



BMBF-Fördermaßnahme
Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor
Klimawirkungen

Teilaspekt B: Anpassung an Klimatrends und Ex-
tremwetter

Anpassungsstrategien
an Klimatrends und Extremwetter und
Maßnahmen für ein
nachhaltiges Grundwassermanagement

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	9
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	9
1.2	Untersuchungsgebiet	10
1.3	Struktur des Vorhabens	11
2	Kenntnisstand	13
2.1	Grundwasserneubildung	13
2.1.1	Definition und Bedeutung für Hessen	13
2.1.2	Sachstand	13
2.1.3	Methodik - Modellkonzept des HLUg (BFI-Ansatz)	14
2.1.4	Modellanpassungen und -weiterentwicklungen	17
2.1.5	Simulationsergebnisse für die Referenzperiode 1971-2000 (Beobachtungsdaten)	21
2.1.6	Diskussion der Ergebnisse	25
2.2	Quellschüttung	26
2.2.1	Entwicklung der Quellschüttungen im Odenwald	26
2.3	Wasserbedarf	29
2.3.1	Trinkwasserversorgung	29
2.3.2	Brauchwasser	35
2.3.3	Landwirtschaftlicher Zusatzwasserbedarf	36
3	Zeitreihen regionaler Klimamodelle	44
3.1	Datengrundlage	44
3.1.1	WETTREG-2006	44
3.1.2	STAR2	45
3.1.3	CLM	45
3.2	Aufbereitung der Daten	45
3.2.1	Berechnung der Kenngrößen	45
3.2.2	LOCI-Transformation der CLM-Daten	46
3.3	Bewertung der Klima-Zeitreihen aus Sicht der Wasserwirtschaft	48
3.4	Der Klimawandel im Projektgebiet	52
4	Prozessbasierte Modellierung des Boden- und Grundwasserhaushalts	56
4.1	Modellierung des Bodenwasserhaushalts - Grundlagen	56
4.2	Abgebildete Prozesse und Eigenschaften	56
4.2.1	Niederschlag und potentielle Verdunstung	57
4.2.2	Boden	58
4.2.3	Landnutzung	58
4.2.4	Aufteilung der Evapotranspiration	59
4.2.5	Landwirtschaftliche Beregnung	59
4.2.6	Ungesättigte Zone	60

4.3	Ergebnisse	60
4.3.1	Grundwasserneubildung	60
4.3.2	Landwirtschaftliche Beregnung	62
4.4	Grundwassermodell	69
5	Konzeptionelle Modellierung der Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1961-2100	72
5.1	Simulationsergebnisse	72
5.2	Diskussion der Ergebnisse	79
6	Entwicklung der Quellschüttung im Odenwald	81
6.1	Zusammenhangsanalyse zwischen Klimaparametern und Quellschüttungen	81
6.1.1	Klimatische Entwicklungen „Klimastation Beerfelden/Odenwald“	81
6.1.2	Niederschlag und Verdunstung	82
6.1.3	Multiple Regressionen zur Beschreibung der Quellschüttungen aus Klimaparametern	84
6.1.4	Prognosen der Quellschüttungen durch multiple Gleichungssysteme	88
6.1.5	Extremwertanalysen	91
6.1.6	Zusammenfassende Bewertungen der Ergebnisse hinsichtlich der Quellschüttungen	92
7	Trinkwasserbedarf	94
7.1	Ausgangssituation und Methode	94
7.2	Bevölkerungsprognose bis 2100	97
7.3	Prognose des Pro-Kopf-Bedarfs bis 2100	99
7.4	Wasserbedarfsprognose für Südhessen 2100	102
7.5	Wasserbedarfsprognose für den Untersuchungsraum	106
7.6	Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserbedarf	107
7.7	Randbedingungen für die Bedarfsentwicklung	113
8	Grundwasserhaushalt und Nutzungskonflikte im Hessischen Ried bis 2100	115
9	Zukünftige Grundwasserbewirtschaftung	120
	Literatur	128

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	2-stufiger Verfahrensablauf zur Berechnung flächendifferenzierter Abflusskomponenten	15
Abb. 2:	Räumliche Verteilung des Baseflow-Index in Hessen	18
Abb. 3:	Vergleich zwischen regionalisierten Niederschlagsdaten des HLUG und Referenzdaten des DWD	20
Abb. 4:	Vergleich zwischen der regionalisierte Grasreferenzverdunstung des HLUG und Referenzdaten des DWD	21
Abb. 5:	Wasserhaushaltskomponenten der Beobachtungsperiode 1971-2000 in Hessen	23
Abb. 6:	Abflusskomponenten der Beobachtungsperiode 1971-2000 in Hessen	24
Abb. 7:	Lage der Klimastationen sowie der ausgewählten Quellen	27
Abb. 8:	Versorgungsgebiete im Regierungsbezirk Darmstadt und Hauptlieferbeziehungen	29
Abb. 9:	Untersuchungsraum „Hessisches Ried und Odenwald“ und Hauptlieferbeziehungen mit angrenzenden Regionen	30
Abb. 10:	Wassergewinnung im Untersuchungsraum 1977 bis 2006	32
Abb. 11:	Abgabe des im Untersuchungsraum geförderten Wassers 1977 bis 2006	32
Abb. 12:	Wasserbeschaffung und Wasserabgabe in den drei Teilräumen des Untersuchungsraumes, 2006	34
Abb. 13:	Grundwassergewinnung anderer Nutzer in den drei Teilräumen des Untersuchungsraumes, 2006	36
Abb. 14:	Landnutzung sowie potentielle Beregnungsflächen im Hessischen Ried (Stand 2008)	39
Abb. 15:	Zusatzwasserbedarf in „Nassjahren“, gruppiert nach Kreisen	42
Abb. 16:	Zusatzwasserbedarf in „Trockenjahren“, gruppiert nach Kreisen	43
Abb. 17:	Gegenüberstellung des gleitenden 3-Jahresmittel der klimatischen Wasserbilanz an der Station Frankfurt / Flughafen und des Flurabstandes einer nahegelegenen Grundwassermessstelle	46
Abb. 18:	Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsintensitäten der Messdaten sowie der CLM-Daten vor und nach der LOCI-Transformation	47

Abb. 19:	Jahresmittel der Niederschläge im Referenzzeitraum (1971-2000), Beobachtungsdaten sowie CLM-Daten vor und nach der LOCI-Transformation; oben absolute Werte [mm], unten Differenzen [%]	47
Abb. 20:	Jahresmittel der klimatischen Wasserbilanz im Beobachtungszeitraum (1961-2007), alle Zeitreihen	49
Abb. 21:	Gleitendes 3-Jahresmittel der klimatischen Wasserbilanz im Beobachtungszeitraum (1961-2007), Station Frankfurt a.M. / Flughafen	50
Abb. 22:	Monatsmittel (oben) von Niederschlag (blau, hellblau) und Verdunstung (rot, orange) im Referenzzeitraum 1971-2000 an den Stationen Frankfurt a. Main / Flughafen (links) und Beerfelden / Odenwald (rechts) sowie deren Entwicklung bis zum Projektionszeitraum 2071-2100 (unten) in mm	53
Abb. 23:	Erwartete Häufigkeitszunahme niederschlagsfreier Perioden an der Messstelle Frankfurt a.M. / Flughafen (nach CLM-LOCI)	54
Abb. 24:	Gleitendes 3-Jahresmittel der klimatischen Wasserbilanz für Beobachtungsdaten (blau), CLM- (hellgrün), CLM-LOCI- (dunkelgrün), WETTREG-T- (magenta) und STAR2-Daten (rot). Die linearen Trends der KWB sind gestrichelt dargestellt	55
Abb. 25:	Prozesse des Bodenwasserhaushaltes	57
Abb. 26:	Indirekte Ermittlung der Berechnungsmengen im Rahmen der Bodenfeuchtesimulation	59
Abb. 27:	Mittlere Grundwasserneubildung im Modellgebiet in Mio. m ³ (WETTREG)	61
Abb. 28:	Mittlere Grundwasserneubildung im Modellgebiet in Mio. m ³ (CLM)	61
Abb. 29:	Modellierte Jahresmitteltemperatur der Klimastation Mannheim (Szenario A1B)	63
Abb. 30:	Mittlere Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung sowie klimatische Wasserbilanz (jeweils in mm) innerhalb der Berechnungssaison	64
Abb. 31:	Mittlere Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung sowie klimatische Wasserbilanz (jeweils in mm) außerhalb der Berechnungssaison	65
Abb. 32:	Jährliche landwirtschaftliche Berechnungsmengen im Modellgebiet in Mio. m ³ (WETTREG)	69
Abb. 33:	Netzstruktur des eingesetzten Grundwassermodells	70
Abb. 34:	Gewässerstrukturen und Brunnen im Grundwassermodell	71

Abb. 35:	Übersicht der für die konzeptionelle Modellierung berücksichtigten Modellketten (nach Krahe u.a., 2009, modifiziert).	72
Abb. 36:	Dekadenmittelwerte und Trendlinien der Grundwasserneubildung für Hessen.	73
Abb. 37:	Dekadenmittelwerte und Trendlinien der Grundwasserneubildung für das Hess. Ried	74
Abb. 38:	Dekadenmittelwerte und Trendlinien der Grundwasserneubildung für den Odenwald.	74
Abb. 39:	Flächendifferenzierte Änderung der Grundwasserneubildung in der nahen Zukunft (2021-2050 gegenüber Bezugszeitraum 1971-2000)	77
Abb. 40:	Flächendifferenzierte Änderung der Grundwasserneubildung in der fernen Zukunft (2071-2100 gegenüber Bezugszeitraum 1971-2000)	78
Abb. 41:	Unsicherheitsbereich beim Multimodellansatz	80
Abb. 42:	Prognostizierter Lufttemperaturverlauf für Beerfelden (A1B-Szenario; WETTREG)	81
Abb. 43:	Gemessener Temperaturverlauf der ausgewählten Quellwässer im Odenwald	82
Abb. 44:	Beobachteter Niederschlag und Verdunstung sowie prognostizierter Niederschlag und Verdunstung durch WETTREG (A1B)	83
Abb. 45:	Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Quelle Kirch-Brombach	85
Abb. 46:	Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Quelle Reichenbach	86
Abb. 47:	Gegenüberstellung von gemessenen und prognostizierten Schüttmengen für den Zeitraum 1961 bis 2008 am Beispiel der Quelle Kirch-Brombach.	87
Abb. 48:	Gegenüberstellung von gemessenen und prognostizierten Schüttmengen für den Zeitraum 1961 bis 2008 am Beispiel der Quelle Reichenbach.	87
Abb. 49:	Prognostizierte Schüttungen für die Quelle Kirch-Brombach (A1B-Szenario, WETTREG)	89
Abb. 50:	Prognostizierte Schüttungen für die Quelle Reichenbach (A1B-Szenario, WETTREG)	90
Abb. 51:	Minimum, 5- und 25- Perzentil der Schüttungen pro Jahr für die Quelle Kirch-Brombach (Datengrundlage A1B-Szenario, WETTREG).	91
Abb. 52:	Minimum, 5- und 25- Perzentil der Schüttungen pro Jahr für die Quelle Reichenbach (Datengrundlage A1B-Szenario, WETTREG).	92
Abb. 53:	Struktur des Trinkwasserverbrauchs in Deutschland, 2004	94
Abb. 54:	Trinkwasserverbrauch in Südhessen, 1977 bis 2006	96

Abb. 55:	Bevölkerungsprognose für Südhessen 2100	99
Abb. 56:	Prognose des Pro-Kopf-Bedarfs in Südhessen 2100	101
Abb. 57:	Wasserbedarfsprognose für Südhessen 2100 (12 Varianten)	103
Abb. 58:	Wasserbedarfsprognose für Südhessen 2100 (3 Szenarien)	105
Abb. 59:	Prognose der Wassergewinnung im Untersuchungsraum bis 2100	106
Abb. 60	Erwartete Häufigkeitszunahme von Hitzeperioden mit Sommertagen (max. Tagestemperatur über 25 °C) im Zeitraum 2071- 2100 gegenüber dem Zeitraum 1961-1990	108
Abb. 61:	Ganglinien der Netzeinspeisung in Wiesbaden in den Jahren 2003 und 2007	109
Abb. 62:	Normierte Ganglinien dokumentierter Spitzenlast-Ereignisse in Wiesbaden	110
Abb. 63:	Fiktiver Verlauf eines extremen Spitzenlast-Ereignisses im Jahr 2100	111
Abb. 64:	Beispielhafte Ganglinien der Szenarienrechnungen	116
Abb. 65:	Aufhöhung der Grundwasserstände im Oktober 2099 infolge der Prognose-Szenarien 2 und 3 gegenüber derzeitigen mittleren Grundwasserständen	117
Abb. 66:	Mittlere Flurabstände nach Grundwasserbewirtschaftungsplan, Szenario 2 (2099) und Szenario 3 (2099), von links nach rechts	119

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Grundwasserneubildung aus Niederschlag (Regierungspräsidium Darmstadt, 1999)	14
Tab. 2:	Abflussrelevante Gebietsparameter des BFI-Regressionsmodells	17
Tab. 3:	BFI-Werte in Abhängigkeit des Versiegelungsgrades	18
Tab. 4:	Niederschlag und BFI für verschiedene Perioden	19
Tab. 5:	Langjährig mittlere Jahressummen der Wasserhaushaltsgrößen in Hessen (1971-2000)	25
Tab. 6:	Basisinformationen über die ausgewählten Quellen	28
Tab. 7:	Berechnungsfläche, unterteilt nach Herkunft der Berechnungswässer	38
Tab. 8:	Anbauverhältnisse landwirtschaftlicher Kulturen im Hessischen Ried	39
Tab. 9:	Berechnungsklassen für Normal-, Trocken- und Nassjahre im Hessischen Ried (Schätzung aus dem Jahr 1994)	41
Tab. 10:	Flächenbezogene statistische Parameter des Jahresniederschlags, nach Projektteilgebieten	48
Tab. 11:	Flächenbezogene statistische Parameter der Jahreswerte der Grasreferenzverdunstung, nach Projektteilgebieten	49
Tab. 12:	Stationsbezogene statistische Parameter des Jahresniederschlags im Bezugszeitraum (1971-2000) an den Stationen Frankfurt a.M. / Flughafen und Beerfelden / Odenwald	51
Tab. 13:	Umverteilung der Niederschläge im Projektionszeitraum (2071-2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971-2000) aus den Mittelwerten der CLM-Realisation 2 und der WETTREG-T Zeitreihe Realisation 7	52
Tabelle 14:	Klimaänderungssignale der Grundwasserneubildung	76
Tabelle 15:	Prognose des Pro-Kopf-Bedarfs in Südhessen 2100	101
Tabelle 16:	Varianten der Wasserbedarfsprognose für 2100	102
Tabelle 17:	Prognose des Wasseraufkommens in den drei Teilräumen bis 2100	107
Tabelle 18:	Prognose des Wasseraufkommens im Untersuchungsraum in Trockenjahren	112

1 Einführung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Trinkwasserversorgung der Bundesrepublik Deutschland erfolgt zum weit überwiegenden Anteil aus dem Grundwasser. Als Folge des ausgeprägten Bevölkerungswachstums in den 1960er- und 1970er-Jahren wurden deshalb auch die Grundwasserentnahmen zur Trinkwasserversorgung erhöht. Aufgrund des Wirtschaftswachstums insbesondere im produzierenden Gewerbe stiegen zudem die gewerblichen und industriellen Grundwasserentnahmen bis in die 1980er-Jahre. Viele Jahre standen dementsprechend Nutzungskonflikte mit Forst und Naturschutz im Vordergrund der Grundwasserbewirtschaftung, da grundwasserabhängige Landökosysteme durch Grundwasserabsenkung geschädigt wurden. Auch Setzrissschäden an der Bebauung und erhebliche Investitionen für eine Umstellung der landwirtschaftlichen Beregnungstechnik auf Tiefbrunnen waren die Folge großräumiger Grundwasserabsenkungen. Periodisch verstärkten witterungsbedingte Trockenperioden (z. B. Anfang der 1970er- und Anfang der 1990er-Jahre in Südwestdeutschland) die Auswirkungen niedriger Grundwasserstände.

Demgegenüber gerieten in der bundesweit aufgetretenen witterungsbedingten Periode ausgeprägt hoher Grundwasserstände Ende der 1990er-Jahre Vernässungsprobleme in Siedlungsgebieten und Infrastruktureinrichtungen erstmals in das breite öffentliche Bewusstsein. In einer Umfrage des Bundes der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau, an der sich 730 Kommunen beteiligten, meldeten u. a. mehr als 50 Prozent der größeren Städte Probleme mit Kellervernässungen. In einigen Kommunen bedrohte ansteigendes Grundwasser sogar die Infrastruktur (U-Bahn, Bauwerke der Kanalisation, Unterführungen, Deponien usw.), der Gewässerschutz war zeitweise als Folge einer verminderten Reinigungsleistung der Kläranlagen auf Grund hoher Fremdwasserzuflüsse aus dem Grundwasser beeinträchtigt (BWK 2003).

Die witterungsbedingten Phasen ausgeprägt niedriger bzw. hoher Grundwasserstände sind es, die die Nutzungskonflikte zwischen Naturschutz und Forst auf der einen, sowie Siedlungsschutz und Landwirtschaft auf der anderen Seite aufzeigen.

Vor diesem Hintergrund stellte sich die Frage,

- inwieweit Klimatrends und Extremwetter ein nachhaltiges Grundwassermanagement beeinflussen.

Hierbei war insbesondere zu klären, in welchem Ausmaß Anpassungsstrategien zu entwickeln sind, die als Folge des Klimawandels ggf. von größeren Schwankungsamplituden der Grundwasserstände und des nutzbaren Grundwasserdargebots auszugehen haben. Auf der Grundlage der Klimazeitreihen der Regionalmodelle WETTREG, STAR und CLM auf der Basis der globalen ECHAM5 – Läufe wurden die Veränderungen in Boden- und Grundwasserhaushalt bis 2100 ermittelt, um auf dieser Grundlage Maßnahmen und Strategien für ein auch zukünftig nachhaltiges Grundwassermanagement abzuleiten.

1.2 Untersuchungsgebiet

Das engere Untersuchungsgebiet umfasst den Odenwald und den hessischen Teil des Oberrheingrabens (Hessisches Ried). Beide Teilgebiete wurden ausgewählt, weil sie in unmittelbarer Nachbarschaft auf Grund der hydrogeologischen Verhältnisse vollständig unterschiedliche Versorgungsstrukturen aufweisen.

Im Odenwald dominieren dezentrale lokale Wasserversorgungsstrukturen mit einem hohen Anteil einer Versorgung aus Quellen. Hier ist die bestimmende Bewirtschaftungsgröße das Schüttungsverhalten der Quellen und das aus der minimalen Schüttungsmenge verbleibende nutzbare Dargebot für die Trinkwasserversorgung nach Abzug der für Fauna und Flora erforderlichen Mindestabflussmenge. Eine relevante Vorratsbildung durch Grundwasseranreicherung oder Rückhaltung ist wegen des geringen Speichervolumens des Untergrundes nicht möglich.

Wegen der günstigen hydrogeologischen Bedingungen existieren dagegen im Oberrheingraben zahlreiche Wasserwerke, die nicht nur den örtlichen Wasserbedarf decken, sondern zur regionalen Wasserversorgung genutzt werden. Aus dem hessischen Teil des Oberrheingrabens wird zusätzlich der Rhein-Main-Ballungsraum mit Trinkwasser versorgt. Auf Grund vielfältiger Nutzungskonflikte in Folge der intensiven Grundwasserförderung wurden im Hessische Ried frühzeitig umfassende Strategien und Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement etabliert, die über Hessen hinaus Maßstäbe gesetzt haben. 1999 wurde der bisher einzige Grundwasserbewirtschaftungsplan nach Wasserhaushaltsgesetz in Deutschland aufgestellt. Die wasserrechtlich zulässigen Fördermengen sind an Richt- und Grenzwerte von Grundwasserständen ausgewählter Messstellen gekoppelt, die im Grundwasserbewirtschaftungsplan festgesetzt sind. Die kontinuierliche Überwachung der Messwerte basiert in Teilbereichen inzwischen auf www-Techniken (www.grundwasser-online.de). Hierbei werden die Informationen zu Betrieb und Monitoring, die bei den Wasserwerken lokal auf deren Datenbanken gehalten werden, automatisiert per Internet ausgetauscht, in einen wasserwerksübergreifenden räumlichen Zusammenhang gebracht (z.B. Grundwassergleichenpläne) und bei entsprechenden Nutzungsrechten Dritten verfügbar gemacht (z.B. Aufsichtsbehörden, Ingenieurbüros). Ferner wurden in Zuordnung zu großen Wasserwerken sukzessive Infiltrationsanlagen zur künstlichen Grundwasseranreicherung eingerichtet. Durch die Versickerung von zu Trinkwasserqualität aufbereitetem Rheinwasser ergeben sich einerseits Möglichkeiten einer Dargebotserhöhung, andererseits können die mit der Förderung verbundenen Grundwasserspiegelabsenkungen auf ein ökologisch verträgliches Maß reduziert und Mindestgrundwasserstände zur Vermeidung von Setzungsschäden eingehalten werden. Als Konsequenz der jüngsten Nassperiode wiederum wurden in Siedlungsgebieten Anlagen ausschließlich zur Begrenzung des Grundwasseranstiegs installiert, um Gebäude und Infrastruktur vor Vernässung zu schützen (Gerdes, 2002).

Damit liegen für die Region bereits Erfahrungen zu möglichen Instrumentarien und Technologien vor, die vor dem Hintergrund des Klimawandels zukünftig verstärkt Bestandteil eines nachhaltigen Grundwassermanagements sein können. Die bisherigen Erfahrungen haben aber auch

gezeigt, dass in Regionen wie dem Hessische Ried mit vielfältigen Nutzungsansprüchen auf engstem Raum eine verträgliche Grundwasserbewirtschaftung eine hochkomplexe politische Aufgabenstellung mit zahlreichen widerstreitenden Akteuren und Wirkungsbereichen ist.

1.3 Struktur des Vorhabens

Das Verbundprojekt wurde gemeinsam von den Partnern (Teilprojekt)

- Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH - BGS Umwelt
An der Eschollmühle 28, 64297 Darmstadt
(Prozessbasierte Wasserhaushaltsmodellierung und modellgestützte Grundwasserbewirtschaftung, Projektkoordination),
- Hessenwasser GmbH & Co. KG - Hessenwasser
Tausenstr. 100, 64521 Groß-Gerau-Dornheim
(Wasserbedarf, Wasserversorgungsstrukturen und Steuerung der Grundwasserbewirtschaftung),
- Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie - HLUG
Rheingastr. 186, 65203 Wiesbaden
(konzeptionelle Wasserhaushaltsmodellierung und dezentrale Wasserversorgung)

bearbeitet.

Für das Untersuchungsgebiet wurden in der ersten Bearbeitungsphase die Grundlegendaten vervollständigt. In Ergänzung zu den schon vorgenommenen Prognosen der Grundwasserneubildung auf Grundlage eines Baseflow-Index (BFI) wurden detaillierte Abflussmessungen in Flüssen und Bächen systematisch ausgewertet, um die Eignung der Methodik und die Voraussetzung für deren Anwendung im Hinblick auf die Untersuchung der Folgen des Klimawandels zu überprüfen (HLUG, Kap. 2.1). Das Verhalten der Quellschüttungen (Kap. 2.2, HLUG) und der Trink- und Brauchwasserbedarf in der Region des Untersuchungsgebiets wurden analysiert (Hessenwasser, Kap. 2.3) sowie die Situation in der landwirtschaftlichen Bewässerung aufbereitet (HLUG Kap. 2.3.3).

Die Zeitreihen der Klimadaten der regionalen Klimamodelle WETTREG, STAR und CLM auf der einheitlichen Grundlage des ECHAM 5 Globalmodells wurden mit einem Schwerpunkt auf den Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag und potentielle Verdunstung im Hinblick auf ihr Verhalten in den Beobachtungszeiträumen („control-run“) ausgewertet, um eine Einschätzung zur Belastbarkeit der klimatischen Eingangsdaten für Wasserhaushaltsbetrachtungen zu gewinnen (BGS Umwelt, Kap. 3).

Mit physikalisch begründeten Ansätzen zur Modellierung des Bodenwasserhaushalts wurde die Grundwasserneubildung durch Langzeitkontinuumssimulation für den Beobachtungszeitraum 1960 bis 2004 lokal differenziert ermittelt und das zentrale Prognoseinstrumentarium für das Hessische Ried, ein dreidimensionales, instationäres Grundwassermodell, kalibriert und validiert (BGS Umwelt, Kap. 4).

In den konzeptionellen Modellierungen der Grundwasserneubildung mit dem BFI-Ansatz bis 2100 wurde neben dem SRES-Szenario A1B, das Gegenstand sämtlicher Untersuchungen für die zukünftige Entwicklungen in der Grundwasserbewirtschaftung war, auch die Neubildungsraten für die SRES-Szenarien A2 und B1 bestimmt (HLUG, Kap. 5).

Für den Bereich des Odenwaldes wurde mit statistischen Methoden der Zusammenhang zwischen Niederschlag, Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz und Quellschüttungsverhalten hergestellt und die zukünftige Entwicklung abgeschätzt (HLUG, Kap. 6).

Zur Prognose des Trinkwasserbedarfs wurden die Bevölkerungsentwicklung sowie Verbraucherverhalten in Haushalten, Kleingewerbe und Industrie untersucht und in Szenarien strukturiert. Neben dem Gesamtbedarf, der für die Grundwasserbewirtschaftung maßgebend ist, wurden auch die Veränderungen im Spitzenbedarf in Folge des Klimawandels prognostiziert (Hessenwasser, Kap. 7).

In Modellrechnungen wurden die Veränderungen im Boden- und Grundwasserhaushalt bis 2100 für ausgewählte Realisationen der Regionalmodelle WETTREG, STAR und CLM (SRES-Szenarios A1B) unter Berücksichtigung des zukünftigen Trinkwasserbedarfs quantifiziert. Die aus den veränderten Grundwasserstände resultierenden Nutzungskonflikte wurden identifiziert (BGS Umwelt, Kap 8).

Maßnahmen zur Lösung der Nutzungskonflikte wurden gemeinsam von den drei Projektpartnern untersucht und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit betrachtet. Hierauf aufbauend wurden die Empfehlungen für ein auch zukünftig nachhaltiges Grundwassermanagement entwickelt (Kap. 9).

2 Kennnisstand

2.1 Grundwasserneubildung

2.1.1 Definition und Bedeutung für Hessen

Unter Grundwasserneubildung wird laut DIN 4049-3 der Zugang von in den Boden infiltriertem Wasser zum Grundwasser verstanden. Die Grundwasserneubildung ist ein Maß für die natürliche Regenerationsfähigkeit der Grundwasserressourcen und deshalb eine entscheidende hydrogeologische Kenngröße für die Beurteilung des mengenmäßigen Zustandes des Grundwassers.

Regional differenzierte Kenntnisse der Grundwasserneubildung sind eine wesentliche Voraussetzung für die nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Grundwasserressourcen, wie sie von der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) verlangt wird.

In Hessen, wo das für die Öffentlichkeit bereitgestellte Trinkwasser zu 95 % aus dem Grundwasser gewonnen wird, sind regional differenzierte Kenntnisse der Grundwasserneubildung besonders wichtig.

Die Grundwasserneubildung ist von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig. Neben den klimatischen Bedingungen (Niederschlag und Verdunstung) wird die Grundwasserneubildung durch die Landnutzung, die Bodenart, den geologischen Aufbau des Untergrundes, der Topographie, der Tiefe des Grundwassers und der Lage zu Gewässern beeinflusst. Auf Grund des jahreszeitlichen Verlaufs der klimatischen Einflussgrößen, der daraus resultierenden Wachstumsperioden und der regional verschiedenen Gebietseigenschaften weist die Grundwasserneubildung eine sowohl zeitliche als auch räumliche Variabilität auf. In Hessen findet die Grundwasserneubildung im langjährigen Mittel überwiegend während des Winterhalbjahres statt, wenn die Verdunstung gering ist und der Niederschlag größtenteils versickern kann. In einem heterogenen Landschaftsraum - wie ihn Hessen darstellt - kann es auf Grund der differenzierten Topographie, Geologie und unterschiedlicher Landnutzungs- und Bodenarten zu deutlichen regionalen Unterschieden in der Grundwasserneubildung kommen.

2.1.2 Sachstand

Wegen der intensiven Grundwasserbewirtschaftung im Hessischen Ried und der besonderen klimatischen Verhältnisse kommt der Quantifizierung des Grundwasserhaushalts dieser Region eine besonders wichtige Rolle zu (Kämpf, M. et al., 2008).

Im Hessischen Ried wird die Grundwasserneubildung maßgeblich von den Niederschlägen, den Zuflüssen aus dem Odenwald sowie den Wechselwirkungen (Infiltration, Entwässerung) mit den natürlichen Fließgewässern und den Grabensystemen bestimmt. Die zentrale Größe für die Abschätzung der erschließbaren Grundwassermengen (nutzbares Grundwasserdargebot) ist die Grundwasserneubildung aus Niederschlag. Die im Zuge der Erstellung des Grundwasser-

bewirtschaftungsplans Hessisches Ried (Regierungspräsidium Darmstadt, 1999) durchgeführten modellgestützten Untersuchungen im Jahr 1996 (Hessische Landesanstalt für Umwelt, 1996) haben bereits gezeigt, dass sich das Hessische Ried in der Vergangenheit durch eine große Schwankungsbreite in den Jahressummen der Grundwasserneubildung ausgezeichnet hat. Während in Trockenperioden (1971-1976, 1989-1992) die Grundwasserneubildung mit rund 60 mm/a sehr gering ausfällt, erreicht sie in Nassperioden (1977-1982) über 160 mm/a (Tab. 1); dies entspricht einer Schwankungsbreite von rund 100 mm/a. Für die langjährig mittlere Grundwasserneubildung der Referenzperiode 1961-1990 wurde mit dem an das Verfahren WESSOLEK (Wessolek, 1992) angelehnten Modellansatz 126 mm/a für das Hessische Ried ermittelt. Die in Tab. 1 aufgeführten Grundwasserneubildungsraten bilden die Basis des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried.

Gebiet	langjähriges Mittel 1961-1990	Trockenperiode 1971-1976	Feuchtperiode 1977-1982	Trockenperiode 1989-1992
Hessisches Ried	126 mm/a 4,01 l/s/km ²	57 mm/a -55% 1,82 l/s/km ²	166 mm/a +32% 5,28 l/s/km ²	62 mm/a -51% 1,98 l/s/km ²

Tab. 1: Grundwasserneubildung aus Niederschlag (Regierungspräsidium Darmstadt, 1999)

Da das GIS-gestützte Verfahren zur Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag räumlich auf das Hessische Ried begrenzt war, wurde im Jahr 2004 im HLUg ein landesweites Verfahren entwickelt (Grossmann, 1995), wodurch die Grundwasserneubildung erstmals hessenweit flächendifferenziert mit einer einheitlichen Methode ermittelt werden konnte.

Die ersten Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt in Hessen wurden im Rahmen des Integrierten Klimaschutzprogrammes von Hessen INKLIM 2012 (Baustein II) im Jahr 2005 unter Verwendung des landesweiten Modells durchgeführt (Berthold u.a., 2005). Die verwendeten Klimaprojektionen für den Zeitraum bis 2050 basierten auf dem globalen Zirkulationsmodell (GCM) ECHAM4, dem regionalen Klimamodell (RCM) WETTREG-2003 und dem moderaten SRES-Emissionsszenario B2. Die ersten Szenarien-Ergebnisse von 2005 zeigten für die meisten Landesteile einen deutlichen Anstieg der Grundwasserneubildung bis zum Jahr 2050.

Im Rahmen des BMBF-Projektes AnKliG hat das HLUg die Grundwasserneubildung auf der Grundlage verschiedener Klimaprojektionen, die auf dem GCM ECHAM5 beruhen, bis zum Jahr 2100 landesweit simuliert.

2.1.3 Methodik - Modellkonzept des HLUg (BFI-Ansatz)

Im HLUg kommt für die Modellierung der Grundwasserneubildung ein zweistufiges, GIS-gestütztes Verfahren zum Einsatz, bei dem das empirische Einschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell (BWHM) nach Grossmann (1995, 1997, 1998 und 2001) und Dommermuth &

Trampf (1991) mit einem speziell für Hessen entwickelten Regressionsmodell (Hergesell u.a., 2005) gekoppelt wurde (Abb. 1).

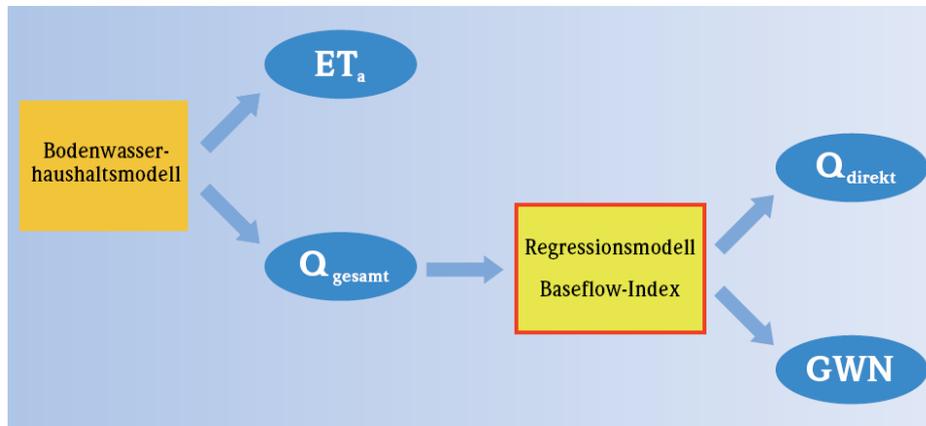


Abb. 1: 2-stufiger Verfahrensablauf zur Berechnung flächendifferenzierter Abflusskomponenten

Vergleichbare Verfahren werden gegenwärtig sowohl auf Bundesebene im Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD) als auch auf Länderebene in den KLIWA-Partnerländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz angewendet.

Das für den ersten Verfahrensschritt verwendete BWHM berechnet in Abhängigkeit von Klima, Landnutzung und Bodeneigenschaften durch die Bilanzierung des Wasserhaushalts in der Biosphäre und der Atmosphäre die tatsächliche Evapotranspiration (ET_a) und die gesamte aus einem Bilanzierungsraum abfließende Wassermenge, die als Gesamtabfluss (Q_{gesamt}) bezeichnet wird.

$$N_{korr.} - ET_a = Q_{gesamt} \quad (\text{Ergebnis des ersten Verfahrensschritts})$$

mit $N_{korr.}$ = korrigierter Niederschlag

Das BWHM rechnet in Monatsschritten und berücksichtigt sieben Landnutzungsclassen, die phänologische Entwicklung der Pflanzen, Interzeptionsverdunstung für Waldflächen und kapillaren Aufstieg für grundwasserbeeinflusste Böden. Als klimatische Eingangsparameter gehen der korrigierte Niederschlag und die Grasreferenzverdunstung als Monatssummen in das Modell ein.

Im zweiten Verfahrensschritt wird der Gesamtabfluss (Q_{gesamt}) mit dem im HLUG auf Basis von Abflussmessungen entwickelten Regressionsmodell in Abhängigkeit von klimatologischen, landnutzungsspezifischen, morphographischen, pedologischen und hydro(geo)logischen Gebietseigenschaften in die beiden Abflusskomponenten Basisabfluss (Q_{basis}) und Direktabfluss (Q_{direkt}) separiert.

$$Q_{gesamt} = Q_{basis} + Q_{direkt}$$

mit Q_{basis} = Basisabfluss

Q_{direkt} = Direktabfluss

Der Direktabfluss ist die Summe aller schnellen Abflussanteile (Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss bzw. Interflow), die mit nur geringer Zeitverzögerung (Stunden bis eine Woche) nach einem Niederschlagsereignis den Vorfluter erreichen.

Der Basisabfluss resultiert aus der sog. „langsamen“ Abflusskomponente im Aquifer und ist weitgehend dessen Leerlaufen in Trockenwetterperioden gleichzusetzen. Der Basisabfluss ist somit in der Regel nichts anderes als regeneriertes Grundwasser, das im Aquifer über einen längeren Zeitraum (meistens Wochen oder Monate, z. T. sogar einige Jahre) gespeichert worden ist. Daher kann die Grundwasserneubildung bei Betrachtung größerer Zeiträume dem Basisabfluss gleichgesetzt werden:

$$\text{GWN} = Q_{\text{basis}} \text{ (im langjährigen Mittel)}$$

Die Separation des Gesamtabflusses (Q_{gesamt}) in die Abflusskomponenten Direktabfluss (Q_{direkt}) und Basisabfluss (Q_{basis}) bzw. Grundwasserneubildung erfolgt durch die Verwendung so genannter „Baseflow-Indizes“. Der Baseflow-Index (BFI) beschreibt den Anteil des Basisabflusses (Q_{basis}) am Gesamtabfluss (Q_{gesamt}):

$$\text{BFI} = Q_{\text{basis}} / Q_{\text{gesamt}}$$

Somit kann die Grundwasserneubildung als relativer Anteil am Gesamtabfluss ausgedrückt werden. Man erhält die Grundwasserneubildung durch die multiplikative Verknüpfung des Baseflow-Index mit dem Gesamtabfluss:

$$\text{GWN} = \text{BFI} \cdot Q_{\text{gesamt}} \text{ (Ergebnis des zweiten Verfahrensschritts)}$$

Für die flächenhafte Anwendung des BFI-Ansatzes in Hessen wurde für eine Auswahl von 52 Pegeleinzugsgebieten zunächst BFI-Werte auf der Grundlage von langjährigen Abflussmessungen der Periode 1971–2000 ermittelt. Durch multiple lineare Regressionsanalyse wurde dann der statistische Zusammenhang zwischen den BFI-Werten der 52 Einzugsgebiete und einer Auswahl abflussrelevanter Gebietsmerkmale in Form einer Übertragungsfunktion beschrieben. Die im ermittelten Regressionsmodell einfließenden Gebietsparameter sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Signifikante Parameter
Niederschlag
Verhältnis Sommer-/Winterniederschlag
Gebietshöhe
Landnutzung Acker
Landnutzung Grünland
Landnutzung Wald
nFK100
Kf-Wert der Böden
Flussdichte
Kf-Wert oberer Grundwasserleiter

Tab. 2: Abflussrelevante Gebietsparameter des BFI-Regressionsmodells

Mit Hilfe der gewonnenen Übertragungsfunktion wurden die BFI-Werte für die gesamte Fläche Hessens regionalisiert. Durch die Multiplikation der flächendifferenzierten BFI-Werte mit dem durch das BWHM zuvor ermittelten Gesamtabfluss wird abschließend die Grundwasserneubildung berechnet.

2.1.4 Modellanpassungen und -weiterentwicklungen

BFI-Anpassung für reliefarme Lockergesteinsbereiche

Die für die Regionalisierung des BFI verwendeten Pegel Einzugsgebiete liegen größtenteils in reliefierten Festgesteinsgebieten, in denen durch die vorherrschenden schnellen lateralen Abflussprozesse nur ein Teil des Gesamtabflusses der Grundwasserneubildung entspricht. Für die reliefarmen, gut durchlässigen Lockergesteinsbereiche liegen keine brauchbaren einzugsgebietsbezogenen Abflussmessungen vor, da diese durch sommerliche Verkrautung und Einleitung von Kläranlagen besonders zu Niedrigwasserzeiten stark verfälscht werden.

Es hat sich herausgestellt, dass die Regionalisierung des BFI auf der Basis der für reliefierte Festgesteinsbereiche ermittelten Übertragungsfunktion in reliefarmen Lockergesteinsbereichen zu unplausiblen BFI-Werten führt. Für das Hessische Ried würde man einen mittleren BFI von 0,58 erhalten. Dies würde bedeuten, dass nur 58% vom Gesamtabfluss als Grundwasserneubildung wirksam werden. In dem reliefarmen und gut durchlässigen Porengrundwasserleiter des Oberrheingrabens ist aber davon auszugehen, dass der Gesamtabfluss nahezu vollständig der Grundwasserneubildung entspricht (Armbruster, 2002). Da diese Annahme auch den Modellansätzen des Grundwasserbewirtschaftungsplans Hessisches Ried (Hessische Landesanstalt für Umwelt, 1996), des Projektpartners BGS Umwelt und der angrenzenden Bundesländer Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz (Morhard, 2010) zu Grunde gelegt wird, wurde für das landesweite Modell des HLUg den reliefarmen Lockergesteinsbereichen aus Vergleichsgründen ein BFI-Wert von 1 zugewiesen.

BFI-Anpassung für versiegelte Flächen

Des Weiteren wurde den bisher im Modell ausgesparten Siedlungsflächen auf Basis von Vergleichsstudien und Literaturlauswertungen BFI-Werte zugewiesen. Hierbei wurde zwischen drei Versiegelungsgraden unterschieden (Tab. 3). Mit zunehmender Versiegelung nehmen BFI und Grundwasserneubildung ab. In großflächigen Ballungsräumen kann die Versiegelung eine deutliche Reduktion der Grundwasserneubildung bewirken.

Versiegelungsgrad	BFI
10-15%	0,42
35-50%	0,31
85-100%	0,13

Tab. 3: BFI-Werte in Abhängigkeit des Versiegelungsgrades

In Abb. 2 ist der flächendifferenzierte BFI für Hessen mit den zuvor genannten Anpassungen dargestellt.

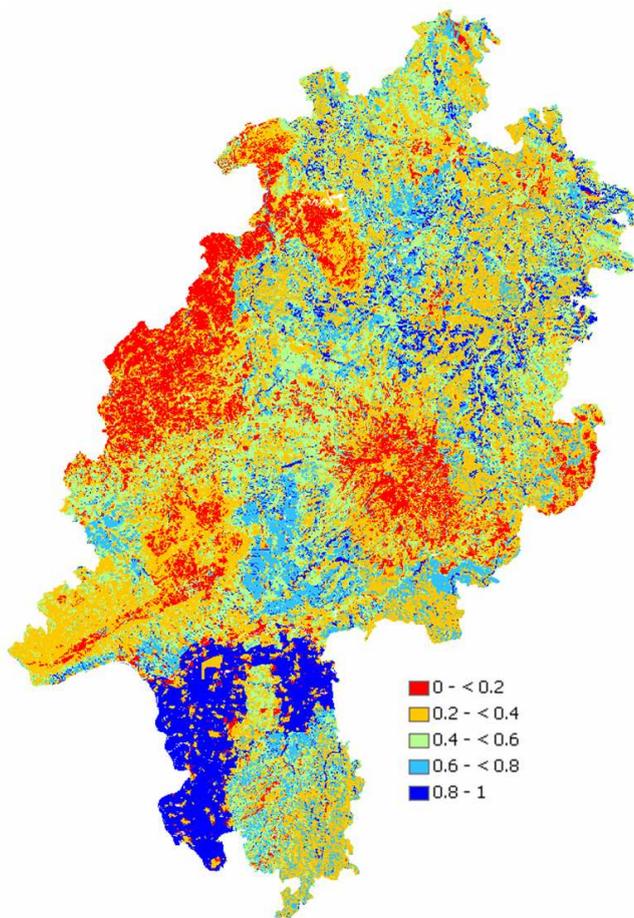


Abb. 2: Räumliche Verteilung des Baseflow-Index in Hessen

Sensitivitätsanalyse zur zeitlichen Variabilität des BFI

Das BFI-Konzept stellt ein plausibles und praktikables Verfahren zur flächendifferenzierten Beschreibung der langjährig mittleren Abflusskomponenten dar. Unter der Annahme, dass der BFI, also der Quotient Basisabfluss/Gesamtabfluss, sich zeitlich invariant verhält, wird das Konzept in Hessen und von den KLIWA-Partnerländern auch für Szenariobetrachtungen hinsichtlich der Grundwasserneubildung unter Verwendung von Klimaprojektionen angewendet.

Es ist allerdings davon auszugehen, dass eine deutliche Veränderung im Niederschlagsregime auch eine Änderung des Quotienten Basisabfluss/Gesamtabfluss und somit auch eine andere Aufteilung der Abflusskomponenten bewirkt. Das kommt schon dadurch zum Ausdruck, dass bei dem oben beschriebenen BFI-Regressionsmodell von Hessen die Parameter Niederschlag und das Verhältnis Sommer-/Winterniederschlag als signifikante Gebietsparameter eingeflossen sind. Um die klimatisch bedingte Dynamik abzuschätzen, hat das HLUG im Rahmen des Projektes eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hierfür wurden für 52 hessische Pegelzugsgebiete die auf Abflussmessungen beruhenden BFI-Werte (MoMNV/MQ) der Referenzperiode 1971-2000 mit den Baseflow Indices der Trockendekade 1971-1980 und der Feuchtdekade 1981-1990 separat ausgewertet und miteinander verglichen (Tab. 4).

