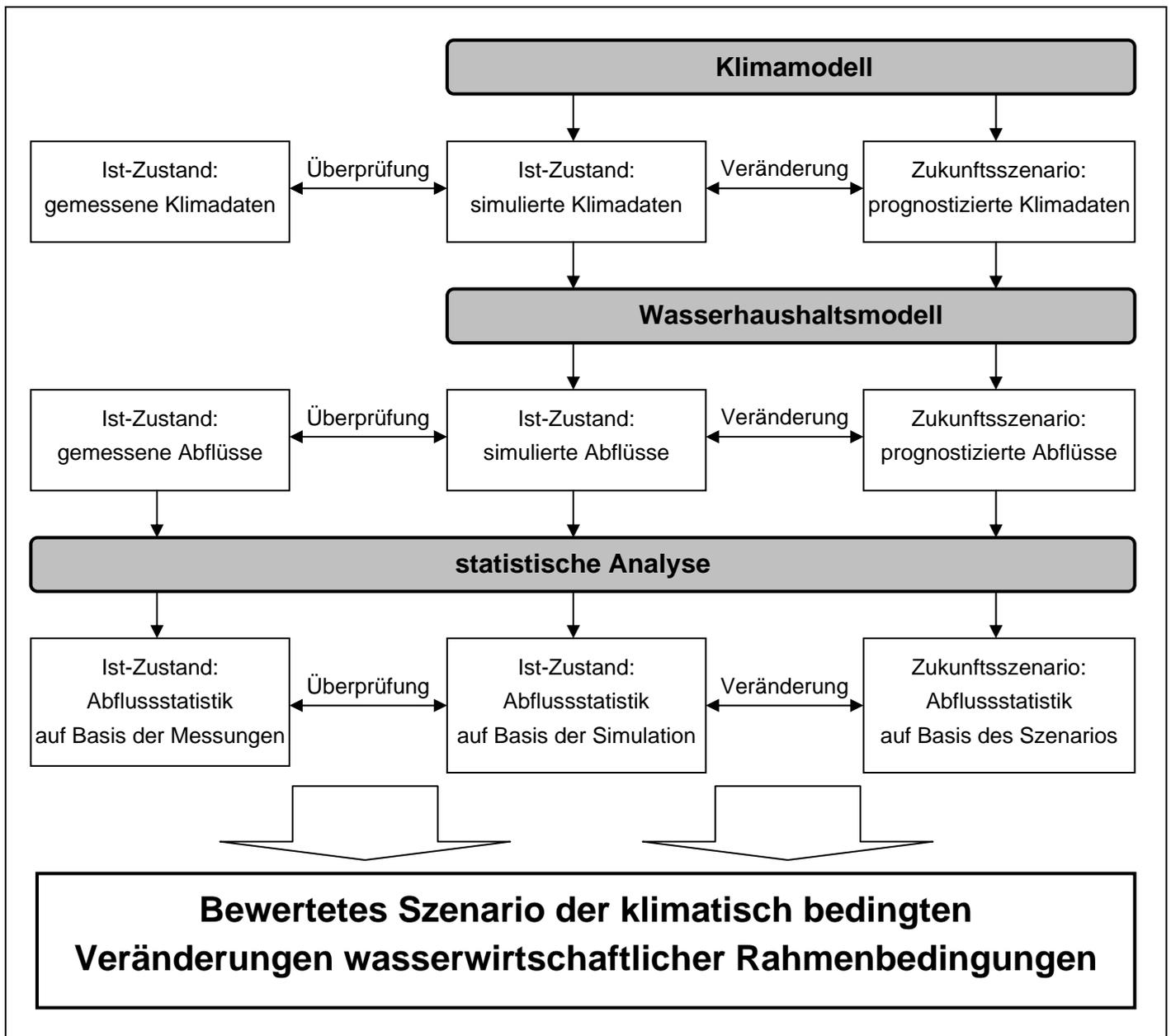
Für die Wasserhaushaltssimulation wird generell vorausgesetzt, dass sich die Landnutzung in Zukunft nicht ändert (weder klimatisch noch anthropogen bedingt) und dass die Parameterwerte der Wasserhaushaltsmodelle für den Szenariolauf konstant bleiben. Diese Annahmen müssen getroffen werden, so lange keine 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 6.1 schematisch dargestellt.

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 kein Kontrolllauf des Klimamodells 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 Daten und die Daten aus dem Kontrolllauf weitestgehend identisch sind. In Bild 6.1 entfallen dann die mittleren Kästchen zum Kontrolllauf, und die Messdaten des Ist-Zustands (Bild 6.1 links) sind direkt mit den Daten des Zukunftsszenarios (Bild 6.1 rechts) zu vergleichen.

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



**Bild 6.1:** Generelle Vorgehensweise bei der Umsetzung von Klimaszenarien in Wasserhaushaltssimulationen (bezogen auf die Abflüsse).

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

## 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 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 WHM-NRW und die ECHAM5-WETTREG-Daten 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.

Messwerte des Deutschen Wetterdienstes für die klimatologische Größe Niederschlag lagen für die Jahre 1971 bis 2000 vor.

## 7. MODELLVALLIDIERUNG

### 7.1 VORBEREITUNG HYDROMETEOROLOGISCHER DATEN FÜR LARSIM

#### Klima- und Niederschlagsdaten:

Als meteorologische Antriebsdaten wurden vom Auftraggeber sowohl Niederschlagsdaten und Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes als auch aus dem Messnetz des Landes NRW zur Verfügung gestellt. Insgesamt lagen

- 396 Niederschlagsmessstationen
- 44 Messstationen der Lufttemperatur
- 44 Messstationen der Luftfeuchte
- 3 Messstationen des Luftdrucks
- 44 Messstationen der Sonnenscheindauer
- 45 Messstationen der Windgeschwindigkeit

Die Anlagen A-09 bis A-14 zeigen im grafischen Überblick die für die WHM-NRW verwendeten Messstationen der genannten meteorologischen Parameter.

#### Abflussdaten:

Abflussdaten als Tagesmittelwerte für unterschiedliche Zeitperioden zwischen 1961 und 2006 wurden vom Auftraggeber für die zweiunddreißig zu validierenden Pegel bereit gestellt. Diese Daten wurden geprüft, aufbereitet und für eine Verwendung in LARSIM in das gmd-Format konvertiert.

Eine Übersicht der Lage der Abflusspegel ist Anlage A-08 zu entnehmen.

Das WHM NRW wurde mit gemessenen Klimazeitreihen auf Tageswertbasis für den Zeitraum 1971-2000 validiert.

Die Validierung wurde für die Parameter

MoMnQ = mittlerer monatliche Niedrigwasserabfluss

MoMMQ = mittlerer monatliche Mittelwasserabfluss

MoMHQ = mittlerer monatliche Hochwasserabfluss

durchgeführt.

## 7.2 ERGEBNISSE DER MODELLVALIDIERUNG

Die Beurteilung der Güte der Modellvalidierung erfolgt in zwei Schritten:

1. Es werden Gütemaße (Bestimmtheitsmaß, Modelleffizienz, logarithmische Modelleffizienz sowie die Bilanz) dargestellt (siehe Tabelle 7.1).
2. Für den Zeitraum 1991-2000 werden die gemessenen und berechneten MoMNQ-, MoMMQ- sowie MoMHQ-Werte berechnet und in der Anlage B dargestellt.

Zur integralen Beurteilung der Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Ganglinien an allen Pegeln sind in Tabelle 7.1 mehrere Gütemaße für den Validierungszeitraum von 1971 bis 2000 zusammengestellt. Die Gütemaße zeigen im Allgemeinen eine gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Abflussganglinien. Größere Abweichungen gibt es bei den Pegeln an der Erft. Dieses Gewässer ist durch den Braunkohletagebau stark beeinflusst. Ebenso gibt es größere Abweichungen an der Weser, die weitgehend durch die Einflüsse der Talsperren bedingt sind. Die am Pegel Zerkall 1/Rur gemessenen Abflüsse sind stark durch die Rurtalsperre beeinflusst, die aufgrund fehlender Daten zur Steuerung nicht ins Modell übernommen wurde.

Auch bei den mittleren monatlichen Abflüssen (Anlage B) zeigen sich v.a. im Niedrigwasserbereich größere Abweichungen an der Erft. Außerdem wird ersichtlich, dass die Steuerung der Edertalsperre nicht detailgetreu ins Modell übernommen werden konnte, wodurch sich die größeren Abweichungen am Pegel Fritzlar/Eder erklären lassen.

Für die Pegel Betzdorf/Sieg, Greven/Ems und Kesseler 3/Lippe lagen gemessene Zeitreihen nur über Zeiträume von unter 10 Jahren vor. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde bei diesen Pegeln von einer Darstellung in Anlage B abgesehen. Für die Pegel Niederschelden 2/Sieg und Schieder-Stausee/Emmer wurde gemäß der Verfügbarkeit der Messdaten der Validierungszeitraum auf 18 bzw. 11 Jahre verkürzt.

Im Allgemeinen zeigt sich auch hier eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten mittleren monatlichen Abflüssen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass mit dem Wasserhaushaltsmodell NRW ein Instrument geschaffen wurde, mit dem die Veränderungen im Wasserhaushalt infolge von Klimaveränderungen prognostiziert werden können.

Im Gegensatz zur Bewertung von ereignisbezogenen Wetterereignissen wurde im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen geprüft, ob das Wasserhaushaltsmodell in der Lage ist, das Abflussverhalten auf einer längeren Skala (Klima) in verschiedenen Abflussbereichen nachzuvollziehen.

Tabelle 7.1: Gütemaße der berechneten Abflüsse bei durchgängiger Simulation (keine Berücksichtigung gemessener Zulaufanglinien)

Pegel	Gewässer	Bestimmtheitsmaß	Modell-effizienz	In Modell-effizienz	Bilanz (gem/ber)
		Validierungszeitraum 1981-2000			
Westtünnen	Ahse	0.72	0.58	0.52	0.93
Westheim	Diemel	0.82	0.70	0.77	1.03
Welda	Diemel	0.67	0.23	0.39	0.93
Schieder-Stausee	Emmer	0.74	0.71	0.78	1.03
Einen	Ems	0.87	0.76	0.79	1.13
Greven	Ems	0.92	0.84	0.86	1.18
Bliesheim	Erft	0.81	0.80	0.75	1.01
Neubrück	Erft	0.29	-0.20	-0.25	0.73
Geldern	Gelderner Fleuth	0.70	0.67	0.47	1.11
Roenkhausen	Lenne	0.90	0.90	0.82	1.03
Altena	Lenne	0.90	0.90	0.82	1.06
Bentfeld	Lippe	0.85	0.84	0.80	0.97
Schermbeck 1	Lippe	0.87	0.84	0.77	1.04
Kessler 3	Lippe	0.92	0.92	0.90	1.04
Ottbergen	Nethe	0.71	0.57	0.70	1.10
Oedt	Niers	0.55	-0.22	-0.21	1.36
Goch	Niers	0.81	0.79	0.64	1.08
Meschede	Ruhr	0.87	0.86	0.79	0.97
Villigst	Ruhr	0.88	0.84	0.76	0.93
Hattingen	Ruhr	0.91	0.89	0.91	0.96
Zerkall 1	Rur	0.59	0.53	0.33	1.04
Jülich Stadion	Rur	0.72	0.70	0.58	1.04
Stah	Rur	0.77	0.71	0.54	1.08
Niederschelden 2	Sieg	0.88	0.83	0.82	1.14
Menden	Sieg	0.91	0.91	0.91	1.03
Betzdorf	Sieg	0.91	0.91	0.91	1.04
Hagen-Eckesey	Volme	0.87	0.85	0.82	0.98
Ahmsen	Werre	0.86	0.84	0.82	0.97
Karlshafen	Weser	0.84	0.74	0.82	1.09
Vlotho	Weser	0.73	0.56	0.62	1.10
Porta Westfalica	Weser	0.58	0.32	0.36	1.12
Opladen	Wupper	0.88	0.88	0.79	1.05

## **8. ABFLUSSBERECHNUNGEN MIT LARSIM MIT WETTREG-ECHAM5 MODELL-DATEN**

### **8.1 VORGEHENSWEISE**

Mit dem WHM NRW werden Berechnungen mit einer räumlichen Auflösung von 2,5 Minuten durchgeführt, wobei als Eingabedaten die Klimadaten der jeweils zehn Realisationen des Kontrolllaufs (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000) als auch die Daten aus den jeweils 10 Realisationen für den Szenarienzustand A1B (2001-2010, ..., 2091-2100) verwendet wurden. Die Untersuchung der Ergebnisse der Simulationen wurden für die oben genannten Pegel durchgeführt.

Für den Kontrolllauf wurden für den Zeitraum 1971 bis 2100 Simulationen mit zehn Realisationen durchgeführt. Dabei umfasst jede Dekade einer Realisation die Daten von 20 Jahren. Dieses ist im statistischen Sinne gleichbedeutend mit 20 Realisationen à 10 Jahren. Für jede der zehn Realisationen wurden also für den Kontrolllauf die Daten von 60 Jahren zu Grunde gelegt, ebenso für die Zukunftsabschnitte „nahe“ Zukunft (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100).

Für jeden dieser Zeitabschnitte wurden die jährlichen und halbjährlichen Gebietsniederschlags- und -verdunstungssummen sowie die mittleren jährlichen und halbjährlichen Abflüsse berechnet und visualisiert.

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. Dennoch liegt der Fokus der Auswertungen beim Niedrig- und Hochwasserbereich.

Die Ergebnisse des Modells WETTREG-ECHAM5 können nur als eine mögliche zukünftige Entwicklung, nicht jedoch als Prognose, angesehen werden. Die Absolutwerte der Abflüsse, die mit diesen Modelldaten als Antrieb für LARSIM errechnet werden, stimmen aus diesem Grund nicht mit den Messdaten überein. Die direkte Validierung des WETTREG-Kontrolllaufs mit gemessenen Klimadaten ist Gegenstand anderer Untersuchungen (Spekat et al., 2007). Dennoch sollte es möglich sein, die jahreszeitliche Dynamik mit Daten aus dem Kontrolllauf nachzubilden.

Um die Einzugsgebiete aufgrund ihres Abflussregimes zu charakterisieren und die Plausibilität der jahreszeitlichen Dynamik des WETTREG-Kontrolllaufs zu überprüfen, wurden für jede Realisation sowie die gemessenen Abflussdaten die Pardé-Koeffizienten der mittleren monatlichen Abflüsse (MoMMQ), wie auch der mittleren monatlichen Niedrig- (MoMnQ) und Hochwasserabflüsse berechnet.