	Niederschlag	Diff. vs. 1971-2000	BFI	Diff. vs. 1971-2000
1971-2000 (mittel)	845 mm/a		0.47	
1971-1980 (trocken)	772 mm/a	- 8.7 %	0.50	+ 6.4 %
1981-1990 (feucht)	913 mm/a	+ 8.0 %	0.45	- 4.3 %

Tab. 4: Niederschlag und BFI für verschiedene Perioden

Gegenüber dem langjährigen Mittel nimmt der Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluss bzw. der BFI für die Trockendekade um ca. 6% zu. Für die Feuchtdekade fällt der BFI ca. 4 % geringer aus. Unter Verwendung des langjährig mittleren BFI wird für die Trockendekade die Grundwasserneubildung also um 6% unterschätzt, für die Feuchtdekade wird sie um 4 % überschätzt. In Anbetracht der mit der regionalen Klimamodellierung verbundenen großen Unsicherheiten ist der Fehler für die Betrachtung von Dekaden und längeren Bezugszeiträumen als gering zu bewerten. Für kürzere Betrachtungszeiträume oder Einzeljahre nimmt die Variabilität des BFI und somit auch der Fehler jedoch deutlich zu. Dadurch dass das BFI-Regressionsmodell von Hessen die Parameter Niederschlag und das Verhältnis Sommer-/Winterniederschlag als signifikante Gebietsparameter berücksichtigt, können für die Betrachtungen kürzerer Zeiträume die BFI-Werte an die jeweiligen klimatischen Randbedingungen angepasst werden. Diese Vorgehensweise erlaubt auch eine Anpassung des BFI an die sich infolge des Klimawandels ändernden klimatischen Verhältnisse.

Regionalisierung von Klimadaten

Für die im Rahmen des Projektes durchgeführten Simulationen des Bodenwasserhaushalts bzw. der Grundwasserneubildung wurden im HLUG auf der Grundlage von für DWD-Messstationen vorliegenden Klimadaten (Beobachtungsdaten und Szenariendaten) die Modell-Eingangsrößen Niederschlag und Grasreferenzverdunstung mit dem Simulationsmodell GWN-BW auf Tagesschrittbasis regionalisiert.

Zunächst wurden die Niederschläge stationsweise in Abhängigkeit von Niederschlagsart und Windgeschwindigkeit nach dem Verfahren von Sevruk (1989) korrigiert und die Grasreferenzverdunstung aus den an den Klimastationen des DWD vorliegenden Klimaparametern gemäß ATV-DVWK-Merkblatt 504 berechnet. Anschließend wurden die Stationswerte unter Berücksichtigung der 12 nächstgelegenen Nachbarpunkte und in Abhängigkeit der Höhe auf ein 500 Meter Raster des Höhenmodells interpoliert. In Abb. 3 ist das Ergebnis der Regionalisierung für die langjährig mittlere Jahressumme des korrigierten Niederschlags bezogen auf den Beobachtungszeitraum 1971-2000 für den Gebietsausschnitt der beiden Projektgebiete Hessisches Ried und Odenwald dargestellt.

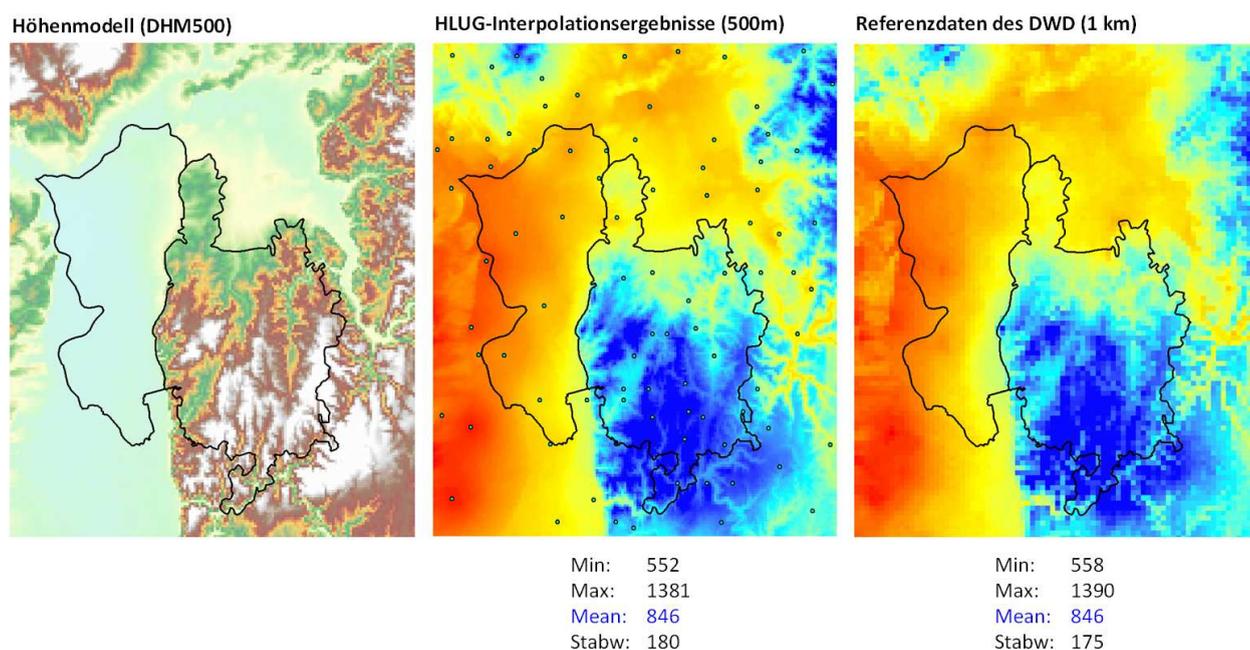


Abb. 3: Vergleich zwischen regionalisierten Niederschlagsdaten des HLUG und Referenzdaten des DWD

Entsprechend wird in Abb. 4 das Ergebnis der Regionalisierung der Grasreferenzverdunstung mit den Referenzdaten des DWD beispielhaft für den Beobachtungszeitraum 2001-2008 verglichen.

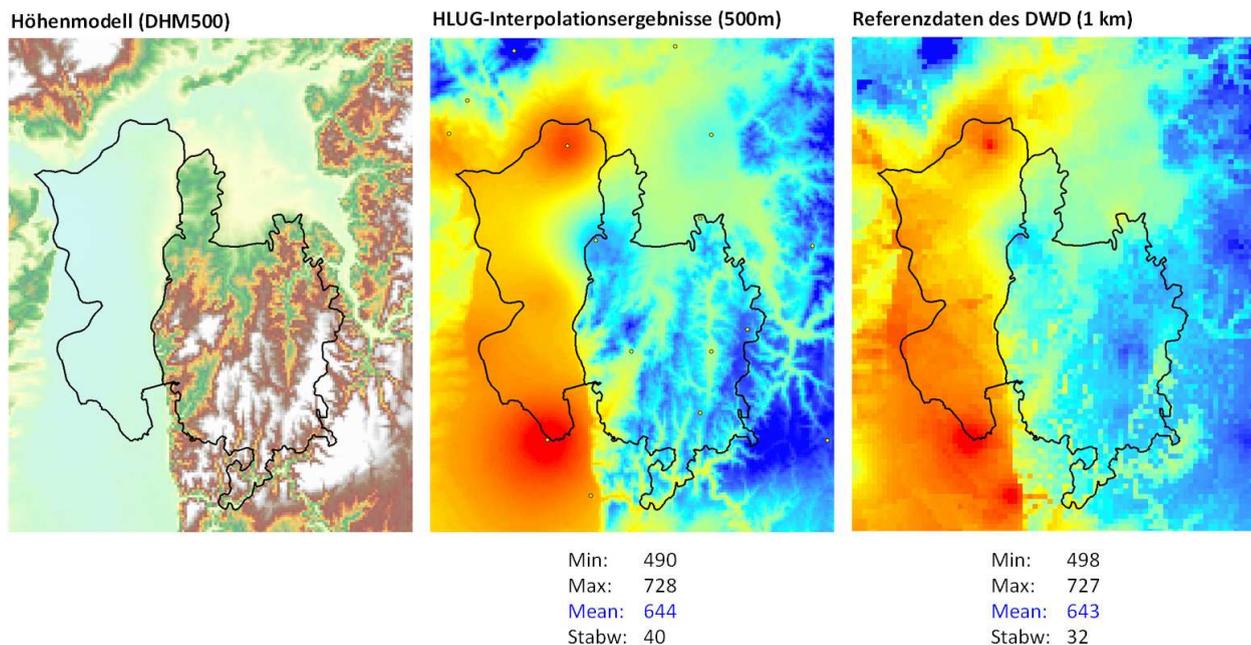


Abb. 4: Vergleich zwischen der regionalisierten Grasreferenzverdunstung des HLUG und Referenzdaten des DWD

Sowohl die Wertespektren als auch die Verteilungsmuster der Interpolationsergebnisse stimmen für den betrachteten Gebietsausschnitt sehr gut mit den Referenzrasterdaten des DWD überein. Für die Gesamtfläche Hessens fällt die Jahressumme des Niederschlags im langjährigen Mittel rund 2 % höher aus. Die durch das HLUG regionalisierte Jahressumme der Grasreferenzverdunstung liegt im langjährigen Mittel rund 4% unterhalb der Referenzdaten des DWD.

2.1.5 Simulationsergebnisse für die Referenzperiode 1971-2000 (Beobachtungsdaten)

In den Abbildungen 5 und 6 sind die Ergebniskarten der mit dem 2-stufigen Modellkonzept ermittelten Wasserhaushaltsgrößen bzw. Abflusskomponenten für die Beobachtungsperiode 1971-2000 dargestellt. Die beiden Untersuchungsgebiete des Projektes, das Hessische Ried und die Odenwaldregion, sind im äußersten Südwesten bzw. Südosten gesondert hervorgehoben. In Tab. 5 sind die Modellergebnisse für die Gesamtfläche Hessens, das Hessische Ried und die Mittelgebirgsregion Odenwald als langjährig mittlere Jahressummen mit der Einheit mm/a aufgeführt.

Durch die topographische Struktur des Landes mit seinen Mittelgebirgen, die flächenhaft untergeordnete Niederungen bzw. flache Landschaften einschließen, ist das Klima räumlich stark strukturiert.

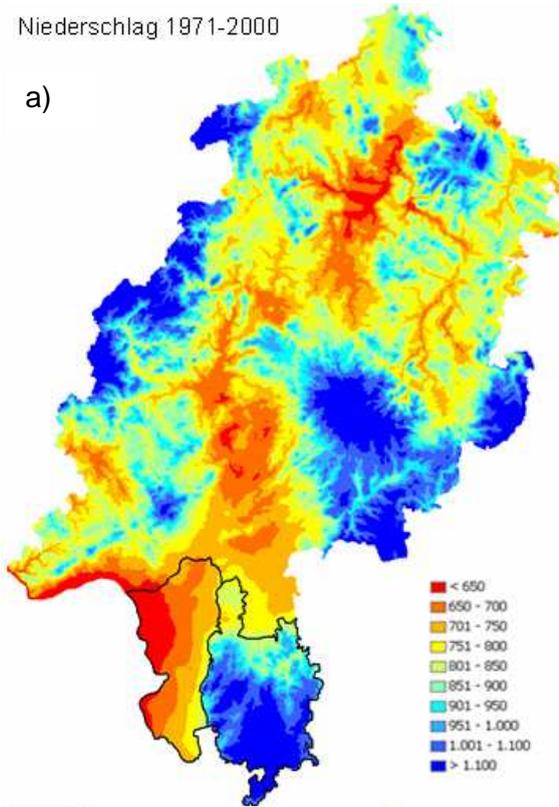
Insgesamt erweisen sich die Niederungen als relativ niederschlagsarm, während die Mittelgebirgsregionen deutlich mehr Niederschlag erhalten (Abb. 5 a). Das Hessische Ried zählt zu den niederschlagsärmsten Regionen Hessens, der östlich angrenzende Odenwald zählt dagegen zu

den niederschlagsreichsten Regionen. Die Karte der potentiellen Verdunstung (Abb. 5 b) zeigt aufgrund des starken Einflusses der Temperatur auf die Verdunstung eine deutliche Höhenabhängigkeit. Zusätzlich ist ein zunehmender Nord-Süd Gradient erkennbar. Die höchste potentielle Verdunstung ist in den Niederungen des Hessischen Rieds zu erkennen. Im Odenwald ist die potentielle Verdunstung deutlich niedriger, sie liegt aber geringfügig über dem Mittelwert von Hessen. Die klimatische Sonderstellung des relativ warmen und trockenen Hessischen Rieds kommt besonders deutlich bei der klimatischen Wasserbilanz (Abb. 5 c), der Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Verdunstung, zum Ausdruck. Bei der realen Verdunstung (Abb. 5 d) fällt auf, dass diese im Hessischen Ried niedriger ist als im angrenzenden Odenwald. Das liegt daran, dass im Hessischen Ried die Wasserverfügbarkeit für Verdunstungsprozesse niedriger ist. Mit abnehmendem Bodenwassergehalt nimmt die reale Verdunstung ab bzw. ab einem kritischen Bodenwassergehalt findet diese gar nicht mehr statt.

Der Gesamtabfluss, die Differenz aus Niederschlag und realer Verdunstung, stellt den abflusswirksamen Niederschlagsteil dar, der für alle Abflussprozesse verfügbar ist. Die räumliche Verteilung des Gesamtabflusses folgt deutlich dem Relief bzw. der Niederschlagsverteilung (Abb. 6 a). Auch hier kommt wieder der deutliche Kontrast zwischen dem Hessischen Ried mit den niedrigsten Gesamtabflüssen Hessens und dem benachbarten Odenwald mit überdurchschnittlich hohen Gesamtabflüssen zum Ausdruck. Der Direktabfluss stellt die Summe der schnellen Abflusskomponenten (Oberflächen- und Zwischenabfluss) dar. Dieser Teil des Gesamtabflusses gelangt unmittelbar bzw. mit einer geringen zeitlichen Verzögerung in die Vorflut. Der Direktabfluss ist in den reliefierten Mittelgebirgsregionen am höchsten und in den reliefarmen Niederungen am niedrigsten (Abb. 6 b). Im Hessischen Ried und der Untermain-Ebene findet mit Ausnahme der versiegelten Flächen (Siedlungsflächen) kein Direktabfluss statt. Die restlichen Abflussanteile des Gesamtabflusses, die nicht unmittelbar oberflächlich bzw. oberflächennah abfließen, versickern als unterirdische Abflüsse und gelangen nach der Passage durch die ungesättigte Zone mit einer deutlichen zeitlichen Verzögerung als Grundwasserneubildung in den Grundwasserraum. Da die Grundwasserneubildung neben den klimatischen Bedingungen noch von einer Vielzahl weiterer Einflussgrößen abhängig ist, erscheint das Verteilungsmuster insgesamt sehr heterogen (Abb. 6 c). Das Flächenmittel der langjährig mittleren Grundwasserneubildung in Hessen beträgt auf der Grundlage der mit dem Programm GWN-BW regionalisierten Klimadaten 111 mm/a für die Referenzperiode 1971-2000 (Tab. 5). Obwohl im Hessischen Ried der Gesamtabfluss, mit Ausnahme der Siedlungsgebiete, vollständig als Grundwasserneubildung wirksam wird ($BFI = 1$), fällt die Grundwasserneubildung hier im langjährigen Mittel mit 96 mm/a niedriger als im Hessenmittel aus. Allerdings ist ein deutlicher West-Ost Gradient erkennbar. Im benachbarten Odenwald liegt die Grundwasserneubildungsraten aus Niederschlag mit 168 mm/a mit am höchsten in Hessen.

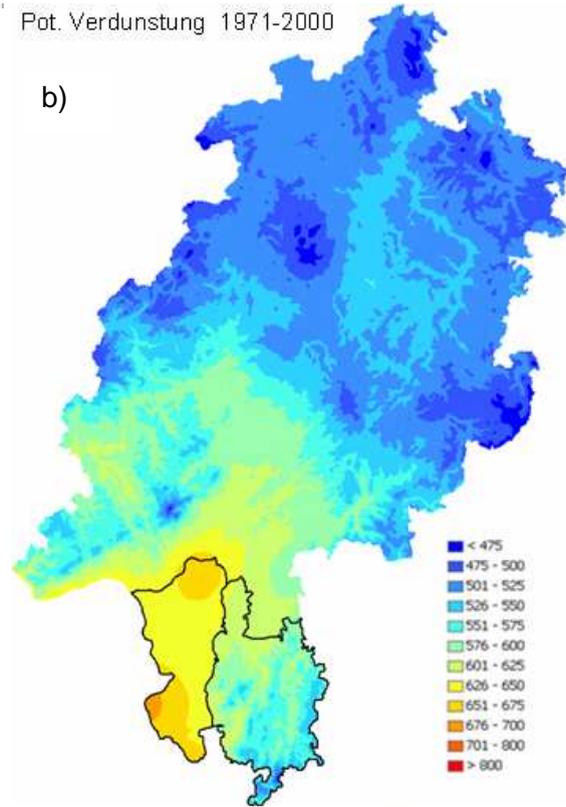
Niederschlag 1971-2000

a)



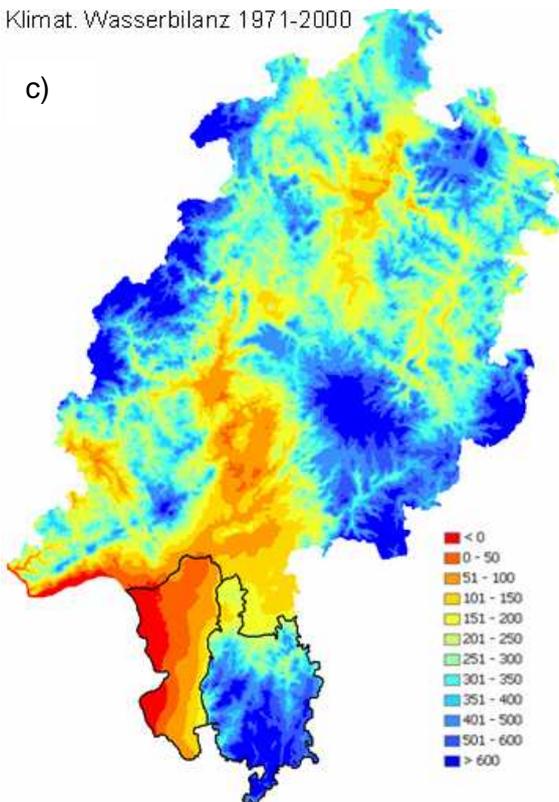
Pot. Verdunstung 1971-2000

b)



Klimat. Wasserbilanz 1971-2000

c)



Reale Verdunstung 1971-2000

d)

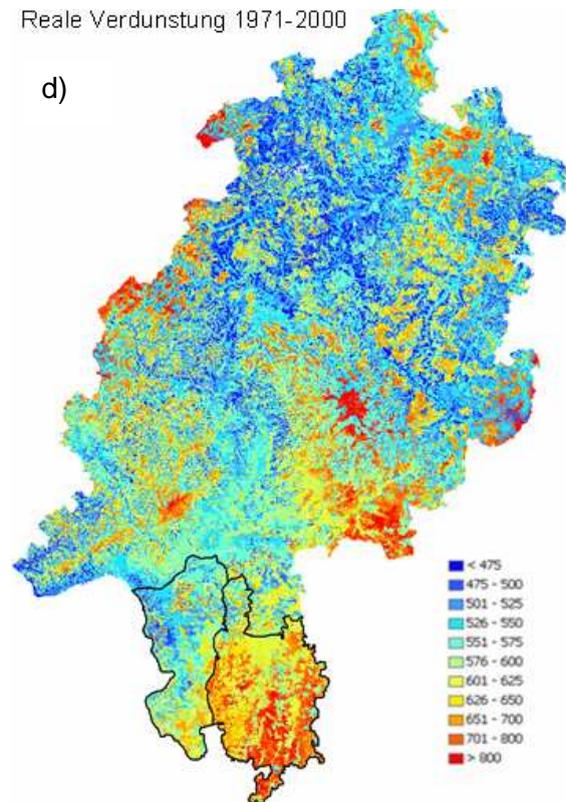
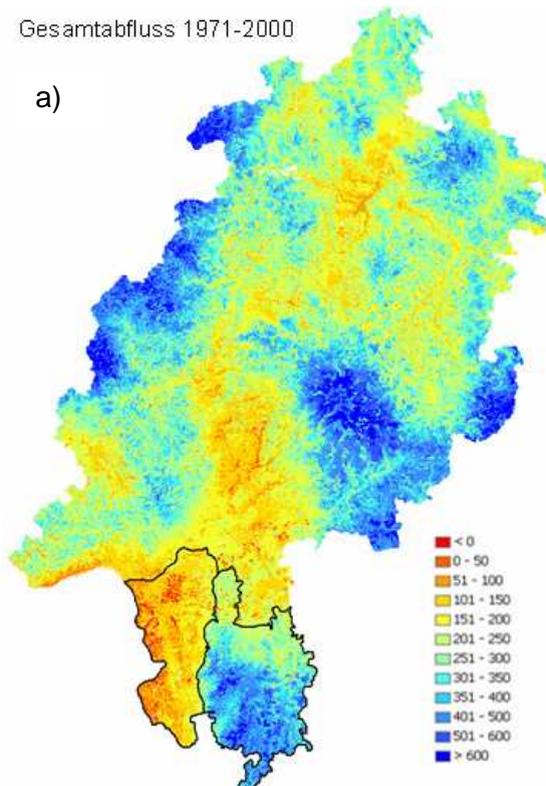


Abb. 5: Wasserhaushaltskomponenten der Beobachtungsperiode 1971-2000 in Hessen (Angaben in mm/a)

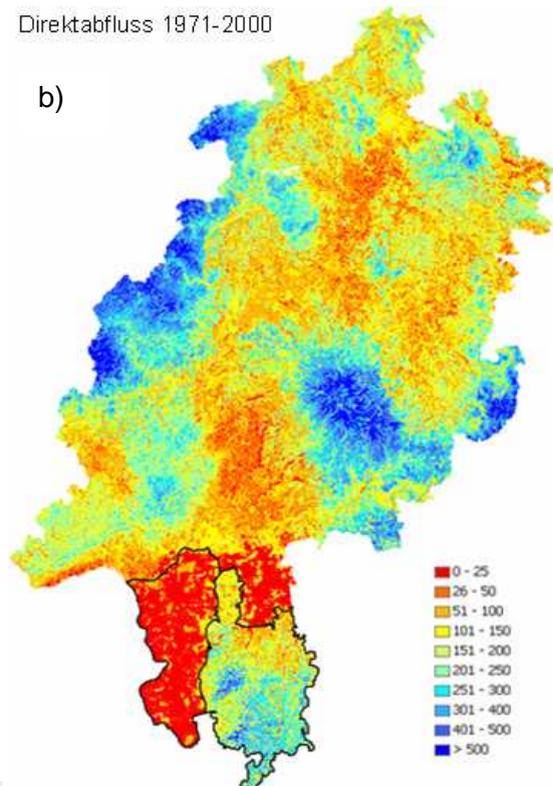
Gesamtabfluss 1971-2000

a)



Direktabfluss 1971-2000

b)



Grundwasserneubildung
1971-2000

c)

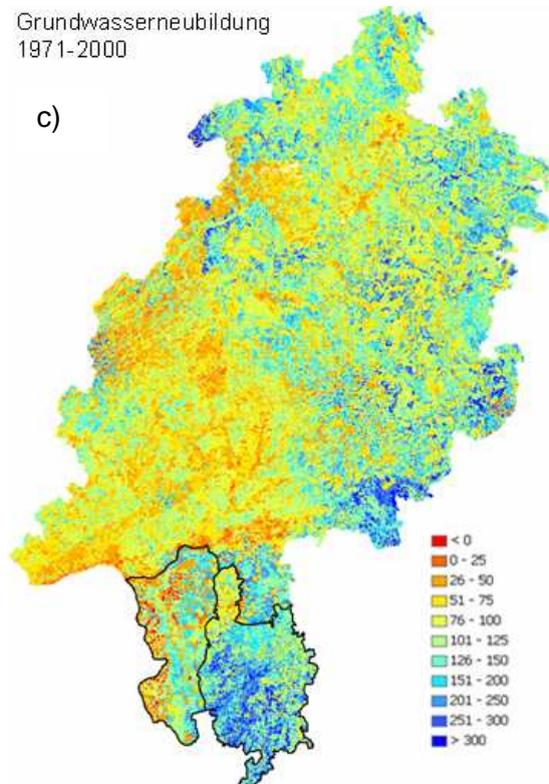


Abb. 6: Abflusskomponenten der Beobachtungsperiode 1971-2000 in Hessen (Angaben in mm/a)

	Niederschlag	Potentielle Verdunstung	Klim. Wasserbilanz	Reale Verdunstung	Gesamt-abfluss	Direktabfluss	GW-Neubildung
Hessen	859	546	313	581	278	167	111
Hess. Ried	695	648	47	579	116	20	96
Odenwald	1029	581	448	671	358	190	168

Tab. 5: Langjährig mittlere Jahressummen [mm] der Wasserhaushaltsgrößen in Hessen (1971-2000)

2.1.6 Diskussion der Ergebnisse

Die hier vorgestellten Modellergebnisse für die Grundwasserneubildung liegen im landesweiten Mittel rund 10 % über den bisherigen Modellergebnissen des HLUg, die auf bereits regionalisierten Rasterdaten des DWD und der Anwendung des gleichen Modell-Ansatzes beruhen. Gegenüber den aus Abflussmessungen ermittelten Werten fallen die im Rahmen des Verbundprojektes ermittelten landesweiten Modellergebnisse 3,6 % höher aus. Dagegen fallen die auf den Rasterdaten des DWD basierenden bisherigen Modellergebnisse gegenüber den aus Abflussmessungen ermittelten Grundwasserneubildungsraten 5,4 % niedriger aus. Die Differenz zwischen den beiden Modellergebnissen ist auf die unterschiedlichen Regionalisierungsverfahren für die Stationswerte der Klima-Inputgrößen Niederschlag und Grasreferenzverdunstung und Unterschieden in der Niederschlagskorrektur zurück zu führen. Vergleichende Auswertungen haben allerdings gezeigt, dass die methodisch bedingte, systematische Abweichung der Absolutwerte kaum einen Einfluss auf die im Abschnitt 5.1 beschriebene relative Änderung der Grundwasserneubildung infolge des Klimawandels hat. Bei der Verwendung von Klimaprojektionsdaten ist das Klimaänderungssignal trotz der voneinander abweichenden Absolutwerte nahezu identisch. Bei der Betrachtung bzw. Interpretation der Absolutwerte muss allerdings diesem methodisch bedingten Fehler Rechnung getragen werden.

Die für das Hessische Ried ermittelte Grundwasserneubildung (1971-2000: 96 mm/a) ist nicht direkt mit den bereits erwähnten Modellergebnissen des Grundwasserbewirtschaftungsplans (1961-1990: 126 mm/a) vergleichbar, da es sich nicht um die gleichen Bezugszeiträume handelt. Die Periode 1971-2000 war gegenüber der Periode 1961-1990 niederschlagsärmer. Außerdem beinhalten die Modellergebnisse des Grundwasserbewirtschaftungsplans zusätzlich die Berechnungsmengen der landwirtschaftlichen Beregnung. Die aus der landwirtschaftlichen Beregnung resultierende Grundwasserneubildung wurde für die insgesamt ca. 400 km² großen Beregnungsflächen auf 20-30 mm/a geschätzt.

Aktuelle Modellergebnisse für den nördlichen Oberrheingraben liegen im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA für die Periode 1971-2000 vor (Morhard, 2010). Die auf Tagesschrittbasis mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW ermittelte Grundwasserneubildung beläuft sich auf 83 bis 95 mm/a. Trotz Anwendung unterschiedlicher Wasserhaushaltsmodelle stimmen die Ergebnisse für die Region des nördlichen Oberrheingrabens sehr gut überein.

Zur Validierung der Modellergebnisse liegen, wie bereits in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, im Hessischen Ried keine brauchbaren Abflussmessungen vor. Die auf Abflussmessungen abgeleitete mittlere Grundwasserneubildungsrate im angrenzenden rheinland-pfälzischen Teil des Oberrheingrabens beläuft sich auf 81 mm/a, die geschätzte Grundwasserneubildung wird mit 100 mm/a angegeben (Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, 2007).

Anders als in dem mit sehr guten Speichereigenschaften ausgestatteten großflächigen Porengrundwasserleiter des Hessischen Rieds erfolgt die Wassergewinnung im Festgesteinsbereich des Odenwalds größtenteils über Quelfassungen (siehe Abschnitt 2.2). Aufgrund der geringen Speichereigenschaften kann nur ein geringer Anteil der überdurchschnittlich hohen Grundwasserneubildung aus Niederschlag (1971-2000: 168 mm/a) im Festgestein gespeichert und für die Wasserversorgung genutzt werden.

2.2 Quellschüttung

2.2.1 Entwicklung der Quellschüttungen im Odenwald

2.2.1.1 Einführung und Datengrundlagen

Quellen bzw. deren Fassungen werden vor allem in den Mittelgebirgsregionen von Hessen häufig zur Trinkwassergewinnung herangezogen. Auch in der Region Odenwald werden in vielen Gemeinden die vorhandenen Quelfassungen zur dezentralen Trinkwasserversorgung genutzt.

Für die Analyse der zeitlichen Entwicklung bzw. Dynamik von Quellschüttungen wurden ausgewählte Quellen der Mittelgebirgsregion Odenwald herangezogen. Als wichtigstes Auswahlkriterium wurde die Durchgängigkeit der Messreihen erachtet. Für die ausgewählten Quellen lagen wöchentlich gemessene Schüttmengen, meist über einen Zeitraum von 40 bis 50 Jahren, vor.

In der zeitlichen Entwicklung der Quellschüttungen werden die Klimaverhältnisse der letzten 40 bis 50 Jahre gut wiedergegeben. Allen Quellen gemeinsam sind niedrige Quellschüttungen Ende der 1950er Jahre. Trockenperioden bzw. extrem trockene Einzeljahre sind durch niedrige Schüttmengen deutlich erkennbar. Bei Quellen mit größeren Einzugsgebieten machen sich diese extremen Trockenjahre durch die zeitliche Pufferung in der Regel erst im Folgejahr bemerkbar. Für das letzte Jahrzehnt ist bei dem überwiegenden Teil der betrachteten Quellen eine leichte Häufung von niedrigeren Schüttmengen erkennbar.

Je größer das Einzugsgebiet, desto höher ist die mittlere Schüttung. Bei kleinen Einzugsgebieten werden durch die fehlende Speicher- bzw. Pufferwirkung die Witterungssignale mit einer kurzen zeitlichen Verzögerung weitergegeben. Dies drückt sich in einem schnellen Wechsel hinsichtlich der Höhe der Quellschüttungen, unabhängig von der Jahreszeit, aus. Quellen mit größeren Einzugsgebieten reagieren mit einer gewissen Trägheit auf Witterungsereignisse.

Die Abhängigkeit der Quellschüttung vom jeweiligen Witterungsgeschehen ist jedoch vorherrschend, auch wenn diese Einflüsse durch die Gegebenheiten der einzelnen Einzugsgebiete eine Überlagerung erfahren.

Es lag deshalb nahe, nach Zusammenhängen zwischen den „Witterungsgrößen“ (Niederschlag, Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz) und den jeweiligen Quellschüttungen zu suchen.

Als Datengrundlagen für die Witterungsparameter wurden die Daten der Klimastation Beerfelden/Odenwald herangezogen. Die Messwerte liegen auf Tagesbasis von 1960 bis 2009 vor.

Diese zeichnet sich durch höhere Amplituden der Klimaparameter im Vergleich zu anderen Realisationen aus und gibt in etwa eine mittlere Klimaentwicklung innerhalb der WETTREG-Familie wieder.

Diese Daten liegen ebenfalls auf Tagesbasis von 1960 bis 2100 für die Klimastation Beerfelden/Odenwald vor.

Alle ausgewählten Quellen, die in die Auswertung eingingen, befinden sich in der Nähe der Klimastation Beerfelden/Odenwald.

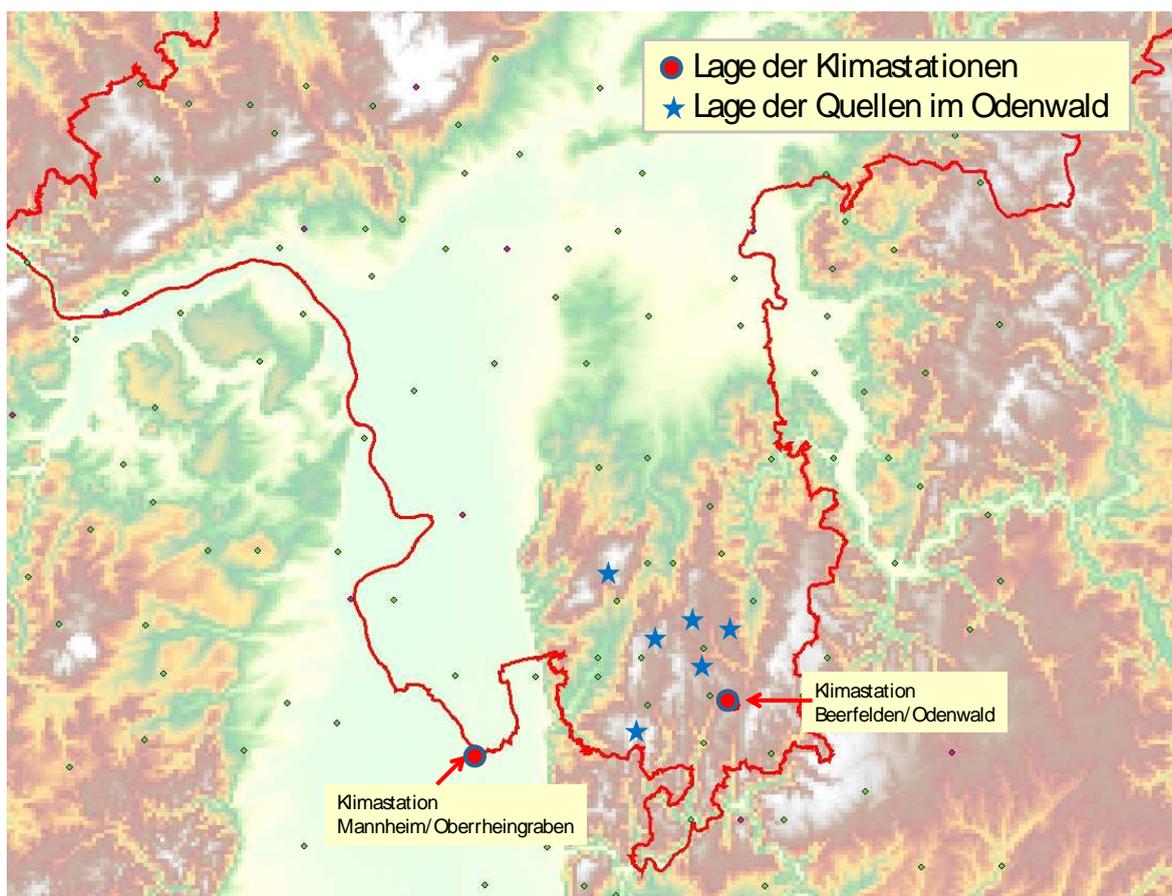


Abb. 7: Lage der Klimastationen sowie der ausgewählten Quellen

In Abb. 7 werden die Klimastationen sowie die in die Auswertung einbezogenen Quelfassungen dargestellt. Die Einzugsgebiete der einzelnen Quelfassungen variieren von 8 bis ca. 30 ha. Aus geologischer Sicht befinden sich 5 Quelfassungen im Kristallin des Odenwaldes und eine Quelfassung ist dem Buntsandstein des Odenwaldes zuzuordnen.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die in die Auswertung einbezogenen Quelfassungen.

Name	Geologische Formation	Einzugsgebiet (ha)	Quellschüttung in m ³ pro Tag Innerhalb des Zeitraums 1961 bis 2008		
			5 Perzentil	Median	95 Perzentil
Malchen	Kristallin	17	20	48	199
Reichenbach	Kristallin	13	38	55	86
Niedernhausen	Kristallin	8	19	33	52
Kirch-Brombach	Buntsandstein	30	42	105	259
Oberostern	Kristallin	25	81	101	126
Birkenau	Kristallin	15	46	59	79

Tab. 6: Basisinformationen über die ausgewählten Quellen

In der Tab. 6 sind wichtige Rahmeninformationen der in die Auswertung einbezogenen Quellen aufgeführt. Für jede der aufgeführten Quellen sind wöchentliche Schüttungsmessungen von 1961 bis 2008/9 vorhanden. Die aufgeführten statistischen Verteilungsgrößen zeigen, dass jede Quelle über ihre individuelle Charakteristik hinsichtlich ihres Schüttungsverhaltens verfügt. Der Median zeigt eine deutliche Abhängigkeit zur Einzugsgebietsgröße. Die 5 und 95 Perzentile weisen dagegen eine erhebliche Variabilität auf, die keinen direkten Zusammenhang zum Einzugsgebiet mehr erkennen lässt.

So weist die Quelle Oberostern eine sehr ausgeglichene Verteilung der Quellschüttungen auf. Das 5 und 95 Perzentil schwankt im Bereich von 20 m³ pro Tag um den Median von 101 m³ pro Tag. Dies bedeutet, dass die Quelle Oberostern über ein besseres Rückhaltevermögen verfügt und das im Einzugsgebiet gespeicherte Grundwasser mehr oder weniger kontinuierlich an die Quelle weitergegeben wird. Trotz annähernd gleicher Einzugsgebietsgröße und fast identischen Median von 105 m³ pro Tag ist die Schüttdynamik bei der Quelle Kirch-Brombach wesentlich ausgeprägter als jene der Quelle Oberostern. Das 5 Perzentil liegt bei 42 und das 95 Perzentil bei 259 m³ pro Tag. Damit wird die Quelle Kirch-Brombach in erheblich größerem Maße vom jeweiligen Witterungsgeschehen beeinflusst. Die Pufferwirkung bzw. das Speichervermögen für Grundwasser ist nicht so ausgeprägt wie bei der Quelle Oberostern.

2.3 Wasserbedarf

2.3.1 Trinkwasserversorgung

Die Versorgung der Bevölkerung mit Trink- und Brauchwasser ist eine Pflichtaufgabe der Kommunen. Die Daten für Wasserbeschaffung und Wasserabgabe der kommunalen Wasserversorgung in Südhessen werden seit 1977 in der Datenbank des RP Darmstadt zur Wasserbilanz Rhein-Main erfasst. Diese bildet auch die Grundlage für die wasserwirtschaftlichen Grundsatzuntersuchungen der Arbeitsgemeinschaft Wasserversorgung Rhein-Main (WRM), in der die großen Wasserversorgungsunternehmen und die mit Wasserversorgung befassten Behörden in gemeinsamer Aufgabenwahrnehmung zusammenarbeiten.

In der Wasserbilanz Rhein-Main sind neun so genannte Versorgungsgebiete definiert, die die Hauptversorgungsstruktur im Rhein-Main-Raum abbilden. Abb. 8 zeigt diese Versorgungsgebiete und die Hauptlieferströme gemäß dem zugrunde liegenden Datenbestand bis 2006.

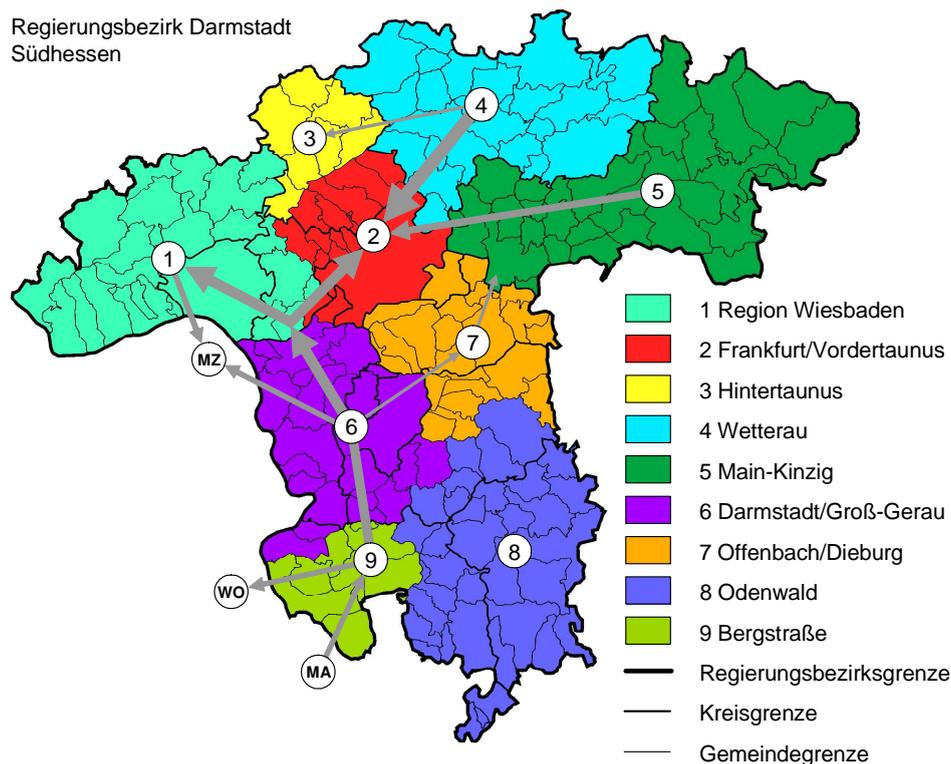


Abb. 8: Versorgungsgebiete im Regierungsbezirk Darmstadt und Hauptlieferbeziehungen

Dabei sind folgende Grenzbereiche einzubeziehen:

- Vom Versorgungsgebiet 2 (Frankfurt/Vordertaunus) die Stadt Kelsterbach und die südlichen Stadtteile von Frankfurt mit dem Flughafen und den Stadtwald-Wasserwerken der Hessenwasser. Wegen der Verbundsituation innerhalb von Frankfurt ist eine präzise versorgungstechnische Abgrenzung gegen den Norden der Stadt nicht möglich.
- Vom Versorgungsgebiet 2 (Main-Kinzig) die südlichen Stadtteile von Hanau, die vollständig aus dem Aufkommen des ZWO, also aus dem Versorgungsgebiet 7 versorgt werden.

Lieferbeziehungen nach außen bestehen im Wesentlichen durch

- Lieferungen der Hessenwasser in die Räume Wiesbaden und Frankfurt,
- Transportmengen der Stadtwerke Mainz AG aus dem Wasserwerk Hof Schönau in Rüsselsheim in das Versorgungsnetz der Stadt Mainz (einschließlich der rechtsrheinischen, Hessen zugeordneten Stadtteile Amöneburg, Kastel und Kostheim („AKK“)),
- Transportmengen der EWR AG (Mainz) aus dem Wasserwerk Bürstadt nach Worms,
- Wasserbezug der Stadtwerke Viernheim GmbH von der MVV AG in Mannheim.

Daneben gibt es mit Baden-Württemberg einige Lieferbeziehungen mit untergeordneter Bedeutung (in der Summe unter 0,1 Mio. m³/a).

Die einzige relevante Lieferbeziehung zwischen den drei Teilbereichen des Untersuchungsraums ist die Lieferung der Hessenwasser an den ZWO (0,5 Mio. m³/a), die Ende 2009 beendet wurde.

In Bezug auf die Hauptdaten der Wasserversorgung im Untersuchungsraum gelten somit folgende Randbedingungen:

- Beschaffungsseitig ergibt sich das Wasseraufkommen im Untersuchungsraum aus der Wassergewinnung in den dortigen Wasserwerken und den Bezugsmengen von außen (vor allem Wasserbezug der Stadtwerke Viernheim aus Mannheim).
- Der Wasserverbrauch im Untersuchungsraum ist nicht exakt zu bestimmen, weil der Verbrauch der südlichen Stadtteile von Frankfurt wegen der Verbundsituation mit der restlichen Stadt nicht abzugrenzen ist. Dagegen werden die südlichen Stadtteile von Hanau vollständig aus dem Aufkommen des ZWO versorgt, so dass der dortige Verbrauchsanteil exakt zu bestimmen ist.
- Aus dem Untersuchungsraum – vor allem dem Hessischen Ried – erfolgen in erheblichem Umfang Wasserlieferungen nach außen, vor allem in die Räume Frankfurt und Wiesbaden sowie nach Mainz und Worms. Die Lieferungen nach Frankfurt-Nord sind wegen der oben beschriebenen Problematik nicht exakt von denen nach Frankfurt-Süd zu trennen.

Während also die Bedarfszahlen für den Untersuchungsraum beschaffungsseitig exakt vorliegen, sind sie abgabeseitig nur näherungsweise festzulegen.

Abb. 10 und Abb. 11 zeigen die Entwicklung der Wassergewinnung im Untersuchungsraum und der Abgabe dieser Wassermengen seit 1977 nach Daten der Wasserbilanz Rhein-Main.

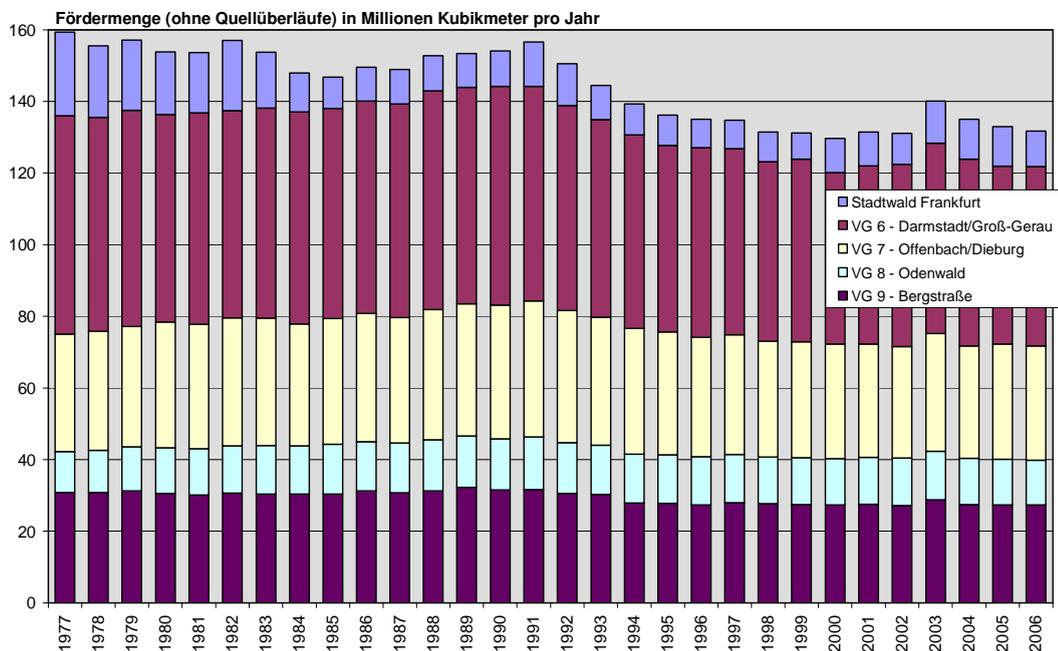


Abb. 10: Wassergewinnung im Untersuchungsraum 1977 bis 2006

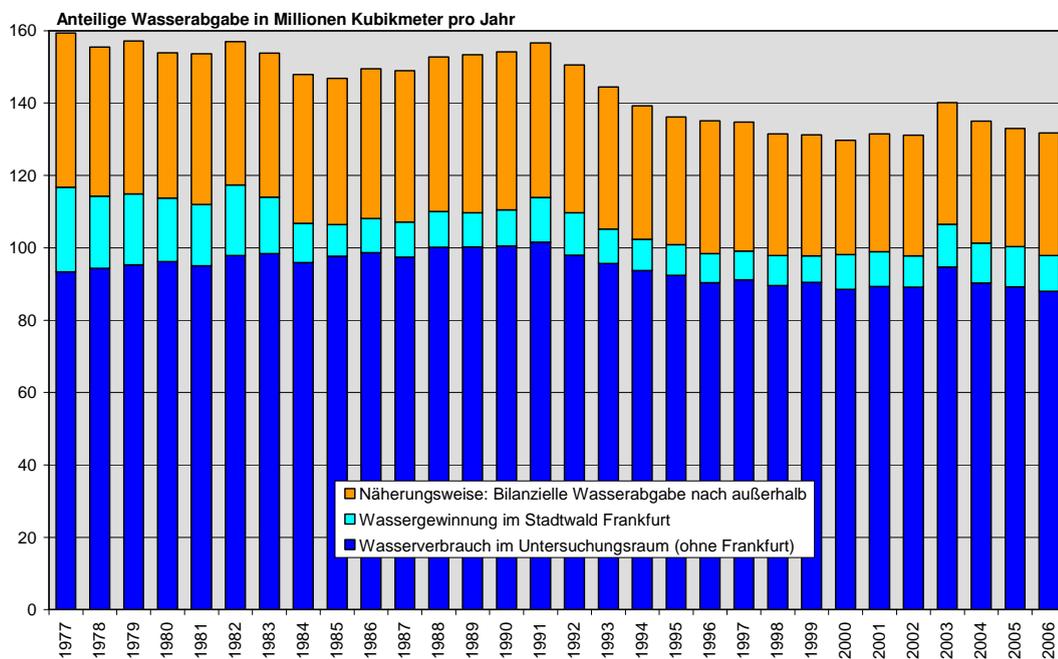


Abb. 11: Abgabe des im Untersuchungsraum geförderten Wassers 1977 bis 2006

Die in Abb. 10 dargestellte Entwicklung der Wassergewinnung setzt sich zusammen aus den Fördermengen in den vier Versorgungsgebieten gemäß Abb. 8 und der Förderung im Frankfurter Stadtwald. Sie zeigte zwischen 1990 und 2000 eine rückläufige Tendenz und hat seit 2002 wieder leicht zugenommen. Die Trockenjahre 1991 und 2003 fallen durch besonders hohe Fördermengen auf. Der höchste Wert wurde 1977 mit 159 Mio. m³ verzeichnet, der niedrigste 2000 mit knapp 130 Mio. m³. Der Rückgang zwischen 1990 und 2000 machte 24,4 Mio. m³ oder 16 % aus. Im Trockenjahr 2003 lag die Fördermenge bei 141 Mio. m³.

Die Wasserabgabe (Abb. 11) setzt sich zusammen aus dem Wasserverbrauch im Untersuchungsraum und der bilanziellen Wasserabgabe nach außen.

- Dabei liegen für den Wasserverbrauch in den Kommunen der vier Versorgungsgebiete exakte Daten für die Verbrauchsanteile von Haushalten und Kleingewerbe, Industrie und Großgewerbe sowie Eigenbedarf und Verluste vor.
- Dennoch ist der Wasserverbrauch im Untersuchungsraum nicht exakt zu bestimmen, weil für den anteiligen Verbrauch in den südlichen Stadtteilen von Frankfurt keine Daten vorliegen. Lediglich näherungsweise kann hierfür angenommen werden, dass dieser Verbrauchsanteil etwa der Fördermenge im Stadtwald entspricht¹.
- Die bilanzielle Wasserabgabe aus dem Untersuchungsraum in umgebende Gebiete ergibt sich dann näherungsweise wie in Abb. 11 dargestellt. Sie enthält die Summe bzw. Bilanz aller Abgabe- und Bezugsmengen. Dargestellt ist somit der Überschuss der Wasserabgaben gegenüber den Bezugsmengen.

Die Liefermengen zwischen den Versorgungsunternehmen bzw. Kommunen sind in der Wasserbilanz Rhein-Main exakt dokumentiert. Dennoch ist die Menge für den Untersuchungsraum nicht exakt zu bilanzieren, weil die anteiligen Liefer- und Verbrauchsmengen innerhalb von Frankfurt (also für die nördlichen und südlichen Stadtteile) nicht bekannt sind. Unabhängig davon gibt Abb. 11 eine aussagekräftige Information über die Verwendung der in Abb. 10 dargestellten Fördermengen.

Der Wasserverbrauch im Untersuchungsraum (ohne die südlichen Stadtteile von Frankfurt) hat zwischen 1977 und 1991 von 93,3 auf 101,6 Mio. m³/a zugenommen und dann bis 2006 auf 88,0 Mio. m³/a abgenommen. Hinzu tritt ein nicht genau bekannter Verbrauchsanteil in den südlichen Stadtteilen von Frankfurt (einschließlich Flughafen).

Die bilanzielle Wasserabgabe aus dem Untersuchungsraum lag von 1977 bis 1992 stets zwischen 39 und 44 Mio. m³/a und ist dann bis zum Jahr 2000 um rd. 25 % auf knapp 32 Mio. m³/a zurückgegangen. Die aktuellen Werte liegen bei 33 bis 34 Mio. m³/a, also wieder etwas darüber. Die jüngste Entwicklung steht auch im Zusammenhang mit der Stilllegung von Wasserwerken im Norden Frankfurts und im Kinzig-Bereich.

¹ In den letzten Jahren trifft diese Annahme aufgrund der versorgungstechnischen Situation relativ genau zu.

Abb. 12 zeigt die Wasserbeschaffung und Wasserabgabe 2006 in den drei Teilräumen des Untersuchungsraumes.

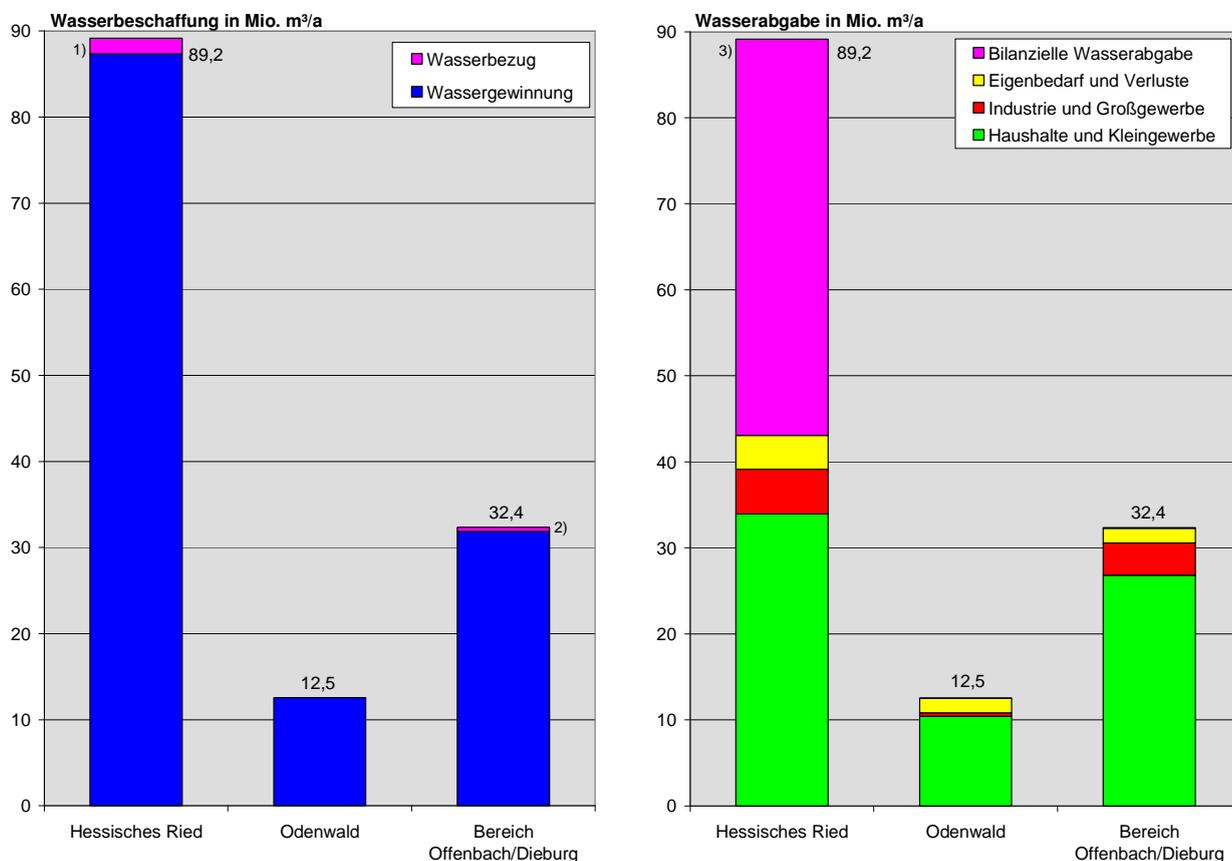


Abb. 12 Wasserbeschaffung und Wasserabgabe in den drei Teilräumen des Untersuchungsraumes, 2006²

² Anteile von Wasserbezug von außen und Wasserabgabe nach außen in Abb. 12:

1) Wasserbezug der Stadtwerke Viernheim GmbH von der MVV AG (Mannheim) – 2006 rd. 1,8 Mio. m³.

2) Wasserbezug des ZWO (Seligenstadt) von der Hessenwasser GmbH & Co. KG – 2006 rd. 0,5 Mio. m³.

3) Wasserabgabe der Hessenwasser GmbH & Co. KG an den ZWO (Seligenstadt) – 2006 rd. 0,5 Mio. m³ (vgl. Ziffer 2); Wasserabgabe der Stadtwerke Mainz AG aus eigener Wassergewinnung in Rüsselsheim nach Mainz (incl. der zu Hessen gehörenden „AKK“-Stadtteile Amöneburg, Kastel und Kostheim) – 2006 rd. 5,6 Mio. m³; Wasserabgabe der EWR AG (Worms) aus eigener Wassergewinnung in Bürstadt nach Worms – 2006 rd. 4,2 Mio. m³; übrige bilanzielle Wasserabgabe – überwiegend Wasserabgabe der Hessenwasser GmbH & Co. KG in die Räume Frankfurt und Wiesbaden – 2006 rd. 35,8 Mio. m³.

Die Differenz zur bilanziellen Wasserabgabe aus dem Untersuchungsraum (gemäß Abb. 11 ca. 33 bis 34 Mio. m³/a) resultiert im Wesentlichen aus dem Verbrauchsanteil der südlichen Stadtteile von Frankfurt, für den dort näherungsweise die Wassergewinnung im Stadtwald Frankfurt angesetzt ist.

Demnach lag das Wasseraufkommen im Teilraum Hessisches Ried 2006 bei insgesamt rd. 89 Mio. m³/a. Davon entfielen rd. 43 Mio. m³/a auf den Wasserverbrauch im Hessischen Ried selbst und rd. 46 Mio. m³/a auf Wasserabgaben nach außen (vgl. Fußnote zu Abb. 12). Das Wasseraufkommen in den beiden anderen Teilräumen ist wesentlich geringer und wird praktisch vollständig für die dortige Bedarfsdeckung verwendet. Dabei resultieren die verschiedenen Verbrauchsanteile im Wesentlichen aus den unterschiedlichen Bevölkerungsanteilen und strukturellen Gegebenheiten³.

2.3.2 Brauchwasser

In der Datenbank des RP Darmstadt zur Wasserbilanz Rhein-Main werden neben den Daten zur öffentlichen Wasserversorgung auch die anderen Grundwasserentnahmen erfasst, soweit hierfür entsprechende wasserrechtliche Genehmigungen vorliegen. Nicht erfasst werden genehmigungsfreie Entnahmen wie vor allem Hausbrunnen. Daneben gibt es eine gewisse Dunkelziffer, also nicht genehmigte Entnahmen und Fördermengen, die nicht oder nur teilweise gemeldet werden. Nach vorliegenden Abschätzungen ist davon auszugehen, dass der Datenbestand des RP Darmstadt insgesamt ziemlich repräsentativ ist.

Neben der Wassergewinnung für die öffentliche Wasserversorgung (Kap. 2.3.1) und der landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Beregnung (Kap. 2.3.3) enthält die Datenbank des RP Darmstadt Förderdaten für die Verwendungszwecke Industrie / Gewerbe, Kommunale Zwecke (z.B. Laufbrunnen), private Anlagen, Fischzucht, Abwehrbrunnen bei Vernässungen infolge Grundwasserhochständen, Mineralwasser, Wärmepumpen und Sonstiges (Verschiedenes). Da Mineralwasser aus tieferen Grundwasserleitern entnommen wird und bei Wärmepumpen das Wasser in der Regel wieder in den Grundwasserleiter zurückgeleitet wird, bleiben diese Anteile im Folgenden unberücksichtigt. Abb. 13 zeigt die Grundwasserentnahmen in den drei Teilräumen des Untersuchungsraumes zu den verbleibenden Zwecken.

Während im Hessischen Ried rd. 14 Mio. m³/a Grundwasser als Brauchwasser und zu ähnlichen Zwecken gefördert werden, betragen die entsprechenden Mengen in den beiden anderen Teilräumen jeweils unter 1 Mio. m³/a. Die Summe der Fördermengen beträgt rd. 15 Mio. m³/a.

³ Im Hessischen Ried sind entsprechend der Systematik der Wasserbilanz Rhein-Main Eigenbedarf und Verluste der dort ansässigen Hessenwasser GmbH & Co. KG vollständig enthalten.

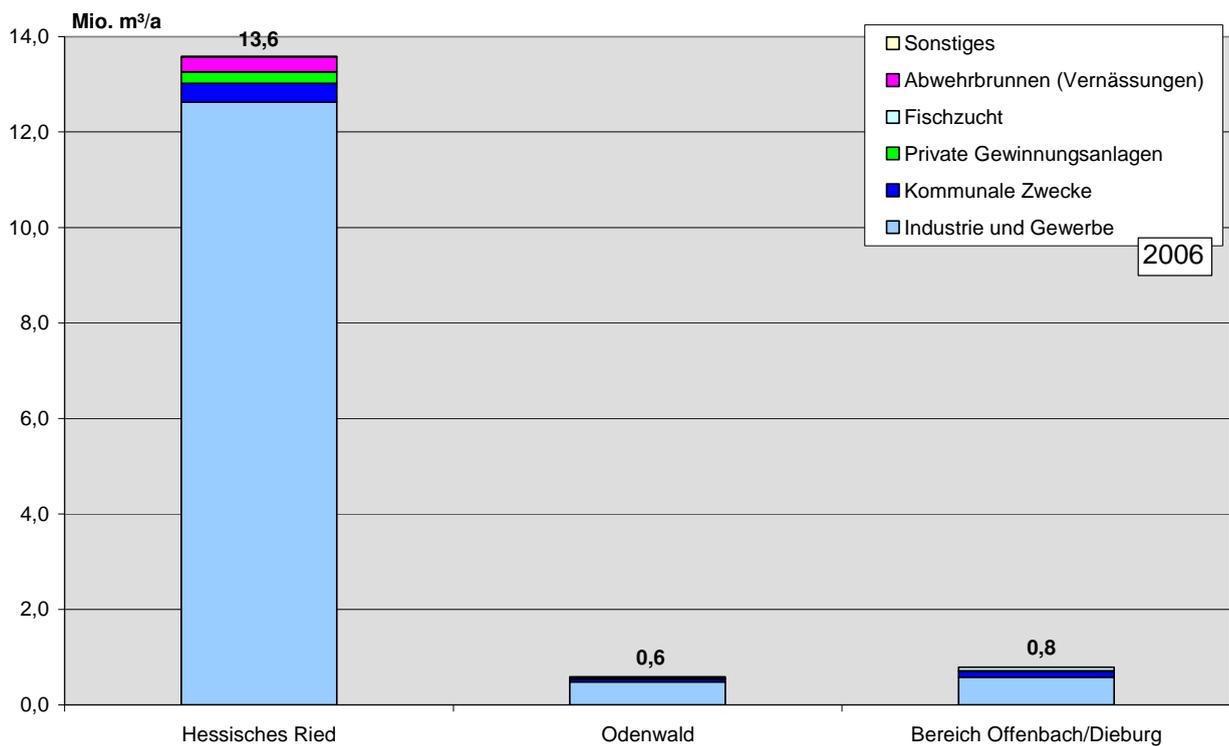


Abb. 13 Grundwassergewinnung anderer Nutzer in den drei Teilräumen des Untersuchungsraumes, 2006

2.3.3 Landwirtschaftlicher Zusatzwasserbedarf

2.3.3.1 Einleitung und Arbeitsgrundlagen

Das Hessische Ried ist eine verbrauchernahe Region, in der zur Versorgung der Ballungsräume Rhein-Main und Rhein-Neckar neben traditionellen landwirtschaftlichen Kulturen Sonderkulturen angebaut werden. Unter den klimatischen Bedingungen des Hessischen Rieds ist eine wirtschaftliche Pflanzenproduktion schon jetzt nur durch die Verabreichung von Zusatzwassergaben möglich. Die Grundwasserentnahmen für die benötigte Zusatzwassermenge liegen zwischen 3,5 Mio. m³/a (Nassjahr) und über 35 Mio. m³/a (Trockenjahr). Es ist anzunehmen, dass der Bedarf an Zusatzwasser bei den angebauten Kulturen im Sommerhalbjahr auf Grund der prognostizierten Klimaveränderung steigen wird. Dies betrifft sowohl die Anzahl der Beregnungsgaben (Menge, Zeitraum) pro Jahr als auch die Ausweitung der Beregnungsflächen. Mit dieser Entwicklung wäre eine erhebliche Zunahme des Zusatzwasserbedarfs in der Pflanzenproduktion verbunden. Dieser erhöhte Zusatzwasserbedarf ist mit den Aspekten des nachhaltigen Grundwassermanagements im Hessischen Ried in Einklang zu bringen.

Das Aufzeigen von Veränderungen hinsichtlich des Zusatzwasserbedarfs von landwirtschaftlichen Kulturen setzt die Erfassung der derzeitigen Beregnungspraxis voraus.

In Form einer Bestandsaufnahme wurde daher die Ist-Situation der landwirtschaftlichen Beregnung im Hessischen Ried erfragt:

- Feststellung der erschlossenen Beregnungsfläche,
- Ermittlung der Beregnungsmengen in der Vergangenheit für Normal-, Nass- und Trockenjahre.

Vom IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) wurden verschiedene Szenarien für die weltweite sozioökonomische Entwicklung erarbeitet. Diese globalen Entwicklungsmodelle weisen eine große Bandbreite auf. Je nach gewähltem Szenario verändern sich die Treibhausgaskonzentrationen unterschiedlich stark.

Für die zu erwartende klimatische Entwicklung wurde das A1B-Szenario zugrunde gelegt. Dieses moderate Szenario des IPCC geht von einer weiter steigenden Konzentration der Treibhausgase aus und basiert auf den Annahmen eines „raschen Wirtschaftswachstums“, „einer Weltbevölkerung, die ein Maximum Mitte des 21. Jahrhunderts erreicht und danach rückläufig ist“ sowie einer „raschen Einführung von neuen und effizienten Technologien“.

Auf regionaler Ebene ist die räumliche Auflösung globaler Klimamodelle nicht ausreichend. Deshalb kommen regionale Klimamodelle zum Einsatz, die die Klimaszenarien der Globalmodelle nutzen. Für die nachfolgend beschriebene Auswertung wurde das wetterlagenbasierte, regionale Klimamodell WETTREG (**W**etterlagen-basierte **R**egionalisierungsmethode) herangezogen.

Auf Grundlage einer kontinuierlichen Zeitreihe des regionalen Klimamodells WETTREG auf Basis des A1B-Szenarios wurden die erwarteten Ausprägungen von Temperatur, Niederschlag sowie Verdunstung vom Jahr 1960 bis zum Jahr 2050 simuliert. Diese Daten wurden als Basis für die zu erwartende Entwicklung der Zusatzberegnung herangezogen.

2.3.3.2 Die derzeitige Beregnungssituation

Zur Erfassung der derzeitigen Verhältnisse wurde eine Befragung bei den 45 Abteilungen der „Beregnungs- und Bodenverbände“ im Hessischen Ried durchgeführt. Die Inhalte der Befragung sind aus den Erfassungsbögen (siehe Anhang) zu entnehmen. Die Befragung erstreckte sich räumlich über den „Riedanteil“ der drei Landkreise „Bergstraße“, „Darmstadt-Dieburg“ sowie „Groß-Gerau“.

2.3.3.2.1 Potentielle Beregnungsflächen und Anbauverhältnisse

Der Begriff „potentielle Beregnungsfläche“ sagt aus, dass diese Flächen mit Zusatzwasser beschickt werden können, also prinzipiell für Beregnungszwecke technisch erschlossen sind. Ob allerdings alle ausgewiesenen Flächen innerhalb eines Jahres beregnet werden, ist abhängig von der jeweiligen Kulturführung. Eines der Ziele des Projektes war die digitale Erfassung aller potentiellen Beregnungsflächen im Hessischen Ried, da bisher lediglich auf Schätzungen hinsichtlich der flächenhaften Ausdehnung der Beregnungsflächen zurückgegriffen werden konnte. Die landwirtschaftliche Nutzfläche im Hessischen Ried wird laut ATKIS (**A**mtliches **T**opogra-

phisch-Kartographisches Informationssystem) mit 34.437 Hektar ausgewiesen (siehe Abb. 14). Neben der ATKIS-Darstellung werden die potentiellen Beregnungsflächen, unterteilt nach der Herkunft der Beregnungswässer, dargestellt. Bereits visuell wird deutlich, dass die potentielle Beregnungsfläche nahezu die gesamte ackerbaulich genutzte Fläche einnimmt. Die aus der Digitalisierung der Beregnungsflächen erhaltenen Flächengrößen werden in Tab. 7 aufgeführt. Der weitaus größte Teil der erschlossenen Beregnungsflächen bezieht das landwirtschaftliche Zusatzwasser direkt aus dem Grundwasser mit Hilfe von Beregnungsbrunnen, die sich auf den Feldern befinden. Die Rheinwasseraufbereitungsanlage, die sich in Biebesheim befindet, versorgt mehr als 5.000 Hektar landwirtschaftliche Nutzflächen mit Beregnungswasser. Der Anteil von aufbereitetem Oberflächenwasser, das zur Bewässerung der Feldfrüchte eingesetzt wird, ist mit 91 Hektar sehr gering. Bezogen auf die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche (34.437 ha) beträgt der prozentuale Anteil der erschlossenen Beregnungsfläche 96 %.

Herkunft der Beregnungswässer	Fläche in Hektar
Beregnung aus Grundwasser	27.725
Beregnung mit aufbereitetem Rheinwasser	5.233
Beregnung mit aufbereitetem Oberflächenwasser	91
Gesamte Beregnungsfläche	33.059

Tab. 7: Beregnungsfläche, unterteilt nach Herkunft der Beregnungswässer

Die in der Befragung der Landwirte erhobenen Anbauverhältnisse zeigen die Sonderstellung der Landbewirtschaftung im Hessischen Ried eindrucksvoll auf. Der Anteil an traditionellen landwirtschaftlichen Kulturen wie Winter- und Sommergetreide, Zuckerrüben, Mais u. a. beträgt ca. $\frac{3}{4}$ der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche.

Der Anteil der Fläche an Kulturen, die unter die Rubrik „Gemüse, Erdbeeren und andere Gartengewächse“ fallen, liegt mit einem Viertel der landwirtschaftlichen Nutzfläche weit über dem landesweiten Anteil (3-5 %). Begründet ist dieser hohe Anteil an Marktfrüchten durch die klimatische Gunst des Hessischen Rieds sowie die durchweg stark sandhaltigen Böden, die für die Produktion von Marktfrüchten besonders gut geeignet sind.

Kulturart	Flächenanteil in % an der Beregnungsfläche
Winter- und Sommergetreide	46
Zuckerrüben	10
Kartoffeln	6
Mais	5
Raps	4
Nachwachsende Rohstoffe	2
Zwiebelgewächse	14
Spargel	5
Sonstiges	8

Tab. 8: Anbauverhältnisse landwirtschaftlicher Kulturen im Hessischen Ried

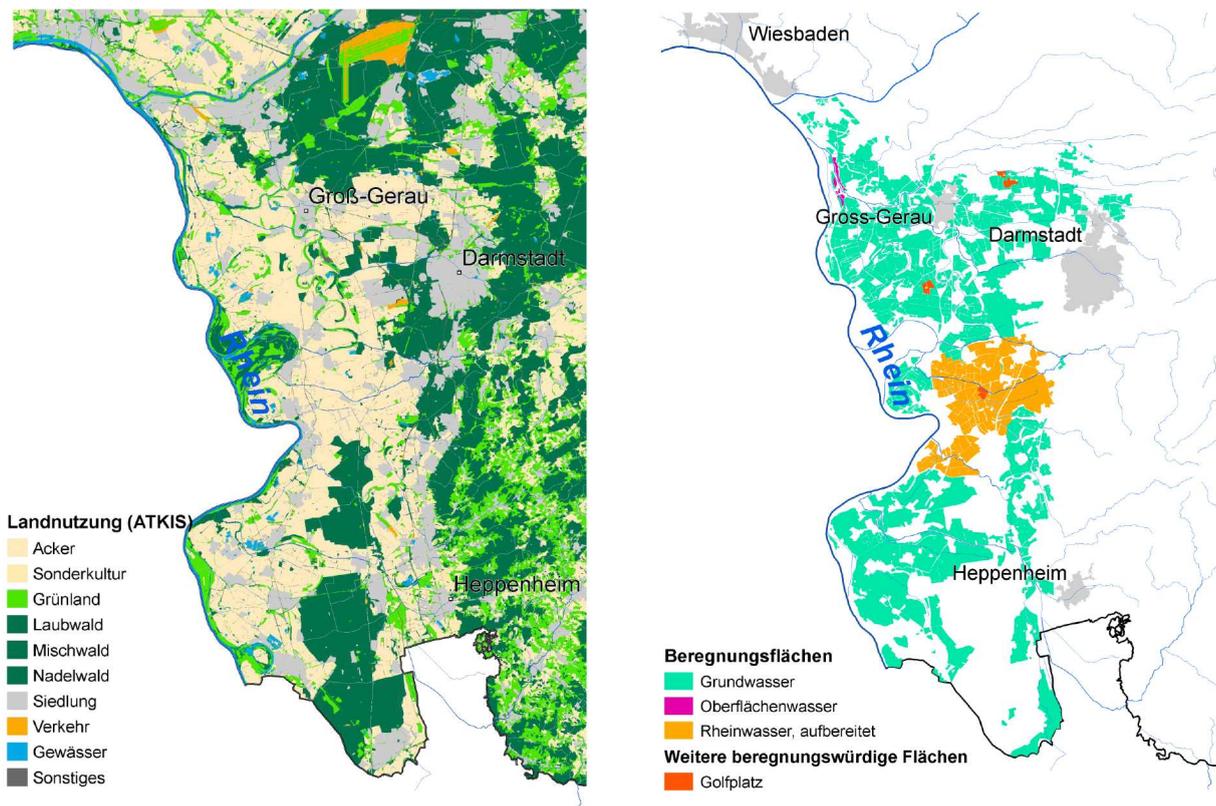


Abb. 14: Landnutzung sowie potentielle Beregnungsflächen im Hessischen Ried (Stand 2008)

2.3.3.2.2 Berechnungstechnik, Berechnungssteuerung sowie Berechnungszeiten

Berechnungstechnik:

Die durchgeführte Befragung ergab, dass 85 % der potentiellen Berechnungsflächen durch eine bewegliche Maschinenberechnung, in der Regel mit Regnereinzug, erschlossen ist. Diese nicht ortsfeste Art der Bewässerung bindet in der Hauptvegetationszeit durch das ständige Umsetzen und Einjustieren der Berechnungsmaschinen einen guten Teil der Arbeitszeit in den jeweiligen Betrieben.

Mit Reihenbewässerungsanlagen sind 12 % der Berechnungsflächen bestückt. Da die Leitungen in der Regel über die gesamte Vegetationsperiode auf dem Felde verbleiben, ist mit dieser Technik eine termingerechte und an den Bedarf angepasste Berechnung möglich.

Ortsfeste Berechnungsanlagen wie „Tropfbewässerung“, die über mehrere Jahre fest installiert auf dem Feld verbleiben können, kommen auf ca. 3 % der Berechnungsflächen zum Einsatz. Allerdings stellen Tropfbewässerungsanlagen erhöhte Anforderungen an die Qualität der Berechnungswässer. Vor allem eisen- und manganhaltige Wässer verursachen ein Zusetzen der Tropfschläuche.

Berechnungssteuerung:

Den Angaben der Landwirte zufolge erfolgt die Steuerung der Berechnungsgaben überwiegend mit Hilfe von „Wasseruhren“ und/oder „Pumpenstunden“. Die erforderliche Anzahl der „Pumpenstunden“ für eine bestimmte Kultur beruht ausschließlich auf den Erfahrungen der Landwirte. Prognosemodelle, die den jeweiligen Wasserbedarf einer Kultur unter Berücksichtigung der herrschenden Witterung ermitteln, kommen nur ganz vereinzelt zum Einsatz.

Berechnungszeiten:

Die Berechnungssaison beginnt im Hessischen Ried bereits in der letzten Märzwoche und endet in der Regel Ende September/Anfang Oktober.

Alle Landwirte sind bemüht, möglichst alle Bewässerungsgaben in den Abendstunden und während der Nacht zu verabreichen, um die Verdunstungsverluste zu minimieren. Daher entfallen zwei Drittel der Zusatzwassergaben in diese Zeiträume. Dieser Anteil wäre noch höher, wenn der Anteil an ortsfesten Bewässerungsanlagen höher wäre.

2.3.3.2.3 Höhe der Zusatzwassergaben

Ein wichtiger Bestandteil der Befragung der Berechnungsverbände war die Ermittlung der verabreichten Berechnungsgaben, wobei zwischen dem Wasserbedarf in „Nassjahren“ sowie in „Trockenjahren“ unterschieden wurde. Da bereits im Jahr 1994 eine Abschätzung der Zusatzwassermengen für die Berechnungsflächen im Hessischen Ried durchgeführt wurde, können die ermittelten Erhebungsdaten mit dem „historischen“ Zahlenwerk verglichen werden.

Im Jahr 1994 wurden in Absprache mit dem damaligen Amt für Regionalentwicklung, Landschaftspflege und Landwirtschaft Darmstadt und dem Regierungspräsidium Darmstadt hinsicht-

lich der Berechnung bestimmte Einteilungskriterien vorgenommen. Zum einen wurde eine Aufteilung in sog. „Normal-, Nass- und Trockenjahre“ vorgenommen und zum anderen wurde auf Gemarkungsebene der Zusatzwasserbedarf, in Abhängigkeit von der Bewirtschaftungsintensität, in die Bewässerungsstufen „niedrig, mittel und hoch“ eingeteilt. Die Berechnungshöhen beinhalten somit eine Taxierung der mittleren Anbauverhältnisse pro Gemarkung, die auch die durchschnittliche Anbaupalette (z. B. Spargel, Salat, Gemüse) berücksichtigte.

	Stufe		Menge (l/m ²)
Normaljahr (25-jähriger Durchschnitt)	Niedrig	(N)	60
	Mittel	(M)	75
	Hoch	(H)	100
Nassjahr	Niedrig	(N)	20
	Mittel	(M)	40
	Hoch	(H)	60
Trockenjahr	Niedrig	(N)	80
	Mittel	(M)	120
	Hoch	(H)	200

Tab. 9: Berechnungsklassen für Normal-, Trocken- und Nassjahre im Hessischen Ried (Schätzung aus dem Jahr 1994)

Wie aus Tab. 9 zu ersehen ist, werden für die drei verschiedenen Jahrestypen jeweils drei Berechnungsklassen vorgestellt. Für ein Normaljahr variieren die Berechnungsmengen von 60 bis 100 l/m². In Trockenjahren kann der Zusatzwasserbedarf durchaus auf 200 l/m² und mehr ansteigen.

Der Zusatzwasserbedarf wurde im Jahr 1994 auf ca. 3,5 Mio. m³ für „Nassjahre“ sowie 35 Mio. m³ für „Trockenjahre“ taxiert. In Trockenjahren wird demnach eine zehnmal höhere Wassermenge zur Berechnung als in Nassjahren benötigt (nach: Althoff S., Berthold G., Braher G., Von Pape W.-P., Toussaint B. (1996)).

Die aktuelle Befragung (2008) der Beregnungsverbände ergab dagegen einen aufsummierten Zusatzwasserbedarf für Nassjahre von 10 Mio. m³. Somit hat sich der Zusatzwasserbedarf im Hessischen Ried in sog. „Nassjahren“ innerhalb der letzten 15 Jahre nahezu verdreifacht.

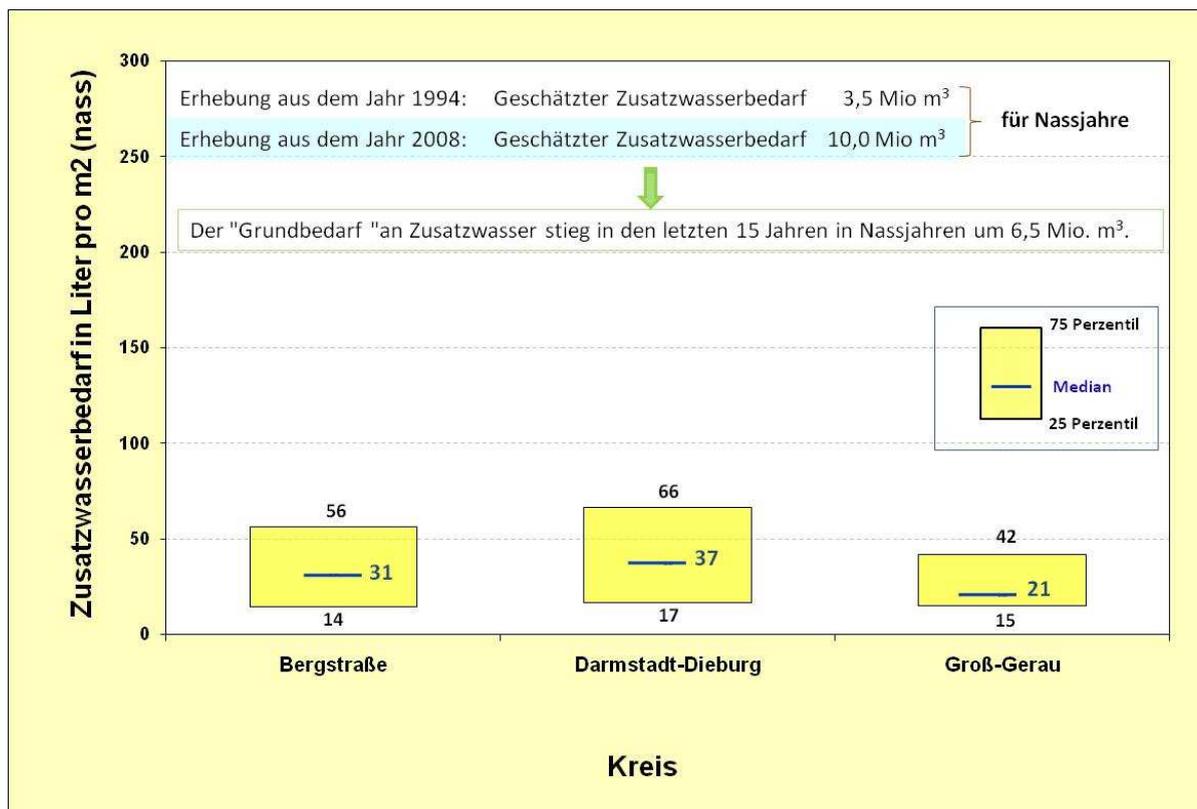


Abb. 15: Zusatzwasserbedarf in „Nassjahren“, gruppiert nach Kreisen

In der Abb. 15 sind die Zusatzwassergaben für Nassjahre, unterteilt nach Kreisen, als Boxplot dargestellt. Mit Hilfe eines „Boxplots“ kann das jeweilige Verteilungsmuster einer Grundgesamtheit, hier der Zusatzwasserbedarf, gut visualisiert werden. Wie aus Abb. 15 zu erkennen ist, beläuft sich das 25-Perzentil in allen drei Kreisen auf ca. 15 l/m² (entspricht etwa der Menge einer Wassergabe). Das 75-Perzentil erreicht Werte zwischen 42 und 66 l/m², je nach Kreis. Dies bedeutet, dass aktuell auch in sog. Nassjahren mindestens 3 Berechnungsgaben verabreicht werden. Die höchsten Zusatzwassergaben werden für den Landkreis Darmstadt-Dieburg erhalten. Ursache hierfür ist der höhere Anteil an Marktfrüchten, die gegenüber rein ackerbaulichen Früchten wie Mais oder Getreide einen höheren Zusatzwasserbedarf aufweisen.

Für Trockenjahre, als Beispiel sei das Jahr 2003 genannt, wird in der aktuellen Befragung ein Zusatzwasserbedarf in Höhe von 35,5 Mio. m³ angegeben. Demnach hat sich der Spitzenwasserbedarf nur unwesentlich während der letzten 15 Jahre erhöht und pendelt sich bei dem bereits 1994 geschätzten Wert von 35 Mio. m³ ein.

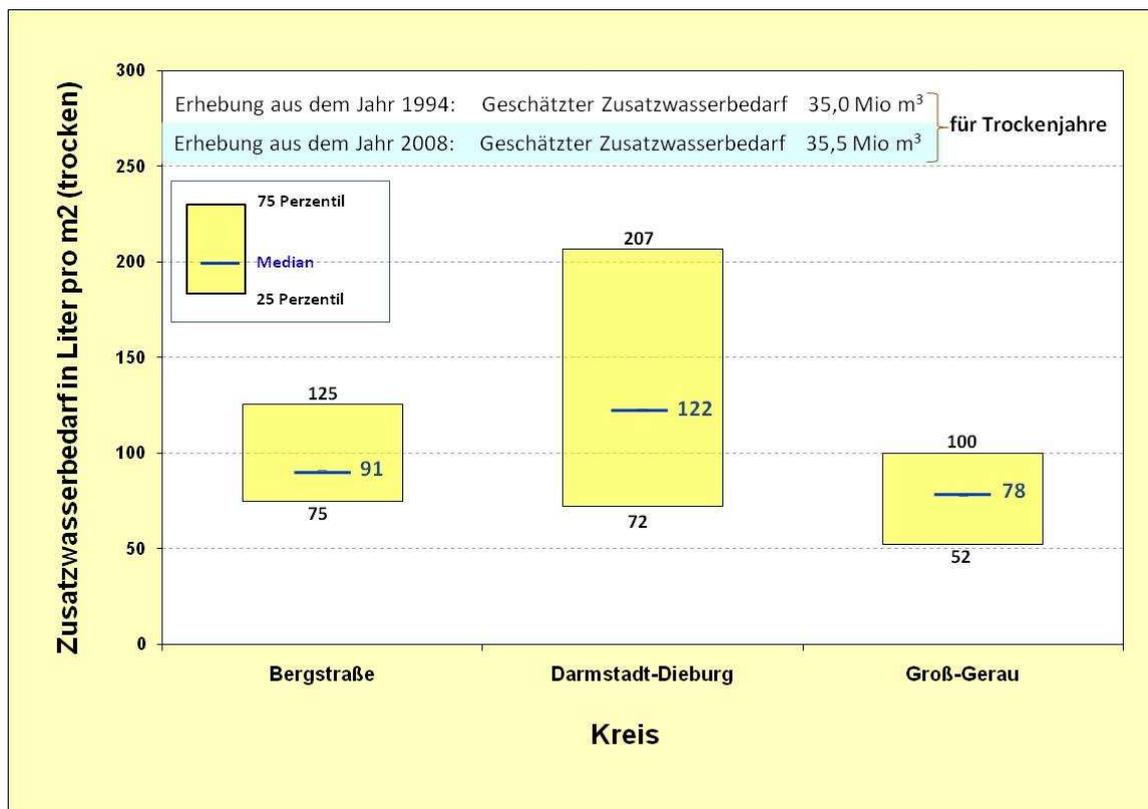


Abb. 16: Zusatzwasserbedarf in „Trockenjahren“, gruppiert nach Kreisen

Die höchsten Zusatzwassergaben werden wiederum im Landkreis Darmstadt-Dieburg verabreicht. Der Median von 122 l/m² zeigt an, dass in jeder zweiten Berechnungsfläche dieser Wert überschritten wird. In 25 % aller Fälle werden sogar mehr als 207 l/m² Zusatzwasser eingesetzt (siehe Abb. 16).

3 Zeitreihen regionaler Klimamodelle

3.1 Datengrundlage

Durch Kombination von Global- und Regionalmodellen sowie der verschiedenen SRES-Emissionsszenarien ergibt sich eine Unzahl möglicher Modellketten. Um die statistische Bandbreite jeder dieser Modellketten zu erfassen, wäre zudem jeweils eine Analyse zahlreicher Realisationen angezeigt. Aufgrund der erheblichen Rechenzeiten bei der Modellierung konnte jedoch im Rahmen dieses Projektes nur ein Bruchteil dieser zahlreichen Projektionen betrachtet werden.