Der Pardé-Koeffizient ist folgendermaßen definiert:

$$Pardé_{monat} = \frac{\overline{Q_{monat}}}{Q_{jahr}} \quad [ - ]$$

$Q_{monat}$  = langjähriger MoMMQ (bzw. MoMnQ, MoMHQ) [m<sup>3</sup>/s]

$Q_{jahr}$  = langjähriger jährlicher MQ (bzw. MNQ, MHQ) [m<sup>3</sup>/s]

Bei Fehlwerten in den Messdaten wurde folgendermaßen verfahren:

- Sofern die gemessenen Daten nicht den gesamten Zeitraum von 1971-2000 abdecken, jedoch für einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren, wurden sämtliche Pardé-Koeffizienten für den jeweiligen Zeitraum berechnet.
- Wenn Messdaten nur für einen Zeitraum von weniger als 20 Jahren verfügbar waren, wurden wegen der Vergleichbarkeit der Mittelwerte auf eine Darstellung verzichtet. Dies war bei folgenden Pegeln der Fall: Greven/Ems (1998-2000), Kessler 3/Lippe (1992-2000), Betzdorf/Sieg (1993-2000), Niederschelden 2/Sieg (1990-2000), Schieder/Emmer (1983-2000).

Diese Vorgehensweise hat mehrere Vorteile:

- Der Pardé-Koeffizient ist dimensionslos, daher ist es möglich, die Abflussregime unterschiedlicher Einzugsgebiete miteinander zu vergleichen
- Es ist möglich, die Güte der Nachbildung der jahreszeitlichen Dynamik der Messdaten durch den Kontrolllauf direkt zu beurteilen, obwohl u.U. Unterschiede in den Absolutwerten bestehen.

Zur Darstellung der Änderungen, die sich gemäß Szenario A1B gegenüber dem Kontrolllauf ergeben, wurden für jede Realisation und jeden der betrachteten Zeitabschnitte (1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100) die mittleren monatlichen Abflüsse (MoMMQ), sowie die mittleren monatlichen Niedrig- (MoMnQ) und Hochwasserabflüsse (MoMHQ) berechnet und gegenübergestellt. Um den Einfluss der jahreszeitlichen Änderung darzustellen, wurden für alle Realisationen die mittleren Niedrig-, Mittel- und Hochwasserabflüsse der hydrologischen Halbjahre (Sommer: Mai-Oktober, Winter: November-April) sowie des Gesamtjahres ermittelt.

## **8.2 ZEITLICHE ENTWICKLUNG DES NIEDERSCHLAGS, DER VERDUNSTUNG UND DER ABFLÜSSE FÜR DEN KONTROLLLAUF (ZEITRAUM 1971-2000)**

Für jeden Pegelkontrollbereich, das ist das Einzugsgebiet eines Pegels bis zu seinem Oberliegerpegel, wurden für jedes hydrologische Jahr (Nov.-Okt.) und jedes hydrologische Winter- (Nov.-Apr.) und Sommerhalbjahr (Mai-Okt.) die Gebietsniederschlagssummen, sowie die Gebietsverdunstungssummen und die mittleren Abflüsse berechnet. Die Ergebnisse für den Zeitraum 1971-2000 sind in Anlage C dargestellt.

Der jährliche Niederschlag beträgt in diesem Zeitraum im Mittel ca. 900 mm und verteilt sich gleichermaßen auf Sommer und Winter. Im Sommer verdunsten davon im Mittel ca. 390 mm (ca. 42 % des Jahresniederschlags), im Winter etwa 140 mm (ca. 15 % des Jahresniederschlags).

Über den 30jährigen Zeitraum hinweg zeigen die Abflüsse und Niederschläge v.a. während der Winterhalbjahre leichte Rückgänge, während bei der Verdunstung keine Veränderungen bemerkbar sind.

### 8.3 BEWERTUNG DES KONTROLLLAUFS (1971-2000)

Die Pardé-Koeffizienten für die mittlere monatlichen Niedrig-, Mittel- und Hochwasserabflüsse aller Pegel sind für den Zeitraum 1971-2000 in Anlage E dargestellt.

Aufgrund der groben topographischen und klimatischen Verhältnisse der Einzugsgebiete sowie der charakteristischen Jahresgänge, wie sie durch die Darstellung der Pardé-Koeffizienten der Messdaten wiedergegeben werden, lässt sich das Untersuchungsgebiet in vier Teile untergliedern:

1. Die Pegel der Einzugsgebiete der **Rur**, **Sieg**, **Wupper** und **Ruhr** (Ruhr, Lenne, Volme) zeigen zunächst einen recht steilen Anstieg der Pardé-Koeffizienten im Herbst, das Maximum liegt meist im Januar-Februar, wobei an der Rur das Maximum etwas später, an Sieg und Ruhr etwas früher erreicht wird. Das Minimum liegt meist etwas über 0,5 und tritt im August-September auf. An der Rur ist der Jahresgang v.a. beim Niedrig- und Hochwasser stark abgeflacht, was wahrscheinlich auf die Steuerung der Rurtalsperre zurückzuführen ist.
2. Der Jahresgang an den Pegeln der **Erft** und **Niers** zeigen eine deutlich geringere Dynamik. Die ausgeprägteste Amplitude zeigt der Pegel Bliesheim/Erft, während in Neubrück/Erft der Pardé-Koeffizient nahezu das ganze Jahr konstant bei 1,0 liegt. Allen gemein ist ein relativ langsamer Anstieg am Anfang des hydrologischen Jahres. Das Maximum erfolgt im März, das Minimum etwa im September-Oktober. Die Unterschiede im Pardé-Koeffizienten zwischen Niedrig-, Mittel- und Hochwasser sind zudem deutlich geringer als an den anderen Gewässern im Untersuchungsgebiet.
3. Die Dynamik an der **Lippe** (Lippe, Ahse) und an der **Ems** ist deutlich ausgeprägter, wobei die Amplitude an der Lippe geringer als an der Ems ausfällt. Das Maximum tritt etwa im Januar-Februar auf, das Minimum im September. Am Pegel Einen/Ems ist zudem bemerkbar, dass die Pardé-Koeffizienten aller drei Hauptwerte etwa die gleiche Amplitude aufweisen.
4. Die Pegel des **Wesereinzugsgebiets** (Weser, Diemel, Nethe, Emmer, Werre) zeigen beim MoMNHQ einen eher langsamen, beim MoMHQ einen recht schnellen Anstieg des Pardé-Koeffizienten bis zum Maximum im Februar, beim Niedrigwasser im März. Das Minimum ereignet sich im August-September. Im Vergleich zu den anderen Teilgebieten liegt die Amplitude etwa im mittleren Bereich.

Die Ergebnisse werden im Folgenden im Bezug auf diese Untergliederung diskutiert.

### 8.3.1 MITTLERE MONATLICHE NIEDRIGWASSERABFLÜSSE FÜR DEN KONTROLLLAUF (1971-2000)

Die Bewertung der Modellergebnisse erfolgt für die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ) anhand der zehn Realisationen für den Kontrolllauf (1971-2000) und der gemessenen mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse.

Die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse sind für alle Pegel für die zehn Realisationen des Kontrolllaufs gegenüber der Messung (soweit für den gesamten Zeitraum vorhanden) für den Zeitraum 1971-2000 in Anlage E dargestellt.

Bei der Betrachtung des Kontrolllaufs an den Gewässern **Rur**, **Sieg**, **Wupper** und **Ruhr** fällt auf, dass die Bandbreite der zehn Realisationen an der Sieg deutlich höher ist als an den anderen Gewässern. Die größten Unterschiede zwischen Kontrolllauf und Messdaten treten im Frühjahr auf. In diesem Zeitabschnitt liegen die Pardé-Koeffizienten der Messdaten z.T. unterhalb der Spannweite der Realisationen des Kontrolllaufs. Die beträchtlichen Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Jahregängen an der Rur (v.a. am Pegel Zerkall 1/Rur) lassen sich durch die fehlende Steuerung der Rurtalsperre erklären, die nicht mehr ins Modell integriert werden konnte.

An der **Erft** und **Niers** weisen die Realisationen des Kontrolllaufs eine vergleichsweise eher geringe Spannweite auf, jedoch auch eine recht hohe Übereinstimmung mit dem Jahregang der Messdaten auf. Lediglich an der Niers liegen im Sommer die Niedrigwasserabflüsse für den Kontrolllauf höher als die gemessenen. Die geringste Übereinstimmung lässt sich am Pegel Geldern/Gelderner Fleuth beobachten, wo der gemessene Jahregang deutlich mehr Dynamik aufweist als der modellierte. Auch der Validierungslauf mit gemessenen meteorologischen Daten weist eine geringere Dynamik auf als die Messdaten (siehe Anlage D-7), weshalb sich die Differenzen nicht durch die Daten aus dem Modell WETTREG erklären lassen.

An der **Lippe** und der **Ems** bildet der Kontrolllauf den Jahregang der Pardé-Koeffizienten des MNQ zufriedenstellend nach, wenngleich im Frühling eine Überschätzung und im Herbst eine leichte Unterschätzung durch die Simulationen mit Modelldaten bemerkbar ist. Dies fällt v.a. beim Pegel Schermbeck 1/Lippe auf, während der Jahregang am Pegel Bentfeld/Lippe recht gut wiedergegeben wurde.

Das gemessene Niedrigwasserabflussregime im Einzugsgebiet der **Weser** liegt zumeist innerhalb der Bandbreite der Realisationen des Kontrolllaufs. Bei zwei Weserpegeln (Porta Westfalica und Vlotho) ist ein Maximum der gemessenen Pardé-Koeffizienten im April zu beobachten, der vom Modell nicht wiedergegeben wird.

### 8.3.2 MITTLERE MONATLICHE ABFLÜSSE FÜR DEN KONTROLLLAUF (1971-2000)

Die Bewertung der Modellergebnisse erfolgt für die mittleren monatlichen Abflüsse (MoMMQ) anhand der zehn Realisationen für den Kontrolllauf (1971-2000) und der gemessenen mittleren monatlichen Abflüsse.

Die mittleren monatlichen Abflüsse sind für alle Pegel für die zehn Realisationen des Kontrolllaufs gegenüber der Messung (soweit für den gesamten Zeitraum vorhanden) für den Zeitraum 1971-2000 in Anlage E dargestellt.

An den Pegeln der **Rur**, **Sieg**, **Wupper** und **Ruhr** ist der gemessene Jahresverlauf durchweg recht gut durch die Bandbreite der Realisationen des Kontrolllaufs wiedergegeben. Auffällig an einigen gemessenen Jahresgängen, wie z.B. an Ruhr und Sieg, ist ein Abfallen des Pardé-Koeffizienten im Februar, der von den modellierten Ergebnissen nicht reproduziert wird. Am Pegel Betzdorf/Sieg sind zudem v.a. im Winter und Frühjahr Schwankungen zu beobachten, die bei den Modellergebnissen nicht auftreten.

An der **Erft** wird die Dynamik im Jahresgang etwas überschätzt, während sie an den Pegeln Goch/**Niers** und Geldern/Gelderner Fleuth unterschätzt wird. Der sehr flache Jahresverlauf des Pardé-Koeffizienten in Oedt/Niers wird hingegen sehr gut wiedergegeben. Es ist weiterhin zu bemerken, dass an der Erft die Übereinstimmung zwischen Messdaten und Kontrolllauf geringer und an der Niers höher ist als beim MoMNQ.

An der **Lippe** bewegen sich die Pardé-Koeffizienten der gemessenen MoMMQ größtenteils innerhalb der Spannweiten des Kontrolllaufs. Auch an der Lippe liegt der gemessene Pardé-Koeffizient im Februar unter dem im Januar und März. Am Pegel Einen/**Ems** wird die Dynamik durch den Kontrolllauf etwas überschätzt, der Jahresgang wurde dennoch zufriedenstellend reproduziert.

Die Pardé-Koeffizienten an der **Weser** stimmen zwischen Messungen und Modelldaten des Kontrolllaufs sehr gut überein, während an den Nebenflüssen (z.B. am Pegel Welda/Diemel) z.T. deutliche Abweichungen auftreten. Am Pegel Ottbergen/Nethe konnten nichtsdestotrotz noch zufriedenstellende Ergebnisse erreicht werden. Weiterhin fällt auf, dass die Spannweite der zehn Realisationen an der Weser selbst einen weitaus geringeren Effekt hatte als an ihren Nebenflüssen.

### 8.3.3 MITTLERE MONATLICHE HOCHWASSERABFLÜSSE FÜR DEN KONTROLLLAUF (1971-2000)

Die Bewertung der Modellergebnisse erfolgt für die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse (MoMHQ) anhand der zehn Realisationen für den Kontrolllauf (1971-2000) und der gemessenen mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse.

Die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse sind für alle Pegel für die zehn Realisationen des Kontrolllaufs gegenüber der Messung (soweit für den gesamten Zeitraum vorhanden) für den Zeitraum 1971-2000 in Anlage E dargestellt.

Allgemein lässt sich feststellen, dass sich bei den Pegeln, an denen beim MoMMQ eine schlechtere Übereinstimmung als beim MoMNQ zu beobachten war, diese Tendenz noch verstärkt. Umgekehrt sind bei den Pegeln, bei denen im Mittelwasserbereich gemessene und modellierte Jahrgänge besser übereinstimmten als im Niedrigwasserbereich, im Hochwasserbereich noch etwas höhere Übereinstimmungen festzustellen.

An der **Rur** lassen sich beispielsweise im Hochwasserbereich deutlich geringere Übereinstimmungen beobachten als im Niedrig- und Mittelwasser. An der **Sieg, Wupper** und **Ruhr** hingegen liegen die gemessenen Pardé-Koeffizienten innerhalb der Spannweite der Realisationen des Kontrolllaufs, was sich z.T. auch auf die Spannweite zurückführen lässt, die beim MoMHQ deutlich größer ist als im Niedrig- und Mittelwasserbereich.