Den hier untersuchten Zeitreihen liegen als Antrieb die IPCC-Szenariorechnungen des globalen Klimamodells ECHAM5 zu Grunde ⁴. Betrachtet wurden zum einen Zeitreihen der statistischen Regionalmodelle WETTREG-2006 und STAR2, zum anderen solche des dynamischen Regionalmodells CLM.

3.1.1 WETTREG-2006

Das vom Climate & Environment Consulting Potsdam (CEC Potsdam) entwickelte WETTREG-Verfahren (WETTERlagenbasierte REGionalisierungsmethode) basiert auf der Analyse der statistischen Beziehung der globalen Zirkulationsmuster (Wetterlagen) und der auf lokaler Ebene resultierenden meteorologischen Parametern. Bei WETTREG-2003 diente das Globalmodell ECHAM4 als Antrieb, bei WETTREG-2006 dagegen ECHAM5.

Zwei Arten von WETTREG-Daten können unterschieden werden. Die ursprünglichen, sogenannten „kontinuierlichen“ Zeitreihen (WETTREG-K) wurden dekadeweise - mit über diesen Zeitraum konstant gehaltenem statistischen Verhalten – erzeugt. Dagegen werden bei der Erzeugung der „transienten“ Zeitreihen (WETTREG-T) die Häufigkeiten der Zirkulationsmuster dynamisch verändert. Sprünge zwischen benachbarten Dekaden bleiben somit aus.

Die vorliegenden Zeitreihen der IPCC-Szenarien A1B, A2 und B1 umfassen die Jahre von 1961 bis 2100. Für die WETTREG-T-Projektionen lagen 10 Realisierungen je Szenario vor. Die „kontinuierlichen“ WETTREG-K-Daten standen je in einer trockenen, einer feuchten und einer mittleren („normalen“) Variante je Szenario zur Verfügung. Letztere entstanden dekadeweise durch die gezielte Selektion entsprechend charakterisierter, zusammenhängender 10-Jahres-Ausschnitte aus den Simulationsläufen. Die Datenreihen lagen stationsbasiert vor.

Aus den 10 WETTREG-T-Realisationen des A1B-Szenarios wurde für die weitere Untersuchung Realisation 7 ausgewählt, da dieser hinsichtlich der Klimatischen Wasserbilanz die größte Dynamik aufweist (vgl. Kap. 3.3).

⁴ Für die konzeptionelle Modellierung der Grundwasserneubildung (BFI-Ansatz, vgl. Kap. 5) lagen zusätzlich die bereits im Rahmen des Integrierten Klimaschutzprogramms von Hessen INKLIM 2012 aus WETTREG-2003-Daten (ECHAM4, Szenario B-2) gewonnenen Ergebnisse vor.

3.1.2 STAR2

Das statistische Regionalmodell STAR2 (STATistisches Regionalisierungsmodell) wurde vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) entwickelt. Das Modell basiert auf dem durch Clusterverfahren hergestellten Zusammenhang zwischen großräumigen Kenngrößen und langjährigen lokalen Messreihen. Als Leitgröße dient die Temperatur. Der Wandel lokaler meteorologischer Größen wird an den Temperaturtrend des Globalmodells gekoppelt.

STAR2-Daten lagen in einer Realisation des Szenarios A1B vor. Der Zeithorizont umfasst die Jahre 1981 bis 2060. Die Zeitreihen sind stationsbasiert.

3.1.3 CLM

Das dynamische Klimamodell CLM (Climate Local Model) hat seinen Ursprung in der Klimaversion des lokalen Modells (LM) des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

Im Rahmen des Projektes lagen A1B-Zeitreihen des Datenstroms 2 (Modell-Output) in 3 Realisationen für den Controlrun- und 2 Realisationen für den Projektionszeitraum in einem 7x7-Zellen-Grid vor.

Aufgrund der großen Datenmenge und weil eine räumliche Selektion des Datenstroms 2 nicht über das Internetportal möglich war, wurden die Daten für das AnKliG-Projekt seitens der SGA ausgeschnitten und eine Berechnung der potentiellen Verdunstung durchgeführt.

3.2 Aufbereitung der Daten

3.2.1 Berechnung der Kenngrößen

Die beobachteten **Niederschläge** und die Niederschlagsreihen der statistischen Modelle wurden stationsweise gemäß dem Verfahren nach Sevruk (1989) wind- und niederschlagstypabhängig korrigiert (s. Kap. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Berechnung der **Grasreferenzverdunstung** (nach Penman-Monteith) erfolgte bei allen Datenreihen gemäß ATV-DVWK-M 504.

Die für die Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft bedeutendste Größe ist die aus Niederschlag und potentieller Verdunstung direkt abgeleitete **klimatestische Wasserbilanz**. Hierbei hat sich insbesondere die über mehrere Jahre gemittelte klimatische Wasserbilanz als geeigneter Indikator für die Kennzeichnung von Nass- und Trockenperioden in der Wasserwirtschaft erwiesen (Gerdes et al., 2010). Mit der Wahl einer dreijährigen Periode (1095 Tage) werden auch mehrjährige Trocken- und Feuchtphasen gut abgebildet (Abb. 17).

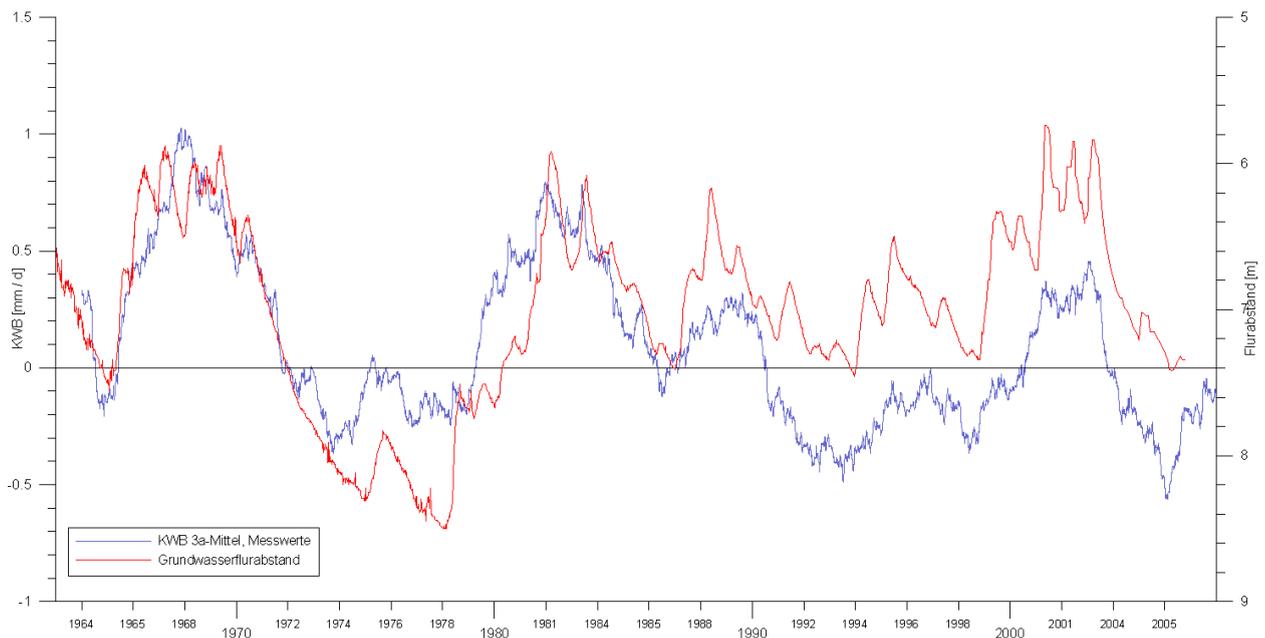


Abb. 17: Gegenüberstellung des gleitenden 3-Jahresmittel der klimatischen Wasserbilanz an der Station Frankfurt / Flughafen und des Flurabstandes einer nahegelegenen Grundwassermessstelle

Die Regionalisierung der Beobachtungs-Messzeitreihen sowie der vorliegenden Klimazeitreihen auf das einheitliche Zielraster von 500m erfolgte seitens des HLOG mit der Software GWN-BW (s. Kap. 2.1.4).

3.2.2 LOCI-Transformation der CLM-Daten

Bei der Analyse der CLM-Zeitreihen des Controlruns (s. Kap. 3.3) zeigte sich die Notwendigkeit einer Bias-Korrektur der CLM-Niederschlagsreihe.

Um eine Anpassung der Charakteristik der Daten an die Beobachtungsdaten vorzunehmen, wurde mit den Rohdaten eine **LOCI-Transformation** (Local intensity scaling) nach Schmidli u.a. (in Dobler u.a., 2008) durchgeführt.

Hierbei wird durch Analyse der Modellzeitreihe auf Tageswertbasis die Regentagschwelle ermittelt, derart, dass der Anteil der Regentage der Modellzeitreihe dem Anteil der Regentage (mit $P \geq 1\text{mm}$) entspricht. Der Skalierungsfaktor ergibt sich als Quotient der Regenintensität der Messdaten zu der der Modellzeitreihen, der transformierte Tagesniederschlag berechnet sich aus dem Produkt von Skalierungsfaktor und der Differenz aus Tagesniederschlagswert und dem ermittelten Regentagsschwellenwert. Die Korrektur wird rasterzellenweise durchgeführt.

Die statistischen Charakteristika der angepassten Niederschläge sind in Tab. 10 unter CLM LOCI zu sehen. In Abb. 18 ist die Häufigkeitsverteilung der beobachteten Tagesniederschlagsintensitäten denen der originalen sowie den transformierten CLM-Daten gegenübergestellt.

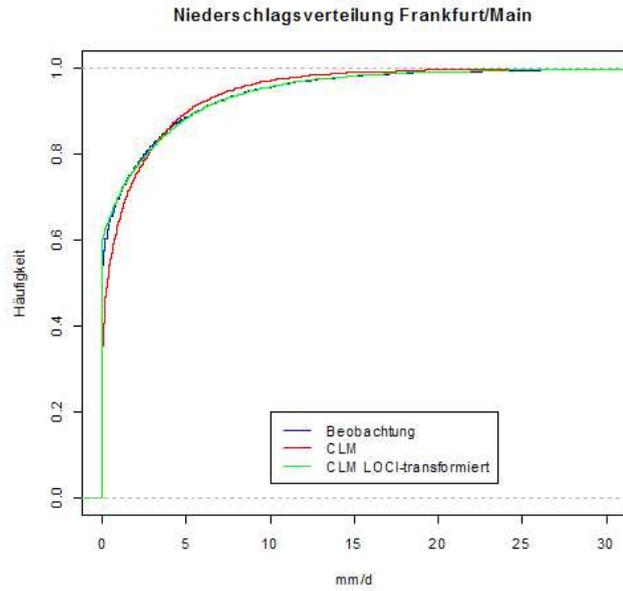


Abb. 18: Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsintensitäten der Messdaten sowie der CLM-Daten vor und nach der LOCI-Transformation

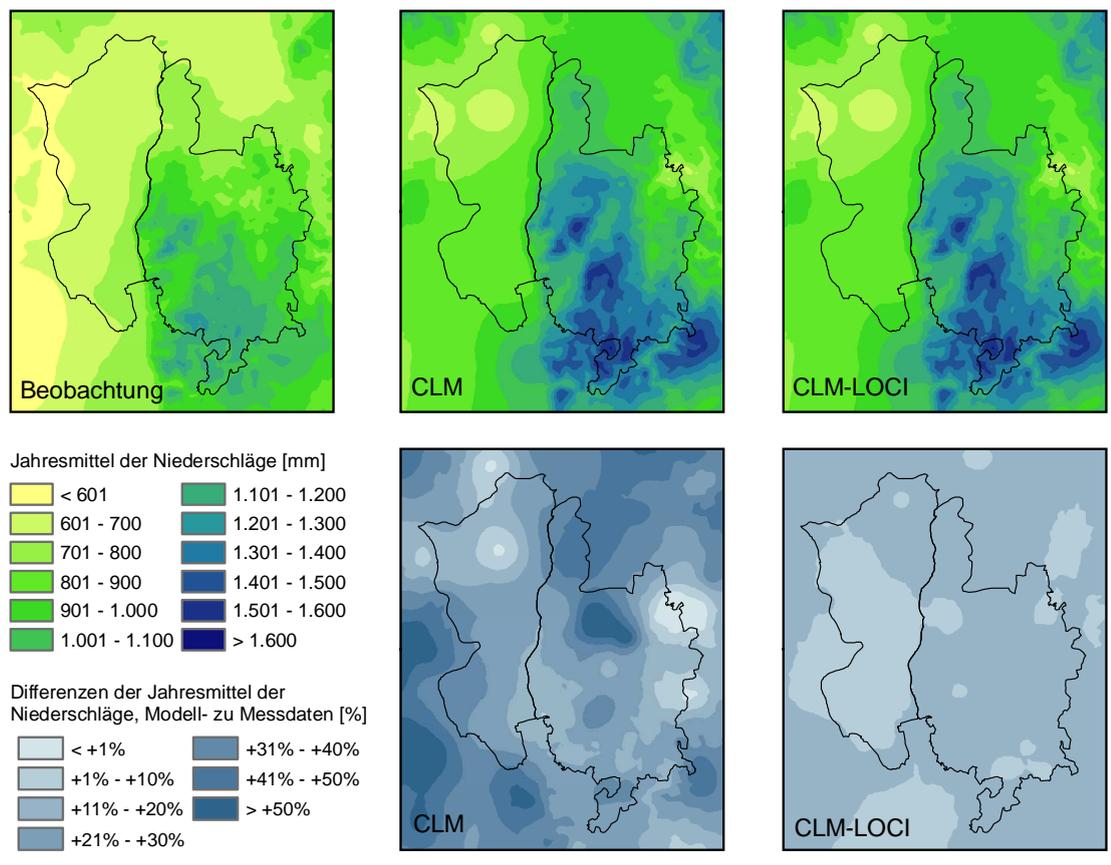


Abb. 19: Jahresmittel der Niederschläge im Referenzzeitraum (1971-2000), Beobachtungsdaten sowie CLM-Daten vor und nach der LOCI-Transformation; oben absolute Werte [mm], unten Differenzen [%]

In Anbetracht der großen Abweichungen auch der CLM-Datenreihen der Grasreferenzverdunstung von den aus Beobachtungswerten ermittelten Daten wäre für zukünftige Untersuchungen eine ähnliche Anpassung auch für diesen Parameter wünschenswert.

3.3 Bewertung der Klima-Zeitreihen aus Sicht der Wasserwirtschaft

Im Bewusstsein, dass die komplette statistische Bandbreite der Modelldaten nur in einer Betrachtung möglichst vieler Realisationen abgedeckt werden kann, muss sich hier aufgrund des begrenzten Zeitrahmens im folgenden auf die Analyse je einer Realisation der Modelle CLM, STAR2 und WETTREG-T für das A1B-Szenario beschränkt werden.

Um fundiert beurteilen zu können, in wie weit sich die synthetischen Zeitreihen für Fragestellungen bezüglich des Wasserhaushalts eignen, sollte zuvorderst untersucht werden, wie gut die einzelnen Regional-Modelle die Charakteristik der Beobachtungsdaten im Kalibrierzeitraum wiedergeben.

Hierfür wurden zunächst **die über die Fläche gemittelten statistischen Parameter der Controlrun-Daten** miteinander verglichen (Tab. 10 und Tab. 11).

Folgt man Tab. 10 weisen über die Fläche gemittelt die STAR2-Daten bezüglich Mittelwert und Spannbreite die größte Übereinstimmung mit den beobachteten Niederschlagszeitreihen auf. Nicht viel schlechter stellen sich die WETTREG-T-Daten dar. Um etwa 23% zu hoch liegen dagegen die mittleren Jahresniederschläge der untransformierten CLM-Daten. Auffällig überhöht zeigt sich die Spannbreite der CLM-Daten im Teilgebiet Odenwald.

Niederschlag Hessisches Ried	Zeitraum	Mittelwert	Min	Max	Range	Std.Abw.
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Messwerte	1971-2000	665	556	994	438	51
CLM (Realisation 2)	1971-2000	817	628	1179	551	82
CLM LOCI (Realisation 2)	1971-2000	726	615	1095	480	59
STAR2	1981-2000	668	563	962	399	54
WETTREG-T (Realisation 7)	1971-2000	709	579	1046	467	66
Niederschlag Odenwald	Zeitraum	Mittelwert	Min	Max	Range	Range
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Messwerte	1971-2000	958	685	1251	566	134
CLM (Realisation 2)	1971-2000	1190	684	1601	917	170
CLM LOCI (Realisation 2)	1971-2000	1070	756	1402	646	148
STAR2	1981-2000	972	711	1299	588	137
WETTREG-T (Realisation 7)	1971-2000	1018	735	1302	567	126

Tab. 10: Flächenbezogene statistische Parameter des Jahresniederschlags, nach Projektteilgebieten

Bei der Grasreferenzverdunstung (Tab. 11) hingegen weisen die WETTREG-T-Daten die beste Anpassung an die Messdaten auf. Die STAR2-Daten liegen zwischen 10 und 13%, die CLM-Daten sogar etwa 20% unter dem Beobachtungsmittel. Die Spannbreite ist generell deutlich geringer als bei den Niederschlägen, so fallen diesbezüglich auch die Abweichungen der modellierten Reihen von den Messwerten in der klimatischen Wasserbilanz weniger ins Gewicht.

Grasreferenzverdunstung Hessisches Ried	Zeitraum	Mittelwert	Min	Max	Range	Std.Abw.
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Messwerte	1971-2000	653	594	721	127	19
CLM (Realisation 2)	1971-2000	533	470	570	100	13
STAR2	1981-2000	569	517	659	142	18
WETTREG-T (Realisation 7)	1971-2000	638	568	708	140	27
Grasreferenzverdunstung Odenwald	Zeitraum	Mittelwert	Min	Max	Range	Range
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Messwerte	1971-2000	577	466	639	173	30
CLM (Realisation 2)	1971-2000	468	399	527	128	22
STAR2	1981-2000	564	513	604	91	21
WETTREG-T (Realisation 7)	1971-2000	581	516	683	167	31

Tab. 11: Flächenbezogene statistische Parameter der Jahreswerte der Grasreferenzverdunstung, nach Projektteilgebieten

Das hieraus resultierende **räumliche Verteilungsmuster der klimatischen Wasserbilanz** ist in Abb. 20 vergleichend dargestellt. Eine gute Übereinstimmung ist - abgesehen von den trockensten Bereichen des Hessischen Rieds und den niederschlagsreichsten Gebieten des Odenwalds - wiederum bei den statistischen Regionalmodellen festzustellen. Die CLM-Daten profitieren zwar deutlich von der LOCI-Transformation, bleiben aber insgesamt zu feucht.

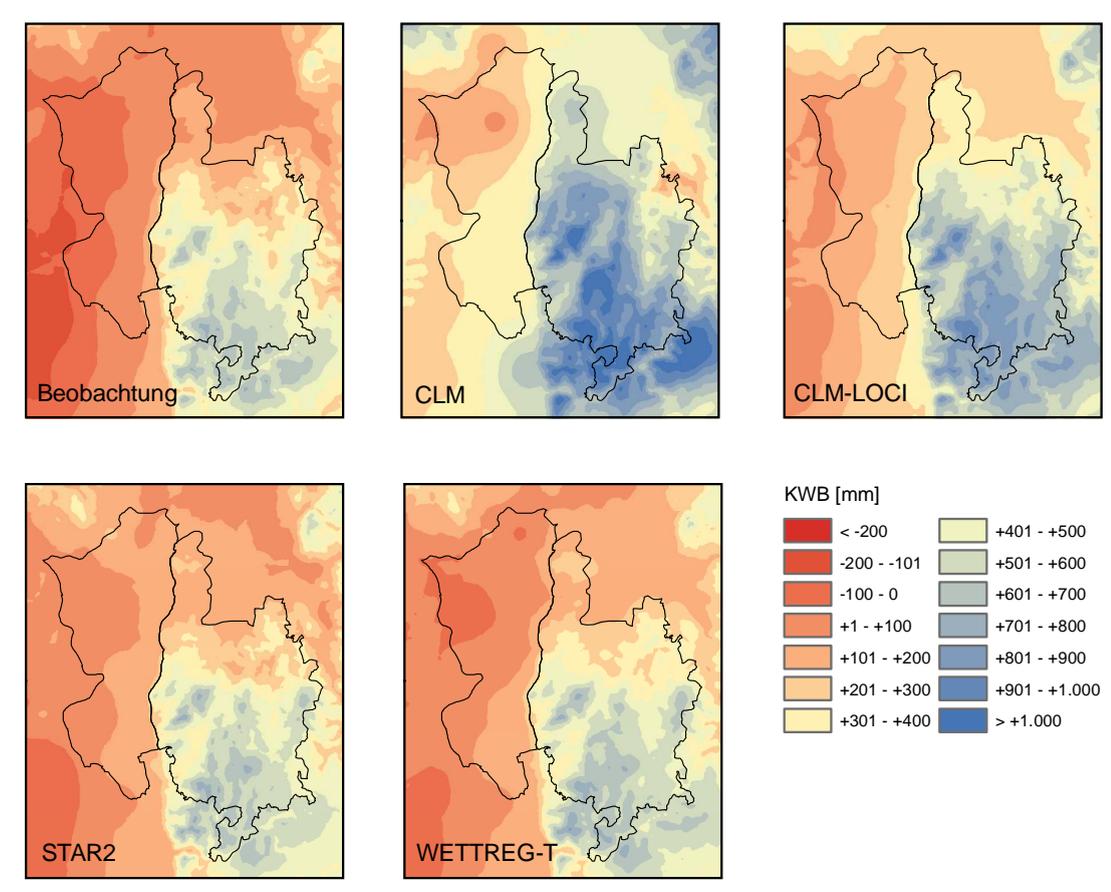


Abb. 20: Jahresmittel der klimatischen Wasserbilanz im Beobachtungszeitraum (1961-2007), alle Zeitreihen

Auf den ersten Blick weisen zumindest die statistischen Modelle in Bezug auf die flächenbezogenen berechneten statistischen Parameter der Jahresmittel sowie deren räumliche Verteilung eine gute Anpassung an die Beobachtungsdaten auf. Bei der **Betrachtung lokaler Ganglinien**⁵ zeigt sich dagegen ein etwas anderes Bild.

Geht man davon aus, dass die Amplitude im Zeitverlauf der klimatischen Wasserbilanz den Wechsel von Trocken- und Nassperioden verlässlich anzeigt, wäre aus wasserwirtschaftlicher Sicht von geeigneten synthetischen Zeitreihen zu fordern, dass sie im Kalibrierzeitraum ein ähnliches Verhalten zeigen.

Abb. 21 dokumentiert das gleitende 3-Jahresmittel der klimatischen Wasserbilanz verschiedener betrachteter Datenreihen für den Beobachtungszeitraum (1961 – 2007) an der Station Frankfurt a. Main / Flughafen. In ihrer Gesamtheit bilden die Zeitreihen die Amplitude der Beobachtungsdaten (blau) ab. Betrachtet man einzelne Reihen bleibt die Spannbreite deutlich hinter der der Messwerte zurück. Die beste Anpassung hinsichtlich der Dynamik im Beobachtungszeitraum weist offensichtlich die STAR2-Datenreihe (rot) auf.

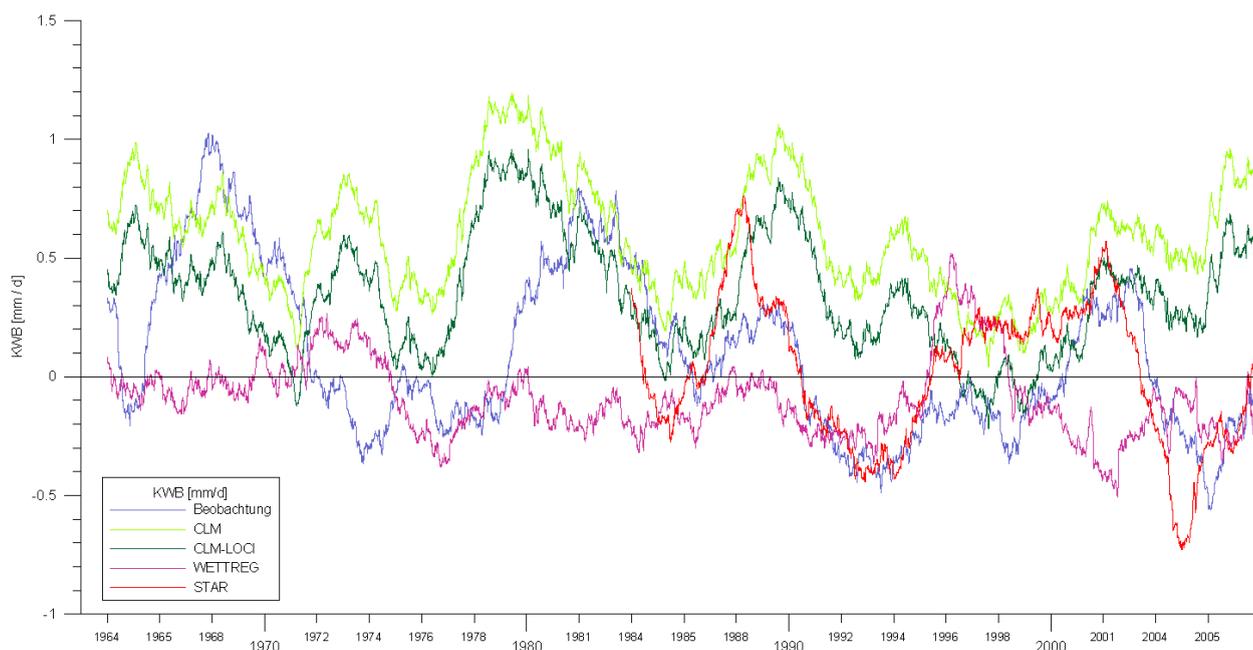


Abb. 21: Gleitendes 3-Jahresmittel der klimatischen Wasserbilanz im Beobachtungszeitraum (1961-2007), Station Frankfurt a.M. / Flughafen

Nimmt man die Gesamtheit der 10 WETTREG-T-Realisationen (nicht abgebildet) zeigt sich das gleiche Bild: erst die Einhüllende der klimatischen Wasserbilanzen aller Zeitreihen im Control-run spiegelt in etwa die Schwankungsbreite der KWB der Messdaten.

⁵ Diese Analyse bezieht sich auf die mit GWN-BW auf das 500m-Raster regionalisierten Daten, indem die Zeitreihen an den jeweiligen Koordinaten der Klimastationen (Frankfurt, Beerfelden) abgegriffen wurden. Dies entspricht im Falle der statistischen Modellverfahren WETTREG und STAR2 den niederschlagskorrigierten Stationszeitreihen, bei CLM der auf diese Zelle interpolierten Datenreihe, die eine Fläche von 500 x 500 m² repräsentiert.

Tab. 12 zeigt, dass im Beobachtungszeitraum an der Station Frankfurt a.M. / Flughafen sowohl Spannweite als auch die Standardabweichung deutlich hinter der der Messdaten zurück bleibt. Auch werden weder Minima noch Maxima erreicht. Hinsichtlich Amplitude und Streuung zeigen sich die Kennwerte der Messstelle Beerfelden / Odenwald deutlich besser angepasst: vor allem die LOCI-transformierten CLM-Daten zeigen hier eine gute Anpassung.

Niederschlag Zeitreihe (1971-2000)		Mittelwert [mm]	Min [mm]	Max [mm]	Range [mm]	Std.Abw. [mm]
Frankfurt a.M. / Flughafen	Messwerte	677	407	1.069	662	131
	CLM	753	551	989	438	104
	CLM-LOCI	665	458	914	456	109
	WETTREG-T	634	488	906	418	113
Beerfelden / Odenwald	Messwerte	1.162	799	1.541	743	185
	CLM	1.294	978	1.721	743	172
	CLM-LOCI	1.147	818	1.606	787	179
	WETTREG-T	1.001	766	1.408	642	170

Tab. 12: Stationsbezogene statistische Parameter des Jahresniederschlags im Bezugszeitraum (1971-2000) an den Stationen Frankfurt a.M. / Flughafen und Beerfelden / Odenwald

Diese **mangelnde Abbildung der örtlich auftretenden Dynamik der klimatischen Wasserbilanz** ist zum einen auf die geringe Schwankungsbreite der modellierten (Jahres-) Niederschläge zurückzuführen.

Hinzu kommt aber vor allem **die fehlende Mehrjährlichkeit von niederschlagsarmen bzw. niederschlagsreichen Perioden**, die zu einem markanten Abfallen bzw. Ansteigen der über 3 Jahre gleitend gemittelten klimatischen Wasserbilanz führen könnten und sich im Ergebnis in extremen Tief- oder Hoch-Grundwasserständen spiegeln würden.

Eine Betrachtung extremer Zeitreihen – etwa der trockenen, mittleren und feuchten WETTREG-K-Varianten - stellt sich nur bedingt als Lösung dar, da solche Szenarien zum einen extreme, realitätsferne Auswirkungen auf den Wasserhaushalt haben. Zudem ist gerade der periodische Wechsel trockener und nasser Phasen für die Untersuchung der speziellen Nutzungskonflikte in intensiv genutzten Räumen von Interesse.

Abschließend ist nach eingehender Untersuchung der vorliegenden Zeitreihen auf Tageswertbasis festzustellen, dass deren unreflektierte Verwendung in der Grundwassermodellierung derzeit problematisch erscheint.

Beim Vergleich der remodellierten WETTREG-T-Zeitreihen des Referenzzeitraums mit den entsprechenden Beobachtungsdaten zeigt sich eine gegenüber letzteren stark eingeschränkte Schwankungsbreite in den Niederschlagssummen und dem hieraus abgeleiteten gleitenden 3-Jahresmittel der klimatischen Wasserbilanz.

Die STAR2-Daten bilden die Amplitude im Kalibrierzeitraum besser ab, weisen dafür nach vorherrschender Meinung im Vergleich zu anderen Modellen Mängel hinsichtlich der Abbildung des

Klimaänderungssignals auf und sind in Bezug auf den zeitlichen Projektionshorizont eingeschränkt.

Bei den (untransformierten) CLM-Zeitreihen ist zusätzlich zur eingeschränkten Variabilität ein im Untersuchungsgebiet um 20% zu hohes Niederschlagsniveau und eine um 20% zu niedrige Grasreferenzverdunstung festzustellen.

Allen Datenreihen fehlt neben der Spannbreite der relevanten Größen für den Wasserhaushalt die Mehrjährlichkeit von Trocken- bzw. Nassereignissen.

In keinem der untersuchten Datensätze spiegelt sich die gemeinhin prognostizierte Zunahme von Starkregenereignissen wider.

Diese aufgezeigten Schwächen der synthetischen Tageswert-Zeitreihen stellen die Sinnhaftigkeit der darauf aufbauenden Modellierungen nicht grundsätzlich in Frage. Eine Interpretation der Ergebnisse und die Ableitung von Maßnahmen sollte jedoch vor dem dargelegten Hintergrund erfolgen.

3.4 Der Klimawandel im Projektgebiet

Nach den betrachteten Klimaprojektionen (Szenario A1B) stellt sich der klimatische Wandel im Untersuchungsgebiet wie folgt dar.

Bei den **Jahresmitteltemperaturen** ist mit einem Anstieg um etwa 2 bis 2,5°C (2071 bis 2100 gg. 1971 bis 2000) zu rechnen, wobei im Winter eine Steigerung um bis zu 4°C prognostiziert wird. Dementsprechend ist eine deutliche Zunahme von Sommertagen (um bis zu 50%), eine Verdopplung von heißen Tagen und Tropennächten sowie eine Abnahme von Frosttagen (- 40 bis - 50%) zu erwarten.

Für die Summe der **Jahresniederschläge** sagen die betrachteten Klima-Modelle übereinstimmend nur geringe Veränderungen voraus. Allerdings ist von einer massiven Umverteilung von Sommer- und Herbstniederschlägen (zusammen rund -20 %) hin zu Winterniederschlägen (fast +30 %) auszugehen (Tab. 13).

Frankfurt a.Main / Flugh.	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Niederschlag	-2%	-17%	-4%	27%	1%
Grasreferenzverdunstung	4%	19%	8%	23%	14%
Beerfelden	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Niederschlag	1%	-13%	-8%	29%	3%
Grasreferenzverdunstung	4%	21%	8%	20%	15%

Tab. 13: Umverteilung der Niederschläge im Projektionszeitraum (2071-2100) gegenüber dem Bezugszeitraum (1971-2000) aus den Mittelwerten der CLM-Realisation 2 und der WETTREG-T Zeitreihe Realisation 7

Diese Entwicklung spiegelt sich auch in den prognostizierten Veränderungen der Monatswerte von Niederschlag und Verdunstung an den Klimastationen Frankfurt a. Main / Flughafen und Beerfelden / Odenwald (Abb. 22).



Abb. 22: Monatsmittel (oben) von Niederschlag (blau, hellblau) und Verdunstung (rot, orange) im Referenzzeitraum 1971-2000 an den Stationen Frankfurt a. Main / Flughafen (links) und Beerfelden / Odenwald (rechts) sowie deren Entwicklung bis zum Projektionszeitraum 2071-2100 (unten) in mm

Zudem muss mit einer Zunahme niederschlagsfreier Perioden gerechnet werden. Im Bezugszeitraum wurden zwischen 1971 und 2000 drei Trockenperioden mit einer Zeitdauer von 30 oder mehr Tagen registriert, die längste davon mit einer Zeitdauer von 34 Tagen.

Folgt man dem Trend, den die betrachteten Projektionen aufzeigen, erhöht sich bis zum Ende des Jahrhunderts sowohl die Häufigkeit längerer niederschlagsfreier Perioden von mehr als 10 Tagen Länge als auch die Zeitdauer der Trockenphasen selbst auf im Einzelfall über 40 Tage (Abb. 23).

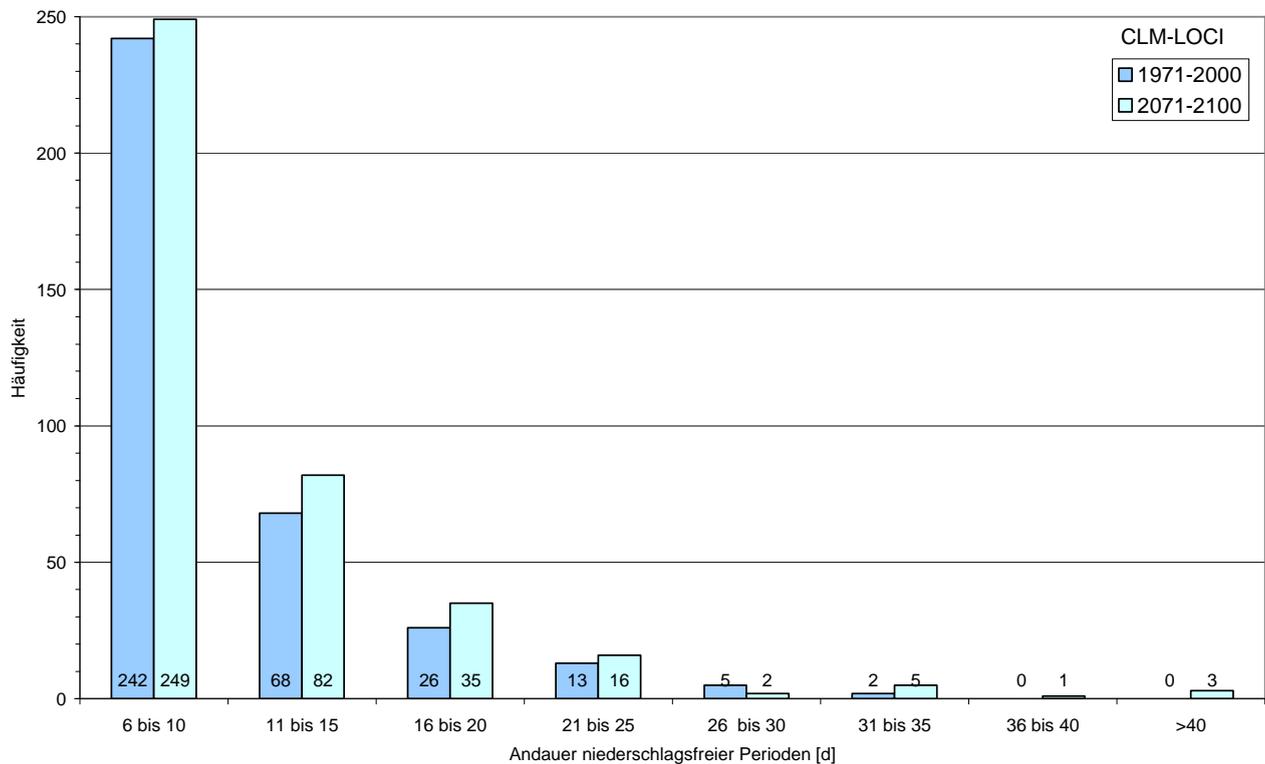


Abb. 23: Erwartete Häufigkeitszunahme niederschlagsfreier Perioden an der Messstelle Frankfurt a.M. / Flughafen (nach CLM-LOCI)

Aus der Niederschlagsumverteilung und aus einem zu erwartenden positiven Trend der **potenziellen Evapotranspiration** (im Jahresmittel etwa +15%) insbesondere in Sommer und Winter (je etwa +20%) folgt eine Entwicklung hin zu einer zunehmend negativen klimatischen Wasserbilanz.

Bestärkt wird diese These durch die aus den A1B-Modellzeitreihen berechnete Entwicklung der gleitenden 3-Jahresmittel der klimatischen Wasserbilanzen an der Station Frankfurt a.M. / Flughafen (Abb. 24). Mit Ausnahme der STAR-Daten, deren Zeithorizont nur bis 2060 reicht, weisen alle verwendeten Zeitreihen einen Trend zu trockeneren Verhältnissen auf.

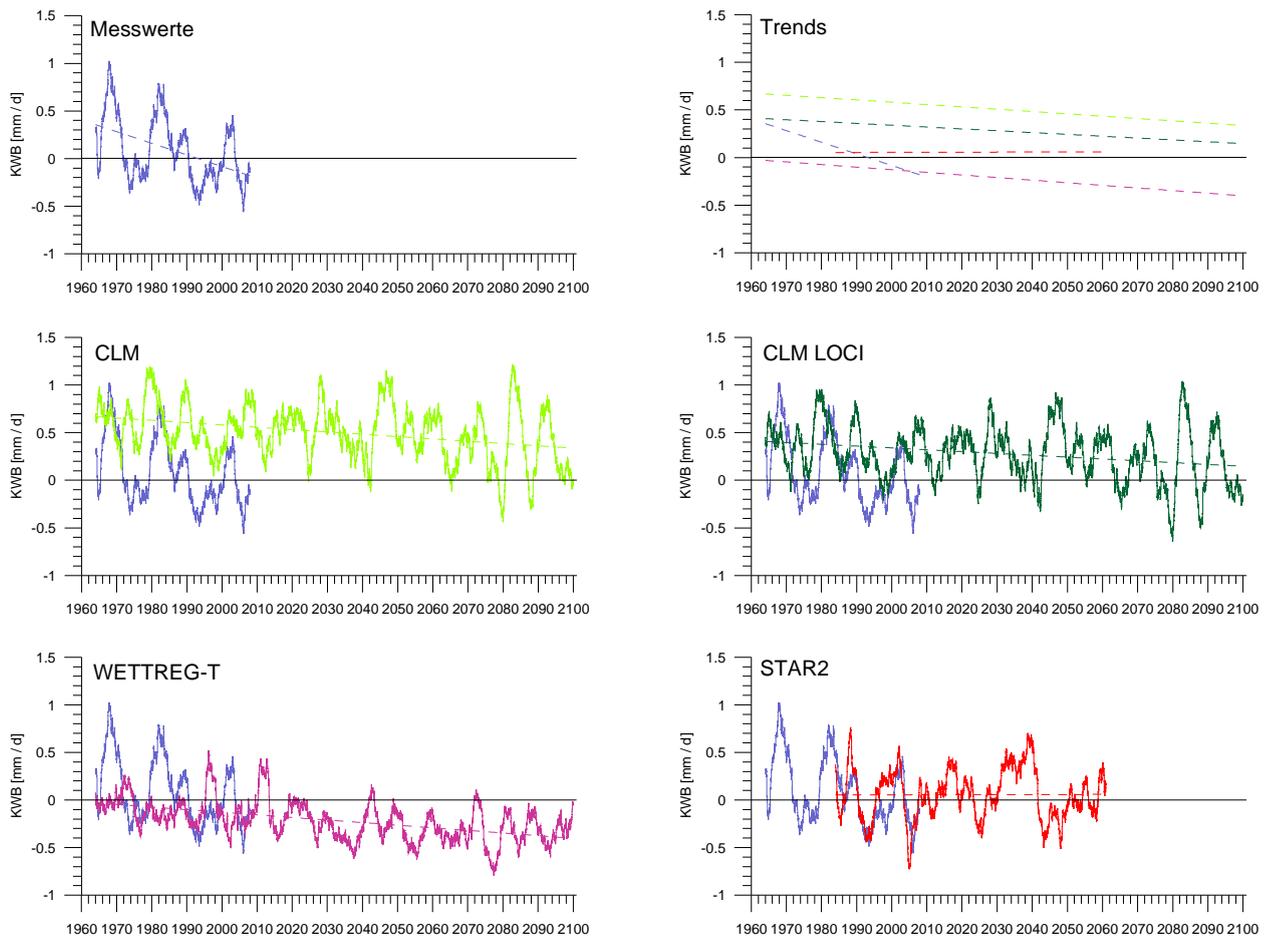


Abb. 24: Gleitendes 3-Jahresmittel der klimatischen Wasserbilanz für Beobachtungsdaten (blau), CLM- (hellgrün), CLM-LOCI- (dunkelgrün), WETTREG-T- (magenta) und STAR2-Daten (rot). Die linearen Trends der KWB sind gestrichelt dargestellt

4 Prozessbasierte Modellierung des Boden- und Grundwasserhaushalts

4.1 Modellierung des Bodenwasserhaushalts - Grundlagen

Die prozessbasierte Modellierung des Bodenwasserhaushalts erfolgte mit Hilfe der hydrologischen Modellierungs- und Simulationssoftware MIKE SHE.

Die horizontale Diskretisierung des das etwa 80 km x 30 km große Untersuchungsgebiet abbildenden numerischen Rechenmodells erfolgte in einem gleichmäßigen, quadratischen Raster mit einer Seitenlänge von 250 m. Es besteht aus über 22.000 Rasterzellen.

Die zeitliche Diskretisierung des Simulationszeitraumes von 1961 bis 2100 erfolgte in Zeitschritten mit einer maximalen Länge von 30 Minuten, wobei diese zu Zeitpunkten mit hohen hydraulischen Gradienten an der Geländeoberfläche (starker Niederschlag, anhaltende landwirtschaftliche Beregnung) von der Simulationssoftware dynamisch auf bis zu 1 Minute verkürzt wurden.

Die räumliche und zeitliche Auflösung des Modells stellen dabei einen Kompromiss dar zwischen einer möglichst feinen Diskretisierung sowohl des Modellgebietes als auch des Simulationszeitraumes und der damit verbundenen benötigten Simulationsdauer. Sie ermöglicht eine hinreichend genaue räumliche und zeitliche Abbildung der betrachteten Strukturen und Prozesse bei einem gleichzeitig noch vertretbaren zeitlichen Rechenaufwand.

Die Untersuchungen wurden mit den Niederschlags- und Verdunstungsdatensätzen auf Tageswertbasis der WETTREG-T (Realisation 7)-, der loci-transformierten CLM- und den STAR2-Datenreihen des IPCC-Szenarios A1B durchgeführt.

4.2 Abgebildete Prozesse und Eigenschaften

Abb. 25 skizziert in einer Übersicht die wichtigsten im Rahmen der Simulation berücksichtigten hydrologischen Prozesse. Neben dem Niederschlag und der potentiellen Verdunstung als Eingangsgrößen werden im Rahmen der Modellrechnungen sowohl alle den Bodenwasserhaushalt betreffenden relevanten Prozesse wie Interzeption, Transpiration, Evaporation, Pflanzenwachstum, Wurzelwasseraufnahme, Versickerung und kapillarer Aufstieg ebenso simuliert, wie die künstliche Beregnung landwirtschaftlich genutzter Flächen.