Etwas stärker als beim MoMMQ wird die Dynamik des Jahrgangs für den MoMHQ an der **Erft** überschätzt. Vor allem am Pegel Neubrück/Erft liegt der Pardé-Koeffizient der Messdaten nahezu das ganze Jahr über konstant bei 1,0, während die Koeffizienten für den Kontrolllauf zwischen 0,8 und 1,4 schwanken. An der **Niers** hingegen wird der ebenfalls sehr flache Jahrgang noch recht gut durch die Daten des Kontrolllaufs nachvollzogen, v.a. am Pegel Oedt/Niers.

Sowohl an der **Lippe** wie auch an der **Ems** bewegen sich im Großteil des Jahres die Pardé-Koeffizienten der Messdaten innerhalb der Spannweite des Kontrolllaufs. Eine Ausnahme stellt bei den Pegeln an der Lippe und Ahse ein lokales Minimum beim gemessenen Jahrgang im Februar dar. Weiterhin liegen die Pardé-Koeffizienten für den Kontrolllauf am Pegel Einen/Ems während der Wintermonate Dezember-Februar höher als die für die Messdaten. In den Sommermonaten dagegen liegen gemessenen Koeffizienten leicht über denen, die mit den Daten des Kontrolllaufs ermittelt wurden.

Wie beim MoMMQ auch weisen die Pardé-Koeffizienten an den drei **Weser**pegeln Karlsruhfen, Vlotho und Porta Westfalica eine hohe Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den aus dem Kontrolllauf ermittelten Daten auf. Größere Diskrepanzen ergeben sich insbesondere an der Diemel (insbes. Welda/Diemel), wo der Jahrgang der Messdaten deutlich flacher verläuft als der des Kontrolllaufs. Bei den Pegeln an Werre, Emmer und Nethe ergibt sich eine visuelle Güte der Anpassung, die zwischen den beiden oben beschriebenen Fällen liegt.

#### **8.4 ZEITLICHE ENTWICKLUNG DES NIEDERSCHLAGS, DER VERDUNSTUNG UND DER ABFLÜSSE FÜR DAS SZENARIO A1B**

Für jeden Pegelkontrollbereich, das ist das Einzugsgebiet eines Pegels bis zu seinem Oberliegerpegel, wurden für jedes hydrologische Jahr (Nov.-Okt.) und jedes hydrologische Winter- (Nov.-Apr.) und Sommerhalbjahr (Mai-Okt.) die Gebietsniederschlagssummen, sowie die Gebietsverdunstungssummen und die mittleren Abflüsse berechnet. Die Ergebnisse für den Zeitraum 2021-2050 („nahe“ Zukunft) sind in Anlage E und für den Zeitraum 2071-2100 („ferne“ Zukunft) in Anlage F dargestellt.

Der jährliche Niederschlag für die „nahe“ Zukunft beträgt im Mittel ca. 930 mm und verteilt sich gleichermaßen auf Sommer und Winter. Im Sommer verdunsten davon im Mittel ca. 380 mm (ca. 41 % des Jahresniederschlags), im Winter etwa 150 mm (ca. 16 % des Jahresniederschlags).

Während der jährliche Niederschlag in der „fernen“ Zukunft etwa gleich bleibt, ergibt sich für die jahreszeitliche Verteilung ein anderes Bild als bei den übrigen beiden Zeitabschnitten. Im Winter fallen im Mittel über alle Teilgebiete etwa 550 mm, während die Sommerniederschläge nur noch etwas über 400 mm ausmachen. Der Anteil des Jahresniederschlags, der verdunstet, ändert sich nur kaum: im Winter verdunsten im Mittel 170 mm, im Sommer 370 mm (17 % bzw. 39 % des Jahresniederschlags).

Im Mittel betrachtet liegen die winterlichen Abflüsse der „fernen“ Zukunft deutlich über denen der „nahen“ Zukunft. Während jedoch im zeitlichen Verlauf der „nahen“ Zukunft weder im Winter- noch im Sommerhalbjahr merkliche Änderungen auftreten, verhalten sich die Winterniederschläge und -abflüsse in der „fernen“ Zukunft, insbesondere während der letzten Dekade 2091-2100, rückläufig.

## **8.5 ABFLUSSVERÄNDERUNGEN GEMÄSS SZENARIO A1B GEGENÜBER DEM KONTROLLLAUF**

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

Um die Abflussveränderungen, die sich aus Szenario A1B gegenüber dem Kontrolllauf ergeben, im direkten Vergleich zu demonstrieren, werden in Anlage G die mittleren jährlichen, halbjährlichen, sowie monatlichen Gewässerhauptzahlen (MNQ, MMQ und MHQ) für die Zeiträume 1971-2000, 2021-2050 und 2071-2100 gegenübergestellt.

### **8.5.1 ABFLUSSVERÄNDERUNG DER JAHRESZEITLICHEN NIEDRIGWASSERABFLÜSSE**

In Tabelle 8.4 sind für die einzelnen Pegel und Jahreszeiten die mittleren Veränderungen gegenüber dem Kontrolllauf (1971-1990) für alle Szenarien dargestellt. Die detaillierten graphischen Darstellungen befinden sich in Anlage G-1.

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass sich der MNQ während der Sommermonate in der „nahen“ Zukunft um < 5 % reduzieren wird, in der „fernen“ Zukunft sind dagegen Abnahmen von bis 10 % bis 20 % möglich. Während der Wintermonate ergeben sich in der „nahen“ Zukunft nur geringfügige Änderungen, in der „fernen“ Zukunft sind Zunahmen von 20 % bis 40 % möglich.

Die Ergebnisse zeigen die stärksten Zunahmen während der Wintermonate an Mittelgebirgsflüssen wie Ruhr und Sieg, weitaus geringere dagegen bei den linksrheinischen Zuflüssen Erft und Niers.

**Tabelle 8.4:** prozentuale Änderung der mittleren jahreszeitlichen MNQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Westtinnen/Ahse</i>					
DJF	2.1	1.7	1.6	-16.5	-20.7
MAM	3.9	3.8	4.4	-2.7	14.8
JJA	1.7	1.6	1.4	-5.7	-16.2
SON	0.9	0.7	0.4	-22.5	-47.0
<i>Westheim/Diemel</i>					
DJF	2.6	2.6	3.0	0	14.8
MAM	3.4	3.4	3.5	0.0	0.8
JJA	2.0	1.9	1.7	-5.1	-12.5
SON	1.2	1.1	0.9	-11.4	-21.4
<i>Welda/Diemel</i>					
DJF	1.4	1.4	1.6	0	11.6
MAM	2.2	2.1	2.3	-1.1	6.4
JJA	1.5	1.4	1.4	-4.1	-5.5
SON	1.0	1.0	0.9	-5.5	-7.7
<i>Schieder/Emmer</i>					
DJF	3.0	3.0	3.1	0	4.1
MAM	3.9	3.8	3.9	-1.4	0.5
JJA	1.9	1.8	1.6	-6.7	-15.9
SON	1.3	1.2	1.0	-12.7	-25.8
<i>Einen/Ems</i>					
DJF	8.9	9.4	10.5	5.6	17.8
MAM	10.5	10.4	10.8	-1.0	3.0
JJA	3.5	3.2	2.8	-9.0	-18.5
SON	2.2	1.9	1.7	-11.7	-24.1
<i>Greven/Ems</i>					
DJF	16.6	16.7	18.1	1.2	9.4
MAM	22.2	22.2	23.2	0.0	4.7
JJA	8.0	7.4	6.8	-7.4	-15.9
SON	5.0	4.4	3.9	-10.4	-21.5
<i>Bliesheim/Erft</i>					
DJF	1.3	1.3	1.4	0	11.5
MAM	2.0	1.9	2.0	-3.0	0.9
JJA	1.2	1.1	1.1	-3.7	-6.4
SON	0.8	0.7	0.7	-4.8	-4.5

noch Tabelle 8.4: prozentuale Änderung der mittleren jahreszeitlichen MNQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Neubrück/Erft</i>					
DJF	7.4	7.5	8.2	0.4	9.6
MAM	8.8	8.9	9.8	1.0	10.9
JJA	7.3	7.4	7.8	1.1	7.3
SON	6.3	6.3	6.8	0.4	7.0
<i>Geldern/Gelderner Fleuth</i>					
DJF	0.6	0.6	0.6	0	0
MAM	0.8	0.9	1.1	3.9	30.7
JJA	0.6	0.6	0.6	0	0
SON	0.5	0.4	0.5	-3.2	2.2
<i>Rönkhausen/Lenne</i>					
DJF	11.4	12.8	15.0	12.9	32.6
MAM	12.1	12.3	12.4	1.3	2.7
JJA	7.0	6.8	6.4	-3.0	-8.9
SON	5.8	5.4	4.9	-5.9	-14.8
<i>Altena/Lenne</i>					
DJF	15.6	17.4	20.3	11.7	30.3
MAM	16.5	16.8	17.0	1.6	2.8
JJA	9.2	8.9	8.4	-3.1	-9.3
SON	7.4	6.9	6.2	-6.2	-15.7
<i>Bentfeld/Lippe</i>					
DJF	6.4	6.1	6.5	-4.2	1.7
MAM	9.6	9.6	11.3	0	17.9
JJA	5.0	4.7	4.5	-6.2	-11.3
SON	3.5	3.2	3.0	-8.2	-15.0
<i>Schermbeck 1/Lippe</i>					
DJF	22.9	22.3	23.7	-2.4	3.6
MAM	34.6	34.6	40.3	0	16.5
JJA	19.4	18.1	17.5	-6.4	-9.7
SON	13.0	11.8	11.0	-9.0	-14.8
<i>Kesseler 3/Lippe</i>					
DJF	13.0	12.5	13.2	-3.1	2.3
MAM	19.2	19.2	22.6	0	18.0
JJA	10.6	9.9	9.4	-6.8	-11.5
SON	7.5	6.8	6.2	-8.9	-16.0

noch Tabelle 8.4: prozentuale Änderung der mittleren jahreszeitlichen MNQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Ottbergen/Nethe</i>					
DJF	3.1	2.8	3.0	-8.2	-2.9
MAM	4.8	4.8	5.0	0	4.9
JJA	2.7	2.6	2.4	-5.2	-12.6
SON	1.6	1.4	1.2	-12.6	-24.5
<i>Oedt/Niers</i>					
DJF	2.1	2.2	2.4	3.4	14.1
MAM	2.4	2.5	2.8	3.9	18.6
JJA	2.1	2.1	2.3	0	12.6
SON	1.8	1.8	2.0	0	11.1
<i>Goch/Niers</i>					
DJF	4.6	4.5	4.7	-1.5	3.1
MAM	6.8	7.0	8.3	3.3	22.2
JJA	4.5	4.6	4.9	2.2	9.6
SON	3.1	3.1	3.3	0	6.2
<i>Meschede/Ruhr</i>					
DJF	4.9	5.4	6.4	10.8	29.9
MAM	5.1	5.0	5.0	-2.3	-1.6
JJA	3.3	3.2	3.0	-3.9	-9.9
SON	2.6	2.4	2.1	-9.4	-18.4
<i>Villigst/Ruhr</i>					
DJF	14.5	15.5	17.6	7.0	21.7
MAM	16.1	15.8	16.1	-1.4	0.3
JJA	9.0	8.6	7.9	-4.5	-11.3
SON	7.1	6.5	6.0	-8.3	-16.0
<i>Hattingen/Ruhr</i>					
DJF	41.6	45.1	51.1	8.7	23.1
MAM	45.7	46.2	47.2	1.4	3.6
JJA	24.1	23.2	21.4	-3.6	-11.1
SON	18.1	16.6	14.7	-8.1	-18.5
<i>Zerkall 1/Rur</i>					
DJF	8.9	9.0	9.6	1.0	7.5
MAM	10.7	11.0	11.4	3.1	6.8
JJA	8.1	8.2	7.8	1.4	-3.3
SON	6.3	6.2	5.8	-2.5	-8.3

noch Tabelle 8.4: prozentuale Änderung der mittleren jahreszeitlichen MNQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Jülich Stadion/Rur</i>					
DJF	13.2	13.3	14.0	0.8	6.2
MAM	15.7	16.1	16.4	3.1	4.8
JJA	11.1	11.2	10.6	0.6	-4.9
SON	8.7	8.4	7.8	-3.3	-9.6
<i>Stah/Rur</i>					
DJF	16.3	16.5	17.3	1.2	6.4
MAM	19.7	20.2	21.0	3.2	7.0
JJA	14.2	14.3	13.7	0.7	-3.3
SON	11.1	10.7	10.2	-3.2	-8.0
<i>Niederschelden 2/Sieg</i>					
DJF	4.2	4.8	5.8	14.5	38.7
MAM	4.2	4.3	4.3	2.2	2.0
JJA	1.4	1.3	1.1	-7.2	-16.6
SON	0.8	0.6	0.5	-20.4	-41.8
<i>Menden/Sieg</i>					
DJF	29.6	32.2	37.2	9.2	26.0
MAM	29.0	29.4	28.7	1.5	-0.9
JJA	10.1	9.1	8.1	-9.0	-19.1
SON	7.0	5.9	5.0	-15.4	-28.3
<i>Betzdorf/Sieg</i>					
DJF	7.8	8.9	10.9	14.9	40.6
MAM	7.6	7.8	7.7	2.1	1.8
JJA	2.2	2.0	1.8	-9.4	-19.2
SON	1.3	1.0	0.8	-21.8	-40.5
<i>Hagen Eckesey/Volme</i>					
DJF	5.1	5.6	6.4	8.8	24.1
MAM	5.3	5.6	5.6	4.8	6.0
JJA	2.5	2.5	2.2	0	-12.2
SON	1.7	1.5	1.2	-11.6	-27.4
<i>Ahmsen/Werre</i>					
DJF	3.8	3.8	4.2	0	11.3
MAM	5.3	5.3	5.8	0	8.3
JJA	3.2	3.0	2.9	-5.6	-10.5
SON	2.0	1.8	1.6	-9.9	-19.1

noch Tabelle 8.4: prozentuale Änderung der mittleren jahreszeitlichen MNQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Karlshafen/Weser</i>					
DJF	89.0	85.1	92.2	-4.2	3.7
MAM	118.1	117.0	126.6	-0.8	7.3
JJA	72.2	69.5	68.8	-3.8	-4.6
SON	54.4	51.0	48.5	-6.1	-10.8
<i>Vlotho/Weser</i>					
DJF	107.6	102.5	109.5	-4.5	1.9
MAM	146.4	145.5	157.7	-0.4	7.9
JJA	89.6	86.3	85.1	-3.6	-5.0
SON	66.0	61.9	58.8	-6.0	-10.8
<i>Porta Westfalica/Weser</i>					
DJF	118.2	113.4	121.3	-3.8	2.7
MAM	160.3	159.6	173.0	-0.3	8.1
JJA	99.0	95.3	94.1	-3.7	-4.8
SON	73.0	68.6	65.4	-5.9	-10.3
<i>Opladen/Wupper</i>					
DJF	9.0	9.9	11.1	10.2	23.0
MAM	9.1	9.4	9.6	2.8	4.7
JJA	6.0	5.9	5.5	-1.1	-8.1
SON	5.0	4.6	4.1	-6.5	-16.9

## **8.5.2 ABFLUSSVERÄNDERUNG DER JAHRESZEITLICHEN MITTELWASSERABFLÜSSE**

In Tabelle 8.5 sind für die einzelnen Pegel und Jahreszeiten die mittleren Veränderungen der mittleren MQ gegenüber dem Kontrolllauf (1971-1990) für alle drei Szenarien dargestellt. Die detaillierten graphischen Darstellungen befinden sich in Anlage G-2.

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass sich der MMQ während der Sommermonate in der „nahen“ Zukunft um < 10 % reduzieren wird, in der „fernen“ Zukunft dagegen Abnahmen von bis 10 % bis 25 % möglich. Während der Wintermonate ergeben sich in der „nahen“ Zukunft nur geringfügige Änderungen, in der „fernen“ Zukunft sind Zunahmen von 20 % bis 60 % möglich.

Die Ergebnisse zeigen die stärksten Zunahmen während der Wintermonate an Mittelgebirgsflüssen wie Ruhr und Sieg, weitaus geringere dagegen bei den linksrheinischen Zuflüssen Erft und Niers.

**Tabelle 8.5:** Änderung der mittleren jahreszeitlichen MMQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Westtünnen/Ahse</i>					
DJF	3.8	3.4	3.8	-11.2	0.5
MAM	6.1	6.0	7.0	-0.8	15.2
JJA	2.7	2.5	2.2	-5.2	-17.9
SON	1.4	1.1	0.8	-20.7	-39.4
<i>Westheim/Diemel</i>					
DJF	6.2	6.7	8.5	7.3	36.8
MAM	6.4	6.1	6.2	-4.4	-3.8
JJA	2.6	2.5	2.2	-2.5	-13.7
SON	1.7	1.5	1.4	-12.8	-21.2
<i>Welda/Diemel</i>					
DJF	2.6	2.6	3.5	0	35.0
MAM	3.9	3.7	4.0	-5.0	4.1
JJA	1.8	1.7	1.6	-2.9	-6.9
SON	1.2	1.1	1.1	-4.9	-4.5
<i>Schieder/Emmer</i>					
DJF	7.2	7.1	8.4	-1.2	17.4
MAM	8.0	7.7	7.8	-2.9	-1.8
JJA	3.0	2.7	2.4	-7.4	-20.2
SON	2.1	1.8	1.5	-15.7	-26.7
<i>Einen/Ems</i>					
DJF	22.1	23.2	28.7	5.3	30.3
MAM	20.9	21.0	21.5	0.4	2.6
JJA	6.1	5.7	5.0	-7.3	-18.2
SON	4.8	4.2	4.0	-10.7	-15.5
<i>Greven/Ems</i>					
DJF	39.6	40.9	50.2	3.7	27.2
MAM	40.3	40.7	41.8	0.8	3.6
JJA	12.8	11.8	10.5	-7.4	-17.8
SON	9.3	8.2	7.6	-10.3	-17.4
<i>Bliesheim/Erft</i>					
DJF	2.8	2.8	3.7	0	34.3
MAM	4.1	4.0	4.0	-1.9	-2.2
JJA	1.8	1.8	1.7	0.0	-7.0
SON	1.2	1.1	1.2	-5.7	-3.0

noch Tabelle 8.5: Änderung der mittleren jahreszeitlichen MMQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Neubrück/Erft</i>					
DJF	9.9	10.1	11.9	2.0	20.3
MAM	11.9	12.0	12.7	0.8	7.0
JJA	8.9	9.0	9.3	1.2	4.8
SON	7.5	7.5	8.0	-0.6	5.8
<i>Geldern/Gelderner Fleuth</i>					
DJF	0.8	0.8	0.9	0	15.2
MAM	1.0	1.1	1.4	5.7	36.0
JJA	0.7	0.7	0.7	0	0
SON	0.5	0.5	0.5	0	0
<i>Rönkhausen/Lenne</i>					
DJF	30.2	34.9	42.8	16.1	42.2
MAM	24.0	23.8	23.4	-0.8	-2.5
JJA	9.5	9.2	8.1	-2.7	-13.7
SON	8.5	7.7	6.9	-9.2	-18.9
<i>Altena/Lenne</i>					
DJF	42.1	48.4	59.1	15.4	41.0
MAM	33.1	33.0	32.3	-0.2	-2.3
JJA	12.7	12.3	10.8	-3.1	-14.7
SON	11.2	10.0	8.9	-9.8	-19.7
<i>Bentfeld/Lippe</i>					
DJF	11.7	11.3	13.8	-2.9	18.5
MAM	14.7	14.6	17.1	-0.7	16.4
JJA	6.6	6.2	5.7	-5.8	-12.4
SON	4.7	4.2	4.0	-9.1	-14.4
<i>Schermbeck 1/Lippe</i>					
DJF	43.6	43.3	53.0	-0.4	21.9
MAM	54.8	55.5	63.2	1.2	15.3
JJA	26.5	24.9	23.4	-5.8	-11.8
SON	18.6	16.7	15.9	-9.7	-14.3
<i>Kesseler 3/Lippe</i>					
DJF	22.9	22.4	27.5	-1.9	20.2
MAM	28.9	29.0	33.7	0.5	16.8
JJA	14.1	13.3	12.3	-5.8	-12.4
SON	10.0	9.0	8.5	-10.0	-15.2

noch Tabelle 8.5: Änderung der mittleren jahreszeitlichen MMQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Ottbergen/Nethe</i>					
DJF	6.7	6.3	8.1	-5.8	20.7
MAM	8.4	8.2	8.5	-2.2	1.8
JJA	3.5	3.3	3.0	-4.3	-13.0
SON	2.0	1.7	1.5	-14.0	-23.9
<i>Oedt/Niers</i>					
DJF	2.9	3.0	3.5	4.6	22.0
MAM	3.0	3.1	3.5	4.8	18.0
JJA	2.6	2.6	2.7	0	7.1
SON	2.2	2.2	2.3	0	8.5
<i>Goch/Niers</i>					
DJF	6.1	6.1	7.0	0	14.9
MAM	8.3	8.7	10.3	4.6	24.0
JJA	5.5	5.6	5.9	1.2	7.0
SON	3.8	3.8	4.0	0	4.1
<i>Meschede/Ruhr</i>					
DJF	12.3	13.3	16.2	8.5	32.6
MAM	10.2	9.8	9.8	-3.6	-3.3
JJA	4.7	4.4	3.9	-5.1	-16.7
SON	3.9	3.4	3.1	-12.6	-19.5
<i>Villigst/Ruhr</i>					
DJF	33.2	35.1	43.6	6.0	31.6
MAM	31.3	31.2	32.2	-0.1	2.9
JJA	12.9	12.3	10.7	-4.9	-16.8
SON	10.3	9.2	8.6	-10.4	-16.1
<i>Hattingen/Ruhr</i>					
DJF	97.9	107.7	131.1	10.4	34.3
MAM	84.4	85.5	86.1	1.3	2.1
JJA	34.4	33.0	28.7	-3.8	-16.2
SON	28.0	24.8	22.4	-10.7	-19.6
<i>Zerkall 1/Rur</i>					
DJF	16.2	17.4	22.0	7.6	36.2
MAM	15.4	15.5	15.6	1.1	1.9
JJA	9.5	9.6	9.0	1.3	-5.3
SON	7.6	7.3	7.0	-3.6	-8.5

noch Tabelle 8.5: Änderung der mittleren jahreszeitlichen MMQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Jülich Stadion/Rur</i>					
DJF	24.3	25.8	31.9	6.5	31.6
MAM	23.9	24.3	24.1	1.5	0.8
JJA	13.6	13.7	12.6	0.8	-7.4
SON	10.7	10.2	9.7	-4.3	-9.3
<i>Stah/Rur</i>					
DJF	28.8	30.5	37.4	6.1	30.0
MAM	29.8	30.3	31.0	1.8	4.2
JJA	17.6	17.8	16.6	1.0	-5.8
SON	13.8	13.3	12.8	-3.8	-7.4
<i>Niederschelden 2/Sieg</i>					
DJF	15.5	18.0	22.2	16.3	43.5
MAM	11.7	11.6	11.1	-0.3	-4.9
JJA	3.3	3.0	2.5	-6.7	-21.9
SON	2.9	2.3	1.9	-18.5	-32.6
<i>Menden/Sieg</i>					
DJF	86.6	93.6	109.4	8.5	26.8
MAM	66.6	67.2	63.3	1.0	-4.8
JJA	19.0	17.2	13.8	-8.9	-26.4
SON	16.2	13.1	11.2	-18.1	-30.0
<i>Betzdorf/Sieg</i>					
DJF	26.9	30.6	37.3	14.3	39.1
MAM	20.0	19.9	19.1	-0.4	-4.4
JJA	5.2	4.8	3.9	-7.6	-24.8
SON	4.6	3.6	3.0	-19.9	-33.3
<i>Hagen Eckesey/Volme</i>					
DJF	13.8	15.2	18.2	11.0	32.4
MAM	11.1	11.6	11.2	4.9	0.9
JJA	4.3	4.1	3.4	-5.6	-20.4
SON	3.6	3.1	2.7	-12.7	-24.2
<i>Ahmsen/Werre</i>					
DJF	8.4	8.7	10.5	4.3	25.8
MAM	10.3	10.3	11.1	0.3	8.4
JJA	4.8	4.5	4.1	-6.8	-14.7
SON	3.3	2.9	2.7	-10.5	-17.3

noch Tabelle 8.5: Änderung der mittleren jahreszeitlichen MMQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Karlshafen/Weser</i>					
DJF	165.9	170.3	220.5	3.0	33.2
MAM	186.6	180.5	196.6	-3.2	5.5
JJA	87.9	85.0	82.3	-3.3	-6.2
SON	66.8	61.8	59.3	-7.3	-11.0
<i>Vlotho/Weser</i>					
DJF	196.2	199.1	254.3	1.8	29.9
MAM	225.7	220.4	241.2	-2.3	7.0
JJA	107.6	104.3	100.8	-3.0	-6.1
SON	79.8	73.9	70.7	-7.2	-11.3
<i>Porta Westfalica/Weser</i>					
DJF	212.4	215.8	273.6	1.9	29.0
MAM	245.0	239.9	263.1	-2.1	7.5
JJA	118.9	115.2	111.5	-3.1	-6.1
SON	88.5	82.0	78.7	-7.1	-10.8
<i>Opladen/Wupper</i>					
DJF	21.2	23.2	26.8	9.7	26.6
MAM	17.1	17.8	17.2	4.0	0.5
JJA	9.4	8.9	7.8	-5.6	-16.9
SON	8.9	8.2	7.5	-7.2	-15.9

### **8.5.3 ABFLUSSVERÄNDERUNG DER JAHRESZEITLICHEN HOCHWASSERABFLÜSSE**

In Tabelle 8.6 sind für die einzelnen Pegel und Jahreszeiten die Veränderungen der mittleren MHQ gegenüber dem Kontrolllauf (1971-1990) für alle drei Szenarien dargestellt. Die detaillierten graphischen Darstellungen befinden sich in Anlage G-3.

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass sich der MNQ während der Sommermonate in der „nahen“ Zukunft um < 10 % reduzieren wird, in der „fernen“ Zukunft sind dagegen Abnahmen von bis 10 % bis 30 % möglich. Während der Wintermonate ergeben sich in der „nahen“ Zukunft nur geringfügige Änderungen, in der „fernen“ Zukunft sind Zunahmen von 20 % bis 60 % möglich.

Auch hier zeigen die Ergebnisse die stärksten Zunahmen während der Wintermonate an Mittelgebirgsflüssen wie Ruhr und Sieg, weitaus geringere dagegen bei den linksrheinischen Zuflüssen Erft und Niers.