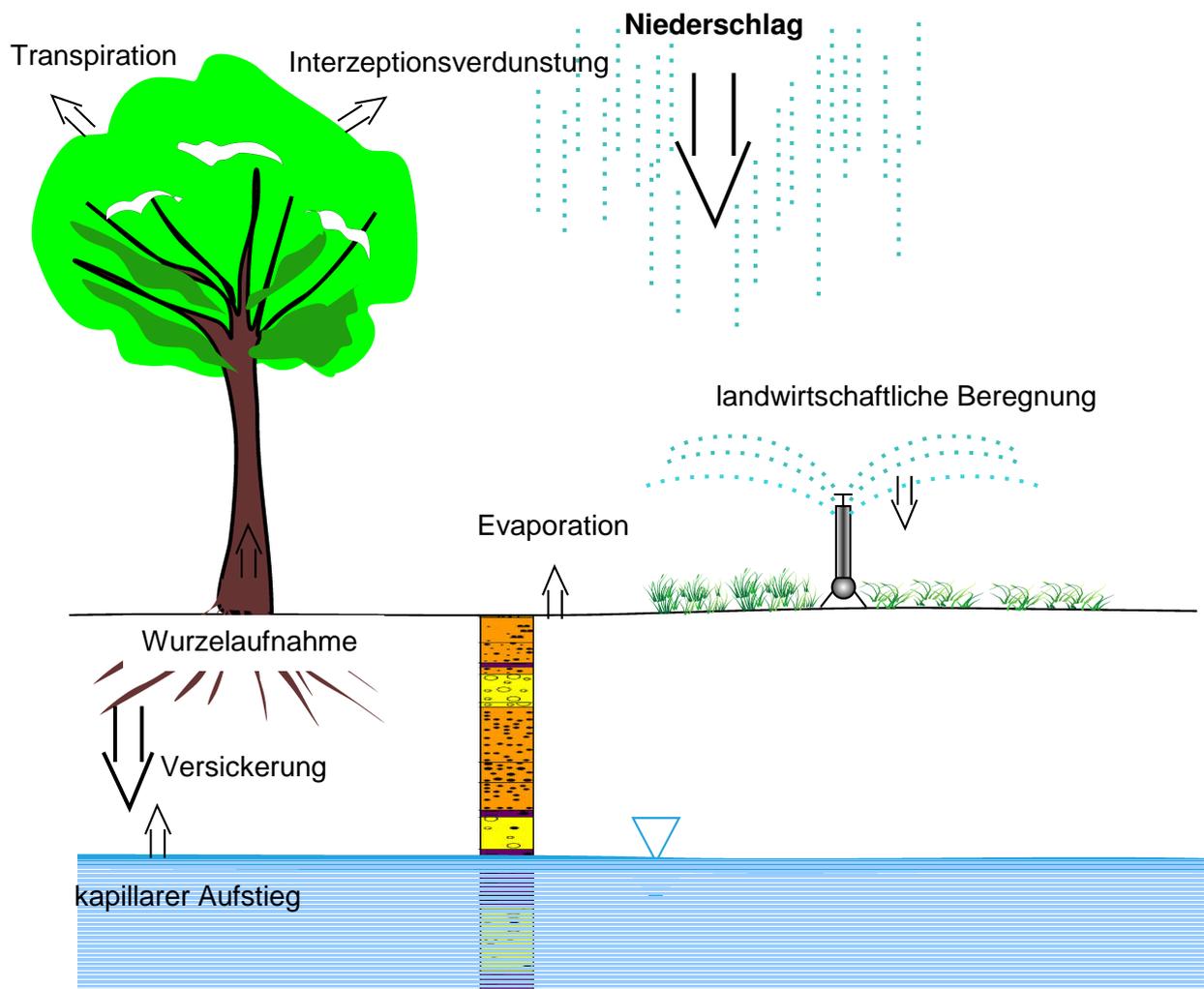


Abb. 25: Prozesse des Bodenwasserhaushaltes

4.2.1 Niederschlag und potentielle Verdunstung

Der Niederschlag im Untersuchungsgebiet wurde über den gesamten Simulationszeitraum auf Tageswertbasis berücksichtigt. Die Modellierung erfolgte über eine Regionalisierung stationsbezogener Niederschlagszeitreihen (vgl. Kap. 3) in einer räumlichen Auflösung von 500 m und einer anschließenden GIS-Verschneidung auf das 250 m-Modellraster.

Die Ermittlung der potentiellen Verdunstung (Grasreferenzverdunstung) erfolgte nach ATV-DVWK-M 504 mit der Methode von Penman-Monteith (vgl. Kap. 3) auf Tageswertbasis. Die Modellierung erfolgte wie auch für den Niederschlag über eine Regionalisierung stationsbezogener Zeitreihen in einem 500m-Raster mit anschließender GIS-Verschneidung auf das Modellraster.

Um eine Vergleichbarkeit der prozessbasierten Berechnungen der Grundwasserneubildung mit dem konzeptionellen BFI-Ansatz (s. Kap. 5) sicherzustellen, waren die räumliche und zeitliche Auflösung der regionalisierten klimatischen Eingangsdaten der Modellrechnungen identisch.

4.2.2 Boden

Für die Beurteilung des Wasserhaushaltes des Bodens sind die Speicher- und Durchlässigkeitseigenschaften (bodenhydraulische Eigenschaften) mitentscheidend. Als Arbeitsgrundlage standen die digitalen Bodenflächendaten (Kartiermaßstab 1:50.000) der BFD-50-Karte zur Verfügung.

Zunächst wurden den einzelnen Bodenarten in den typisierten Bodeneinheiten der BFD-50-Karte ihre bodenhydraulischen Kennwerte aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (2005) zugewiesen. In einer Clusteranalyse mit den Kriterien Schichtmächtigkeit, Speichervermögen und Durchlässigkeit wurden insgesamt 19 Bodenprofilklassen identifiziert, die sich aus insgesamt 31 Bodenarten zusammensetzen und sich in ihrem vertikalen Aufbau voneinander unterscheiden. Die vertikale Diskretisierung dieser Bodenprofile erfolgte in Schichten mit einer über die Tiefe ansteigenden Mächtigkeit von 1 cm an der Geländeoberfläche bis zu 2 m in der vom Grundwasser gesättigten Bodenzone.

Die Parametrisierung der ungesättigten hydraulischen Bodeneigenschaften (Retentionskurve, ungesättigte hydraulische Durchlässigkeit) erfolgte getrennt für jede Bodenart über die Methode von Mualem und van-Genuchten, wobei Hystereseeffekte von der Simulationssoftware nicht berücksichtigt wurden.

4.2.3 Landnutzung

Die Landnutzung im Modellgebiet wurde auf Grundlage von Satellitenbilddauswertungen der Jahre 1985 und 2000 abgeleitet. Die Landnutzung für das Jahr 2000 beruht dabei auf einer multitemporalen Satellitenbilddauswertung. Zusätzlich wurde ausgehend von der Nutzungssituation in 1985 mit Hilfe topographischer Karten die Landnutzung Anfang der 1970er Jahre rekonstruiert (Bezugsjahr 1972). Hierbei wurden insbesondere die Wald- und Siedlungsbereiche korrigiert.

In den Bodennutzungen der Jahre 1972 und 1985 wurden jeweils 10 Nutzungsklassen berücksichtigt, in der für das Jahr 2000 sind es 19 Nutzungsklassen. Für jede vegetative Nutzungsklasse wurde das Pflanzenwachstum anhand der saisonalen Entwicklung des Blattflächenindex, der Wurzeltiefe und des k_c -Faktors (pflanzenpezifische Korrektur der Grasreferenzverdunstung) modelliert.

In den Modellrechnungen wurde für den Simulationszeitraum von 1960 bis 1975 die Landnutzung von 1972 zugrunde gelegt, von 1975 bis 1990 die Landnutzung von 1985 und von 1990 bis 2100 die Landnutzung des Jahres 2000.

4.2.4 Aufteilung der Evapotranspiration

Die Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung erfolgte anhand der Methode von Kristensen & Jensen. Anhand der potentiellen Verdunstung wurden zur Laufzeit die Interzeption, Interzeptionsverdunstung, Transpiration, Evaporation und die Bodenfeuchte in der Wurzelzone unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen Entwicklung der jeweiligen kulturspezifischen Daten (Blattflächenindex, k_c -Faktor, Wurzelwachstum und -verteilung) in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Landnutzung ermittelt.

4.2.5 Landwirtschaftliche Beregnung

Der Wasserbedarf für die landwirtschaftliche Beregnung wurde im Rahmen der Simulationsrechnungen automatisiert über die Bodenfeuchte ermittelt. Als Steuergröße für die Applikation von Beregnungswasser wurde die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) herangezogen. Hierbei wurde im Rahmen der Simulationsrechnungen automatisch eine konstante Beregnungsgabe von bis zu 30 mm/Tag auf diejenigen landwirtschaftlich beregneten Flächen angesetzt, deren Bodenfeuchte im durchwurzelten Bereich der ungesättigten Bodenzone auf einen Wert unter 50% nFKWe fiel. Abgeschaltet wurde die Beregnung automatisch beim Erreichen von 80% nFKWe.

Im Rahmen der Simulationsrechnungen wurden die Kulturen des Winterweizen, Sommergerste, Kartoffeln, Mais, Winterroggen, Beta-Rüben, Wintergerste, Spargel, Bohnen, Speisezwiebeln und Salat als beregnet angenommen.

Abb. 26 skizziert den Beginn und das Ende einer Beregnungsgabe in Abhängigkeit der Bodenfeuchte.

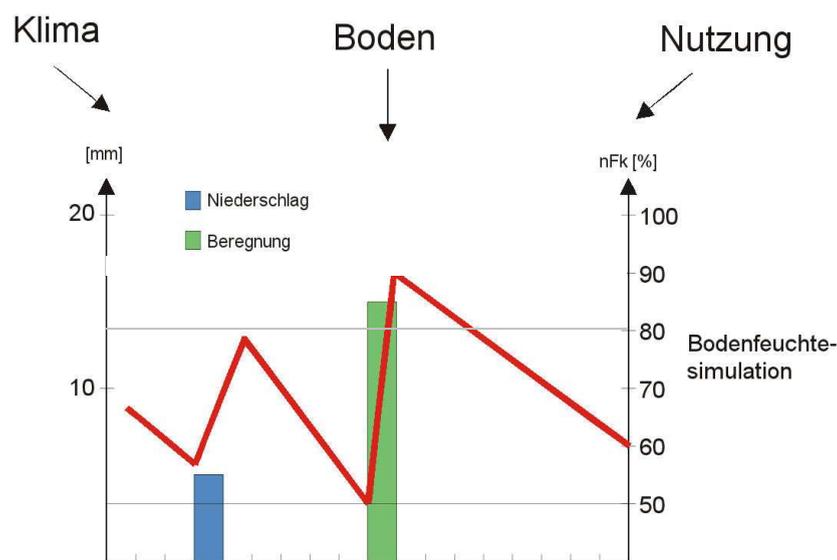


Abb. 26: Indirekte Ermittlung der Beregnungsmengen im Rahmen der Bodenfeuchtesimulation

4.2.6 Ungesättigte Zone

Die Beschreibung des Bodenwasserhaushaltes innerhalb der ungesättigten Zone erfolgte über die Richards-Gleichung unter der im Rahmen der Bodenklassifizierung modellierten Beziehung zwischen der Bodenfeuchte und der hieraus resultierenden ungesättigten hydraulischen Durchlässigkeit.

Die Grundwasseroberfläche als implizites Maß für die Mächtigkeit der ungesättigten Zone bzw. den Flurabstand wurde im Rahmen der Bodenfeuchtesimulation als untere Randbedingung berücksichtigt.

Für die modelltechnische Abbildung der natürlichen Grundwasserstandsdynamik im Modellgebiet wurden Grundwassergleichenpläne als Eingabedatensätze für jeweils April und Oktober eines jeden Jahres erzeugt. Für den Beobachtungszeitraum von 1960 bis 2006 standen hierfür umfangreiche Messwerte zur Verfügung. Für den Zeitraum von 2007 bis 2100 wurden repräsentative, mittlere Grundwasserstände (jeweils für April und Oktober) aus dem Beobachtungszeitraum gewählt. Die Grundwasserstände wurden zur Laufzeit zwischen den Stichtagen für jeden Simulationszeitschritt linear interpoliert.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Grundwasserneubildung

Die Ergebnisse für die Grundwasserneubildung im Modellgebiet auf Grundlage der WETTREG-Daten zeigt Abb. 27. Ein leichter Abwärtstrend zeigt sich für das Dekadenmittel ca. ab 2010. Entgegen den Erwartungen zeigt sich jedoch die Amplitude zwischen maximaler und minimaler Grundwasserneubildung seit den 1970er Jahren eher gedämpft.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Daten des Kontrollaufs (1960 – 2000) keine kalendarische Zuordnung zum tatsächlichen Wetter dieses Zeitraums, sondern nur zu den statistischen Merkmalen des Wetters für diesen Zeitraum (z.B. für die Variabilität) ermöglichen.

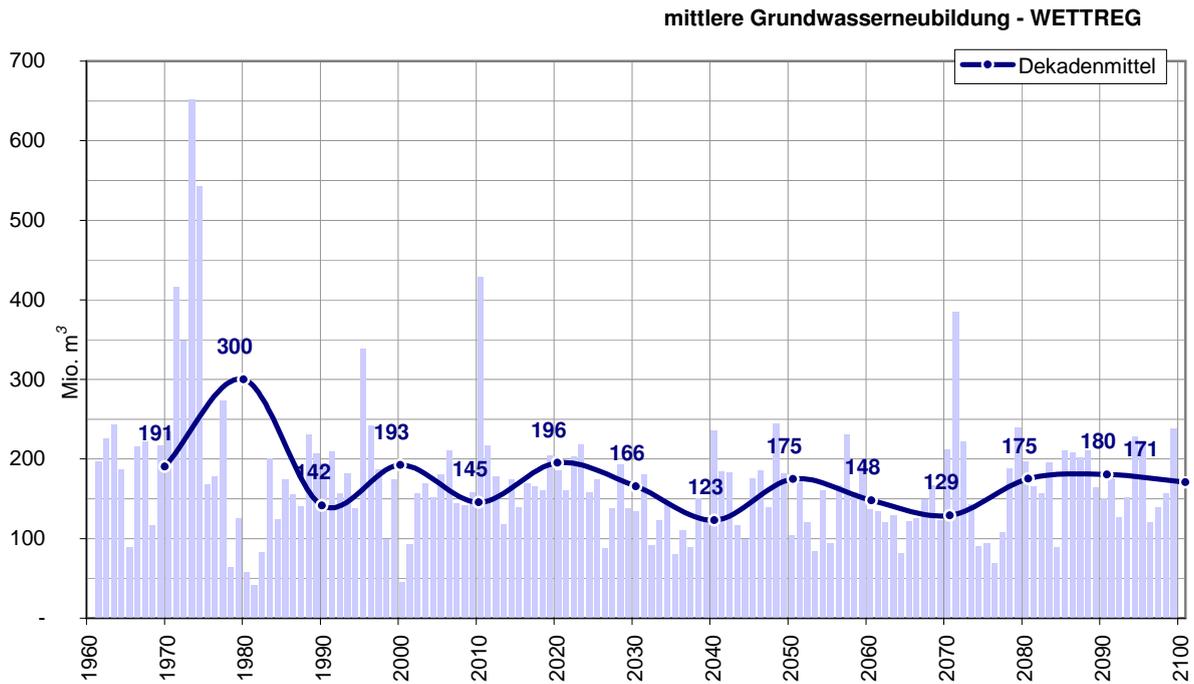


Abb. 27: Mittlere Grundwasserneubildung im Modellgebiet in Mio. m³ (WETTREG)

Die Ergebnisse für die Grundwasserneubildung im Modellgebiet auf Grundlage der CLM-Daten (Abb. 28) ergeben keine maßgeblichen Veränderungen.

Die Amplitude zwischen minimaler und maximaler jährlicher Grundwasserneubildung bleibt hier über die gesamte Simulationsdauer bei einem sehr geringen Anstieg der Dekadenmittel erhalten.

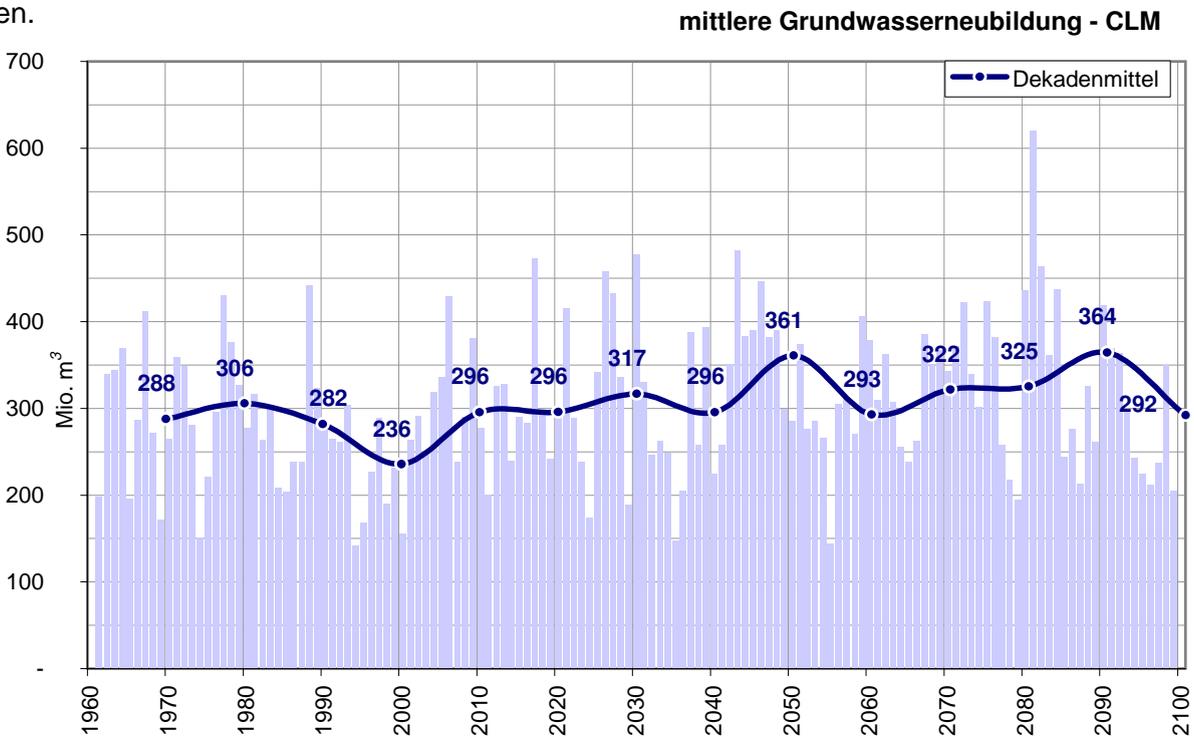


Abb. 28: Mittlere Grundwasserneubildung im Modellgebiet in Mio. m³ (CLM)

Aufgrund der zu hohen Niederschläge der CLM-Daten ergeben sich modelltechnisch ebenfalls zu hohe Grundwasserneubildungsraten. Die Ergebnisse der Simulationen mit dem STAR-Datensatz zeigen, wie auch die CLM-Daten, keinen Trend für die Entwicklung der Grundwasserneubildung.

4.3.2 Landwirtschaftliche Berechnung

Die Entwicklung der landwirtschaftlichen Berechnung im Zeichen des Klimawandels wird nachfolgend auf methodisch unterschiedliche Weise beschrieben: Zunächst wird eine Abschätzung auf Grundlage der klimatischen Wasserbilanz einer repräsentativen Klimastation bis 2050 durchgeführt und der bisherigen Entwicklung sowie Befragungsergebnissen gegenübergestellt. Im Abschnitt 4.3.2.4 wird das Ergebnis der kontinuierlichen Bodenfeuchteberechnung auf Tageswertbasis bis 2100 dargestellt, in die die landwirtschaftliche Berechnung gemäß Kap. 4.2.5 kulturspezifisch integriert wurde.

4.3.2.1 Projektion der zu erwartenden Entwicklung des Bedarfs an Zusatzwasser

Die für Hessen prognostizierte Klimaänderung wird einen großen Einfluss auf alle Wasserhaushaltsgrößen ausüben. Im Landesmittel zeigen die Klimaprojektionen bis zum Jahr 2050 eine deutliche Erhöhung der Jahresmitteltemperatur. Diese Temperaturerhöhung bedingt längere Vegetationszeiten, die wiederum einen deutlichen Einfluss auf den Wasserverbrauch von landwirtschaftlichen Kulturen haben werden. Gleichfalls wird eine markante Zunahme der Winterniederschläge sowie eine deutliche Abnahme der Niederschläge im Sommer prognostiziert. Somit wird sich der Klimawandel insbesondere auf die intensiv bewirtschafteten landwirtschaftlichen Räume in Südhessen auswirken.

4.3.2.1.1 Datengrundlagen

Aus den vom IPCC definierten Emissionsszenarien wurde ein Szenario aus der A1B-Familie gewählt (IPCC, 2007). Dieses Szenario geht von einer mittleren Emissionsentwicklung aus. Bedingt durch eine sehr rasche wirtschaftliche Entwicklung, gepaart mit einer raschen Einführung von neuen und effizienteren Technologien, wird die zukünftige Emissionsbelastung etwa ab Mitte des 21. Jahrhunderts reduziert.

Als Regionalisierungsmodell wurde WETTREG (**W**etterlagen-basierte **R**egionalisierungsmethode), in das die bisherigen Klimabeobachtungen sowie der Einfluss der Großwetterlagen auf das Lokalklima einfließen, benutzt (Spekat et. al., 2007). Zum Einsatz kam eine kontinuierliche Zeitreihe von 1960 bis 2050, die mittlere Niederschlagsverhältnisse widerspiegelt.

Die WETTREG-Daten liegen als Punktinformationen für die Messstationen des Deutschen Wetterdienstes auf Tageswertbasis vor. Als Messstation wurde die Klimastation Mannheim herangezogen, da diese in geeigneter Weise die klimatischen Verhältnisse im Hessischen Ried repräsentiert. Die Niederschlagswerte wurden mit Hilfe des vom Deutschen Wetterdienst vorgeschlagenen Korrekturverfahrens bereinigt (Richter, 1995).

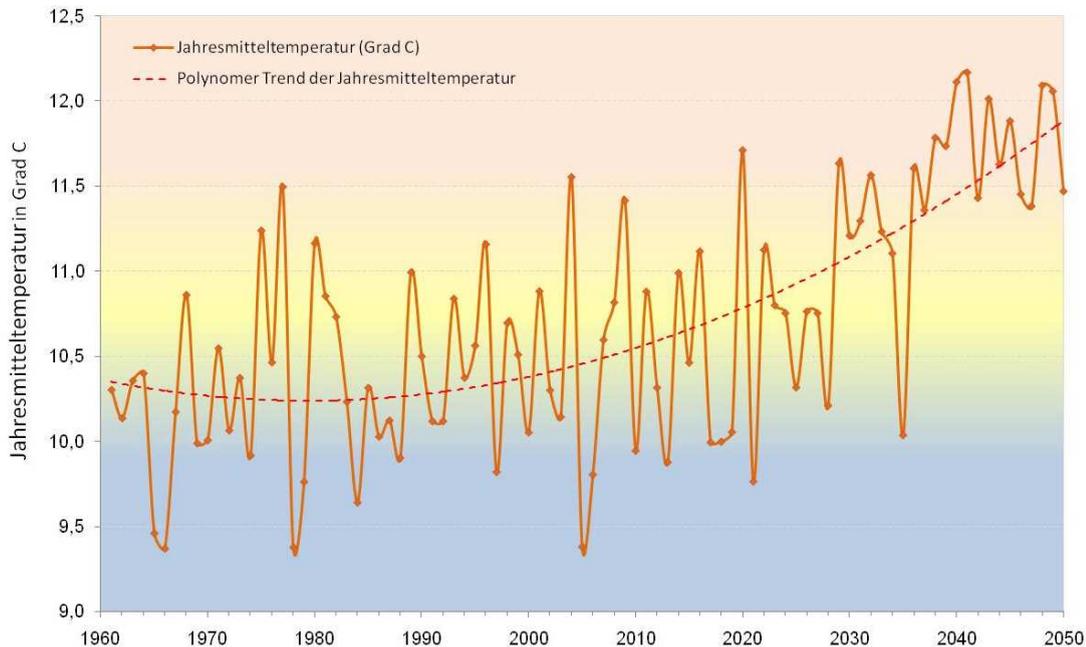


Abb. 29: Modellierte Jahresmitteltemperatur der Klimastation Mannheim (Szenario A1B)

Der in Abb. 29 illustrierte Verlauf der Jahresmitteltemperatur der Klimastation Mannheim zeigt eine sukzessive Zunahme der Jahresmitteltemperatur. In den ersten Jahrzehnten wird keine gravierende Veränderung der Jahresmitteltemperatur ausgewiesen, während ab den 1990er Jahren eine deutliche Zunahme der Jahresmitteltemperatur zu verzeichnen ist. Die Klima-projektion liefert einen Anstieg der Jahresmitteltemperatur von 10,5 auf rund 12 °C bis zum Jahr 2050.

4.3.2.1.2 Berechnung der klimatischen Wasserbilanzen als Bewertungsgrundlage für den Bewässerungsbedarf

Die klimatische Wasserbilanz stellt die Differenz zwischen Niederschlag (korrigiert) und potentieller Verdunstung dar. In der Hydro(geo)logie dient die potentielle Evapotranspiration, die auf Tageswertbasis für die Messstation Mannheim vorliegt, als Eingangsgröße zur Berechnung der klimatischen Wasserbilanz.

Aus den vorliegenden Klimadaten Niederschlag und potentielle Evapotranspiration wurden zunächst die klimatischen Wasserbilanzen auf Tagesbasis durch Differenzbildung berechnet und anschließend auf Monatebene aggregiert. Die Auswertung erbrachte, dass für die Monate Januar, Februar und März in Zukunft mit einer ständig steigenden positiven klimatischen Wasserbilanz zu rechnen ist. Für die Monate April, Mai, Juni, Juli und August werden die Wasserbilanzen im Laufe der Zeit immer stärker negativ. Für den September wird eine ausgeglichene klimatische Wasserbilanz, die keiner zeitlichen Veränderung unterliegt, ausgewiesen. Die Was-

serbilanzen für die Monate Oktober bis Dezember sind deutlich im positiven Bereich und zeigen keine zeitliche Veränderung im Betrachtungszeitraum (1960 - 2050).

Bezogen auf den Berechnungszeitraum (letzte Märzwoche bis Anfang Oktober) ergibt sich aus dieser Betrachtung allein schon ein Mehrbedarf an Zusatzwasser für die landwirtschaftlichen Kulturen durch die stärker negativ werdenden klimatischen Wasserbilanzen in der Zukunft. Da alle Ausgangsdaten auf Tageswertbasis vorliegen, können die Wasserhaushaltsgrößen ohne Probleme auf den für die Berechnung wichtigen Zeitraum (letzte Märzwoche bis zur zweiten Woche im Oktober) aggregiert werden. Die Veränderung der klimatischen Wasserbilanz in diesem Zeitraum dient als Maß für den Bedarf an Zusatzwasser. Diese Vorgehensweise bietet sich an, da klimatische Wasserbilanzen die Grundlage für eine Vielzahl von Modellen zur Berechnungssteuerung sind. Um eine aussagekräftige Tendenz für die Entwicklung der klimatischen Wasserbilanz über die Zeit zu erhalten, werden die Daten zu Dekaden zusammengefasst.

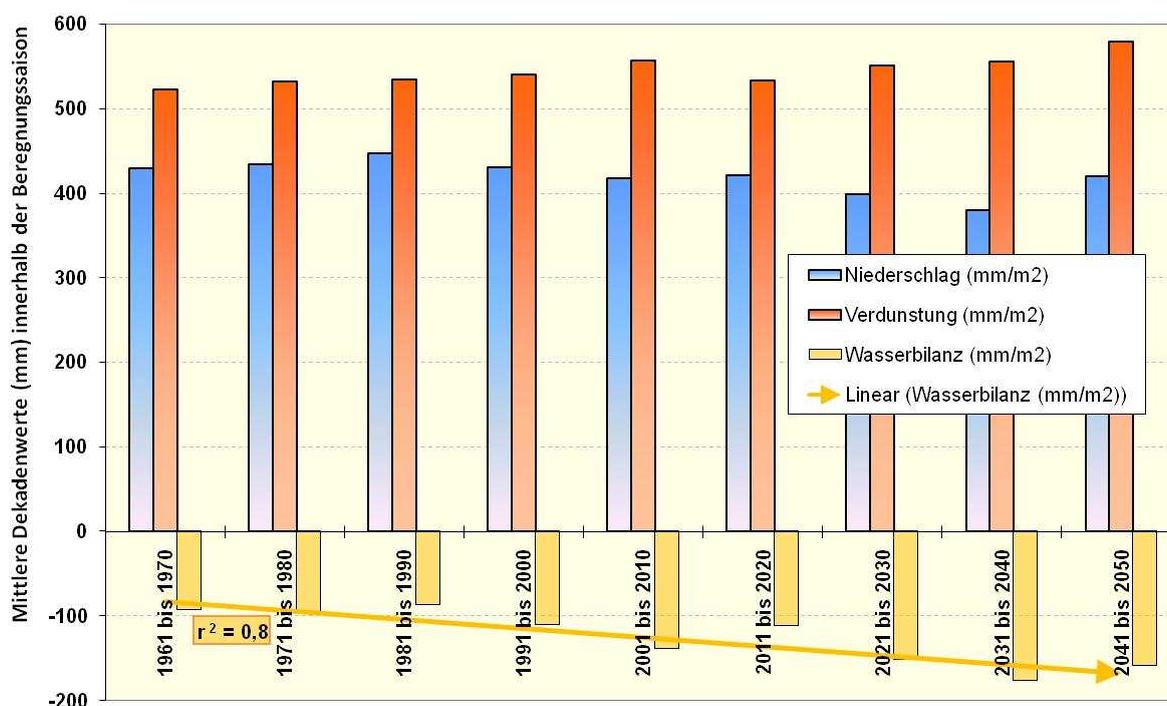


Abb. 30: Mittlere Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung sowie klimatische Wasserbilanz (jeweils in mm) innerhalb der Berechnungsperiode

In Abb. 30 werden die Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung und die aus deren Differenz berechnete klimatische Wasserbilanz innerhalb der Berechnungsperiode visualisiert. Für die klimatische Wasserbilanz ergibt sich ein statistisch abgesicherter abnehmender Trend. Die sukzessive negativer werdende klimatische Wasserbilanz resultiert einerseits aus den leicht abnehmenden Niederschlägen sowie andererseits aus der leicht gestiegenen Verdunstung. Beide Entwicklungstendenzen ergeben in der Summe eine stärker ausgeprägte negative klimatische Wasserbilanz innerhalb der Berechnungsperiode. Im Durchschnitt berechnet sich pro Jahrzehnt

eine mit -8 bis -12 mm stärker negativ werdende klimatische Wasserbilanz. Dies bedeutet, dass der durchschnittliche Zusatzwasserbedarf sich pro Dekade um ca. 10 mm erhöhen würde.

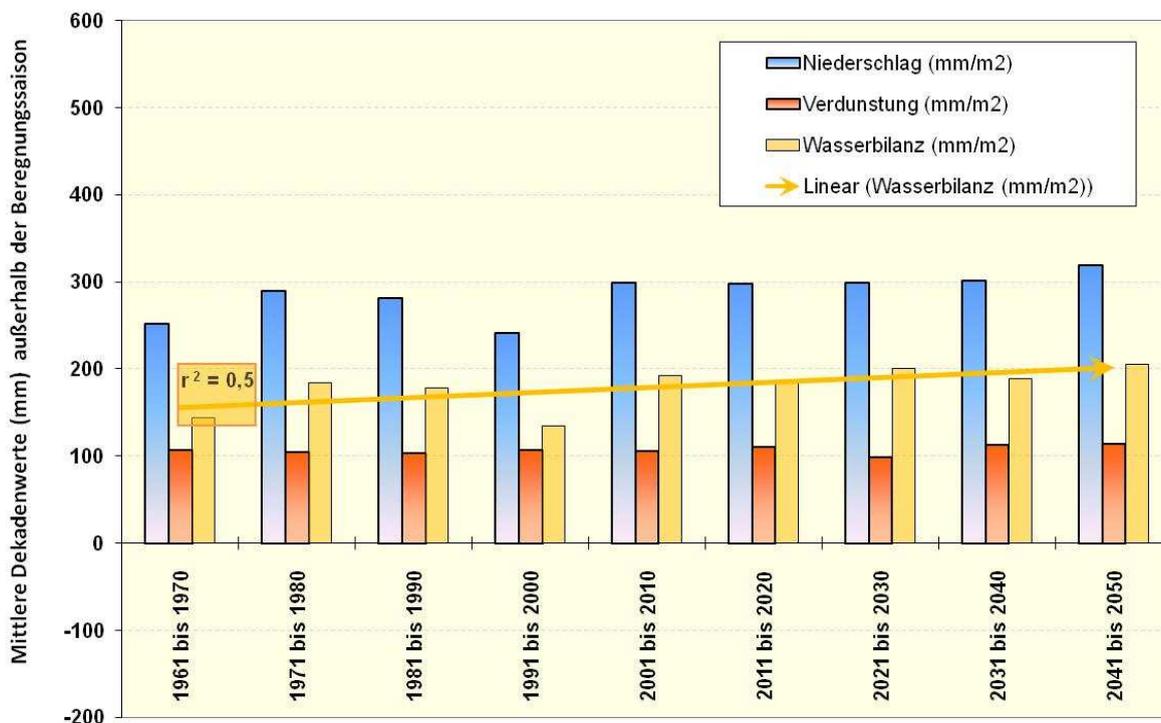


Abb. 31: Mittlere Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung sowie klimatische Wasserbilanz (jeweils in mm) außerhalb der Beregnungssaison

Die in Abb. 31 aufgetragenen mittleren Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung sowie die klimatische Wasserbilanz zeigen außerhalb der Beregnungssaison (Mitte Oktober bis Mitte März) eine völlig andere Ausprägung als dies während der Beregnungszeit der Fall ist. Die Regenmengen liegen mit durchschnittlich 300 mm deutlich unter denen innerhalb der Beregnungssaison und zeigen eine leicht zunehmende Tendenz. Die Verdunstung, die innerhalb des Beregnungszeitraums mit steigender Tendenz durchweg über 500 mm liegt, weist für die beregnungsfreie Zeit Werte um 100 mm aus, allerdings ohne erkennbaren Trend. Die klimatische Wasserbilanz außerhalb der Beregnungszeit, als Resultierende beider Größen, zeigt eine statistisch schwach abgesicherte zunehmende Tendenz, die maßgeblich auf die tendenziell höheren Niederschläge zurückzuführen ist.

4.3.2.2 Abschätzung der zukünftig zu erwartenden Anbauverhältnisse

Als Grundlage für die Abschätzung werden die Ergebnisse der Befragung (s. Kapitel 2.3.3.2) sowie die Einschätzung der Entwicklung von Fachberatern (Gemüsebau) herangezogen.

Entwicklung der Berechnungsflächen:

Die kartografische Erfassung der Berechnungsflächen ergab, dass derzeit 96 % der landwirtschaftlichen Fläche beregnet werden können. Dies bedeutet, dass nahezu alle Ackerflächen bereits beregnet werden können. Durch die klimatische Entwicklung ist zu erwarten, dass auch die wenigen Restflächen für die Beregnung erschlossen werden.

Veränderung der Produktionstechnik:

Die anhaltende Ausweitung der Bebauungsflächen (Siedlung, Verkehr) im Hessischen Ried, die mit einem Rückgang der ackerbaulich genutzten Flächen einhergeht, wird sich auf die Nutzung der verbleibenden landwirtschaftlichen Flächen auswirken. Weiterhin bietet das Hessische Ried gute Voraussetzungen für die landwirtschaftliche Beregnung. Die hydrogeologischen Verhältnisse des Grundwasserleiters (Porengrundwasserleiter, meist aus Sanden und Kiesen bestehend), teilweise geringe Grundwasserflurabstände sowie die vorhandene Rheinwasseraufbereitung in Biebesheim schaffen Bedingungen, die für die landwirtschaftliche Beregnung als ideal anzusehen sind. Theoretisch könnte ein Mangel an Beregnungswasser durch die verstärkte Nutzung von aufbereitetem Rheinwasser ausgeglichen werden. In anderen Gebieten mit intensiver Landnutzung (z. B. Gemüseanbau) sind derart günstige Bedingungen für eine zukünftig notwendig werdende Zusatzbewässerung nicht vorhanden. Die relative Vorzüglichkeit des Hessischen Rieds könnte demnach zur Folge haben, dass sich die Flächennutzung im Ried intensiviert. Falls der Trend Beerenobst anhält, könnte dies mit einer sukzessiven Ausweitung der Flächen mit Tropfbewässerung einhergehen, da diese Kulturen mehrjährig sind. Gleiches gilt für den Spargelanbau, der ebenfalls durch eine Tropfbewässerung weiter optimiert werden kann.

Mögliche Änderungen hinsichtlich der anzubauenden Kulturen:

Während Erdbeeren, Beerenobst, Spargel und weiteres Gemüse einen hohen Arbeitsaufwand bei der Produktion bedingen, ist der Anbau von z. B. Buschbohnen, Zwiebeln aber auch Arznei- und Gewürzpflanzen gut zu mechanisieren. Es ist denkbar, dass die vorherrschenden landwirtschaftlichen Kulturen wie Getreide und Mais daher zugunsten der vorgenannten Gruppen leicht zurückgehen.

Allgemein ist festzuhalten, dass die Entwicklung der Anbauverhältnisse und damit auch die Veränderung der Produktionstechnik sehr stark von der Nachfrage bzw. Marktlage und der Vermarktungsstruktur abhängig ist. Erhöht sich der Anteil der Selbstvermarkter, wird sich ebenfalls der Anteil an intensiven gärtnerischen Kulturen erhöhen. Dies zieht wiederum eine Veränderung der Produktionstechnik nach sich.

4.3.2.3 Diskussion der Ergebnisse bezüglich „landwirtschaftlicher Zusatzwasserbedarf – Klimawandel“

Erschließung der Beregnungsflächen

Die erstmalige digitale Erfassung der Beregnungsflächen im Hessischen Ried ergab eine potentielle Beregnungsfläche von 33.059 ha. Damit können derzeit 96 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche mit Zusatzwasser versorgt werden. In der Praxis liegt allerdings die pro Jahr tatsächlich beregnete Fläche etwas unter diesem Wert, da bei vielen landwirtschaftlichen Betrieben aus arbeitstechnischen Gründen sowie auf Grund der technischen Ausstattung nicht alle Flächen ausreichend und zur geeigneten Zeit mit Zusatzwasser versorgt werden können.

Das Beregnungswasser stammt zum überwiegenden Teil aus dem Grundwasser, das in der Regel direkt „vor Ort“ aus sog. Beregnungsbrunnen gefördert wird. Mit Grundwasser wird der überwiegende Teil der Beregnungsflächen bewässert (27.725 ha). Mit aufbereitetem Rheinwasser werden derzeit 5.233 ha mit Zusatzwasser versorgt. Die Verwendung von aufbereiteten Oberflächenwässern zur Beregnung spielt heute dagegen nur eine untergeordnete Rolle.

Beregnungssteuerung

Die durchgeführte Umfrage brachte deutlich zum Ausdruck, dass der Bewässerungseinsatz derzeit hauptsächlich durch die „Erfahrungswerte“ der Landwirte gesteuert wird. Prognosemodelle, die Witterung und den spezifischen Wasserbedarf einzelner Kulturen berücksichtigen, kommen nur vereinzelt zum Einsatz. Dies bedeutet jedoch nicht, dass Prognosemodelle als Grundlage zur Steuerung der Zusatzwassergaben abgelehnt werden. Gegen ihren Einsatz werden überwiegend arbeitstechnische Aspekte ins Feld geführt (oft haben die Betriebe einen festen zeitlichen Ablauf; Nähe der Flächen zueinander u. a.). Eine effizientere Beregnungssteuerung, die auf den Wasserbedarf der Kulturen aufbaut, kann daher nur durch eine Erhöhung des Anteils an ortsfesten Beregnungsanlagen erreicht werden. Gleichfalls wurde deutlich, dass die Landwirte möglichst die Abend- und Nachtstunden zur Beregnung nutzen. Die Verlegung sämtlicher Bewässerungsgaben in die verdunstungsärmeren Tageszeiten ist allerdings mit der vorherrschenden Bewässerungstechnik im Hessischen Ried derzeit nicht möglich.

Höhe der Zusatzwassergaben

Bereits im Jahr 1994 wurde eine Befragung hinsichtlich der Höhe der Beregnungsgaben durchgeführt. Der Zusatzwasserbedarf wurde damals auf 3,5 Mio. m³ für sog. „Nassjahre“ und 35 Mio. m³ für „Trockenjahre“ taxiert. Die aktuelle Erhebung (2008) dagegen ergab für „Nassjahre“ einen Zusatzwasserbedarf von rund 10 Mio. m³. Bezogen auf die Beregnungsfläche von rund 33.000 ha ergibt dies eine Steigerung der Zusatzwassergaben in „Nassjahren“ von ca. 12 l/m² (Jahr 1994) auf rund 30 l/m² (Jahr 2008). Dies entspricht einer Steigerung des Zusatzwasserbedarfs im Laufe einer Dekade um 12 l/m².

Für „Trockenjahre“ wurde mit einer Zusatzwassermenge von 35,5 Mio. m³ nahezu die gleiche Größenordnung erreicht wie dies im Jahre 1994 der Fall war. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Arbeiten von Prof. Paschold (Vortrag im Mai 2008), der beispielhaft für die Kultu-

ren Sommer-Zwiebel und Spinat (früh) einen zunehmenden Wasserbedarf in den letzten Jahrzehnten festgestellt hat. Dass die Berechnungsmengen in „Trockenjahren“ während der letzten 15 Jahre keine nennenswerte Steigerung erfuhren, ist vor allem auf die begrenzenden technischen Möglichkeiten zurückzuführen. Dies ist in extremen Trockenjahren mit Ertragsminderungen verbunden.

Die Ergebnisse der Befragung decken sich gut mit der Entwicklung der berechneten klimatischen Wasserbilanzen. Die Modellierung der klimatischen Wasserbilanzen für die Berechnungssaison auf Grund kontinuierlicher Zeitreihen für den Niederschlag und die Verdunstung von 1960 bis 2050 ergab eine mit zunehmender Zeit immer stärker negativ werdende klimatische Wasserbilanz. Hierfür sind zum einen die abnehmenden Niederschlagsmengen und zum anderen die steigende Verdunstung verantwortlich. Pro Jahrzehnt wird die klimatische Wasserbilanz um ca. 10 mm stärker negativ. Der höhere Verdunstungsanspruch muss durch die Berechnung ausgeglichen werden. Dies drückt sich durch das Mehr an Zusatzwasser in sog. „Nassjahren“ aus. Gleichfalls wurde bei der Befragung der Berechnungsverbände von deren Vorsitzenden einhellig die Meinung vertreten, dass sich der Bedarf an Zusatzwasser im letzten Jahrzehnt ständig erhöht hat und mit einer weiteren Zunahme der Zusatzwassergaben zu rechnen sei.

In der berechnungsfreien Zeit gibt es eine schwach abgesicherte Tendenz hin zu einer steigenden positiven klimatischen Wasserbilanz. Dies legt den Schluss nahe, dass zu Beginn der Berechnungssaison die Böden mehr oder weniger wassergesättigt sein werden.

Abschätzung der zukünftig zu erwartenden Anbauverhältnisse:

96 % der landwirtschaftlichen Fläche im Hessischen Ried ist für die Berechnung aus technischer Sicht zugänglich. Aus arbeitstechnischen Gründen liegt jedoch der tatsächliche Anteil „Flächen mit Zusatzwassergaben“ unter diesem Wert. Zukünftig könnte jedoch auf Grund des „Wasserreichtums“ im Ried eine Intensivierung des Anbaus erfolgen. Dies würde zwangsläufig dazu führen, dass ein höherer Anteil der technisch erschlossenen Berechnungsflächen in optimaler Weise (auch in Richtung der Anzahl der Berechnungsgaben) genutzt würde. Gleichfalls ist bei Beerenobst- und Spargelanbau eine Ausweitung der Tropfbewässerung denkbar, durch die eine Optimierung der Zusatzwassergaben (Höhe und zeitliche Terminierung der Wassergaben) gegeben wäre.

Hinsichtlich der Anbauverhältnisse könnte es zu einer leichten Zunahme von gartenbaulich intensiv genutzten Flächen (z. B. Gemüse, Spargel) auf Kosten von Flächenanteilen aus der konventionellen Landbewirtschaftung (z. B. Getreide und Mais) kommen.

4.3.2.4 Berechnung des zukünftigen Wasserbedarfs

Abb. 32 zeigt die in den Berechnungen zum Bodenwasserhaushalt ermittelten Zusatzwassermengen als Jahressummen aller Kulturen bis 2100, ebenfalls auf Grundlage der WETTREG-Daten.

Deutlich wird die Zunahme der Berechnungsmengen durch die ebenfalls dargestellten Dekadenmittel. Mit den WETTREG-Daten ergibt sich außer dem ansteigenden Trend eine

signifikante Vergleichmäßigung der jährlichen Mengen und der Dekadenmittel ab etwa 2050. Der erforderliche Zusatzwasserbedarf unter den derzeitigen landwirtschaftlichen Nutzungsverhältnissen wird im Mittel mit 25 Mio. m³/a für das Modellgebiet berechnet (entspricht einer mittleren Beregnungshöhe von 75 mm ohne Berücksichtigung von Verlusten).

Der Bedarf an Zusatzwasser wird sich in Folge der Veränderungen in den Niederschlägen und der Verdunstung in etwa verdoppeln, wobei eine veränderte Beregnungspraxis durch Kulturwandel und verlängerte Vegetationsperioden nicht berücksichtigt sind.

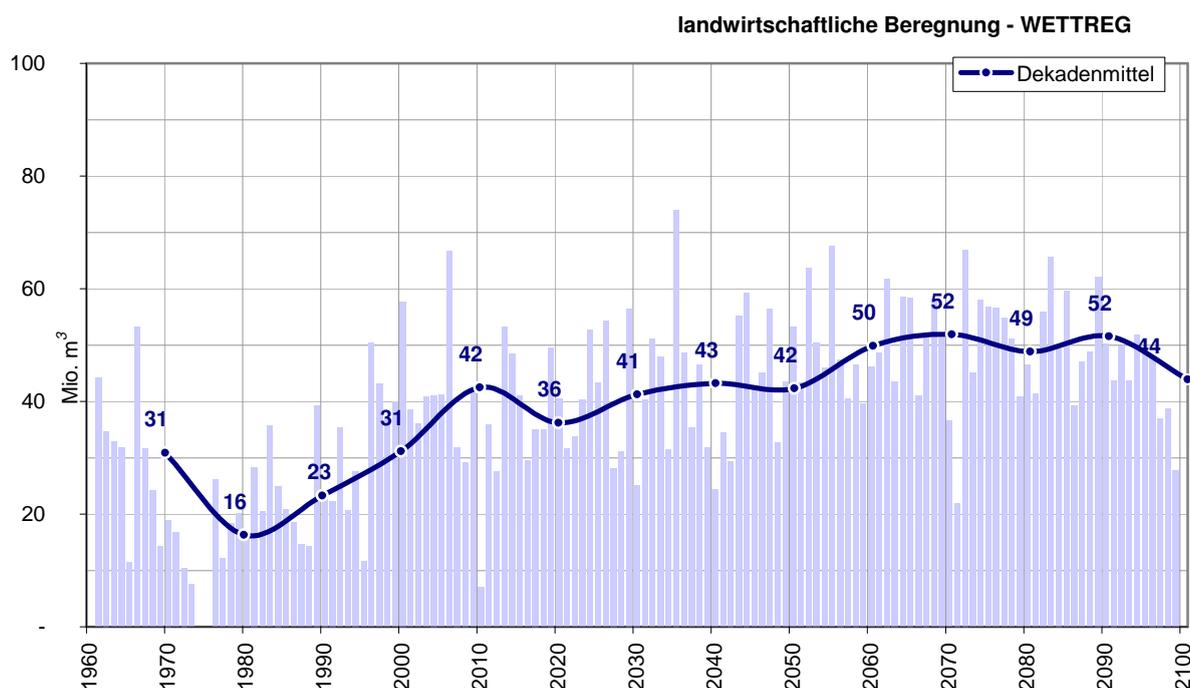


Abb. 32: Jährliche landwirtschaftliche Beregnungsmengen im Modellgebiet in Mio. m³ (WETTREG)

Die Ergebnisse der Simulationen mit dem STAR- bzw. CLM-Datensatz hingegen zeigen über die Simulationsdauer keine maßgeblichen Änderungen in Höhe und Variabilität der landwirtschaftlichen Beregnungsmengen. Aufgrund der in den Bodenfeuchtesimulationen ermittelten zu hohen Grundwasserneubildungsraten für den CLM-Datensatz, wurden für diesen rechnerisch keine bzw. nur sehr geringe Beregnungsmengen ermittelt.

4.4 Grundwassermodell

Für eine Abschätzung der Auswirkungen der klimabedingten Veränderung der Grundwasserneubildung auf das Grundwasserregime wurden Simulationsrechnungen für das Grundwasser durchgeführt (Gerdes et al., 2010).

Hierfür wurde ein numerisches Grundwassermodell (gesättigte Bodenzone) mit der Modellierungssoftware SPRING erstellt. Die Ergebnisse der Bodenwasserhaushaltssimulationen dienen hierbei als Eingabedatensätze der Grundwasserneubildung.

Das Netz des Grundwassermodells besteht aus insgesamt 12 vertikalen Knotenschichten mit jeweils 33.000 Knoten und 42.000 Elementen, welche den aktuellen Kenntnisstand der geologischen Verhältnisse im Modellgebiet abbilden. Alle Entnahmen sind den tatsächlichen Entnahmetiefen und Grundwasserstockwerken zugeordnet. Die Simulation der Grundwasserströmung erfolgte mit der an die Strömungsverhältnisse optimal angepassten Netzstruktur der Finiten Elemente und mit extremer Netzverdichtung im Bereich von Singularitäten. In Abb. 33 ist die Netzstruktur abgebildet, vertikaler Schichtaufbau und Netzverdichtung im Bereich der Entnehmer sind dabei gut zu erkennen.

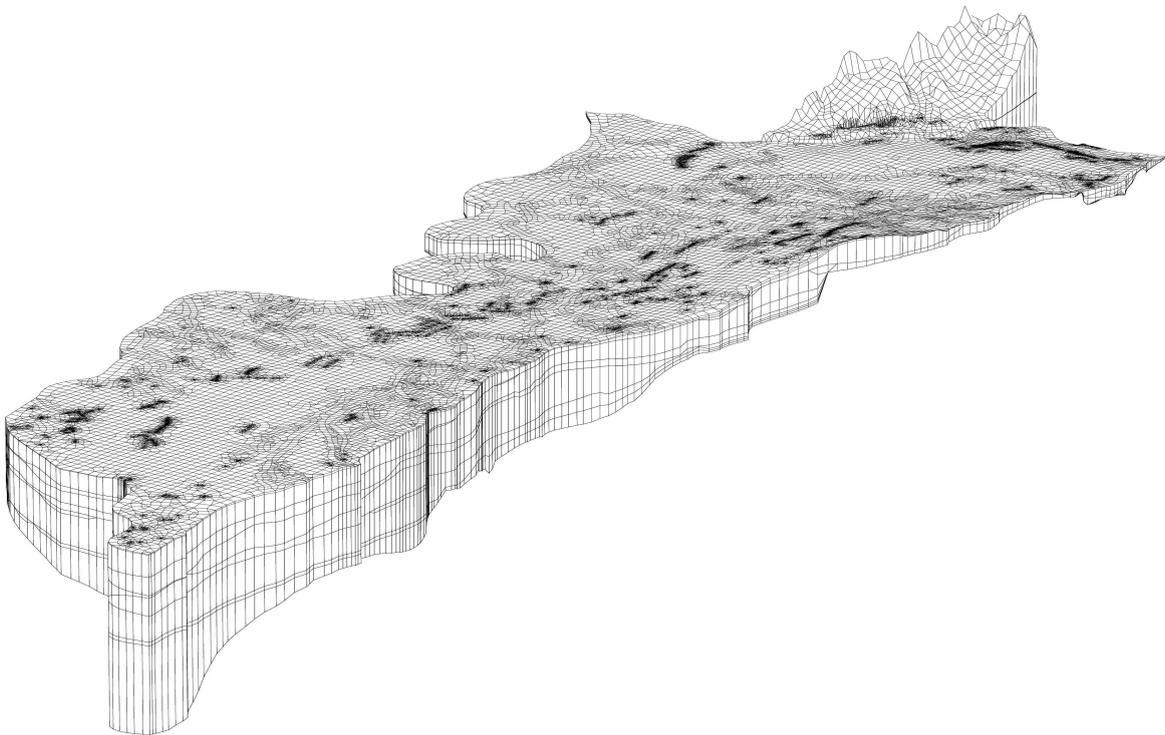


Abb. 33: Netzstruktur des eingesetzten Grundwassermodells

Abb. 34 zeigt das Finite-Elemente-Netz und die detaillierte Berücksichtigung der Oberflächen-
gewässer sowie die zahlreichen einbezogenen Brunnen und Infiltrationsanlagen. Insgesamt
sind ca. 900 Brunnen ab einer jährlichen Entnahme von 50.000 m³, die Tiefbrunnenanlagen der
landwirtschaftlichen Beregnung und 58 Infiltrationsorgane modelltechnisch umgesetzt worden.

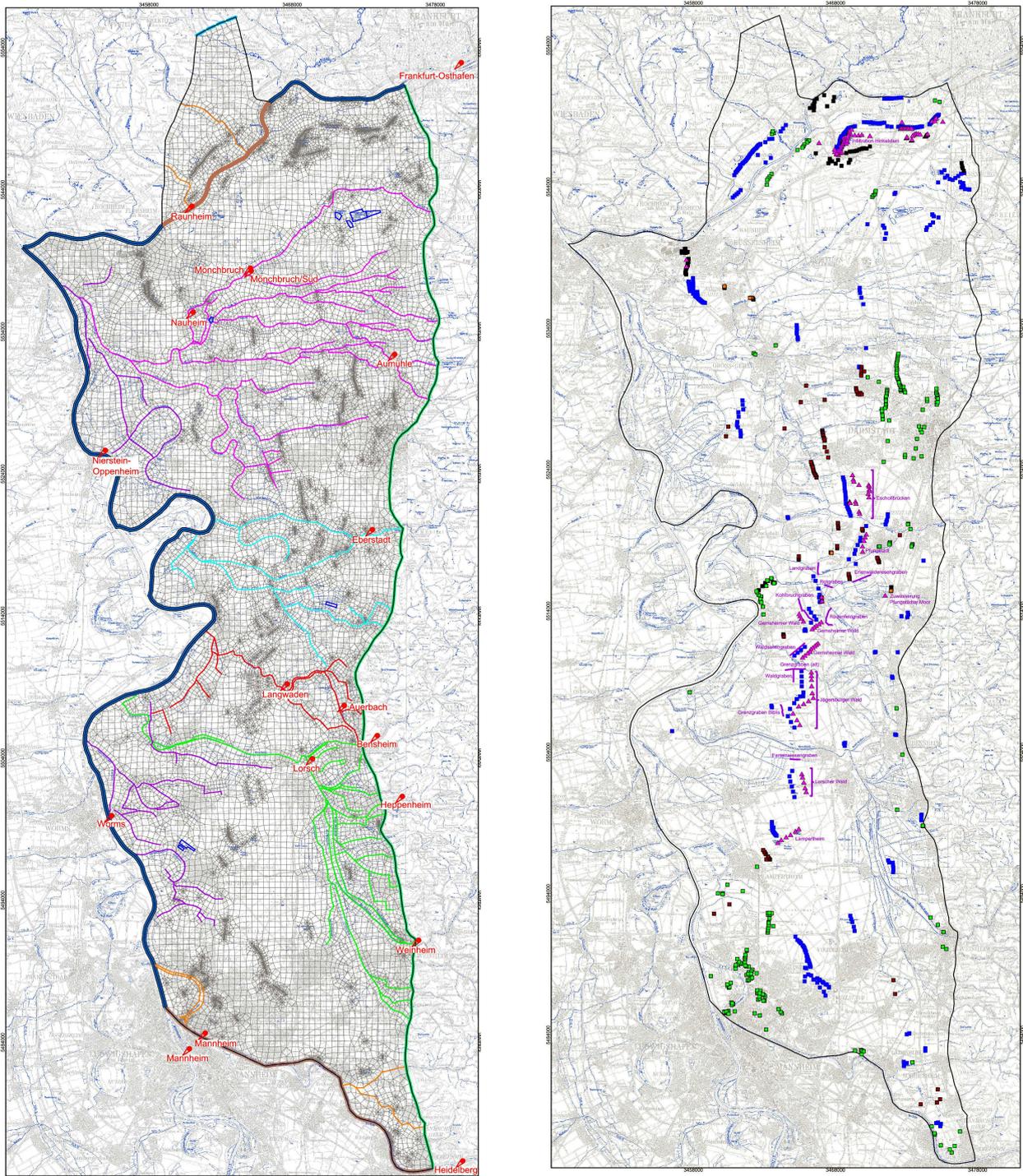


Abb. 34: Gewässerstrukturen und Brunnen im Grundwassermodell

5 Konzeptionelle Modellierung der Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1961-2100

5.1 Simulationsergebnisse

Im Rahmen des BMBF-Projektes hat das HLUG die Grundwasserneubildung auf der Grundlage der drei SRES-Emissionsszenarien A2, A1B und B1 unter Verwendung des in 2.1.3 und 2.1.4 beschriebenen Modellkonzeptes landesweit für den Zeitraum 1961-2100 modelliert und für die Gesamtfläche Hessens und die Regionen Hessisches Ried und Odenwald ausgewertet. Die Klimaprojektionen basieren auf dem globalen Klimamodell (GCM) ECHAM5 und den statistischen regionalen Klimamodellen (RCM) WETTREG-2006 und STAR2. Zusätzlich liegen die bereits im Rahmen des Integrierten Klimaschutzprogrammes von Hessen INKLIM 2012 gewonnenen Ergebnisse (Emissionsszenario: B2, GCM: ECHAM4, RCM: WETTREG-2003) vor (Bertold u.a., 2005).

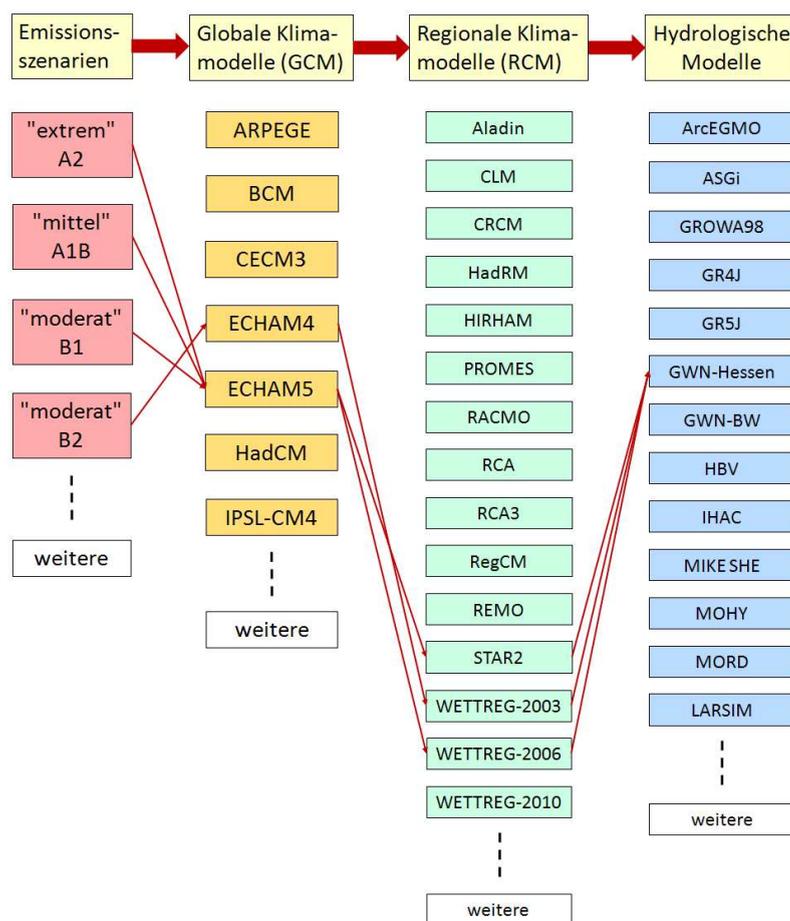


Abb. 35: Übersicht der für die konzeptionelle Modellierung berücksichtigten Modellketten (nach Krahe u.a., 2009, modifiziert).

In Abb. 35 ist gut erkennbar, dass die für die konzeptionelle Modellierung verwendeten Modellketten nur ein sehr begrenztes Ensemble der möglichen Kombinationen von Emissionsszenarien, globalen und regionalen Klimamodellen und hydrologischen Modellen darstellen. Rein rechnerisch ergeben sich aus den drei gängigen Emissionsszenarien A2, A1B, und B1 und den 21 globalen Klimamodellen des vierten IPCC-Sachstandsberichts in Kombination mit den verfügbaren Regionalmodellen, die in Deutschland anwendbar sind, ca. 700 Klimaprojektionen (Krahe u.a., 2009).

Mit dem konzeptionellen Modell (BFI-Ansatz) des HLUG wurde die langfristig mittlere Grundwasserneubildung aus Niederschlag ermittelt. In den Abb. 36, Abb. 37 und Abb. 38 sind die Dekadenmittelwerte der Grundwasserneubildung als Trendlinien für die Gesamtfläche Hessens, das Hessische Ried und den Odenwald sowohl für die Beobachtungsdaten als auch für das genannte „Mini-Ensemble“ aller betrachteten Klimaprojektionen (Abb. 35) dargestellt.

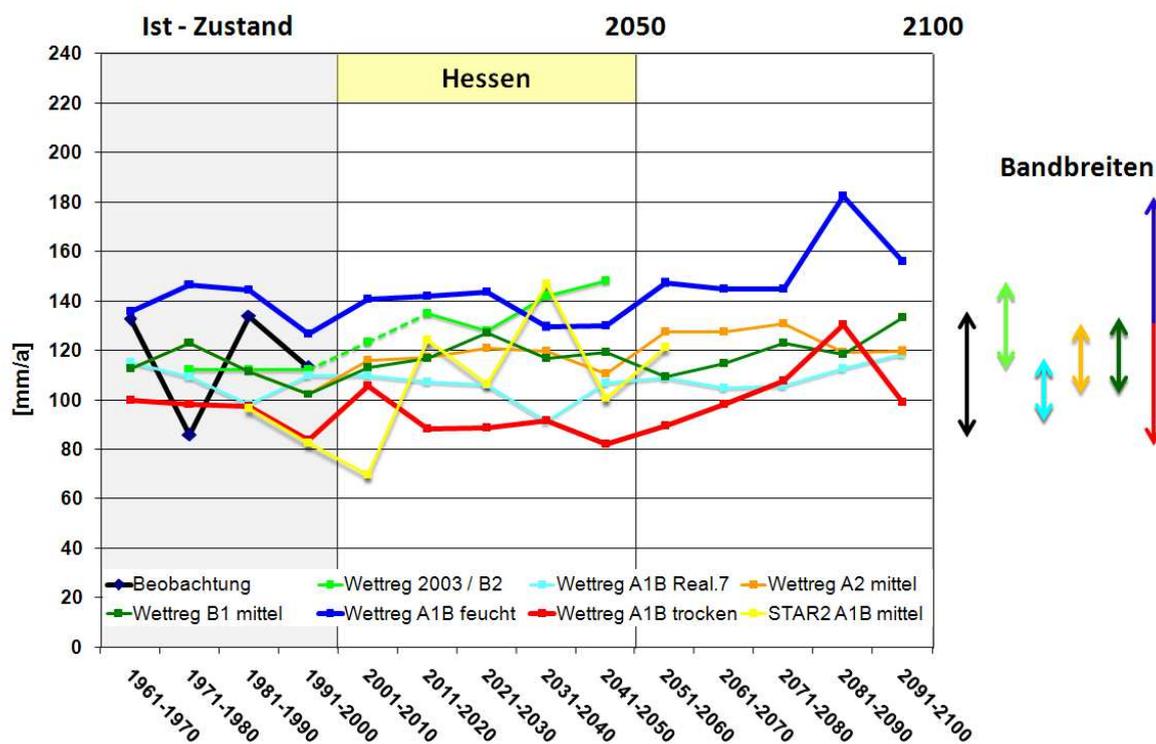


Abb. 36: Dekadenmittelwerte und Trendlinien der Grundwasserneubildung für Hessen.

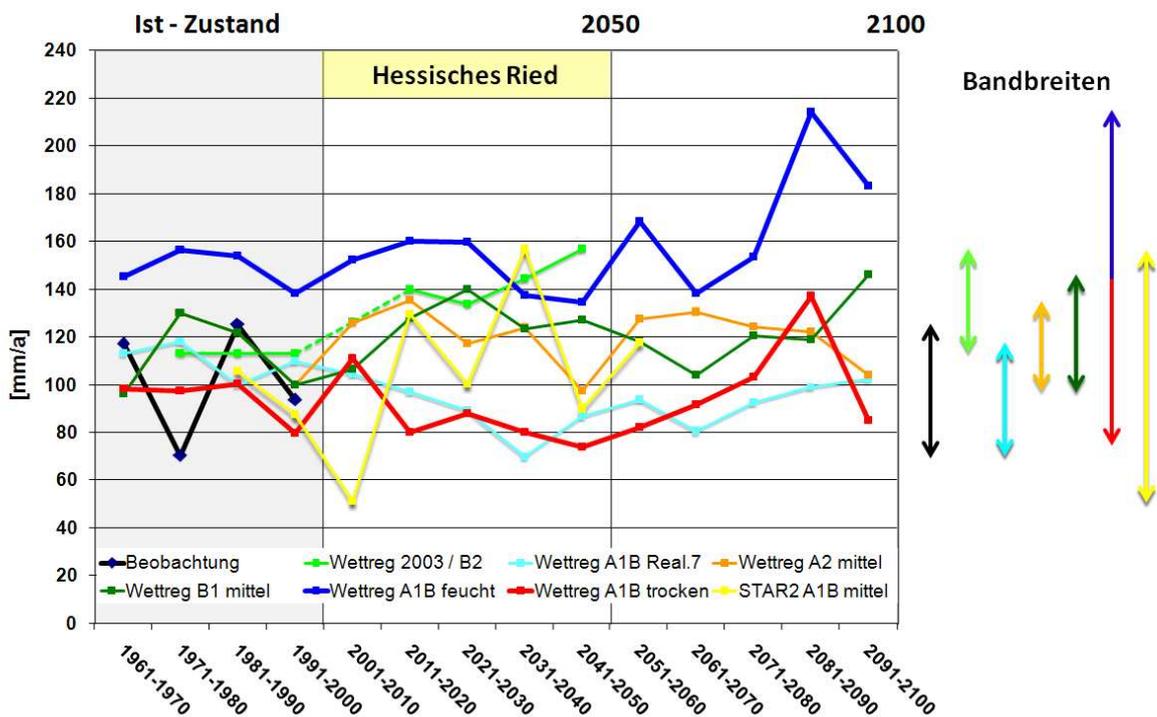


Abb. 37: Dekadenmittelwerte und Trendlinien der Grundwasserneubildung für das Hess. Ried

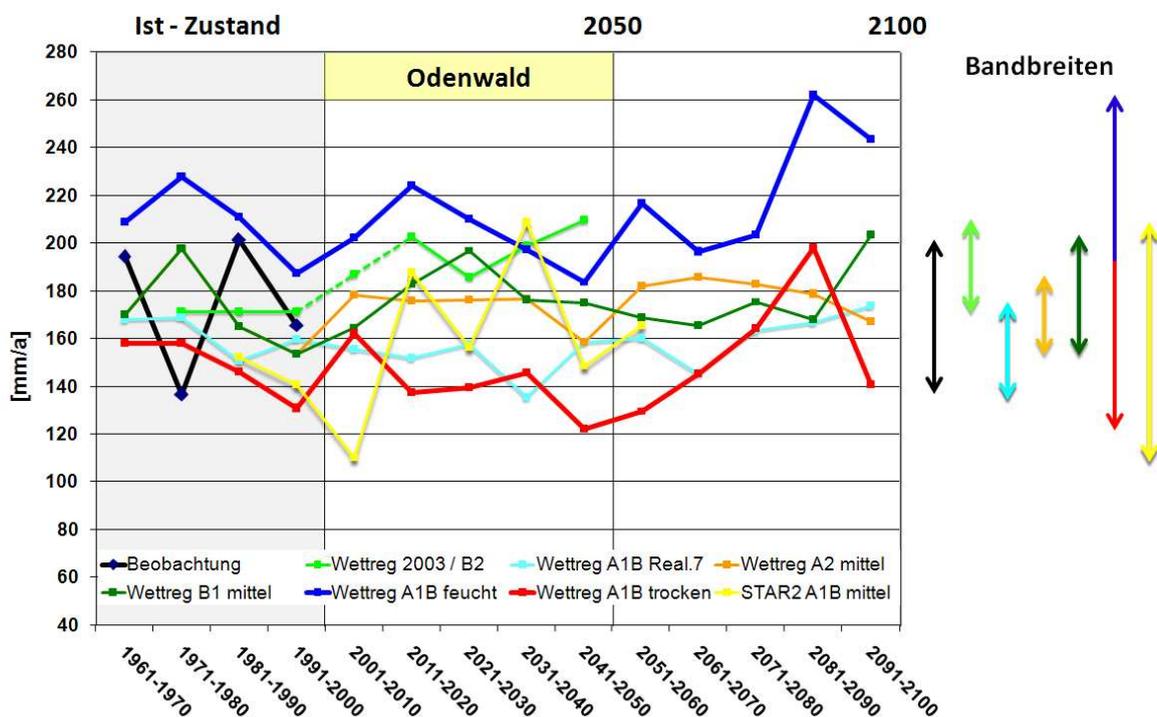


Abb. 38: Dekadenmittelwerte und Trendlinien der Grundwasserneubildung für den Odenwald.

Die auf den Beobachtungsdaten beruhenden Ergebnisse zeigen eine deutliche dekadische Variabilität. Die ersten Szenarien-Ergebnisse von 2005 (SRES-Emissionsszenario B2, GCM-ECHAM4, RCM-WETTREG-2003) zeigten zunächst einen deutlichen Anstieg der Grundwasserneubildung bis zum Jahr 2050. Die aktuellen Ergebnisse, die auf dem GCM ECHAM5 und dem RCM WETTREG-2006 basieren, geben diesen Trend dagegen nicht wieder. Für das A1B-Szenario ist bis 2050 sogar eher ein rückläufiger Trend für die Grundwasserneubildung zu beobachten. Für das **A1B-Szenario** wurde die **Realisation 7** und nicht das Mittel aus den 10 verfügbaren Realisationen ausgewertet, da dieser Einzellauf sich durch die stärkste Variabilität und größte Amplitude für das A1B-Szenario auszeichnet. Die Ergebnisse für die gemittelten Läufe der SRES-Emissionsszenarien A2 und B1 liegen zwischen den beiden erst genannten Szenarien-Ergebnissen und im Fall der landesweiten Mittelwerte (Abb. 36) innerhalb des Wertebereiches der Beobachtungsdaten. Die dekadische Variabilität bzw. Amplitude der Beobachtungsdaten wird für alle drei Bezugsräume von keinem einzelnen WETTREG-Lauf erreicht. Um Aussagen über die Variabilität und den Schwankungsbereich der transienten WETTREG-Klimaprojektionen treffen zu können, müssten streng genommen alle 10 Realisationen eines Szenarios betrachtet werden, was allerdings aufgrund der langen Rechenzeiten und großen Datenmengen nicht praktikabel erscheint. CEC Potsdam GmbH hat daher für die WETTREG-basierten Klimaprojektionen neben den 10 Einzelläufen sogenannte Feucht- und Trockenläufe zur Verfügung gestellt. Die in den Abb. 36, Abb. 37 und Abb. 38 für das A1B-Szenario dargestellten Feucht- und Trockenläufe approximieren die Bandbreite der 10 einzelnen WETTREG-Realisationen. Die so angenäherte Bandbreite für das A1B-Szenario entspricht bis 2050 in etwa der Bandbreite der Beobachtungsdaten. Der Beobachtungszeitraum 1961-2000 wird für das Hessische Ried durch die Trocken- und Feuchtläufe am schlechtesten reproduziert.

Für das SRES-Emissionsszenario A1B wurden zusätzlich Klimaprojektionen des statistischen Regionalmodells STAR2 für die Ermittlung der Grundwasserneubildung verwendet (Abb. 36, Abb. 37 und Abb. 38). Im Gegensatz zu den WETTREG-Ergebnissen wird die Schwankungsbreite der Beobachtungsdaten durch die STAR2-Ergebnisse deutlich überschritten. Allerdings erscheinen die Ergebnisse nicht plausibel. So fallen die Niederschlagshöhen für den Zeitraum 1981-2000 viel zu niedrig aus, obwohl der für diesen Zeitraum für das Regionalisierungsverfahren vorgegebene Temperaturtrend auf Beobachtungsdaten beruht. Die Ursache hierfür liegt vermutlich an der geringen Korrelation zwischen den Klimagrößen Temperatur und Niederschlag.

Zusammenfassend kann auf der Grundlage der bisher betrachteten Klimaprojektionen festgehalten werden, dass in den beiden kleinräumigen Projektgebieten Südhessens die dekadische Variabilität und die Bandbreiten der Modellergebnisse erwartungsgemäß größer als bei den landesweiten Ergebnissen sind.

Bis zum Jahr 2050 ist kein eindeutiger Trend für die Grundwasserneubildung erkennbar. Die landesweiten Ergebnisse bewegen sich innerhalb der Schwankungsbreite der auf den Beobachtungsdaten beruhenden Ergebnisse.

In der zweiten Hälfte des Projektionszeitraums deutet sich auf Landesebene und für den Odenwald ein zunehmender Trend für die Grundwasserneubildung ab, während für das Hessische Ried kein Trend erkennbar ist.

Neben den dekadischen Absolutwerten sind die Klimaänderungssignale der Grundwasserneubildung als relative Abweichung der dreißigjährigen Mittelungszeiträume 2021-2050 (nahe Zukunft) und 2071-2100 (ferne Zukunft) gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 in Tabelle 14 aufgeführt.

Klimaperiode	2021-2050 vs. 1971-2000			2071-2100 vs. 1971-2000		
	Änderung in %			Änderung in %		
Klimamodell	Hessen	Ried	Odenwald	Hessen	Ried	Odenwald
WETTREG-2003, B2	+24.2	+28.2	+15.6	k.A.	k.A.	k.A.
WETTREG-2006, A1B, Real.7	-4.4	-25.1	-5.7	+6.0	-10.4	+5.2
WETTREG-2006, A2, mittel	+4.3	-3.8	-1.0	+9.7	-0.3	+2.3
WETTREG-2006, B1, mittel	+7.8	+11.0	+6.1	+11.3	+9.5	+5.9
WETTREG-2006, A1B, feucht	+15.6	+18.9	+11.4	+38.6	+51.7	+33.6
WETTREG-2006, A1B, trocken	-24.7	-33.4	-23.3	-3.3	-10.4	-5.2
STAR2, A1B, mittel	+31.5	+19.7	+16.9	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 14: Klimaänderungssignale der Grundwasserneubildung

Zusätzlich ist in Abb. 39 und Abb. 40 die flächendifferenzierte Änderung der Grundwasserneubildung für die beiden dreißigjährigen Zukunftszeiträume dargestellt.

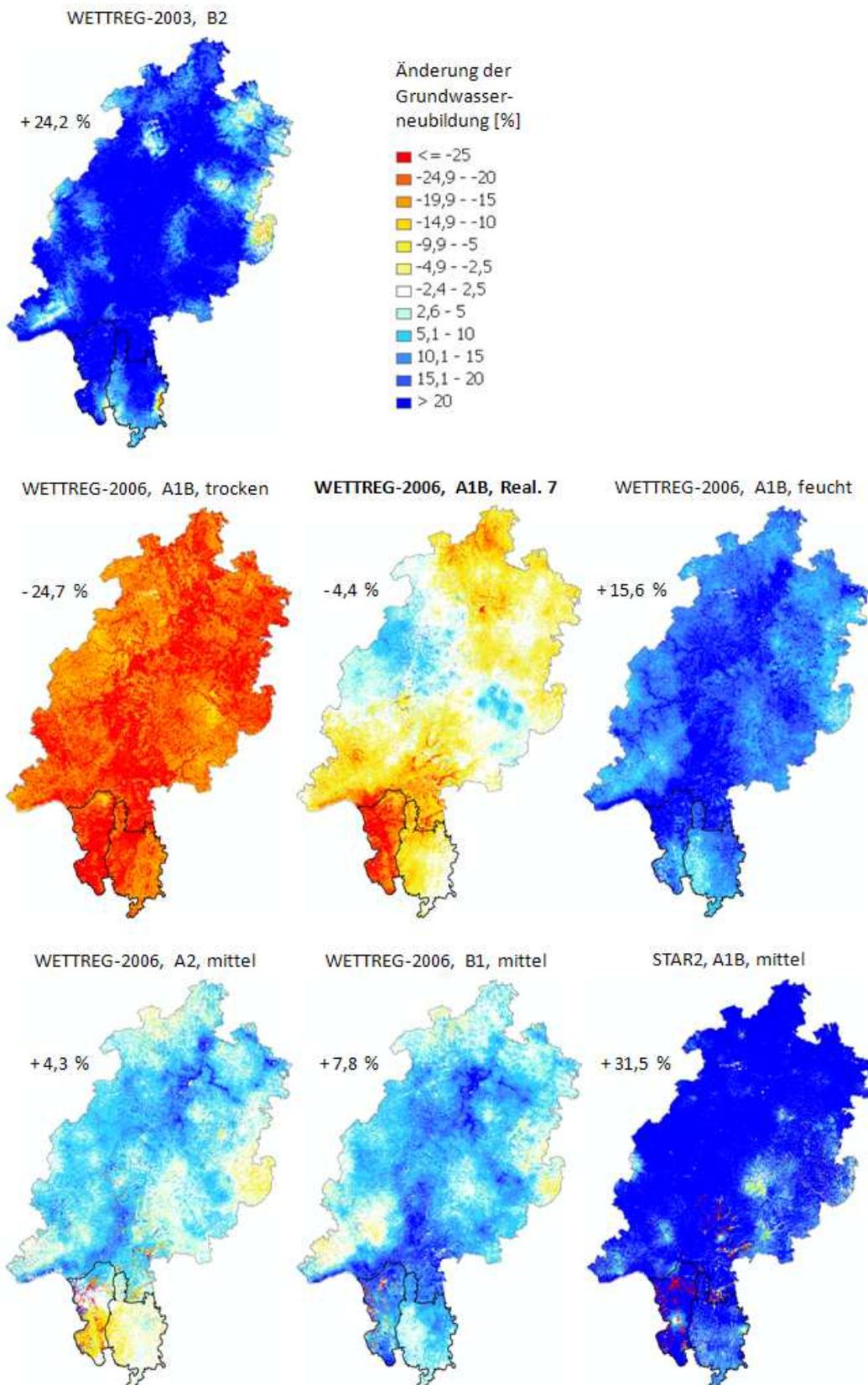


Abb. 39: Flächendifferenzierte Änderung der Grundwasserneubildung in der nahen Zukunft (2021-2050 gegenüber Bezugszeitraum 1971-2000)

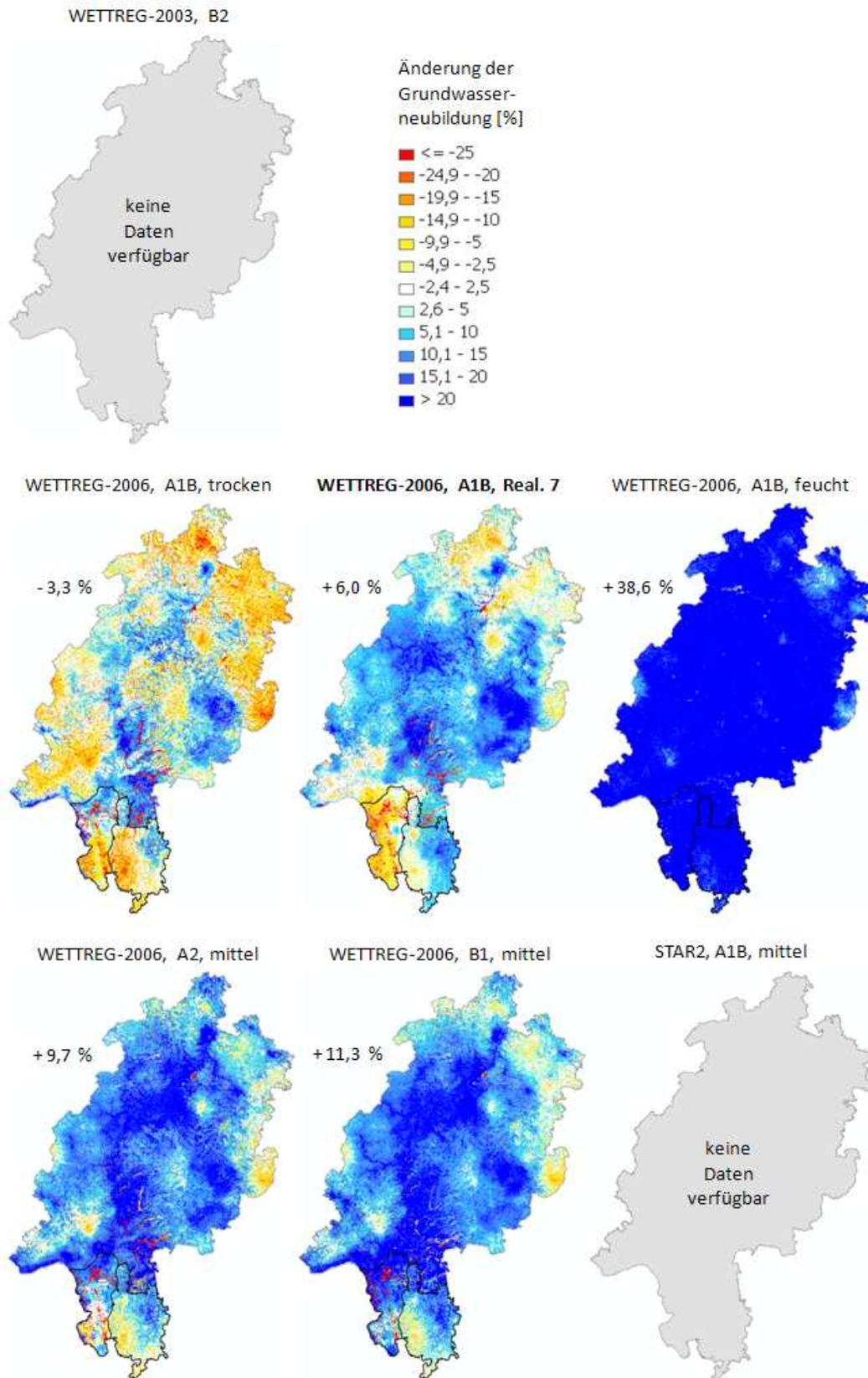


Abb. 40: Flächendifferenzierte Änderung der Grundwasserneubildung in der fernen Zukunft (2071-2100 gegenüber Bezugszeitraum 1971-2000)

Die Änderungssignale unterliegen einer deutlichen räumlichen Variabilität. Daher sind Landesweite Mittelwerte auch nur begrenzt aussagekräftig. In den Flächendarstellungen ist die Sonderstellung des Hessischen Rieds durch geringere Zunahmen bzw. höhere Abnahmen der Grundwasserneubildung gegenüber den anderen Landesteilen besonders gut erkennbar. Am deutlichsten ist dieser gegensätzliche Entwicklungstrend bei den Projektionsdaten „WETTREG-2006, A1B, Realisierung 7“ und den Projektionszeitraum 2071-2100 (Abb. 40). Während das Flächenmittel für Hessen um 6 % zunimmt, nimmt die Grundwasserneubildung im Hessischen Ried um mehr als 10 % ab.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Die hier vorgestellten Modellergebnisse sind mit großen Unsicherheiten behaftet und das hier dargestellte „Mini-Ensemble“ stellt nur einen Bruchteil der möglichen unterschiedlichen Modellketten-Varianten (SRES-Emissionsszenario → GCM → RCM → Hydrologisches Wirkmodell) dar. Schon für das hier beschriebene kleine Modell-Ensemble erhält man große Ergebnisbandbreiten. Die vorgestellten unterschiedlichen Ergebnisse der Grundwasserneubildung zeigen die Schwierigkeit auf, konkrete und quantifizierbare Anpassungsmaßnahmen auf der Grundlage regionaler Klimaprojektionen zu formulieren. Da nicht bekannt ist, welche Modellketten-Variante die zukünftige Entwicklung am genauesten beschreibt, ist die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen auf der Grundlage einer einzigen Modellketten-Variante problematisch. Folgt man dem Rat der Klimamodellentwickler und praktiziert den sehr zeit- und rechenintensiven Multimodellansatz (Abb. 41), erhält man Ergebnisbandbreiten, für die ein ganzes Spektrum unterschiedlicher, unter Umständen sogar gegensätzlicher Anpassungsmaßnahmen erforderlich wären.

Die erforderliche Anzahl an Ensemble-Mitgliedern bzw. Modellvarianten, um statistisch abgesicherte Trends ableiten zu können, erscheinen zum gegenwärtigen Zeitpunkt für die hydrologische Impact-Modellierung auf Grund der hierzu benötigten Rechenkapazitäten und des erforderlichen Zeitaufwandes nicht praktikabel. Anpassungsstrategien sollten daher zum gegenwärtigen Zeitpunkt möglichst flexibel gestaltet werden („flexible and no regret strategies“). Durch den kontinuierlichen Erkenntniszuwachs und die Weiterentwicklung der Klimamodelle müssen die Anpassungsstrategien sukzessive nachjustiert und an den aktuellen Kenntnisstand angepasst werden.

Multimodellansatz

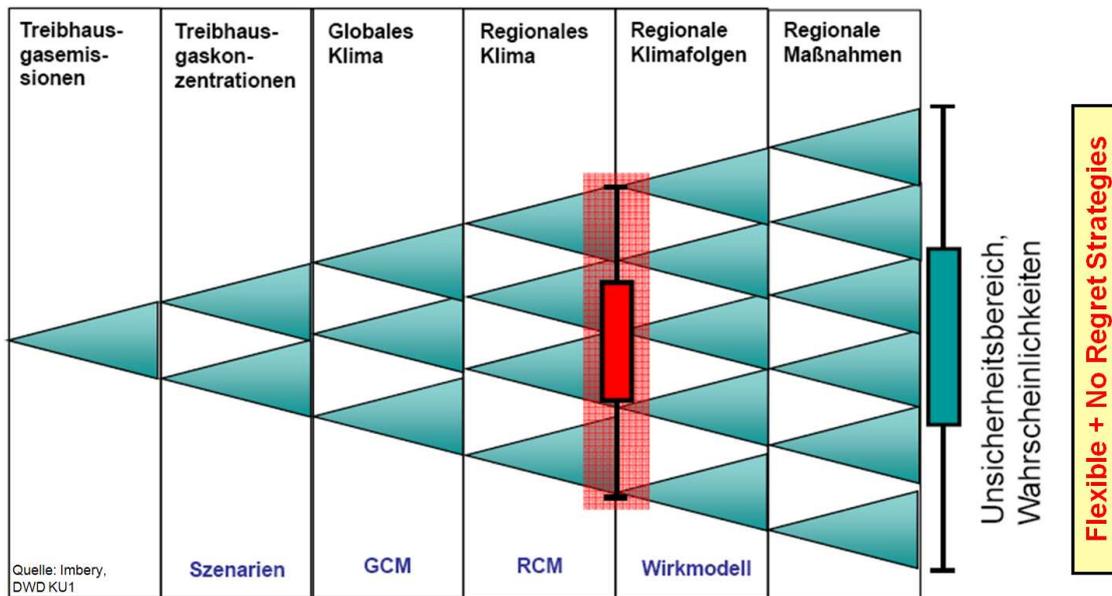


Abb. 41: Unsicherheitsbereich beim Multimodellansatz

6 Entwicklung der Quellschüttung im Odenwald

6.1 Zusammenhangsanalyse zwischen Klimaparametern und Quellschüttungen

6.1.1 Klimatische Entwicklungen „Klimastation Beerfelden/Odenwald“

In der Abb. 42 wird der prognostizierte Lufttemperaturverlauf für die Station Beerfelden dargestellt.