**Tabelle 8.6:** Änderung der mittleren jahreszeitlichen MHQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Westtünnen/Ahse</i>					
DJF	7.5	6.6	8.2	-11.3	9.0
MAM	11.2	11.1	13.2	-0.9	17.8
JJA	4.8	4.5	3.9	-3.9	-17.0
SON	2.7	2.2	1.7	-20.6	-35.6
<i>Westheim/Diemel</i>					
DJF	14.4	14.6	18.6	2.0	29.7
MAM	13.4	12.8	12.9	-3.7	-3.4
JJA	3.6	3.7	3.1	3.0	-14.7
SON	2.9	2.5	2.2	-12.5	-21.1
<i>Welda/Diemel</i>					
DJF	5.5	5.3	7.9	-3.1	43.7
MAM	8.2	7.6	8.7	-6.7	6.0
JJA	2.3	2.3	2.1	0	-8.0
SON	1.5	1.4	1.5	-5.0	1.6
<i>Schieder/Emmer</i>					
DJF	18.2	16.6	20.4	-7.8	12.6
MAM	19.7	18.4	19.0	-6.0	-3.1
JJA	5.4	5.1	4.3	-5.4	-19.8
SON	4.2	3.3	2.9	-20.0	-29.8
<i>Einen/Ems</i>					
DJF	49.3	49.0	62.1	0.1	26.6
MAM	44.1	44.6	46.4	1.4	5.2
JJA	11.4	10.8	9.7	-4.4	-14.0
SON	10.7	9.4	8.9	-10.2	-14.7
<i>Greven/Ems</i>					
DJF	90.3	89.7	114.6	-0.1	27.4
MAM	82.7	83.8	86.8	1.6	5.0
JJA	22.6	20.8	18.4	-6.8	-17.5
SON	19.1	16.8	15.4	-10.1	-17.5
<i>Bliesheim/Erft</i>					
DJF	6.3	6.1	8.2	-3.4	31.3
MAM	9.0	8.8	8.8	-2.1	-2.0
JJA	3.4	3.6	3.3	5.5	-3.8
SON	2.5	2.3	2.5	-4.6	1.9

noch Tabelle 8.6: Änderung der mittleren jahreszeitlichen MHQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Neubrück/Erft</i>					
DJF	15.0	14.9	18.6	-0.5	23.8
MAM	18.1	18.1	18.8	-0.2	4.1
JJA	11.8	12.2	12.3	3.1	3.9
SON	10.2	10.0	10.6	-1.4	4.1
<i>Geldern/Gelderner Fleuth</i>					
DJF	1.0	1.0	1.2	0	23.8
MAM	1.3	1.4	1.9	6.2	43.1
JJA	0.9	0.9	0.9	0	4.3
SON	0.7	0.6	0.7	-3.0	-0.2
<i>Rönkhausen/Lenne</i>					
DJF	73.6	77.4	91.1	5.4	24.2
MAM	53.7	52.6	51.7	-1.9	-3.6
JJA	14.4	14.3	11.7	-0.5	-18.5
SON	14.9	13.0	11.2	-9.0	-23.3
<i>Altena/Lenne</i>					
DJF	106.0	110.3	130.2	4.4	23.2
MAM	75.9	74.7	73.3	-1.4	-3.1
JJA	19.7	19.4	15.7	-0.9	-19.7
SON	20.4	17.6	15.0	-9.8	-24.3
<i>Bentfeld/Lippe</i>					
DJF	24.0	21.8	27.9	-8.6	16.6
MAM	27.3	26.2	30.1	-3.9	10.5
JJA	9.6	9.3	8.6	-3.3	-10.6
SON	7.7	6.8	6.4	-11.1	-15.4
<i>Schermbeck 1/Lippe</i>					
DJF	80.9	77.4	100.4	-4.0	24.5
MAM	93.3	94.5	109.2	1.2	17.1
JJA	39.0	37.4	34.2	-3.7	-12.1
SON	29.9	26.6	25.1	-10.5	-15.4
<i>Kesseler 3/Lippe</i>					
DJF	42.3	39.6	51.5	-5.9	22.0
MAM	49.6	49.2	56.9	-0.6	14.8
JJA	20.4	19.7	18.1	-3.2	-11.4
SON	15.5	13.6	12.9	-11.3	-15.8

noch Tabelle 8.6: Änderung der mittleren jahreszeitlichen MHQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Ottbergen/Nethe</i>					
DJF	16.5	14.6	20.2	-10.2	23.2
MAM	18.7	18.2	19.0	-2.5	2.2
JJA	5.0	4.9	4.3	-2.1	-13.4
SON	3.2	2.6	2.3	-18.0	-25.5
<i>Oedt/Niers</i>					
DJF	3.9	4.0	4.8	3.7	23.2
MAM	3.9	4.2	4.7	5.4	18.8
JJA	3.3	3.3	3.4	0	3.5
SON	2.8	2.8	3.0	0	5.7
<i>Goch/Niers</i>					
DJF	8.2	8.3	9.8	1.6	19.8
MAM	10.2	10.8	13.1	5.1	28.0
JJA	6.8	6.9	7.2	1.4	5.7
SON	4.9	4.8	5.0	-1.7	2.0
<i>Meschede/Ruhr</i>					
DJF	29.9	29.1	35.1	-2.3	17.9
MAM	22.3	21.4	21.4	-3.7	-3.7
JJA	7.7	7.4	6.1	-2.5	-20.3
SON	7.1	5.9	5.6	-13.8	-19.9
<i>Villigst/Ruhr</i>					
DJF	71.5	69.8	89.2	-2.0	25.2
MAM	63.3	63.0	68.1	-0.2	8.0
JJA	21.0	20.5	17.2	-2.1	-17.8
SON	17.9	15.6	14.7	-11.8	-16.8
<i>Hattingen/Ruhr</i>					
DJF	216.2	219.1	265.3	1.7	23.1
MAM	169.3	170.6	176.2	0.9	4.3
JJA	53.5	52.6	43.6	-1.2	-18.2
SON	50.1	43.6	38.7	-11.0	-21.5
<i>Zerkall 1/Rur</i>					
DJF	33.3	34.6	45.6	4.6	37.8
MAM	26.7	25.9	26.1	-3.0	-1.6
JJA	12.1	12.3	11.1	2.2	-8.1
SON	10.4	9.8	9.4	-5.2	-8.5

noch Tabelle 8.6: Änderung der mittleren jahreszeitlichen MHQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Jülich Stadion/Rur</i>					
DJF	48.1	49.4	63.9	3.5	33.8
MAM	41.4	41.0	41.4	-0.9	0.5
JJA	17.7	18.0	15.9	2.1	-10.1
SON	14.6	13.6	13.1	-5.7	-9.3
<i>Stah/Rur</i>					
DJF	54.2	55.8	71.8	3.5	33.2
MAM	49.6	49.4	51.9	-0.4	5.0
JJA	22.8	23.3	21.0	2.4	-7.8
SON	18.7	17.7	17.2	-4.7	-7.3
<i>Niederschelden 2/Sieg</i>					
DJF	50.5	52.0	61.6	3.4	22.7
MAM	34.7	34.4	32.6	-0.4	-5.4
JJA	8.4	8.1	6.5	-3.2	-21.3
SON	9.1	7.3	6.2	-16.1	-30.0
<i>Menden/Sieg</i>					
DJF	213.0	208.1	236.0	-1.8	11.4
MAM	152.5	152.6	144.3	0.0	-5.3
JJA	37.3	34.5	25.6	-6.3	-30.0
SON	37.5	30.1	24.9	-17.3	-32.3
<i>Betzdorf/Sieg</i>					
DJF	77.8	79.3	93.4	2.4	20.7
MAM	54.4	53.3	51.1	-1.6	-5.5
JJA	12.6	11.8	9.2	-4.6	-25.6
SON	13.4	10.5	8.9	-17.8	-32.0
<i>Hagen Eckesey/Volme</i>					
DJF	37.4	36.9	43.0	-0.8	15.7
MAM	26.0	27.6	25.8	6.3	-0.7
JJA	8.9	8.3	6.8	-5.7	-23.2
SON	9.4	8.1	7.0	-11.8	-24.0
<i>Ahmsen/Werre</i>					
DJF	19.5	19.0	23.3	-1.9	19.7
MAM	23.0	22.4	24.8	-2.4	7.8
JJA	8.7	8.1	7.4	-6.6	-13.9
SON	6.7	5.8	5.4	-11.7	-17.6

noch Tabelle 8.6: Änderung der mittleren jahreszeitlichen MHQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	<b>Kontrollzeit- raum [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>„nahe“ Zukunft [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>„ferne“ Zukunft [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Δ „nahe“ Zukunft [%]</b>	<b>Δ „ferne“ Zukunft [%]</b>
<i>Karlshafen/Weser</i>					
DJF	329.1	328.3	466.6	0.2	42.5
MAM	329.9	312.0	349.2	-5.5	6.1
JJA	114.1	112.4	104.2	-1.4	-8.5
SON	89.3	80.9	78.3	-8.5	-11.7
<i>Vlotho/Weser</i>					
DJF	372.1	368.4	513.1	-0.6	38.4
MAM	388.6	370.6	421.8	-4.7	8.8
JJA	135.8	134.3	125.1	-0.9	-7.6
SON	103.5	93.9	90.1	-8.5	-12.4
<i>Porta Westfalica/Weser</i>					
DJF	396.8	392.8	542.2	-0.6	37.1
MAM	417.5	398.8	456.4	-4.6	9.5
JJA	149.7	147.9	138.2	-1.1	-7.5
SON	114.6	104.2	100.3	-8.3	-12.0
<i>Opladen/Wupper</i>					
DJF	51.8	49.9	56.0	-3.1	8.7
MAM	36.5	38.4	35.4	5.3	-2.8
JJA	17.4	16.2	13.6	-6.6	-21.3
SON	19.1	17.8	15.8	-5.6	-16.2

**Tabelle 8.7:** Änderung der mittleren jahreszeitlichen MMQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Westtünnen/Ahse</i>					
DJF	3.8	3.4	3.8	-11.2	0.5
MAM	6.1	6.0	7.0	-0.8	15.2
JJA	2.7	2.5	2.2	-5.2	-17.9
SON	1.4	1.1	0.8	-20.7	-39.4
<i>Westheim/Diemel</i>					
DJF	6.2	6.7	8.5	7.3	36.8
MAM	6.4	6.1	6.2	-4.4	-3.8
JJA	2.6	2.5	2.2	-2.5	-13.7
SON	1.7	1.5	1.4	-12.8	-21.2
<i>Welda/Diemel</i>					
DJF	2.6	2.6	3.5	0	35.0
MAM	3.9	3.7	4.0	-5.0	4.1
JJA	1.8	1.7	1.6	-2.9	-6.9
SON	1.2	1.1	1.1	-4.9	-4.5
<i>Schieder/Emmer</i>					
DJF	7.2	7.1	8.4	-1.2	17.4
MAM	8.0	7.7	7.8	-2.9	-1.8
JJA	3.0	2.7	2.4	-7.4	-20.2
SON	2.1	1.8	1.5	-15.7	-26.7
<i>Einen/Ems</i>					
DJF	22.1	23.2	28.7	5.3	30.3
MAM	20.9	21.0	21.5	0.4	2.6
JJA	6.1	5.7	5.0	-7.3	-18.2
SON	4.8	4.2	4.0	-10.7	-15.5
<i>Greven/Ems</i>					
DJF	39.6	40.9	50.2	3.7	27.2
MAM	40.3	40.7	41.8	0.8	3.6
JJA	12.8	11.8	10.5	-7.4	-17.8
SON	9.3	8.2	7.6	-10.3	-17.4
<i>Bliesheim/Erft</i>					
DJF	2.8	2.8	3.7	0	34.3
MAM	4.1	4.0	4.0	-1.9	-2.2
JJA	1.8	1.8	1.7	0.0	-7.0
SON	1.2	1.1	1.2	-5.7	-3.0

noch Tabelle 8.7: Änderung der mittleren jahreszeitlichen MMQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Neubrück/Erft</i>					
DJF	9.9	10.1	11.9	2.0	20.3
MAM	11.9	12.0	12.7	0.8	7.0
JJA	8.9	9.0	9.3	1.2	4.8
SON	7.5	7.5	8.0	-0.6	5.8
<i>Geldern/Gelderner Fleuth</i>					
DJF	0.8	0.8	0.9	0	15.2
MAM	1.0	1.1	1.4	5.7	36.0
JJA	0.7	0.7	0.7	0	0
SON	0.5	0.5	0.5	0	0
<i>Rönkhausen/Lenne</i>					
DJF	30.2	34.9	42.8	16.1	42.2
MAM	24.0	23.8	23.4	-0.8	-2.5
JJA	9.5	9.2	8.1	-2.7	-13.7
SON	8.5	7.7	6.9	-9.2	-18.9
<i>Altena/Lenne</i>					
DJF	42.1	48.4	59.1	15.4	41.0
MAM	33.1	33.0	32.3	-0.2	-2.3
JJA	12.7	12.3	10.8	-3.1	-14.7
SON	11.2	10.0	8.9	-9.8	-19.7
<i>Bentfeld/Lippe</i>					
DJF	11.7	11.3	13.8	-2.9	18.5
MAM	14.7	14.6	17.1	-0.7	16.4
JJA	6.6	6.2	5.7	-5.8	-12.4
SON	4.7	4.2	4.0	-9.1	-14.4
<i>Schermbeck 1/Lippe</i>					
DJF	43.6	43.3	53.0	-0.4	21.9
MAM	54.8	55.5	63.2	1.2	15.3
JJA	26.5	24.9	23.4	-5.8	-11.8
SON	18.6	16.7	15.9	-9.7	-14.3
<i>Kesseler 3/Lippe</i>					
DJF	22.9	22.4	27.5	-1.9	20.2
MAM	28.9	29.0	33.7	0.5	16.8
JJA	14.1	13.3	12.3	-5.8	-12.4
SON	10.0	9.0	8.5	-10.0	-15.2

noch Tabelle 8.7: Änderung der mittleren jahreszeitlichen MMQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Ottbergen/Nethe</i>					
DJF	6.7	6.3	8.1	-5.8	20.7
MAM	8.4	8.2	8.5	-2.2	1.8
JJA	3.5	3.3	3.0	-4.3	-13.0
SON	2.0	1.7	1.5	-14.0	-23.9
<i>Oedt/Niers</i>					
DJF	2.9	3.0	3.5	4.6	22.0
MAM	3.0	3.1	3.5	4.8	18.0
JJA	2.6	2.6	2.7	0	7.1
SON	2.2	2.2	2.3	0	8.5
<i>Goch/Niers</i>					
DJF	6.1	6.1	7.0	0	14.9
MAM	8.3	8.7	10.3	4.6	24.0
JJA	5.5	5.6	5.9	1.2	7.0
SON	3.8	3.8	4.0	0	4.1
<i>Meschede/Ruhr</i>					
DJF	12.3	13.3	16.2	8.5	32.6
MAM	10.2	9.8	9.8	-3.6	-3.3
JJA	4.7	4.4	3.9	-5.1	-16.7
SON	3.9	3.4	3.1	-12.6	-19.5
<i>Villigst/Ruhr</i>					
DJF	33.2	35.1	43.6	6.0	31.6
MAM	31.3	31.2	32.2	-0.1	2.9
JJA	12.9	12.3	10.7	-4.9	-16.8
SON	10.3	9.2	8.6	-10.4	-16.1
<i>Hattingen/Ruhr</i>					
DJF	97.9	107.7	131.1	10.4	34.3
MAM	84.4	85.5	86.1	1.3	2.1
JJA	34.4	33.0	28.7	-3.8	-16.2
SON	28.0	24.8	22.4	-10.7	-19.6
<i>Zerkall 1/Rur</i>					
DJF	16.2	17.4	22.0	7.6	36.2
MAM	15.4	15.5	15.6	1.1	1.9
JJA	9.5	9.6	9.0	1.3	-5.3
SON	7.6	7.3	7.0	-3.6	-8.5

noch Tabelle 8.7: Änderung der mittleren jahreszeitlichen MMQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Jülich Stadion/Rur</i>					
DJF	24.3	25.8	31.9	6.5	31.6
MAM	23.9	24.3	24.1	1.5	0.8
JJA	13.6	13.7	12.6	0.8	-7.4
SON	10.7	10.2	9.7	-4.3	-9.3
<i>Stah/Rur</i>					
DJF	28.8	30.5	37.4	6.1	30.0
MAM	29.8	30.3	31.0	1.8	4.2
JJA	17.6	17.8	16.6	1.0	-5.8
SON	13.8	13.3	12.8	-3.8	-7.4
<i>Niederschelden 2/Sieg</i>					
DJF	15.5	18.0	22.2	16.3	43.5
MAM	11.7	11.6	11.1	-0.3	-4.9
JJA	3.3	3.0	2.5	-6.7	-21.9
SON	2.9	2.3	1.9	-18.5	-32.6
<i>Menden/Sieg</i>					
DJF	86.6	93.6	109.4	8.5	26.8
MAM	66.6	67.2	63.3	1.0	-4.8
JJA	19.0	17.2	13.8	-8.9	-26.4
SON	16.2	13.1	11.2	-18.1	-30.0
<i>Betzdorf/Sieg</i>					
DJF	26.9	30.6	37.3	14.3	39.1
MAM	20.0	19.9	19.1	-0.4	-4.4
JJA	5.2	4.8	3.9	-7.6	-24.8
SON	4.6	3.6	3.0	-19.9	-33.3
<i>Hagen Eckesey/Volme</i>					
DJF	13.8	15.2	18.2	11.0	32.4
MAM	11.1	11.6	11.2	4.9	0.9
JJA	4.3	4.1	3.4	-5.6	-20.4
SON	3.6	3.1	2.7	-12.7	-24.2
<i>Ahmsen/Werre</i>					
DJF	8.4	8.7	10.5	4.3	25.8
MAM	10.3	10.3	11.1	0.3	8.4
JJA	4.8	4.5	4.1	-6.8	-14.7
SON	3.3	2.9	2.7	-10.5	-17.3

noch Tabelle 8.7: Änderung der mittleren jahreszeitlichen MMQ für die „nahe“ (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Kontrolllauf (1971-2000)

	Kontrollzeit- raum [m <sup>3</sup> /s]	„nahe“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	„ferne“ Zukunft [m <sup>3</sup> /s]	Δ „nahe“ Zukunft [%]	Δ „ferne“ Zukunft [%]
<i>Karlshafen/Weser</i>					
DJF	165.9	170.3	220.5	3.0	33.2
MAM	186.6	180.5	196.6	-3.2	5.5
JJA	87.9	85.0	82.3	-3.3	-6.2
SON	66.8	61.8	59.3	-7.3	-11.0
<i>Vlotho/Weser</i>					
DJF	196.2	199.1	254.3	1.8	29.9
MAM	225.7	220.4	241.2	-2.3	7.0
JJA	107.6	104.3	100.8	-3.0	-6.1
SON	79.8	73.9	70.7	-7.2	-11.3
<i>Porta Westfalica/Weser</i>					
DJF	212.4	215.8	273.6	1.9	29.0
MAM	245.0	239.9	263.1	-2.1	7.5
JJA	118.9	115.2	111.5	-3.1	-6.1
SON	88.5	82.0	78.7	-7.1	-10.8
<i>Opladen/Wupper</i>					
DJF	21.2	23.2	26.8	9.7	26.6
MAM	17.1	17.8	17.2	4.0	0.5
JJA	9.4	8.9	7.8	-5.6	-16.9
SON	8.9	8.2	7.5	-7.2	-15.9

## 8.6 RÄUMLICHE DARSTELLUNG DER WASSERHAUSHALTSKOMPONENTEN

Um die räumlichen Muster der relevanten Wasserhaushaltskomponenten darzustellen, die sich aus den Rechenläufen ergeben, wurden folgende Parameter mit Hilfe eines geographischen Informationssystems flächenhaft in Anlage H dargestellt:

- Jährliche und halbjährliche Niederschlagssummen (nach Korrektur des Benetzungsverlustes und des Windfehlers)
- Jährliche und halbjährliche Verdunstungssummen, die mit LARSIM berechnet wurden
- Jährlicher und halbjährlicher mittlerer MNQ
- Jährlicher und halbjährlicher mittlerer MQ
- Jährlicher und halbjährlicher mittlerer MHQ

Die Parameter wurden jeweils über die Flächen der Pegelkontrollbereiche, also der Fläche zwischen einem Pegel und seinem Oberliegerpegel bzw. dem Anfang eines Einzugsgebiets gemittelt. Da der Abfluss im Rhein selbst nicht berechnet wurde, sind die Abflusshauptwerte für diese Modellzellen nicht dargestellt. Zudem sind die Gebiete im Norden von NRW, die nicht oberhalb von Pegeln liegen, nicht geeicht. Daher sind diese Simulationsergebnisse mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet und sollten nur noch als grobe Schätzung angesehen werden.

## 8.7 BERECHNUNG VON UNTERSCHREITUNGSHÄUFIGKEITEN

In Ergänzung zu den bisher durchgeführten Untersuchungen werden zusätzlich für den Kontrolllauf (1971-2000) sowie für die „nahe“ Zukunft (2021-2050) und „ferne“ Zukunft (2071-2100) Unterschreitungshäufigkeiten berechnet. Die Berechnung der Unterschreitungshäufigkeiten (Dauerlinien) erfolgt analog der Berechnungsvorschrift für die gewässerkundlichen Jahrbüchern:

**Mittlere Dauerlinie:** Die Werte der auszuwertenden Periode werden der Größe nach sortiert. Danach wird die Zeitreihe in Klassen mit Anzahl der Werte entsprechen der Anzahl der Jahre. Somit entstehen 365 Klassen. Der Wert für den Rang der Klasse ergibt sich als Median der entsprechenden Klasse.

**Maximale Dauerlinie:** Die Werte werden jährlich der Größe nach sortiert. Hierdurch entstehen n jährliche partielle Serien. Die maximalen Ränge ergeben sich aus den maximalen Werten der partiellen Serien.

**Minimale Dauerlinie:** Die Werte werden jährlich der Größe nach sortiert. Hierdurch entstehen n jährliche partielle Serien. Die minimalen Ränge ergeben sich aus den minimalen Werten der partiellen Serien.

Die Berechnung der Dauerlinie für die dreißigjährigen Zeiträume erfolgte durch Hintereinanderhängung aller 10 Realisationen und 3 Dekaden eines Auswertzeitraumes (Kontrolllauf, nahe, bzw. ferne Zukunft). Somit standen 600 Jahre zur Auswertung für jeden Auswertzeitraum zur Verfügung.

Die Ergebnisse der Dauerlinienberechnungen sind in der Anlage I dargestellt. In den Abbildungen sind die mittlere Dauerlinie für den Kontrolllauf und für die „nahe“ Zukunft und „ferne“ Zukunft dargestellt. Zusätzlich ist die aus Messwerten abgeleitete Dauerlinie dargestellt.

Im Allgemeinen zeigt sich eine geringfügige Abnahme der Dauerlinie in der „nahen“ Zukunft und eine Zunahme der Dauerlinien in der „fernen“ Zukunft.

Dauerlinien eignen sich für die unterschiedlichen Bereiche der Wasserwirtschaft; z.B. bei der Schifffahrt zur Bewirtschaftung von Schiffskapazitäten bzw. ggf. zum Bau neuerer Schiffe, die besonders bei Niedrigwassersituationen effizient beladbar sind. Für den Rhein sind zwar keine Aussagen ableitbar, jedoch für das in NRW vorhandene Kanalnetzsystem. Weitere Aussagemöglichkeiten sind für ökologische Flutungen, bzw. für den Betrieb von Kraftwerken möglich.

## 9. BEWERTUNG DER AUSWIRKUNGE DES KLIMAWANDELS AUF DAS ABFLUSSVERHALTEN DER FLIEßGEWÄSSER IN NRW

### 9.1 WASSERWIRTSCHAFTLICHE AUFGABEN

Die Wasserwirtschaft ist nach DIN 4049 die zielbewusste Ordnung aller menschlichen Einwirkungen auf den Wasserkreislauf. Nach § 1a des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) sind die Gewässer jedoch "als Bestandteil des Naturhaushalts" u.a. so zu bewirtschaften, dass "jede vermeidbare Beeinträchtigung unterbleibt". Für eine sektorenbezogene Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussverhalten in NRW bietet sich die Betrachtung in Handlungsfeldern an. Analog zur Gliederung wasserwirtschaftlicher Bereiche in [BWK 2002 S. 5 bis 7] sind folgende Handlungsfelder grundsätzlich von Belang:

- Integrierte Flussgebietsbewirtschaftung von Fließgewässern und Wasserstraßen
- Ortsentwässerung
- Wasserversorgung
- Landwirtschaftlicher Wasserbau
- Abfallwirtschaft sowie
- Bergbau

#### Integrierte Flussgebietsbewirtschaftung von Fließgewässern und Wasserstraßen:

Hierunter sind im wesentlichen die Aufgaben des klassischen Hochwasserschutzes (Ausweisung von Überschwemmungsgebieten, naturnahe Gestaltung von Gewässern sowie der Bau und Betrieb von Hochwasserschutzanlagen), sowie die Speicherplanung und Speicherbewirtschaftung (Hoch- und Niedrigwasser betreffend), zu verstehen. Niedrigwassersituationen an Fließgewässern können durch Aufkonzentrierung von Inhaltsstoffen und höhere Wassertemperaturen zu ergänzenden Güteproblemen führen. Für die Befahrbarkeit von Wasserstraßen sind neben einer Verschärfung der Hochwässer auch die Verschärfung von Niedrigwassersituationen relevant, da hierdurch die Schifffahrt stark beeinflusst wird.

#### Ortsentwässerung:

Zu den Auswirkungen einer Klimaänderung auf Ortsentwässerungen gehört im Wesentlichen die Frage nach einer Verstärkung lokaler Hochwässer (bzw. Veränderung von Starkniederschlägen) und der damit verbundenen Dimensionierung und der Bewirtschaftung von Kanalnetzen sowie Fragen des dezentralen Rückhaltes. Die hier durchgeführte Untersuchung gibt sowohl aufgrund ihrer Zielsetzung, als auch allein über die hier durchgeführte Abschätzungen der MHQ kaum Anhalt zur Veränderung in diesem fachlichen Bereich. Dies ist anderen Untersuchungen vorbehalten, die als Schwerpunkt die Stadthydrologie aufgreifen.

### Wasserversorgung:

Die Wasserversorgung in NRW erfolgt im Wesentlichen durch die Bewirtschaftung von Speichern, die Entnahme von Grundwasser in Trinkwasserschutzgebieten sowie die Entnahme von Uferfiltraten. Die hier durchgeführte Untersuchung hat fachliche Aussagen zu diesem Bereich nicht als Ziel. Dies ist anderen Untersuchungen vorbehalten, deren Zielsetzung über die räumliche Skalierung und die numerische Abbildung der Bodenphysik des genutzten Grundwassermodells definiert sind. Eine Bewertung der Veränderung der Grundwasserneubildung ist als räumlicher Mittelwert über die gewählten Pegelkontrollbereiche qualitativ denkbar, in der Aussage aber zu grob, um Handlungsgrundlage für Anpassungsmaßnahmen zu sein.

### Landwirtschaftlicher Wasserbau:

Die Landwirtschaft kann je nach Situation in zweierlei Hinsicht von der Veränderung des Wasserkreislaufes betroffen sein. Niedrigwassersituationen (u.a. Indikator: MNQ) können je nach vorhandenen Bodenstrukturen die Notwendigkeit der Beregnung ergeben. Feuchtesituationen (u.a. Indikator: MHQ), z.B. durch längerandauernde Landregen, können zu Vernässungen führen. Kleinräumige Auswirkungen können mit den Projektergebnissen nicht abgeleitet werden, sind aber auch nicht das Ziel. Maßgebend für die Schnittstelle Wasserwirtschaft und Landwirtschaft werden Untersuchungen zur Veränderung des Niederschlagsverhaltens sein, z.B. das Vorhaben ExUS des Landes NRW (Extremwertuntersuchung Starkregen).

### Abfallwirtschaft:

Die hier im Projekt erarbeiteten Indikatoren erlauben keine Bewertung der Auswirkungen auf die Abfallwirtschaft, da die Oberflächenentwässerung von Deponien im Wesentlichen vom lokalen Niederschlagsverhalten abhängig ist. Hier werden Untersuchungen zur Veränderung des Niederschlagsverhaltens von Bedeutung sein, z.B. das Vorhaben ExUS des Landes NRW (Extremwertuntersuchung Starkregen). Niederschlagsveränderungen, die in größeren Pegelinzugsgebieten zu einer Erhöhung des MHW führen, führen nicht zwangsläufig zu mehr Wasseranfall an Deponien.

### Bergbau:

In NRW wird Kohle sowohl im Tagebau als auch unter Tage abgebaut. Bei der Kohleförderung sind oftmals Grundwasserhaltungen im großen Stil notwendig. Hier sind die Zusammenhänge zwischen Niederschlägen, Oberflächengewässern und Grundwasser sehr individuell und jeweils komplex, so dass Schlussfolgerungen auf Basis der in diesem Vorhaben erzielten Ergebnisse fachlich nicht gerechtfertigt wären.

## 9.2 MÖGLICHE AUSWIRKUNGEN DER KLIMAÄNDERUNG AUF DAS ABFLUSS- VERHALTEN DER FLIEßGEWÄSSER IN NRW

Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Fließgewässer in NRW sind räumlich nicht grundsätzlich verschieden. Sie werden daher zusammenfassend dargestellt und lediglich bei räumlichen Unterschieden für die vier einzelnen Regionen

- Eifel, Sauer- und Siegerland (Flussgebiete Rur, Sieg, Wupper und Ruhr)
- Niederrheinische Tiefebene (Flussgebiete Erft und Niers)
- Westfälische Bucht (Flussgebiete Lippe und Ems)
- Weserbergland (Flussgebiete Diemel, Weser, Emmer, Werre)

getrennt. Die Bewertung orientiert sich an den oben genannten Handlungsfeldern.

Die Bewertung erfolgt durch Abschätzung der Veränderung von MNQ im Sommer und der MHQ im Winter als Index, abgeleitet aus Mittelwerten für verschiedene Pegel einer Region. „Veränderung“ bedeutet bei Hochwässern (MHQ) eine Zunahme und bei Niedrigwasser (MNQ) eine Abnahme.