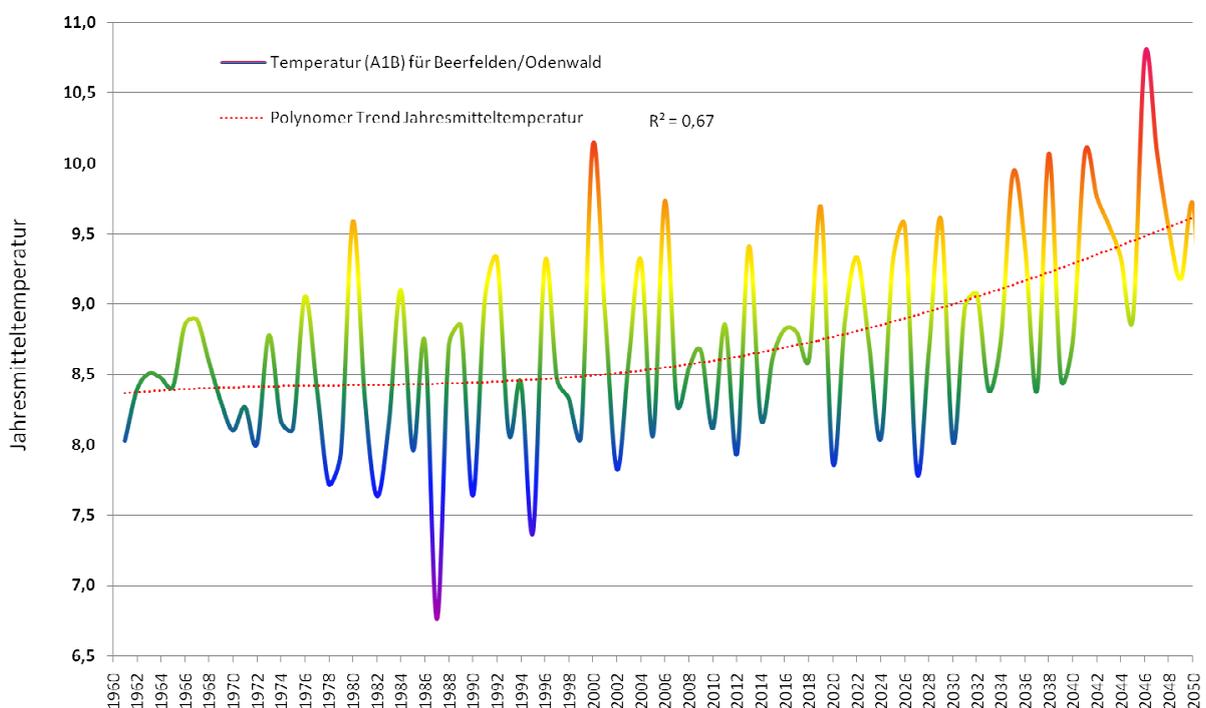


Abb. 42: Prognostizierter Lufttemperaturverlauf für Beerfelden (A1B-Szenario; WETTREG)

Die mit dem regionalen Klimamodell WETTREG-T (A1B-Szenario, Realisation 7) prognostizierte Erhöhung der Lufttemperatur zeigt einen Anstieg um rund 1 °C für den Zeitraum 1960 bis 2050. Der Hauptteil der Temperaturerhöhung findet nach dieser Simulation vor allem in dem Zeitraum 2000 bis 2050 statt.

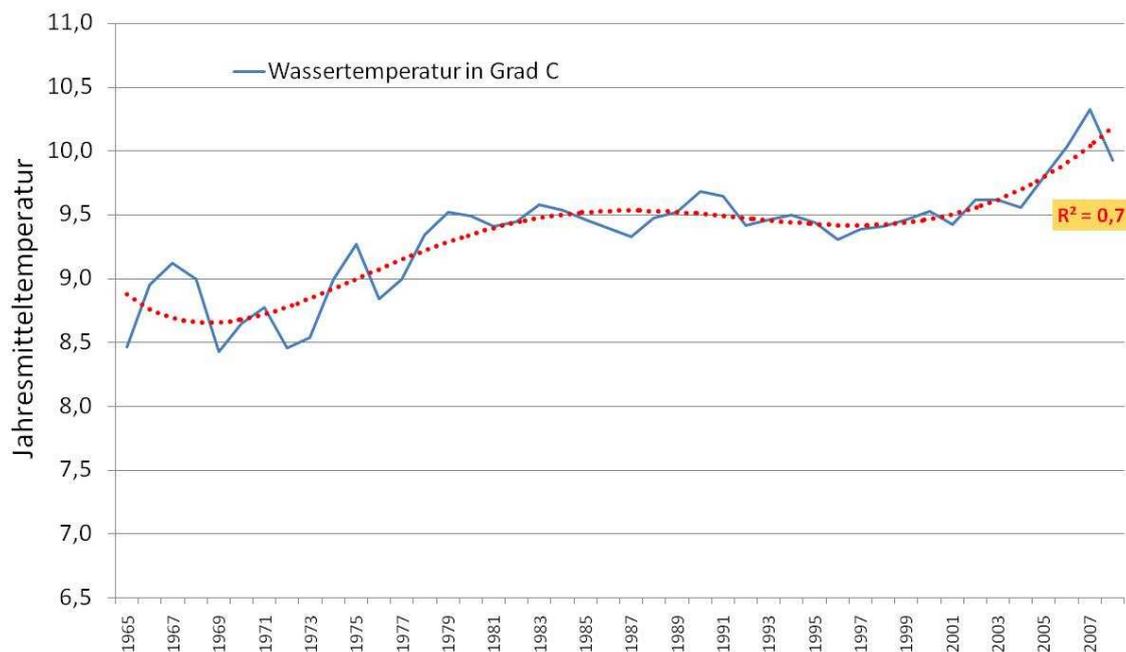


Abb. 43: Gemessener Temperaturverlauf der ausgewählten Quellwässer im Odenwald

Die mittlere Grundwassertemperatur der beobachteten Quellen entspricht in etwa der mittleren Jahrestemperatur, die wiederum stark von der Geländehöhe abhängig ist. Somit können die Quellwassertemperaturen als Indikator für eine Veränderung der regionalen klimatischen Verhältnisse gewertet werden.

Die in der Abb. 43 dargestellten Quellwassertemperaturen für den Zeitraum 1964 bis 2008 zeigen einen eindeutig steigenden Trendverlauf. Die Quellwassertemperaturen (Mittelwerte der ausgewählten Quellen) liegen zu Beginn auf gleichem Niveau (ca. 8,5 Grad C) wie die prognostizierten Lufttemperaturen bei WETTREG (s. Abb. 42).

Die mittlere Grundwassertemperatur der beobachteten Quellen entspricht in etwa der mittleren Jahrestemperatur, die wiederum stark von der Geländehöhe abhängig ist.

Die gemessenen Wassertemperaturen zeigen jedoch bereits einen Temperaturanstieg auf rund 10 °C im Zeitraum von 1964 bis 2008 an, während der Anstieg bei den prognostizierten WETTREG-Temperaturen erst bis zum Jahr 2050 zu erwarten gewesen wäre. Dies bedeutet, dass im Bereich Odenwald bereits heute ein klimatischer Wandel hin zu höheren durchschnittlichen Temperaturen stattgefunden hat.

6.1.2 Niederschlag und Verdunstung

Die Klimaparameter Niederschlag und Verdunstung sind die elementaren Größen, die den Wasserhaushalt einer Region, neben den Gebietseigenschaften wie Relief, Bodenbeschaffenheit und Landnutzung, bestimmen.

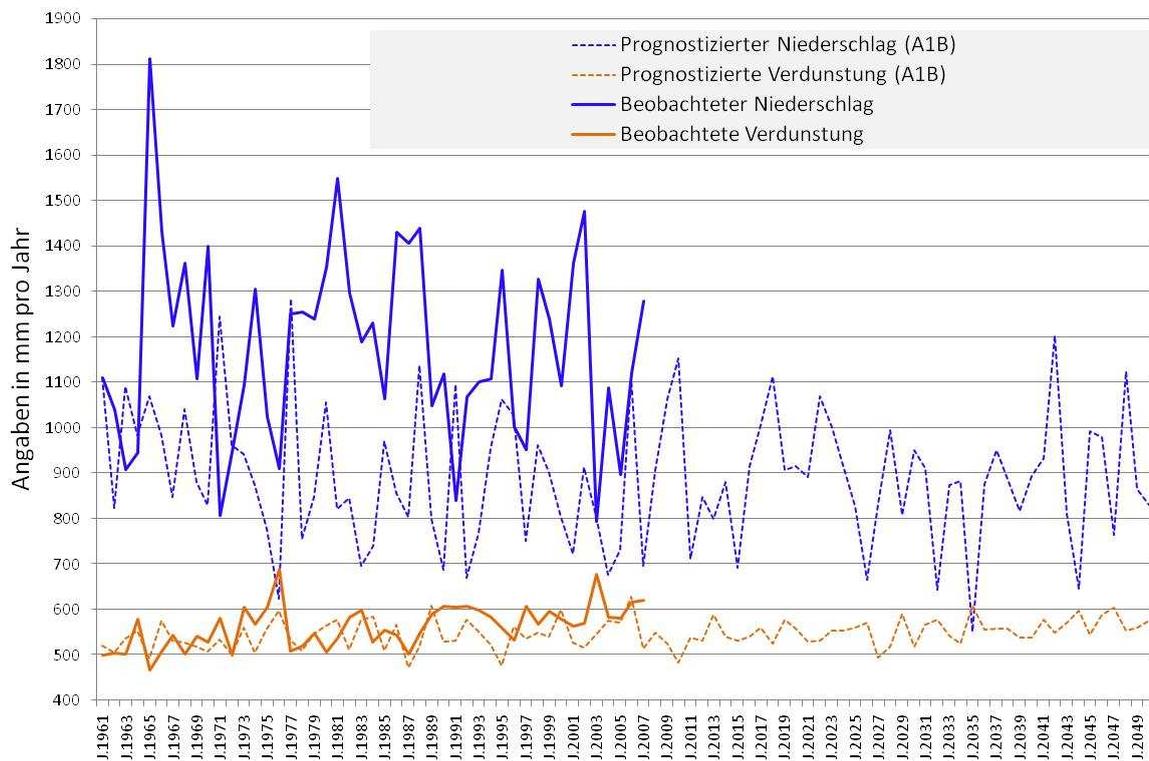


Abb. 44: Beobachteter Niederschlag und Verdunstung sowie prognostizierter Niederschlag und Verdunstung durch WETTREG (A1B)

Die in Abb. 44 aufgezeigten Gegenüberstellungen von gemessenen und prognostizierten Klimaparametern machen die derzeit noch bestehenden Unsicherheiten der Klimamodelle deutlich. Die Variabilität der beobachteten Niederschläge an der Klimastation Beerfelden findet keine direkte Entsprechung in den prognostizierten Niederschlägen. Auch die absoluten Niederschlagsmengen pro Jahr sind gegenüber den prognostizierten Niederschlagsmengen leicht erhöht. Die gewählte Realisation aus WETTREG spiegelt in etwa mittlere Verhältnisse, bezogen auf alle WETTREG-Realisationen, wider. Hinsichtlich der beobachteten und prognostizierten Verdunstung wird eine gute Übereinstimmung erhalten.

6.1.3 Multiple Regressionen zur Beschreibung der Quellschüttungen aus Klimaparametern

Da die einzelnen Quellschüttungen ausgeprägte Jahrgänge zeigen, muss ein Zusammenhang zwischen der Witterung und der Ausprägung der Quellschüttungen bestehen. Um diesen zu analysieren, wurde im ersten Schritt die klimatische Wasserbilanz als resultierende Größe aus Niederschlag und Verdunstung berechnet.

Anschließend wurden für alle Witterungsparameter (Niederschlag, potentielle Verdunstung und klimatische Wasserbilanz) Summenbildungen dergestalt durchgeführt, dass jeweils die Summen der zum jeweiligen Schüttungsdatum vorhergehenden 10, 30, 90, 182, 364 und 728 Tage gebildet wurden. Diese Zeitabschnitte wurden gewählt, da für die Region Odenwald mittlere Verweilzeiten von einem Vierteljahr bis zwei Jahren berechnet wurden.

Die gewählte Vorgehensweise zur Prognose der Quellschüttung wird nachfolgend kurz skizziert:

- Plausibilisierung der Schüttungsmengen, Vollständigkeitsprüfung,
- Analyse der Klimaparameter Niederschlag, potentielle Verdunstung und Wasserbilanz,
- Verknüpfung der Schüttungsmessungen je Quelle mit aufsummierten Wasserbilanzsummen (10, 30, 90, 182, 364 und 727 Tage vor der jeweiligen Schüttungsmessung anhand multipler Regressionen,
- Beschreibung der Schüttungsmengen pro Quelle mit der Regressionsgleichung und deren Prüfung auf Tauglichkeit,
- Prognose der zukünftigen Quellschüttungen anhand multipler Gleichungssysteme unter der Verwendung der Klimaparameter aus dem A1B-Szeanario (WETTREG).

Bei der statistischen Analyse zeigte sich, dass ausnahmslos die klimatischen Wasserbilanzen einen signifikanten Zusammenhang zu den jeweiligen Quellschüttungen aufweisen. Mit Hilfe von multiplen Regressionen wurde für jede Quelle diejenige Funktionsgleichung bestimmt, die das höchste Bestimmtheitsmaß aufwies. Die erzielten Bestimmtheitsmaße (r^2) bewegen sich von 0,6 bis 0,8. Dies bedeutet, dass die Quellschüttung mit Hilfe der Gleichungssysteme mit 60 bis 80 %iger Wahrscheinlichkeit erklärt werden kann.

Beispiele:

Multiple Regression

X-Variable: WB10Tage
 WB30Tage
 WB90Tage
 WB182Tage
 WB364Tage
 WB728Tage

ID 13386;
Quelle Kirch-Brombach
Buntsandstein Odenwald

Y-Variable: Schüttung_m3_Tag
Y-Gewichtungen: WB364Tage

Methode: Schrittweise

Schritte	P	R-Quadrat	korrigiert
WB10Tage(+)	0,00	-1,00	0,00
WB30Tage(+)	0,00	-1,00	0,00
WB10Tage(-)	0,24	-1,00	0,00
WB90Tage(+)	0,00	0,04	0,04
WB182Tage(+)	0,00	0,54	0,54
WB90Tage(-)	0,80	0,54	0,54
WB364Tage(+)	0,00	0,70	0,70
WB728Tage(+)	0,00	0,71	0,71
WB90Tage(+)	0,00	0,71	0,71
WB30Tage(-)	0,52	0,71	0,71

Zusammenfassung

	N	R	R-Quadrat	Std.Fehler
normal	2348,00	0,85	0,71	46,29
korrigiert		0,85	0,71	

Gleichung

	Koeffizient	95%		T	P
		Vertrauen (±)	Std.Fehler		
Konstante	0,000	----	----	----	----
WB90Tage	0,078	0,02	0,01	9,00	0,00
WB182Tage	0,138	0,01	0,01	20,96	0,00
WB364Tage	0,059	0,01	0,01	8,42	0,00
WB728Tage	0,027	0,01	0,00	7,73	0,00

Abb. 45: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Quelle Kirch-Brombach

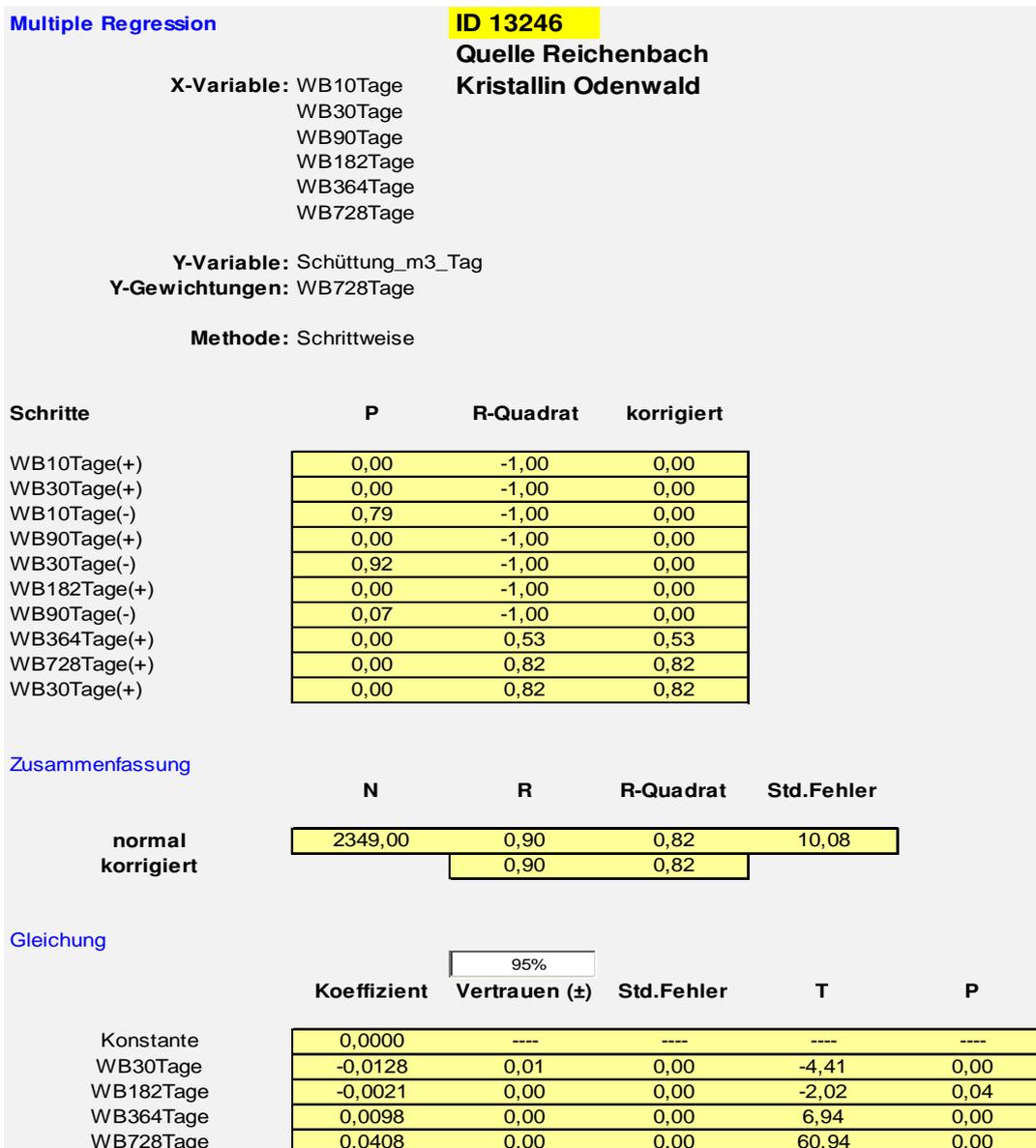


Abb. 46: Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Quelle Reichenbach

Aus den beiden vorstehenden Beispielen geht hervor, dass für jede Quelle eine individuelle Gleichung abgeleitet wird, die nur für diese Quelle eine Gültigkeit besitzt. Welche der einzelnen Wasserbilanzsummen mit welchem Faktor in das multiple Gleichungssystem eingehen, wird alleine durch die Güte der Anpassung an die Zielgröße „Quellschüttung“ bestimmt.

Die Güte der mit Hilfe der Gleichungssysteme berechneten Quellschüttungen wird durch die Gegenüberstellung von gemessenen und prognostizierten Quellschüttungen ersichtlich.

In Abb. 47 und Abb. 48 werden beispielhaft für die Quellen Kirch-Brombach sowie Reichenbach die gemessenen und prognostizierten Schüttmengen gegenübergestellt.

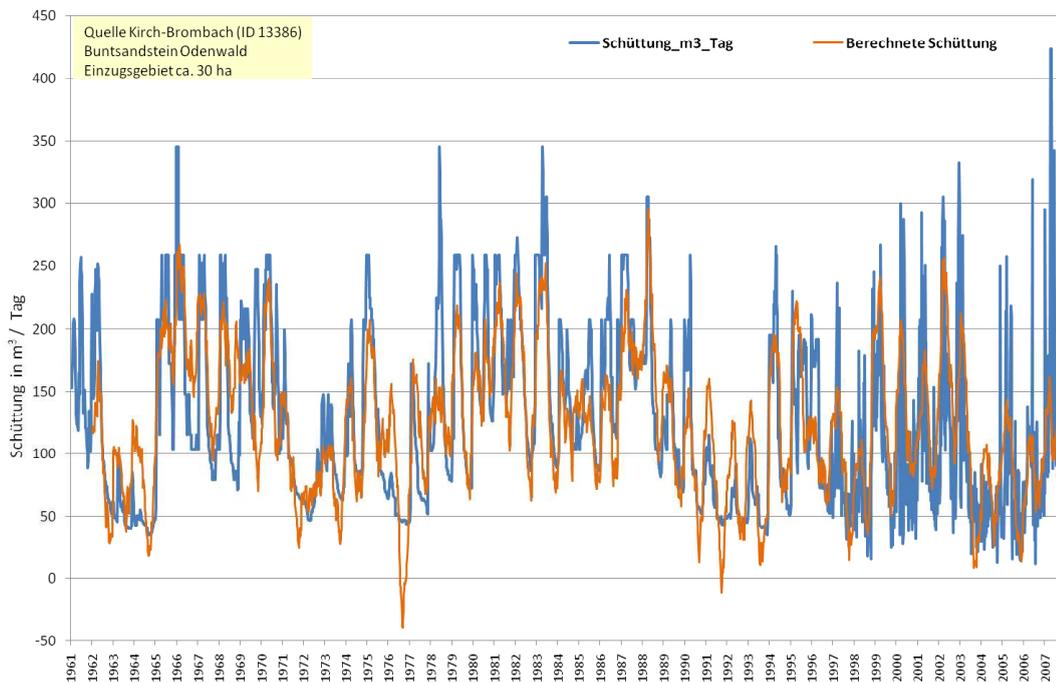


Abb. 47: Gegenüberstellung von gemessenen und prognostizierten Schüttmengen für den Zeitraum 1961 bis 2008 am Beispiel der Quelle Kirch-Brombach.

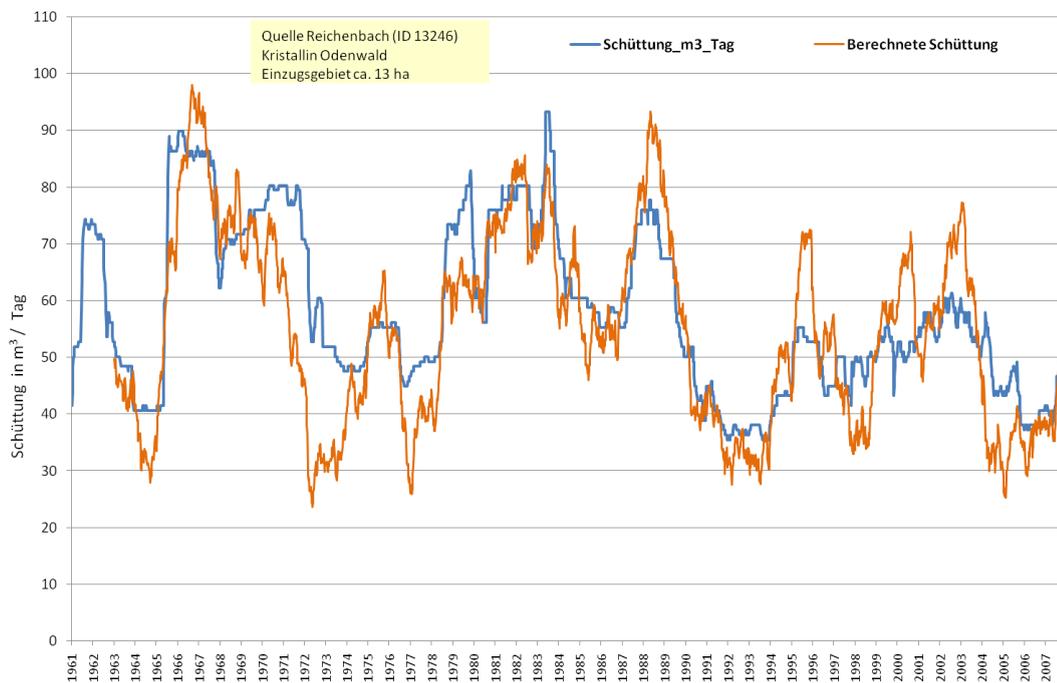


Abb. 48: Gegenüberstellung von gemessenen und prognostizierten Schüttmengen für den Zeitraum 1961 bis 2008 am Beispiel der Quelle Reichenbach.

Die multiplen Regressionsgleichungen beschreiben die individuellen Ausprägungen der Quellschüttungen recht gut. Die in Abb. 47 und Abb. 48 dargestellten Gegenüberstellungen von gemessenen und berechneten Quellschüttungen zeigen eine befriedigende Anpassung der berechneten Werte an die gemessenen Werte. Die Dynamik der Jahresverläufe wird in ausreichendem Maße wiedergegeben. Allerdings sind die aus den Wasserbilanzsummen abgeleiteten Schüttungskurven nicht in der Lage die gemessenen Spitzenschüttungen abzubilden. Besonders hohe und zeitlich eng begrenzte Quellschüttungen werden maßgeblich durch die Eigenschaften des Einzugsgebietes bestimmt (Größe, Relief, Landnutzung, u. a.). Gleichfalls ist festzustellen, dass die prognostizierten Quellschüttungen in der Regel die gemessenen Minimalwerte leicht unterschreiten. Dieses Verhalten resultiert aus der Tatsache, dass jedes Quelleinzugsgebiet über einen Wasserspeicher verfügt, der auch in Zeiten mit hoher negativer Wasserbilanz für eine Speisung der Quelle sorgt. Diese Pufferwirkung wird durch die Regressionsgleichungen nicht beschrieben. Dies hat allerdings den Vorteil, dass eventuelle zukünftige Perioden mit niedrigen Schüttmengen gut sichtbar werden.

6.1.4 Prognosen der Quellschüttungen durch multiple Gleichungssysteme

Die einzelnen Quellschüttungen bzw. Quellschüttungsverläufe werden mit Hilfe der Regressionsgleichungen ausreichend gut beschrieben. Dies ermöglicht es, unter Verwendung von prognostizierten Klimadaten aus den Modellrechnungen (WETTREG), aus diesen die zukünftige Entwicklung der Quellschüttungen abzuschätzen.

Aus den WETTREG-Klimadaten Niederschlag (korrigiert) und potentielle Verdunstung auf Tageswertbasis wurde die klimatischen Wasserbilanz errechnet. Die klimatischen Wasserbilanzen wurden der gleichen Routine hinsichtlich der Summenbildung (10, 30, 90, 182, 364 und 728 Tage) unterzogen. Die Wasserbilanzsummen wurden anschließend in das jeweilige Gleichungssystem für eine Quelle eingesetzt und berechnet.

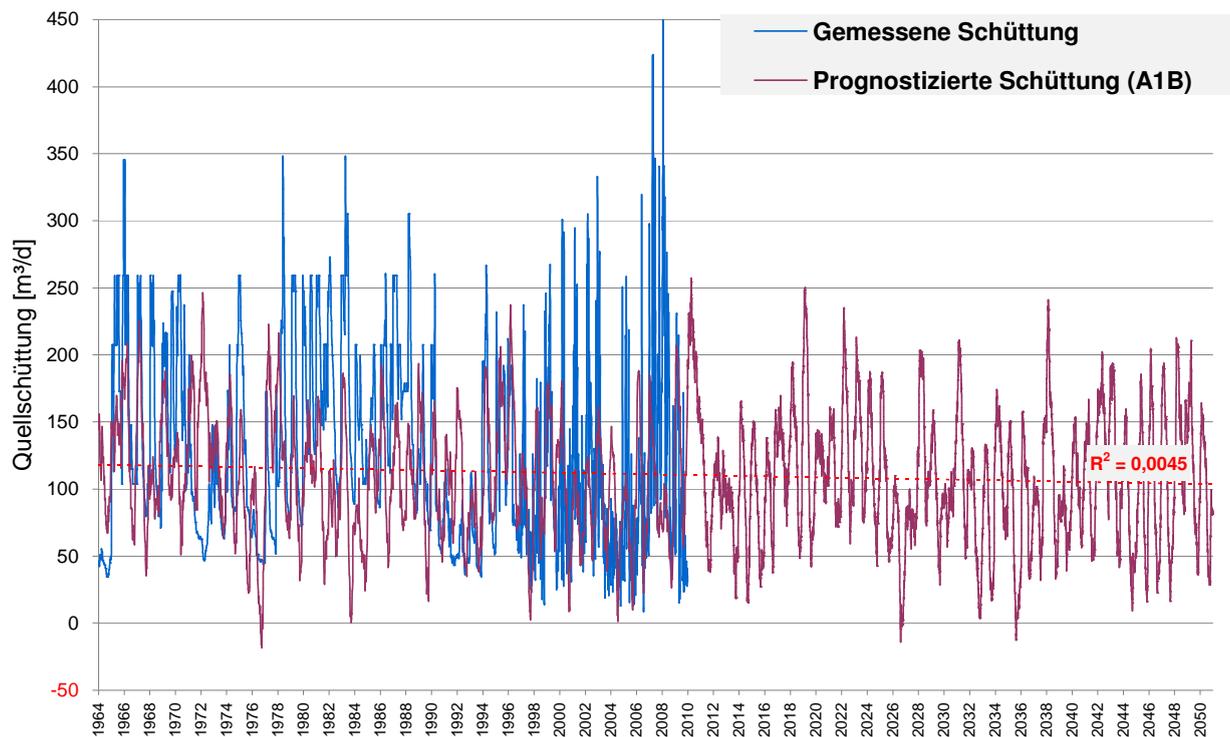


Abb. 49: Prognostizierte Schüttungen für die Quelle Kirch-Brombach (A1B-Szenario, WETTREG)

Die mögliche Entwicklung der Quellschüttungen für die Quelle Kirch-Brombach ist in Abb. 49 visualisiert. Die Amplituden der Quellschüttungen für die kommenden Jahrzehnte entsprechen denen der mit den WETTREG-Datensätzen berechneten vergangenen Dekaden. Die Trendanalyse ergab keine signifikante Entwicklung hin zu niedrigeren Quellschüttungen.

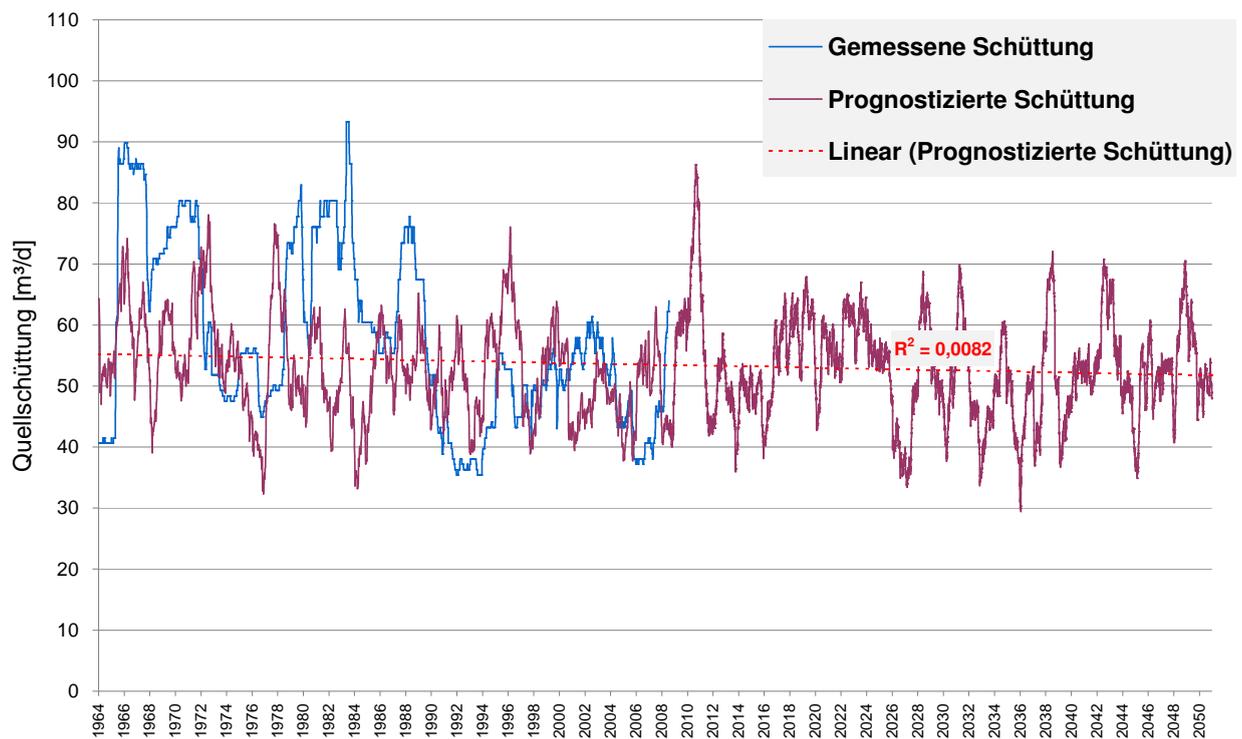


Abb. 50: Prognostizierte Schüttungen für die Quelle Reichenbach (A1B-Szenario, WETTREG)

Die Abb. 50 zeigt die Abschätzung der Quellschüttungen für die Quelle Reichenbach. Analog zur Quelle Kirch-Brombach sind die Ausprägungen der Quellschüttungen bis 2050 denen der vergangenen Jahrzehnte sehr ähnlich. Eine absicherbare Entwicklung hin zu niedrigeren Quellschüttungen wird allerdings nicht erhalten.

Auch bei den nicht dargestellten 4 Quellen konnten keine Entwicklungstendenzen bezüglich ihrer Quellschüttungen festgestellt werden.

6.1.5 Extremwertanalysen

Bei der Entwicklung der Quellschüttungen ist von besonderem Interesse, ob sich zukünftig häufiger geringere Quellschüttungen einstellen. Um dies zu testen, wurden die Schüttmengen eines jeden Jahres (Berechnung erfolgte in Tagesschritten) auf ihre Perzentile hin untersucht.

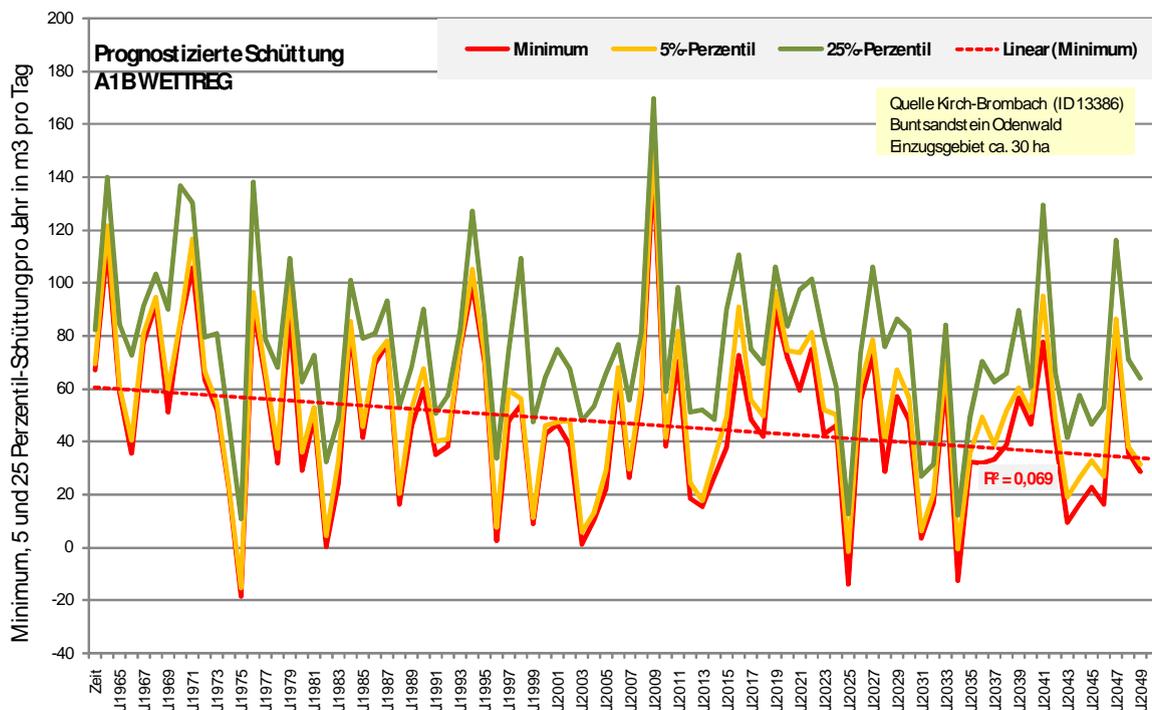


Abb. 51: Minimum, 5- und 25- Perzentil der Schüttungen pro Jahr für die Quelle Kirch-Brombach (Datengrundlage A1B-Szenario, WETTREG).

Die prognostizierten Quellschüttungen der Quelle Kirch-Brombach, die in Tagesschritten berechnet wurden, wurden den einzelnen Jahren zugeordnet und einer Häufigkeitsanalyse unterzogen. In der Abb. 51 sind die Minima, die 5- und 25-Perzentile eines jeden Jahres aufgezeichnet.

Durch die Perzentildarstellung wird ein anschauliches Bild erhalten, ob mit zunehmender Zeit sich eine Häufung geringer Quellschüttungen ergibt. Zwar gibt es eine gewisse Tendenz, dass die Minima mit zunehmender Zeit geringere Werte annehmen, doch diese lässt sich statistisch nicht signifikant belegen.

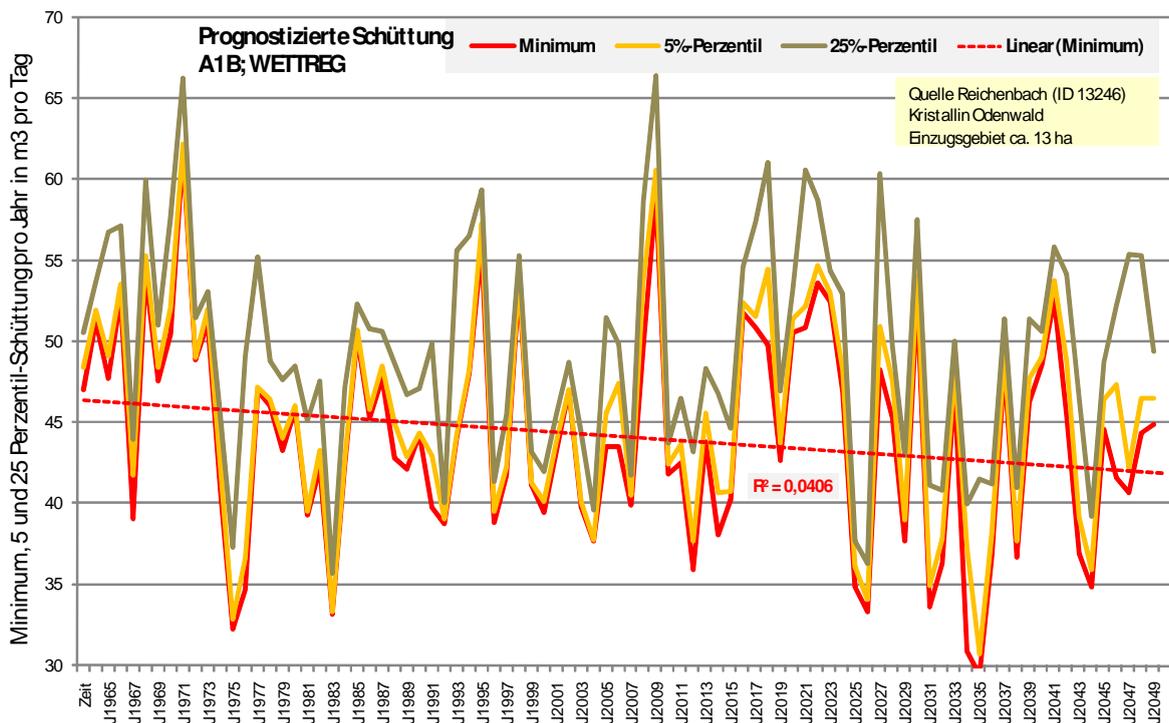


Abb. 52 Minimum, 5- und 25- Perzentil der Schüttungen pro Jahr für die Quelle Reichenbach (Datengrundlage A1B-Szenario, WETTREG).

Die Entwicklung der Minima, 5- und 25-Perzentile der prognostizierten Quellschüttungen für die Quelle Reichenbach zeigt ein ähnliches Bild wie bei der Quelle Kirch-Brombach. Eine leichte Tendenz hin zu abnehmenden Quellschüttungen ist vorhanden, jedoch nicht statistisch absicherbar.

6.1.6 Zusammenfassende Bewertungen der Ergebnisse hinsichtlich der Quellschüttungen

Mit den Wasserbilanzsummen für 10, 30, 90, 182, 364 und 728 Tage, die sich auf das Datum der jeweiligen Schüttungsmessung beziehen, lassen sich mit Hilfe multipler Regressionen Gleichungssysteme zur Modellierung der Quellschüttungen aufstellen.

Für jede Quelle wird eine individuelle Gleichung erhalten, mit deren Hilfe aus den Wasserbilanzsummen das Schüttungsverhalten abgeleitet werden kann. Die erhaltenen Bestimmtheitsmaße (r^2) variieren von 0,6 bis 0,8. Dies bedeutet, dass 60 bis 80 % der Varianz der abhängigen Variablen durch die Gleichung beschrieben werden kann.

Da nur Klimaparameter in die Gleichungssysteme eingehen, werden Schüttungsspitzen der Quellen nicht ausreichend erkannt. Hier sind die Gegebenheiten der Einzugsgebiete prägend, die z. B. einen schnellen grundwasserbürtigen Abfluss und damit hohe Quellschüttungen verursachen können.

Zur Prognose der möglichen Entwicklung von Quellschüttungen im Odenwald wurden Daten aus dem WETTREG-Regionalmodell (Realisation 7) für die Klimastation Beerfelden/Odenwald herangezogen. Die Realisation 7 zeichnet sich durch ein mittleres Verhalten hinsichtlich der Niederschlagsentwicklung sowie, im Gegensatz zu den anderen WETTREG-Realisationen, durch eine höhere Variabilität des Niederschlagsgeschehens aus.

Die prognostizierten Niederschlagsdaten aus WETTREG weisen jedoch nicht die Variabilität der gemessenen Niederschläge aus. Auch die prognostizierten absoluten Jahresniederschläge liegen leicht unter dem Niveau der gemessenen. Insoweit führt die Verwendung der prognostizierten Niederschlagsdaten zu einer verschärften Darstellung möglicher zukünftiger Situationen, da ja für die Quellen weniger Niederschläge zur Verfügung stehen würden.

Die Analyse der prognostizierten Quellschüttungen ergab bei keiner Quelle einen signifikant abnehmenden Trend, wenngleich eine leicht abnehmende Tendenz hinsichtlich der Quellschüttungen bei allen Quellen zu beobachten war.

Die vorgestellte Ableitungsmethode von Quellschüttungen aus Klimaparametern ist geeignet, um eine Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von Quellschüttungen durchzuführen. Die erhaltenen Gleichungssysteme können beispielsweise beim Vorliegen der derzeit im Test befindlichen WETTREG2010-Datensätze direkt zur Prognose benutzt werden. Gleiches gilt für Klimadatensätze aus anderen Regionalmodellen wie REMO oder CLM.

7 Trinkwasserbedarf

7.1 Ausgangssituation und Methode

In Deutschland entfällt rd. 70 % des Trinkwasserverbrauchs auf „Haushalte und Kleingewerbe“ (Abb. 53). Im Bereich der öffentlichen, gewerblichen und industriellen Einrichtungen wird Trinkwasser im Wesentlichen für Publikum bzw. Belegschaft eingesetzt. Für Brauch- und Kühlwasserzwecke wird meist Brauchwasser und Oberflächenwasser genutzt. Eigenbedarf und Verluste folgen näherungsweise dem Bedarf.