Die nachfolgende Bewertungsskala ist durch den Verfasser festgelegt und ist somit subjektiv. Die „Größe“ (deutlich, mäßig, wenig) der Veränderung lässt keine quantitative Aussage über das Ausmaß der Veränderungen zu. Dieses ist pegelspezifisch aus den Tabellen in Kapitel 8 abzuleiten und im Einzelnen auf die beschriebenen wasserwirtschaftlichen Aufgaben anzupassen.

Bewertungsskala:

- ++ deutliche Veränderung = Veränderungen > 15%
- + mäßige Veränderung = Veränderungen >5% und < 15%
- o keine/wenig Veränderung = Veränderungen < 5%

Für die weniger durch das Abflussverhalten der Fließgewässer, sondern durch Niederschlagsverhältnisse beeinflussten Handlungsfelder erfolgt keine Einzelbewertung. Dies betrifft die Siedlungswasserwirtschaft, die Trinkwasserversorgung, die Abfallwirtschaft und den Bergbau.

## 9.2.1 ALLGEMEINE BEWERTUNG

Für die Flussgebiete in NRW ist in Bezug auf die integrierte Flussgebietsbewirtschaftung (Hochwasserschutz) in der „nahen“ Zukunft kein direkter Handlungsbedarf erkennbar. Eine deutliche Erhöhung der mittleren Hochwasserverhältnisse zeichnet sich auf Basis der verwendeten WETTREG-A1B-Daten in der „fernen“ Zukunft ab. Da nur ein Szenario eines einzigen Regionalmodells Grundlage der Berechnungen war und die Veränderungen der mittleren Hochwasserverhältnisse keine zwingenden Schluss auf Ereignisse seltener Jährlichkeiten bzw. Bemessungsgrößen erlaubt, erscheint eine pauschale Berücksichtigung im Zuge von Neuplanungen bzw. von Sanierung von Hochwasserschutzanlagen mit einer längeren Lebensdauer – auch angesichts nennenswerter Mehrkosten – nicht zielführend. Empfohlen wird, die Sensibilität entsprechender Planungen gegenüber höheren Bemessungsgrößen zu ermitteln, flexible Anpassungen einzuplanen und die vorliegenden Erkenntnisse der Lastfälle „Extremes Hochwasser“ der Hochwasseraktionspläne und -gefahrenkarten in NRW zu nutzen

Im Bereich der Ortsentwässerung sind für siedlungswasserwirtschaftliche Maßnahmen keine Aussagen möglich. Hierzu sind Untersuchungen auf kleinräumiger (zeitlich und räumlich) Skala notwendig. Auch die dynamischen Klimaregionalmodelle bilden konvektive Ereignisse kleinräumiger Skalierung prozessbedingt nicht ausreichend ab, um Veränderungen von Starkregen der Dauerstufe 15 Minuten zu beschreiben.

Die sich im WETTREG-A1B-Datensatz ergebende Niederschlagsveränderung wird durch den höheren Anteil im Winter auf das Wasserdargebot im Grundwasser und den Speichern (Talsperren) voraussichtlich keine negative Auswirkung haben. Es ist eher zu erkennen, dass hier eine leichte Zunahme stattfindet, die Niedrigwassersituationen im Sommer zum Teil kompensieren kann. Eine Bewertung hinsichtlich Trinkwasserversorgung bedarf weiterer Untersuchungen, die neben kleinräumigerer Modellierung auch die Versorgungsstrukturen, den Wasserbedarf und die demographische Entwicklung berücksichtigt

Bezüglich der landwirtschaftlichen Nutzung entlang der Fließgewässer führen häufigere Hochwasserereignisse größerer Bordvoll unter Umständen zu einer Einschränkung des Anbaus. Niedrigwasserperioden können sich in diesen Bereichen durch niedrigere Grundwasserstände ebenfalls negativ auf den Anbau auswirken. Ergänzende Auswirkungen auf den lokalen Grundwasserhaushalt sind im Bereich der Landwirtschaft durch ergänzende Bewässerungsmaßnahmen infolge längerer Trockenperioden im Sommer (Indikator „MNQ“) denkbar.

## 9.2.2 FLUSSGEBIETSSPEZIFISCHE BEWERTUNGEN

Neben den allgemeinen Auswirkungen, die sich für ganz NRW ergeben, gibt es einige flussgebietspezifische Unterschiede, die sich aus den hier eingesetzten WETTREG-A1B-Daten ergeben.

Die folgende Tabelle zeigt diese Unterschiede zusammenfassend für die o.a. vier Flussgebiete bzw. Naturräume auf:

Veränderung der Abflussverhältnisse, Auswirkungen auf die Flussgebietbewirtschaftung				
	„nahe Zukunft“		„ferne Zukunft“	
	MNQ	MHQ	MNQ	MHQ
Erft und Niers	0	0	0	+
Rur, Sieg, Wupper, Ruhr	+	0	+	++
Diemel, Weser, Emmer, Werre	+	0	++	++
Lippe und Ems	+	0	++	++

In der Niederrheinischen Tiefebene, den Flussgebieten von Erft und Niers, ergibt sich eine deutlich weniger ausgeprägte Zunahme der Niedrigwasserverhältnisse sowohl in der „nahen“, als auch in der „fernen“ Zukunft. Auch die mittleren Hochwasserverhältnisse in der fernen Zukunft zeigen an Erft und Niers einen geringeren Anstieg als landesweit.

In den Mittelgebirgsregionen sowie an Lippe und Ems sind die Veränderungen der Hochwasserverhältnisse in der fernen Zukunft auffällig markant, in der Westfälischen Bucht und dem Weserbergland auch die Ausprägung der Veränderung mittlerer Niedrigwasserverhältnisse. Diese wären durch weitere Auswertungen näher zu untersuchen, um frühzeitig über fachlich allgemein belastbare Daten zu verfügen, die Grundlagen für Anpassungen sein können.

## 10. AUSBLICK

Mit dem Datensatz LARSIM NRW mit einer horizontalen Auflösung von 2,5 x 2,5 Minuten wurde ein Instrumentarium zur Simulation des landgebundenen Wasserkreislaufes geschaffen. Die Erstellung des Datensatzes selbst ist nicht Gegenstand des hier beschriebenen Vorhabens, sondern die Anwendung für wasserwirtschaftliche Fragestellungen.

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 Bodengewässerspeicherung, laterale Transporte zu den Gewässern (Abflusskonzentration) und der Wassertransport im Gerinne.

Damit ist es u.a. möglich, Veränderungen im Wasserhaushalt sowohl in Folge von Klimaänderungen, als auch durch Veränderungen z.B. der Landnutzung zu berechnen. Weitere Szenarien z.B. das Szenario A2 oder B1, sowie andere Modelle (REMO, CLM) können im Hinblick auf eine mögliche Bandbreite der Veränderungen im Abfluss hinzugezogen werden. Grundsätzlich kann das Modell LARSIM auch mit dem Zeitschritt „1 Std.“ betrieben werden. Hierzu ist eine gesonderte Eichung des Modelldatensatzes notwendig, sowie die Verfügbarkeit fachlich belastbarer, stündlicher Klimadaten (REMO, CLM).

Derzeit liefern die dynamischen Modelle nur unzureichend genaue Informationen über Niederschläge. Im Rahmen einer Kooperation mit der Universität Bonn (Prof. Hense) und Weatheronline wurde im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde ein Verfahren zur Korrektur der REMO/CLM Daten entwickelt, so dass stündlich korrigierte Szenariendaten lagegerecht zur Verfügung gestellt werden können.

## 11. LITERATUR

- Aitken, A. P. (1973): Assessing systematic errors in rainfall-runoff models. *J. Hydrology* (20): 121-136.
- Bartels H., B. Katzenberger & H. Weber (2004): Klimaveränderung und Wasserwirtschaft in Süddeutschland. – *Wasserwirtschaft*, 94 (4), 15 – 19.
- 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.
- BWK (Bundesverband der Ingenieure für Wasserwirtschaft) 2002: „Wasserbilanzmodelle in der Wasserwirtschaft-Kontinuierliche Abflussmodelle“, Merkblatt 2/2002.
- 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 Thika-Chania-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-Schriften*, Heft 46, 95-135.
- Krauter, G. E. (2005) Entwicklung eines Ansatzes zur Abschätzung der Geometrie von Fließgewässern. Ing.-Büro Dr.-Ing. Karl Ludwig, Karlsruhe (unveröffentlicht).

- LAWA (1993) Richtlinie für die Gebietsbezeichnung und die Verschlüsselung von Fließgewässern. – Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).
- Lehner, B., K. Verdin & A. Jarvis (2008) New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, AGU*, 89(10): 93-94.
- LfU (1999): Weiterentwicklung der des Wasserhaushaltsmodellierung für den Neckar. Ing.-Büro Dr.-Ing. Karl Ludwig im Auftrag der LfU Baden-Württemberg (unveröffentlicht).
- LUBW (2006): Weiterentwicklung des Schneemodells und Vereinheitlichung der Energiebilanzansätze in LARSIM. Ing.-Büro Dr.-Ing. Karl Ludwig, im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 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 K. & Bremicker M. (Eds.) (2006): *The Water balance Model LARSIM – Design, Content and Applications*. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 22, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg.
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. 1. A discussion of principles. *J. Hydrology*, 10, pp. 282-290.
- 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.
- Spekat, A., W. Enke & F. Kreienkamp (2007) Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2 (Endbericht). UBA Bericht 204 41 138.
- 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.

## VERZEICHNIS DER ANLAGEN

### Anlagen A: Übersichtsdarstellungen (vorläufige Darstellungen)

- A-1: Modellelemente und Vernetzung
- A-2: Lage der Pegel
- A-3: Lage der Niederschlagsmessstationen
- A-4: Lage der Luftdruckmessstationen
- A-5: Lage der Windgeschwindigkeitsmessstationen
- A-6: Lage der Temperaturmessstationen
- A-7: Lage der Globalstrahlungsmessstationen
- A-8: Lage der Feuchtemessstationen
- A-9: Digitales Höhenmodell
- A-10: Landnutzung
- A-11: Nutzbare Feldkapazität
- A-12: Vertikaler Durchlässigkeitsbeiwert

## Anlagen B: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen

- B-1: Pegel Westtünnen/Ahse
- B-2: Pegel Westheim/Diemel
- B-3: Pegel Welda/Diemel
- B-4: Pegel Schieder-Stausee/Emmer
- B-5: Pegel Einen/Ems
- B-6: Pegel Bliesheim/Erft
- B-7: Pegel Neubrück/Erft
- B-8: Pegel Geldern/Gelderner Fleuth
- B-9: Pegel Roenkhausen/Lenne
- B-10: Pegel Altena/Lenne
- B-11: Pegel Bentfeld/Lippe
- B-12: Pegel Schermbeck 1/Lippe
- B-13: Pegel Ottbergen/Nethe
- B-14: Pegel Oedt/Niers
- B-15: Pegel Goch/Niers
- B-16: Pegel Meschede/Ruhr
- B-17: Pegel Villigst/Ruhr
- B-18: Pegel Hattingen/Ruhr
- B-19: Pegel Zerkall 1/Rur
- B-20: Pegel Jülich Stadion/Rur
- B-21: Pegel Stah/Rur
- B-22: Pegel Niederschelden 2/Sieg
- B-23: Pegel Menden/Sieg
- B-24: Pegel Hagen-Eckensey/Volme
- B-25: Pegel Ahmsen/Werre
- B-26: Pegel Karlshafen/Weser
- B-27: Pegel Vlotho/Weser
- B-28: Pegel Porta Westfalica/Weser
- B-29: Pegel Opladen/Weser

Anlagen C: Zeitliche Entwicklung des Niederschlags, der Verdunstung und der Abflüsse für den Kontrolllauf (1971-2000)

- C-1: Pegel Westtünnen/Ahse
- C-2: Pegel Westheim/Diemel
- C-3: Pegel Welda/Diemel
- C-4: Pegel Schieder-Stausee/Emmer
- C-5: Pegel Einen/Ems
- C-6: Pegel Greven/Ems
- C-7: Pegel Bliesheim/Erft
- C-8: Pegel Neubrück/Erft
- C-9: Pegel Geldern/Gelderner Fleuth
- C-10: Pegel Roenkhausen/Lenne
- C-11: Pegel Altena/Lenne
- C-12: Pegel Bentfeld/Lippe
- C-13: Pegel Schermbeck 1/Lippe
- C-14: Pegel Kesseler 3/Lippe
- C-15: Pegel Ottbergen/Nethe
- C-16: Pegel Oedt/Niers
- C-17: Pegel Goch/Niers
- C-18: Pegel Meschede/Ruhr
- C-19: Pegel Villigst/Ruhr
- C-20: Pegel Hattingen/Ruhr
- C-21: Pegel Zerkall 1/Rur
- C-22: Pegel Jülich Stadion/Rur
- C-23: Pegel Stah/Rur
- C-24: Pegel Niederschelden 2/Sieg
- C-25: Pegel Menden/Sieg
- C-26: Pegel Betzdorf/Sieg
- C-27: Pegel Hagen-Eckensey/Volme
- C-28: Pegel Ahmsen/Werre
- C-29: Pegel Karlshafen/Weser
- C-30: Pegel Vlotho/Weser
- C-31: Pegel Porta Westfalica/Weser
- C-32: Pegel Opladen/Wupper

Anlagen D: Pardé-Koeffizienten der gemessenen und der mit WETTREG-Daten berechneten monatlichen Niedrig-, Mittel- und Hochwasserabflüsse für den Kontrolllauf (1971-2000)

- D-1: Pegel Westtünnen/Ahse
- D-2: Pegel Westheim/Diemel
- D-3: Pegel Welda/Diemel
- D-4: Pegel Einen/Ems
- D-5: Pegel Bliesheim/Erft
- D-6: Pegel Neubrück/Erft
- D-7: Pegel Geldern/Gelderner Fleuth
- D-8: Pegel Roenkhausen/Lenne
- D-9: Pegel Altena/Lenne
- D-10: Pegel Bentfeld/Lippe
- D-11: Pegel Schermbeck 1/Lippe
- D-12: Pegel Ottbergen/Nethe
- D-13: Pegel Oedt/Niers
- D-14: Pegel Goch/Niers
- D-15: Pegel Meschede/Ruhr
- D-16: Pegel Villigst/Ruhr
- D-17: Pegel Hattingen/Ruhr
- D-18: Pegel Zerkall 1/Rur
- D-19: Pegel Jülich Stadion/Rur
- D-20: Pegel Stah/Rur
- D-21: Pegel Niederschelden 2/Sieg
- D-22: Pegel Menden/Sieg
- D-23: Pegel Hagen-Eckensey/Volme
- D-24: Pegel Ahmsen/Werre
- D-25: Pegel Karlshafen/Weser
- D-26: Pegel Vlotho/Weser
- D-27: Pegel Porta Westfalica/Weser
- D-28: Pegel Opladen/Wupper

Anlagen E: Zeitliche Entwicklung des Niederschlags, der Verdunstung und der Abflüsse für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)

- E-1: Pegel Westtünen/Ahse
- E-2: Pegel Westheim/Diemel
- E-3: Pegel Welda/Diemel
- E-4: Pegel Schieder-Stausee/Emmer
- E-5: Pegel Einen/Ems
- E-6: Pegel Greven/Ems
- E-7: Pegel Bliesheim/Erft
- E-8: Pegel Neubrück/Erft
- E-9: Pegel Geldern/Gelderner Fleuth
- E-10: Pegel Roenkhausen/Lenne
- E-11: Pegel Altena/Lenne
- E-12: Pegel Bentfeld/Lippe
- E-13: Pegel Schermbeck 1/Lippe
- E-14: Pegel Kesseler 3/Lippe
- E-15: Pegel Ottbergen/Nethe
- E-16: Pegel Oedt/Niers
- E-17: Pegel Goch/Niers
- E-18: Pegel Meschede/Ruhr
- E-19: Pegel Villigst/Ruhr
- E-20: Pegel Hattingen/Ruhr
- E-21: Pegel Zerkall 1/Rur
- E-22: Pegel Jülich Stadion/Rur
- E-23: Pegel Stah/Rur
- E-24: Pegel Niederschelden 2/Sieg
- E-25: Pegel Menden/Sieg
- E-26: Pegel Betzdorf/Sieg
- E-27: Pegel Hagen-Eckensey/Volme
- E-28: Pegel Ahmsen/Werre
- E-29: Pegel Karlshafen/Weser
- E-30: Pegel Vlotho/Weser
- E-31: Pegel Porta Westfalica/Weser
- E-32: Pegel Opladen/Wupper

Anlagen F: Zeitliche Entwicklung des Niederschlags, der Verdunstung und der Abflüsse für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)

- F-1: Pegel Westtünen/Ahse
- F-2: Pegel Westheim/Diemel
- F-3: Pegel Welda/Diemel
- F-4: Pegel Schieder-Stausee/Emmer
- F-5: Pegel Einen/Ems
- F-6: Pegel Greven/Ems
- F-7: Pegel Bliesheim/Erft
- F-8: Pegel Neubrück/Erft
- F-9: Pegel Geldern/Gelderner Fleuth
- F-10: Pegel Roenkhausen/Lenne
- F-11: Pegel Altena/Lenne
- F-12: Pegel Bentfeld/Lippe
- F-13: Pegel Schermbeck 1/Lippe
- F-14: Pegel Kesseler 3/Lippe
- F-15: Pegel Ottbergen/Nethe
- F-16: Pegel Oedt/Niers
- F-17: Pegel Goch/Niers
- F-18: Pegel Meschede/Ruhr
- F-19: Pegel Villigst/Ruhr
- F-20: Pegel Hattingen/Ruhr
- F-21: Pegel Zerkall 1/Rur
- F-22: Pegel Jülich Stadion/Rur
- F-23: Pegel Stah/Rur
- F-24: Pegel Niederschelden 2/Sieg
- F-25: Pegel Menden/Sieg
- F-26: Pegel Betzdorf/Sieg
- F-27: Pegel Hagen-Eckensey/Volme
- F-28: Pegel Ahmsen/Werre
- F-29: Pegel Karlshafen/Weser
- F-30: Pegel Vlotho/Weser
- F-31: Pegel Porta Westfalica/Weser
- F-32: Pegel Opladen/Wupper

Anlagen G-1: Veränderungen zwischen Kontrolllauf, „naher“ und „ferner“ Zukunft im Niedrigwasserbereich

- G-1.1: Pegel Westtünnen/Ahse
- G-1.2: Pegel Westheim/Diemel
- G-1.3: Pegel Welda/Diemel
- G-1.4: Pegel Schieder-Stausee/Emmer
- G-1.5: Pegel Einen/Ems
- G-1.6: Pegel Greven/Ems
- G-1.7: Pegel Bliesheim/Erft
- G-1.8: Pegel Neubrück/Erft
- G-1.9: Pegel Geldern/Gelderner Fleuth
- G-1.10: Pegel Roenkhausen/Lenne
- G-1.11: Pegel Altena/Lenne
- G-1.12: Pegel Bentfeld/Lippe
- G-1.13: Pegel Schermbeck 1/Lippe
- G-1.14: Pegel Kesseler 3/Lippe
- G-1.15: Pegel Ottbergen/Nethe
- G-1.16: Pegel Oedt/Niers
- G-1.17: Pegel Goch/Niers
- G-1.18: Pegel Meschede/Ruhr
- G-1.19: Pegel Villigst/Ruhr
- G-1.20: Pegel Hattingen/Ruhr
- G-1.21: Pegel Zerkall 1/Rur
- G-1.22: Pegel Jülich Stadion/Rur
- G-1.23: Pegel Stah/Rur
- G-1.24: Pegel Niederschelden 2/Sieg
- G-1.25: Pegel Menden/Sieg
- G-1.26: Pegel Betzdorf/Sieg
- G-1.27: Pegel Hagen-Eckensey/Volme
- G-1.28: Pegel Ahmsen/Werre
- G-1.29: Pegel Karlshafen/Weser
- G-1.30: Pegel Vlotho/Weser
- G-1.31: Pegel Porta Westfalica/Weser
- G-1.32: Pegel Opladen/Wupper

Anlagen G-2: Veränderungen zwischen Kontrolllauf, „naher“ und „ferner“ Zukunft im Mittelwasserbereich

- G-2.1: Pegel Westtünnen/Ahse
- G-2.2: Pegel Westheim/Diemel
- G-2.3: Pegel Welda/Diemel
- G-2.4: Pegel Schieder-Stausee/Emmer
- G-2.5: Pegel Einen/Ems
- G-2.6: Pegel Greven/Ems
- G-2.7: Pegel Bliesheim/Erft
- G-2.8: Pegel Neubrück/Erft
- G-2.9: Pegel Geldern/Gelderner Fleuth
- G-2.10: Pegel Roenkhausen/Lenne
- G-2.11: Pegel Altena/Lenne
- G-2.12: Pegel Bentfeld/Lippe
- G-2.13: Pegel Schermbeck 1/Lippe
- G-2.14: Pegel Kesseler 3/Lippe
- G-2.15: Pegel Ottbergen/Nethe
- G-2.16: Pegel Oedt/Niers
- G-2.17: Pegel Goch/Niers
- G-2.18: Pegel Meschede/Ruhr
- G-2.19: Pegel Villigst/Ruhr
- G-2.20: Pegel Hattingen/Ruhr
- G-2.21: Pegel Zerkall 1/Rur
- G-2.22: Pegel Jülich Stadion/Rur
- G-2.23: Pegel Stah/Rur
- G-2.24: Pegel Niederschelden 2/Sieg
- G-2.25: Pegel Menden/Sieg
- G-2.26: Pegel Betzdorf/Sieg
- G-2.27: Pegel Hagen-Eckensey/Volme
- G-2.28: Pegel Ahmsen/Werre
- G-2.29: Pegel Karlshafen/Weser
- G-2.30: Pegel Vlotho/Weser
- G-2.31: Pegel Porta Westfalica/Weser
- G-2.32: Pegel Opladen/Wupper

Anlagen G-3: Veränderungen zwischen Kontrolllauf, „naher“ und „ferner“ Zukunft im Hochwasserbereich

- G-3.1: Pegel Westtünnen/Ahse
- G-3.2: Pegel Westheim/Diemel
- G-3.3: Pegel Welda/Diemel
- G-3.4: Pegel Schieder-Stausee/Emmer
- G-3.5: Pegel Einen/Ems
- G-3.6: Pegel Greven/Ems
- G-3.7: Pegel Bliesheim/Erft
- G-3.8: Pegel Neubrück/Erft
- G-3.9: Pegel Geldern/Gelderner Fleuth
- G-3.10: Pegel Roenkhausen/Lenne
- G-3.11: Pegel Altena/Lenne
- G-3.12: Pegel Bentfeld/Lippe
- G-3.13: Pegel Schermbeck 1/Lippe
- G-3.14: Pegel Kesseler 3/Lippe
- G-3.15: Pegel Ottbergen/Nethe
- G-3.16: Pegel Oedt/Niers
- G-3.17: Pegel Goch/Niers
- G-3.18: Pegel Meschede/Ruhr
- G-3.19: Pegel Villigst/Ruhr
- G-3.20: Pegel Hattingen/Ruhr
- G-3.21: Pegel Zerkall 1/Rur
- G-3.22: Pegel Jülich Stadion/Rur
- G-3.23: Pegel Stah/Rur
- G-3.24: Pegel Niederschelden 2/Sieg
- G-3.25: Pegel Menden/Sieg
- G-3.26: Pegel Betzdorf/Sieg
- G-3.27: Pegel Hagen-Eckensey/Volme
- G-3.28: Pegel Ahmsen/Werre
- G-3.29: Pegel Karlshafen/Weser
- G-3.30: Pegel Vlotho/Weser
- G-3.31: Pegel Porta Westfalica/Weser
- G-3.32: Pegel Opladen/Wupper

Anlagen H: Räumliche Darstellung der Wasserhaushaltskomponenten

- H-1: Mittlere jährliche Gebietsniederschläge für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-2: Mittlere sommerliche Gebietsniederschläge für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-3: Mittlere winterliche Gebietsniederschläge für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-4: Mittlere jährliche Verdunstung für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-5: Mittlere sommerliche Verdunstung für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-6: Mittlere winterliche Verdunstung für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-7: Mittlere jährliche Niedrigwasserabflüsse (MNQ) für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-8: Mittlere sommerliche Niedrigwasserabflüsse (MNQ) für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-9: Mittlere winterliche Niedrigwasserabflüsse (MNQ) für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-10: Mittlere jährliche Mittelwasserabflüsse (MQ) für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-11: Mittlere sommerliche Mittelwasserabflüsse (MQ) für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-12: Mittlere winterliche Mittelwasserabflüsse (MQ) für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-13: Mittlere jährliche Hochwasserabflüsse (MHQ) für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-14: Mittlere sommerliche Hochwasserabflüsse (MHQ) für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-15: Mittlere winterliche Hochwasserabflüsse (MHQ) für den Kontrolllauf (1971-2000)
- H-16: Mittlere jährliche Gebietsniederschläge für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-17: Mittlere sommerliche Gebietsniederschläge für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-18: Mittlere winterliche Gebietsniederschläge für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-19: Mittlere jährliche Verdunstung für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-20: Mittlere sommerliche Verdunstung für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-21: Mittlere winterliche Verdunstung für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-22: Mittlere jährliche Niedrigwasserabflüsse (MNQ) für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-23: Mittlere sommerliche Niedrigwasserabflüsse (MNQ) für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-24: Mittlere winterliche Niedrigwasserabflüsse (MNQ) für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-25: Mittlere jährliche Mittelwasserabflüsse (MQ) für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-26: Mittlere sommerliche Mittelwasserabflüsse (MQ) für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-27: Mittlere winterliche Mittelwasserabflüsse (MQ) für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)

- H-28: Mittlere jährliche Hochwasserabflüsse (MHQ) für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-29: Mittlere sommerliche Hochwasserabflüsse (MHQ) für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-30: Mittlere winterliche Hochwasserabflüsse (MHQ) für die „nahe“ Zukunft (2021-2050)
- H-31: Mittlere jährliche Gebietsniederschläge für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-32: Mittlere sommerliche Gebietsniederschläge für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-33: Mittlere winterliche Gebietsniederschläge für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-34: Mittlere jährliche Verdunstung für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-35: Mittlere sommerliche Verdunstung für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-36: Mittlere winterliche Verdunstung für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-37: Mittlere jährliche Niedrigwasserabflüsse (MNQ) für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-38: Mittlere sommerliche Niedrigwasserabflüsse (MNQ) für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-39: Mittlere winterliche Niedrigwasserabflüsse (MNQ) für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-40: Mittlere jährliche Mittelwasserabflüsse (MQ) für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-41: Mittlere sommerliche Mittelwasserabflüsse (MQ) für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-42: Mittlere winterliche Mittelwasserabflüsse (MQ) für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-43: Mittlere jährliche Hochwasserabflüsse (MHQ) für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-44: Mittlere sommerliche Hochwasserabflüsse (MHQ) für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)
- H-45: Mittlere winterliche Hochwasserabflüsse (MHQ) für die „ferne“ Zukunft (2071-2100)

Anlagen I: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, Kontrolllauf „nahe“ und „ferne“ Zukunft

- I-1: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Westtünen/Ahse
- I-2: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Westheim/Diemel
- I-3: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Welda/Diemel
- I-4: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Schieder-Stausee/Emmer
- I-5: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Einen/Ems
- I-6: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Greven/Ems
- I-7: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Bliesheim/Erft
- I-8: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Neubrück/Erft
- I-9: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Geldern/Gelderner Fleuth
- I-10: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Roenkhausen/Lenne
- I-11: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Altena/Lenne
- I-12: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Bentfeld/Lippe
- I-13: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Schermbeck 1/Lippe
- I-14: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Kesseler 3/Lippe
- I-15: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Ottbergen/Nethe
- I-16: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Oedt/Niers
- I-17: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Goch/Niers
- I-18: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Meschede/Ruhr
- I-19: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Vligst/Ruhr
- I-20: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Hattingen/Ruhr

- I-21: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Zerkall 1/Rur
- I-22: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Jülich Stadion/Rur
- I-23: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Stah/Rur
- I-24: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Niederschelden 2/Sieg
- I-25: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Menden/Sieg
- I-26: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Betzdorf/Sieg
- I-27: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Hagen-Eckensey/Volme
- I-28: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Ahsen/Werre
- I-29: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Karlshafen/Weser
- I-30: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Vltho/Weser
- I-31: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Porta Westfalica/Weser
- I-32: Überschreitungshäufigkeiten für Messungen, für den Kontrolllauf und für die „nahe“ und „ferne“ Zukunft am Pegel Opladen/Wupper