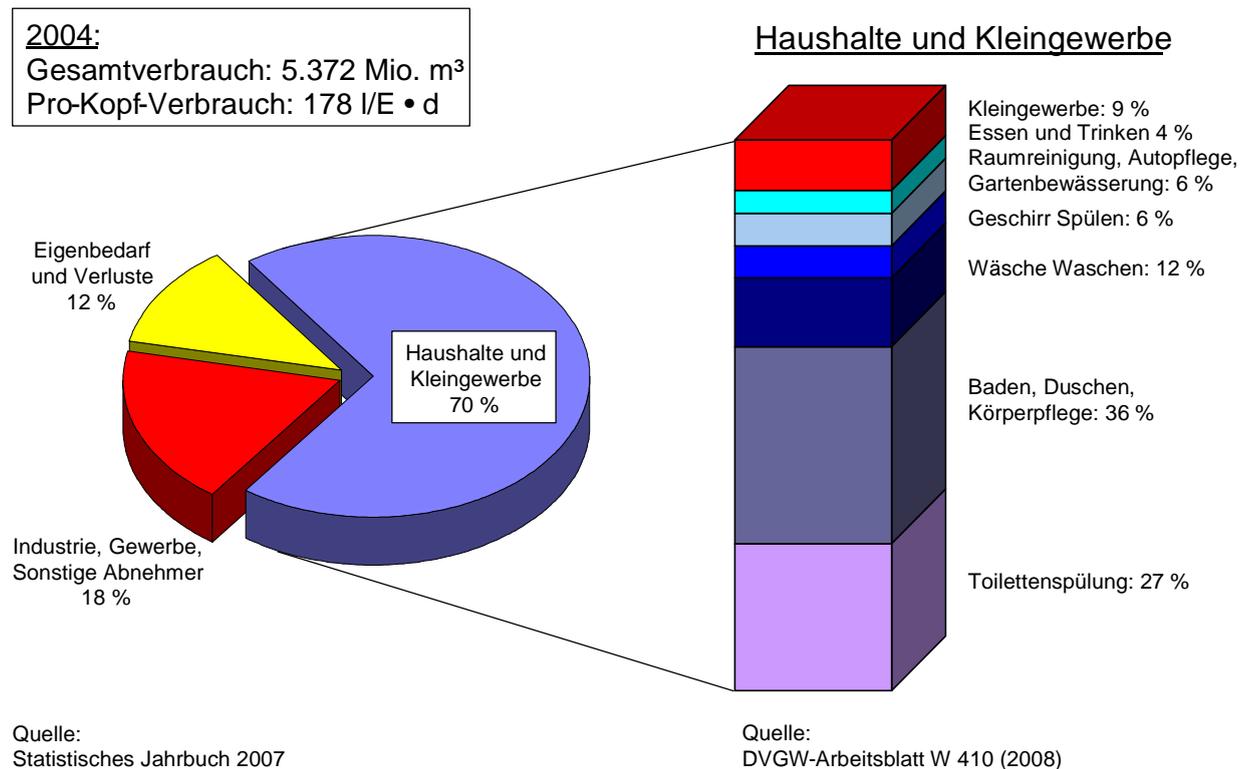


Abb. 53: Struktur des Trinkwasserverbrauchs in Deutschland, 2004

Vor diesem Hintergrund resultiert die Entwicklung des Trinkwasserbedarfs aus den Entwicklungen der versorgten Bevölkerung und des Pro-Kopf-Bedarfs (Liter pro Einwohner und Tag, Roth 1998):

Wasserbedarf = Einwohnerzahl • Pro-Kopf-Bedarf

Dabei sind die Entwicklungen in Abb. 53 dargestellten Verbrauchssektoren jeweils einzeln zu bewerten. Für Großverbraucher (z.B. den Frankfurter Flughafen) können gesonderte Prognosen erstellt werden, sofern eine entsprechende Datengrundlage vorliegt.

Die im Folgenden dargestellte Wasserbedarfsprognose für den Zeitraum bis 2100 umfasst also die drei Teile:

- Bevölkerungsprognose 2100 (Hessenwasser 2009a),
- Prognose des Pro-Kopf-Bedarfs 2100 (Hessenwasser 2009b),
- Wasserbedarfsprognose 2100 (Hessenwasser 2009c).

Da längerfristige Bevölkerungsprognosen nur für größere räumliche Einheiten vorliegen, beziehen sich die beiden ersten Teile der Prognose auf die Entwicklung in Südhessen, also den ganzen Regierungsbezirk Darmstadt. Im dritten Teil werden diese zunächst zu einer Wasserbedarfsprognose für Südhessen 2100 zusammengeführt und dann auf den Untersuchungsraum „Hessisches Ried und Odenwald“ und dessen drei Teilräume reduziert. Dabei wird im Hinblick auf die Länge des Prognosezeitraums und die damit verbundenen, unvermeidlichen Unsicherheiten eine räumlich einheitliche und zeitlich lineare Entwicklung vorausgesetzt.

Abb. 54 zeigt die Entwicklung des Wasserverbrauchs in Südhessen auf Grundlage der in der Datenbank des RP Darmstadt dokumentierten, kommunalen Verbrauchsdaten für den Zeitraum 1977 bis 2006 (vgl. Kap. 2.3.1).

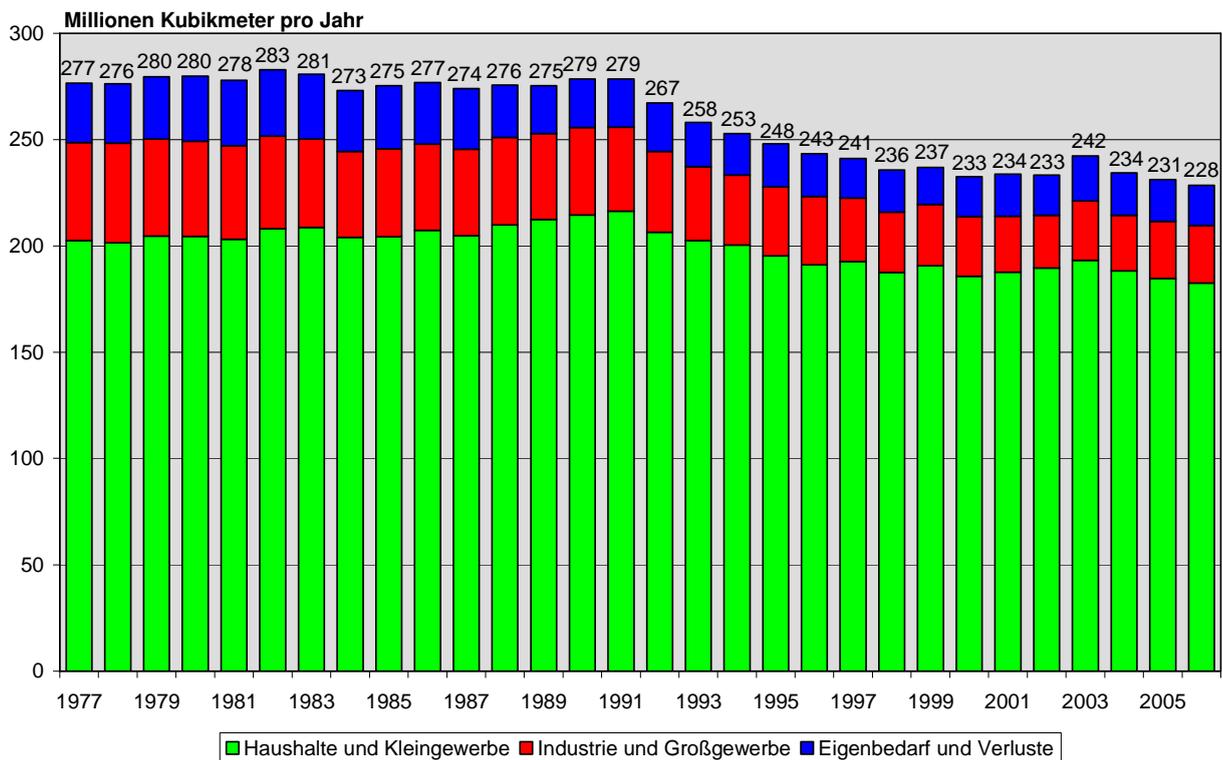


Abb. 54: Trinkwasserverbrauch in Südhessen, 1977 bis 2006

In Südhessen entfielen 2006 rund 80 % des Trinkwasserverbrauchs auf „Haushalte und Kleingewerbe“, rd. 12 % auf „Industrie und Großgewerbe“ und rd. 8 % auf „Eigenbedarf und Verluste“. Der Gesamtverbrauch ist seit 1991 um 18 % zurückgegangen. Die Verbrauchsdaten in den Trockenjahren 1990, 1991 und 2003 lagen um etwa 4 bis 5 % über dem Trend.

Die bisherige Entwicklung des Wasserverbrauchs in den drei Verbrauchssektoren war unterschiedlich und der jeweilige Verbrauchsrückgang beginnt zu verschiedenen Zeitpunkten:

- Haushalte und Kleingewerbe: Rückgang um 15 % seit 1991
- Industrie und Großgewerbe: Rückgang um 42 % seit 1978
- Eigenbedarf und Verluste: Rückgang um 40 % seit 1982

Während der Verbrauchsrückgang in den Sektoren „Industrie und Großgewerbe“ und „Eigenbedarf und Verluste“ bereits vor bzw. um 1980 einsetzt, hatte der Verbrauch im Sektor „Haushalte und Kleingewerbe“ noch bis zu der Trockenperiode um 1990 zunehmende Tendenz. In den letzten Jahren hat sich der Verbrauch auf dem erreichten niedrigen Niveau konsolidiert.

7.2 Bevölkerungsprognose bis 2100

Die Bevölkerungsprognose für 2100 basiert auf folgenden Unterlagen (Hessenwasser 2009a):

1. Auf der amtlichen Bevölkerungsstatistik des Hessischen Statistischen Landesamtes beruhende Bestandsdaten ab 1977.
2. Die Bevölkerungsprognose der UN für 2300, die Prognosen auf Staatenebene auf einer Datenbasis bis 2000 und Angaben für das Zieljahr 2100 enthält.
3. Die Bevölkerungsprognose der UN für 2050, die Prognosen auf Staatenebene enthält, und die in zweijährigem Turnus aktualisiert wird. Aktuelle Datenbasis ist das Jahr 2005.
4. Die Bevölkerungsvorausschätzung der EU für 2050, die Prognosen auf nationaler Ebene auf einer Datenbasis bis 2004 enthält.
5. Die 11. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes aus dem Jahr 2006, die eine Prognose für Deutschland bis 2050 enthält. Damit wurde die 10. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung (2003) aktualisiert, ebenfalls mit einer Prognose für Deutschland bis 2050.
6. Die „Raumordnungsprognose 2025/2050“ des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR), die eine Bevölkerungsprognose auf Kreisebene bis 2025 und auf Landesebene bis 2050 enthält.
7. Der Bericht „Bevölkerung in Hessen“ des Hessischen Statistischen Landesamtes (2008), der eine Prognose mit 2 Varianten für Hessen bis 2050 und auf Kreisebene bis 2025 enthält. Damit wurde der vom Hessischen Landtag veröffentlichte Bericht „Bevölkerung in Hessen 2050“ der Enquetekommission „Demografischer Wandel“ (2005) aktualisiert, der eine Bevölkerungsprognose auf Kreisebene mit 3 Varianten bis 2050 enthält.
8. Die „Bevölkerungsvorausschätzung für die hessischen Landkreise und kreisfreien Städte“ der Hessen Agentur GmbH (2007) mit einer Prognose bis 2050. Diese ersetzt die „Bevölkerungsvorausschätzung für die hessischen Landkreise und kreisfreien Städte bis 2050“ der Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft Hessen mbH (FEH) aus dem Jahr 2004.

Daneben wurden auch mittelfristige und kleinräumigere Prognosen berücksichtigt, die im Rahmen des Regionalen Wasserbedarfsnachweises der Hessenwasser GmbH & Co. KG (Herber u.a. 2008) in der Dokumentation Bevölkerungsprognosen (Herber u.a. 2007, Hessenwasser 2009a) dargestellt sind.

Eine Prognose offizieller Institutionen mit Angaben für den Untersuchungsraum „Hessisches Ried und Odenwald“ für 2100 liegt nicht vor. Die einzige Prognose für „Deutschland 2100“ ist die Prognose der UN für 2300, in der das Jahr 2100 als Stützstelle aufgeführt ist. Alle anderen Prognosen beziehen sich auf das Jahr 2050 und enthalten Angaben für unterschiedliche Räume, z.B. Europa, Deutschland, Hessen und in den Prognosen für Hessen für die kreisfreien Städte und Landkreise. Dabei reichen die neuen Prognosen des Statistischen Landesamtes nur bis zum Zieljahr 2025.

Die Bevölkerungsprognose für 2100 musste somit aus den vorliegenden Unterlagen, also der Prognose der UN für Deutschland 2300 und den Prognosen für 2050 bzw. 2025 abgeleitet werden. Als Grundlage hierfür wurde eine umfassende Dokumentation aller relevanten Prognosen und der jeweils zugrunde liegenden Annahmen in Bezug auf die drei prägenden Faktoren Geburtenrate, Sterblichkeit bzw. Lebenserwartung und Migration erstellt.

Im Ergebnis wurden daraus drei Szenarien für die Bevölkerungsentwicklung in Südhessen abgeleitet, die den oberen und unteren Rand der Entwicklung sowie ein mittleres Szenario abbilden (Abb. 55). Den Szenarien liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Das obere Szenario entspricht mit einer Zunahme um 25 % der Prognose der UN für Deutschland (hohes Szenario).
- Das untere Szenario entspricht mit einer Abnahme um rund 35 % der Prognose der UN für Deutschland (niedriges Szenario).
- Das mittlere Szenario ist mit einem Rückgang um 8 % aus dem mittleren Szenario der UN abgeleitet, das für Deutschland einen Rückgang um 8,5 % ausweist. Berücksichtigt ist damit eine etwas günstigere Entwicklung in Südhessen, wie sie sich übereinstimmend aus den Prognosen für die drei Regierungsbezirke in Hessen ergibt.

Ausgehend von 3,78 Mio. Einwohnern im Jahr 2005 ergeben sich demnach für 2100 Einwohnerzahlen von rd. 4,72 Mio. als Oberer Wert, 3,48 Mio. als Mittlerer Wert und 2,46 Mio. als Unterer Wert. Die Entwicklung im Zeitraum 2005 bis 2100 wird näherungsweise linear angesetzt.

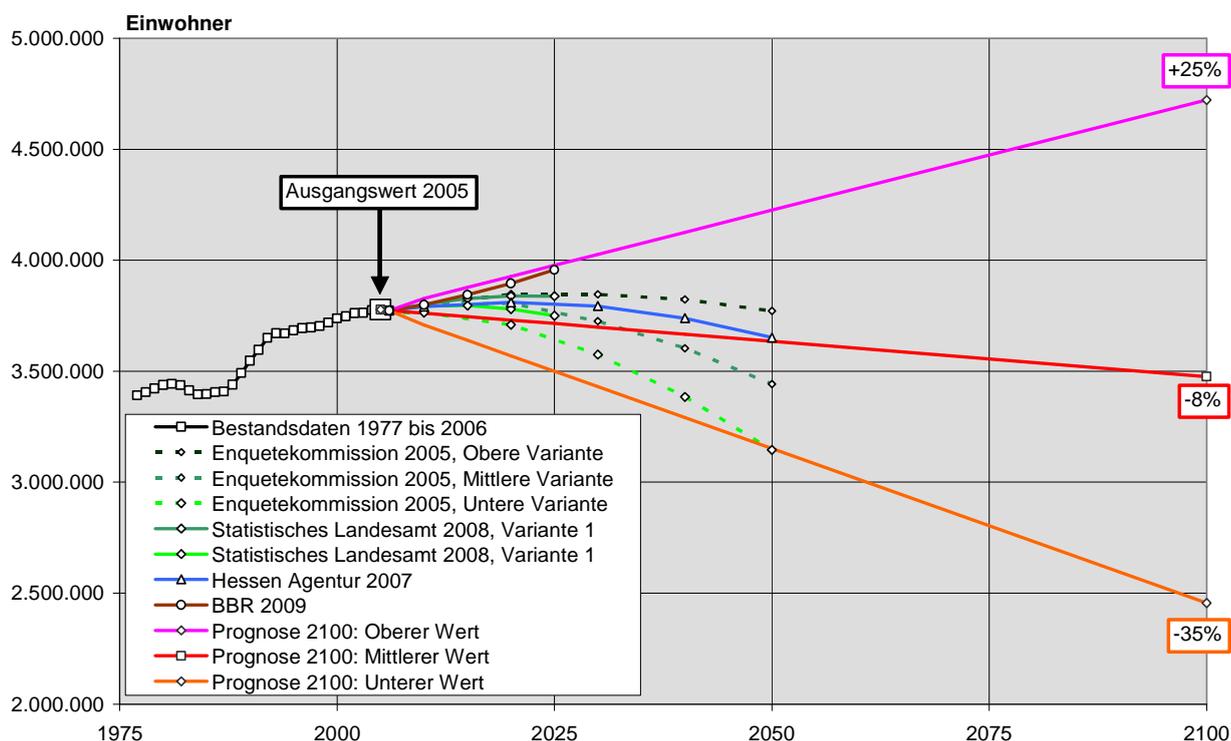


Abb. 55: Bevölkerungsprognose für Südhessen 2100

Vor dem Hintergrund der unvermeidlichen Unsicherheit der Prognose für 2100 und der unterschiedlichen Ansätze in den zugrunde liegenden Prognosen wäre jede weitere Präzisierung (z.B. Anpassung an einen kurvenförmigen Verlauf) reine Spekulation. Aus dem gleichen Grund wird keine weitere Differenzierung für die Landkreise und kreisfreien Städte innerhalb Südhessens vorgenommen.

7.3 Prognose des Pro-Kopf-Bedarfs bis 2100

Die Prognose des Pro-Kopf-Bedarfs bis 2100 umfasst folgende Aspekte:

1. Beschreibung der Ausgangslage, also der bisherigen Entwicklung des Pro-Kopf-Verbrauchs seit Einführung der öffentlichen Wasserversorgung in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts und der aktuellen Verbrauchsstruktur einschließlich eines Vergleichs mit der Situation im internationalen Kontext.
2. Dokumentation und Analyse der Entwicklung in den zurückliegenden 30 Jahren auf Grundlage der Datenbank des Regierungspräsidiums Darmstadt zur Wasserbilanz Rhein-Main.
3. Dokumentation und Analyse der Einflussfaktoren und Randbedingungen für die zukünftige Entwicklung des Wasserbedarfs.
4. Die daraus abgeleitete Prognose des Pro-Kopf-Bedarfs in Südhessen bis 2100.

Im Bestand des Jahres 2006 lag der Pro-Kopf-Verbrauch in Südhessen bezogen auf die Einwohnerzahl nach Angaben des Hessischen Statistischen Landesamtes (Hauptwohnsitze) im Mittel bei 166 Litern pro Einwohner und Tag (l/E•d). Darin enthalten sind die Verbrauchsanteile:

- Haushalte und Kleingewerbe mit rd. 133 l/E•d (rd. 80 %),
- Industrie und Großgewerbe mit rd. 19 l/E•d (rd. 12 %),
- Eigenbedarf und Verluste mit rd. 14 l/E•d (rd. 8 %).

Hauptgegenstand der Prognose des Pro-Kopf-Bedarfs ist die Analyse der bekannten bzw. abzuleitenden Einflussfaktoren, die eine weitere Abnahme oder auch eine Zunahme des Bedarfs bewirken könnten. Hierzu wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Dokumentation übergeordneter Zielsetzungen wie sie sich aus der Agenda 21 und den Millennium-Zielen der UN ergeben.
- Dokumentation der Wasserversorgungssituation und der diesbezüglichen Zielsetzungen der für die Wasserversorgung zuständigen Stellen in den Bundesländern.
- Dokumentation der Einschätzungen und Zielsetzungen anderer Organisationen und Akteure, die sich mit der Problematik befassen (z.B. Verbände, Fachinstitute).
- Dokumentation und Analyse anderer Trends, die sich auf den Wasserverbrauch auswirken (z.B. Klimawandel, Wasserpreise).
- Dokumentation und Analyse der bekannten und zu erwartenden Entwicklung im Bereich der Trinkwassernutzung in sämtlichen Verbrauchssektoren (z.B. Toilettenspülung, Haushaltsgeräte, Regenwassernutzung, Randbedingungen im gewerblichen und öffentlichen Bereich).

Im Ergebnis zeigt sich, dass ausgehend vom Bestand eine gemäßigte Entwicklung zu erwarten ist und von der überwiegenden Zahl der Akteure erwartet wird. Maßgeblich für diese Einschätzung ist das Abklingen der Wasserspareffekte, die die Entwicklung in den letzten 20 Jahren geprägt haben. Unabhängig von dieser grundsätzlichen Einschätzung ist für die Entwicklung bis 2100 aufgrund unterschiedlicher Bewertungen eine Bandbreite anzusetzen, die einen relativ deutlichen Rückgang und eine leichte Zunahme einschließt.

Demgegenüber stehen so genannte „ökologische Sanitärkonzepte“, deren Umsetzung einen deutlichen Rückgang des Trinkwasserbedarfs zur Folge hätte. Ausgangspunkt hierfür ist das Ziel, möglichst alle Stoffe im Kreislauf zu führen, also sowohl die Mehrfachverwendung von Wasser als auch damit verbunden die Rückführung von Stoffen aus dem Abwasser in den Stoffkreislauf. Bei konsequenter Umsetzung dieser Konzepte könnte der Trinkwasserbedarf im Idealfall lokal auf nahezu Null reduziert werden. Eine flächendeckende Umsetzung dieser Konzepte bis 2100 erscheint jedoch unwahrscheinlich. Die „alternativen“ und „ökologischen“ Sanitärkonzepte werden unter verschiedenen Slogans diskutiert, darunter der Begriff „Ecosan“. Für die langfristig denkbare Umsetzung dieser Konzepte wird in der Prognose ein eigenes Szenario dargestellt.

Auf dieser Grundlage wurden ausgehend von einem Bestandswert von 166 l/E•d im Jahr 2006 für die Gesamtentwicklung des Trinkwasserverbrauchs in Südhessen bis 2100 die in Tabelle 15 zusammengestellten und in Abb. 56 dargestellten Szenarien bzw. Varianten definiert.

	Südhessen 2006 l/E•d	Prognose 2100		
		Moderates Szenario		Ecosan- Szenario
		oben	unten	
Haushalte	133	+ 1 %	- 22 %	- 55 %
Andere Verbraucher: - Kleingewerbe		± 0 ... + 5 %	- 20 ... - 25 %	- 50 ... - 60 %
- Industrie und Großgewerbe - Öffentliche Einrichtungen	20			
Eigenbedarf und Verluste	14	etwa analog zur Bedarfsentwicklung		
Gesamtverbrauch / -bedarf	166	+ 2,5 %	- 20 %	- 55 %
		Mittelwert: - 8,75 %		

Tabelle 15: Prognose des Pro-Kopf-Bedarfs in Südhessen 2100

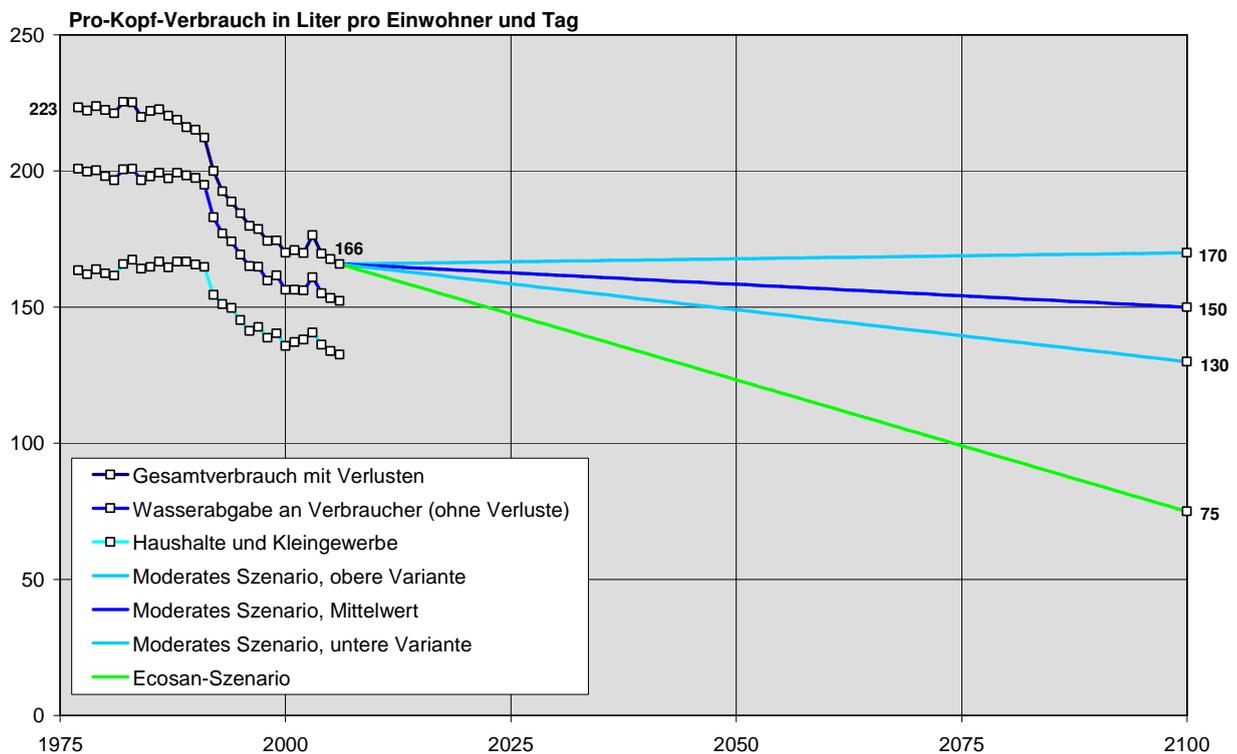


Abb. 56: Prognose des Pro-Kopf-Bedarfs in Südhessen 2100

Die im Bestand unterschiedliche Verbrauchsstruktur in den kreisfreien Städten und Landkreisen wirkt sich über die prozentualen Ansätze mit entsprechend unterschiedlichen Bedarfsänderungen in absoluten Zahlen aus. Aufgrund des langen Prognosezeitraums ist eine weitere räumliche oder zeitliche Differenzierung der Bedarfsentwicklung nicht sinnvoll und wäre rein spekulativ.

7.4 Wasserbedarfsprognose für Südhessen 2100

Aus den drei Szenarien für die Bevölkerungsentwicklung (Kap. 7.2) und vier Szenarien für die Entwicklung des Pro-Kopf-Bedarfs (Kap. 7.3) ergeben sich für die Entwicklung des Wasserbedarfs durch multiplikative Verknüpfung zwölf Varianten (Tabelle 15, Abb. 57).

			Bevölkerungsentwicklung		
			Oberer Wert	Mittelwert	Unterer Wert
Entwicklung des Pro-Kopf-Bedarfs			+ 25 %	- 8 %	- 35 %
Moderates Szenario	Oberer Wert	+ 2,5 %	+ 28 %	- 6 %	- 33 %
	Mittelwert	- 8,75 %	+ 14 %	- 16 %	- 41 %
	Unterer Wert	- 20 %	± 0 %	- 26 %	- 48 %
Ecosan-Szenario		- 55 %	- 44 %	- 59 %	- 71 %
Wasserbedarfsprognose 2100					

Tabelle 16: Varianten der Wasserbedarfsprognose für 2100

Ausgehend von einem Ausgangswert von 228 Mio. m³/a im Jahr 2006 beträgt die Bandbreite der Wasserbedarfsprognose damit 66 bis 292 Mio. m³/a (Abb. 57).

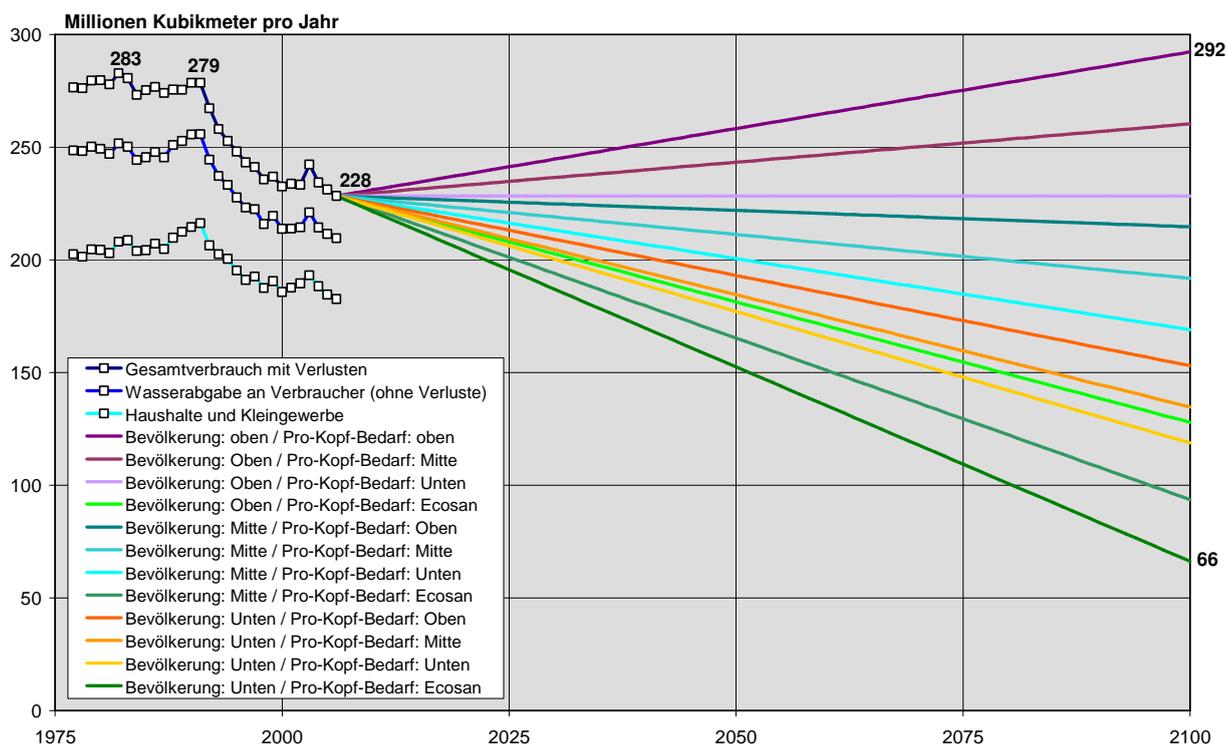


Abb. 57: Wasserbedarfsprognose für Südhessen 2100 (12 Varianten)

Demnach leiten sich aus den Szenarien für Bevölkerung und Pro-Kopf-Bedarf Varianten in erheblicher Bandbreite ab:

- Eine Überlagerung der jeweils Oberen Werte führt zu einer Bedarfszunahme um 28 %.
- Eine Überlagerung der jeweils Mittleren Werte führt zu einem Bedarfsrückgang um 16 %, also etwa in der Größenordnung der Entwicklung der letzten 20 Jahre.
- Eine Überlagerung der jeweils Unteren Werte führt zu einem Bedarfsrückgang um 48 %.
- Im Ecosan-Szenario ergeben sich in Abhängigkeit von der Bevölkerungsentwicklung Bedarfsrückgänge um 44 bis 71 %.

Außer im Ecosan-Szenario ist die Bevölkerungsentwicklung der prägende Faktor für die Entwicklung des Wasserbedarfs. Die Varianten bilden in Abb. 57 vier Gruppen:

- oben in Violett-Tönen drei Varianten für den Oberen Wert der Bevölkerungsentwicklung,
- in der Mitte in Blau-Tönen drei Varianten für den Mittleren Wert der Bevölkerungsentwicklung,
- unten in Orange- und Gelb-Tönen drei Varianten für den Unteren Wert der Bevölkerungsentwicklung.

- Die drei Varianten, die sich aus dem Ecosan-Szenario ergeben, bilden eine eigene Gruppe in Grün-Tönen am unteren Ende der Skala. Der starke Rückgang des Pro-Kopf-Bedarfs dominiert in diesem Fall die Entwicklung des Wasserbedarfs unabhängig von der Bevölkerungsentwicklung.

Bei den Modellrechnungen im Rahmen des AnKliG-Projektes kann nur eine begrenzte Zahl von Varianten bzw. Szenarien betrachtet werden. Es bietet sich an, drei Szenarien zu definieren, die eine obere, eine mittlere und eine untere Entwicklungsoption abbilden.

Sowohl für die Bevölkerung als auch für den Pro-Kopf-Bedarf in Südhessen sind ausgehend von den derzeitigen Kenntnissen tendenziell eher moderate Entwicklungen zu erwarten. Allenfalls wäre zu bedenken, dass z.B. eine günstige wirtschaftliche Entwicklung sowohl eine stabile Bevölkerungsentwicklung als auch eine gewisse Zunahme des Pro-Kopf-Verbrauchs verursachen könnte und umgekehrt. Dennoch ist eine insgesamt gemäßigte Entwicklung wahrscheinlicher als denkbare Extremszenarien. Die obersten und untersten Varianten, wie sie sich aus solchen Überlagerungen ergeben, werden daher nicht weiter verfolgt.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen wurden ausgehend von der Bandbreite der in Abb. 57 dargestellten 12 Varianten drei Szenarien definiert, denen die folgenden Annahmen zugrunde liegen:

- Im Szenario 1 (Oberes Szenario) wird der Status Quo unverändert fortgeschrieben ($\pm 0\%$).
Dieses Szenario ist im Rahmen der vorliegenden Fragestellung eines komplexen Klimafolgen-Projektes obligatorisch. Da eine relevante Zunahme des Wasserbedarfs nach vorliegenden Kenntnissen unwahrscheinlich ist, wird dieser Ansatz als Oberes Szenario betrachtet.

Im Szenario 2 (Mittleres Szenario) wird mit einem Bedarfsrückgang um 15 % gerechnet.

Dieses Szenario ergibt sich aus der Überlagerung der jeweils mittleren Varianten für Bevölkerungsentwicklung und Pro-Kopf-Bedarf. Eine solche Entwicklung ist somit im Rahmen der dargestellten Bandbreite als relativ wahrscheinlich anzusehen. Zudem ist dieses Szenario noch ohne gravierende Änderungen der bestehenden Versorgungsinfrastruktur zu beherrschen.

- Im Szenario 3 (Unteres Szenario) wird mit einem Bedarfsrückgang um 40 % gerechnet.
Dieses Szenario ergibt sich aus mehreren möglichen Überlagerungen, die gemäß Tabelle 15 zu Bedarfsrückgängen in der Größenordnung zwischen etwa 30 und 50 % führen. Demnach ist auch eine solche Entwicklung nicht unwahrscheinlich, die sicherlich gravierende Änderungen sowohl in der Versorgungsinfrastruktur als auch in der Grundwasserbewirtschaftung nach sich ziehen würde.

Die in Abb. 58 dargestellten Szenarien decken somit drei relevante Kategorien unterschiedlicher Entwicklungen ab.

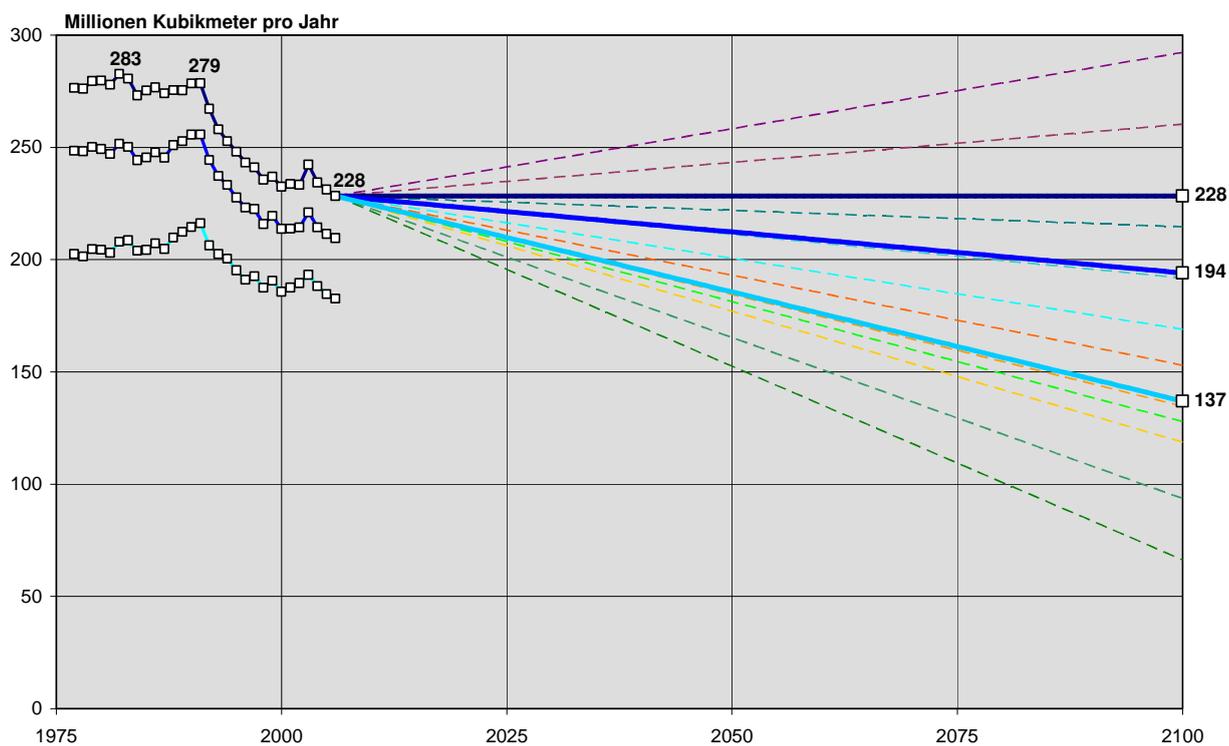


Abb. 58: Wasserbedarfsprognose für Südhessen 2100 (3 Szenarien)

Die Prognose bezieht sich auf Südhessen, also den ganzen Regierungsbezirk Darmstadt bzw. den Bilanzraum der Wasserbilanz Rhein-Main. Der Untersuchungsraum des vorliegenden Projektes umfasst den südlichen Teil des Regierungsbezirks. Im folgenden Kapitel erfolgt eine Konkretisierung der Prognose für den Untersuchungsraum „Hessisches Ried und Odenwald“ und dessen Teilräume.

7.5 Wasserbedarfsprognose für den Untersuchungsraum

Der Untersuchungsraum „Hessisches Ried und Odenwald“ ist innerhalb des Regierungsbezirks Darmstadt (Südhessen) abgegrenzt wie in Abb. 9 dargestellt und in Kap. 2.3.1 mit Bezug auf die Struktur der Trinkwasserversorgung beschrieben.

Neben der bereits in Kap. 7.1 formulierten Voraussetzung einer einheitlichen Entwicklung im Gesamttraum ist für die Wasserbedarfsprognose für den Untersuchungsraum und dessen Teilräume eine sich in ihren Grundzügen wenig verändernde Versorgungsstruktur unterstellt. Insbesondere strukturelle Änderungen am technischen Leitungsverbund können erhebliche Auswirkungen auf die Bedarfsdeckung zur Folge haben. Solche Änderungen könnten vor allem die Teilräume Hessisches Ried und Offenbach/Dieburg betreffen, weniger den ländlich geprägten Teilraum Odenwald mit seinen überwiegend dezentralen Versorgungsstrukturen. Sie sind jedoch nicht prognostizierbar, so dass vorausgesetzt werden muss, dass sie nicht eintreten bzw. durch die in Kap. 7.4 definierten Szenarien abgedeckt sind.

Abb. 59 zeigt die Prognose der Wassergewinnung im Untersuchungsraum⁶ bis 2100.

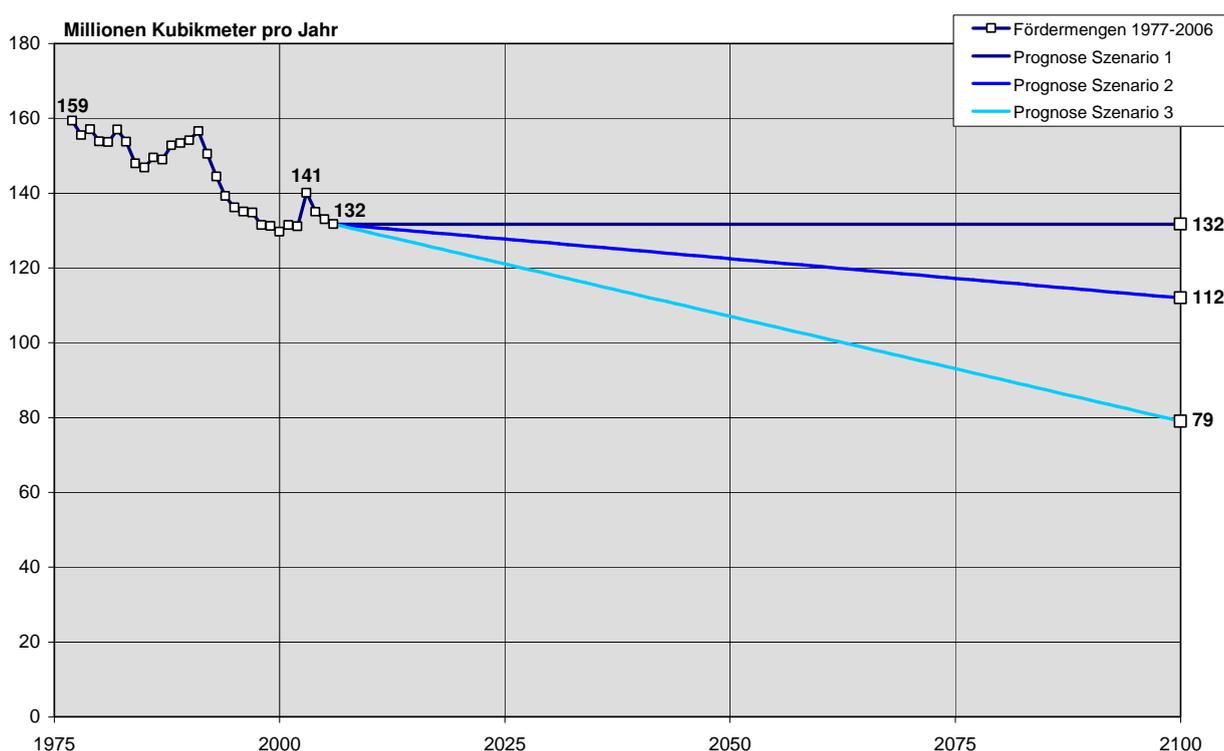


Abb. 59: Prognose der Wassergewinnung im Untersuchungsraum bis 2100

⁶ Fördermengen nach Abzug der Quellüberläufe (Daten: Wasserbilanz Rhein-Main).

Basierend auf den in Kap. 7.4 definierten Szenarien liegt die zu erwartende Gesamtfördermenge im Untersuchungsraum „Hessisches Ried und Odenwald“ ausgehend von einem Bestandswert von 132 Mio. m³/a im Jahr 2100 zwischen 79 und 132 Mio. m³/a.

Die Prognosen für die drei Teilräume sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Die Daten beziehen sich auf das Wasseraufkommen, also die Summe aus Wassergewinnung und Bezug. Dies entspricht der Summe aus dem Wasserverbrauch in den jeweiligen Teilräumen und der Wasserabgabe nach außen.

	Bestand 2006	Prognose 2100		
		Szenario 1 (Oberes)	Szenario 2 (Mittleres)	Szenario 3 (Unteres)
	Mio. m ³ /a			
Hessisches Ried	87,4	87,4	74,4	52,4
Offenbach/Dieburg	32,4	32,4	27,5	19,4
Odenwald	12,4	12,4	10,5	7,4
Summe (rund)	132	132	112	79

Tabelle 17: Prognose des Wasseraufkommens in den drei Teilräumen bis 2100

7.6 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserbedarf

Im Verlauf eines Jahres folgt der Wasserbedarf dem Gang der Jahreszeiten. Im Winter liegt er tendenziell unter dem Durchschnitt, im Sommer bzw. bei sonnig-warmem Wetter darüber. Besonders hoch ist der Wasserbedarf in längeren Hitzeperioden bzw. bei anhaltender Trockenheit. Da im Zuge des Klimawandels mit einer zunehmenden Häufigkeit und Intensität von Trockenperioden gerechnet wird (Abb. 60), ist mit einer entsprechenden Intensivierung des Spitzenwasserbedarfs zu rechnen.

Während die längsten in Deutschland dokumentierten sommerlichen Hitzeperioden mit Temperaturen über 25 °C in den Jahren 1961 bis 1990 eine Länge von 31 bis 40 Tagen hatten (ca. 4 bis 6 Wochen), werden für den Zeitraum 2071 bis 2100 auch Hitzeperioden mit einer Länge von über 51 Tagen (mehr als 7 Wochen) erwartet. Zugleich wird die Häufigkeit der Ereignisse mit einer Länge von mehr als 30 Tagen nach Abb. 60 von 3 in 30 Jahren (eins in 10 Jahren oder 10 %) auf 19 in 30 Jahren zunehmen.

Der mittlere Tagesverbrauch eines Jahres (m³/d) errechnet sich aus dem Jahresverbrauch (m³/a) dividiert durch die Zahl der Tage, also 365 bzw. 366 d/a in Schaltjahren. Der Jahresverbrauch ist die Summe der Einzelwerte für den Tagesverbrauch. Die maximalen Tageswerte des Wasserverbrauchs hängen von der Größe des Versorgungsgebietes ab und werden durch

Spitzenfaktoren bzw. Prozentwerte angegeben⁷. Abb. 61 zeigt Beispiele für Ganglinien des Tageswasserverbrauchs⁸.

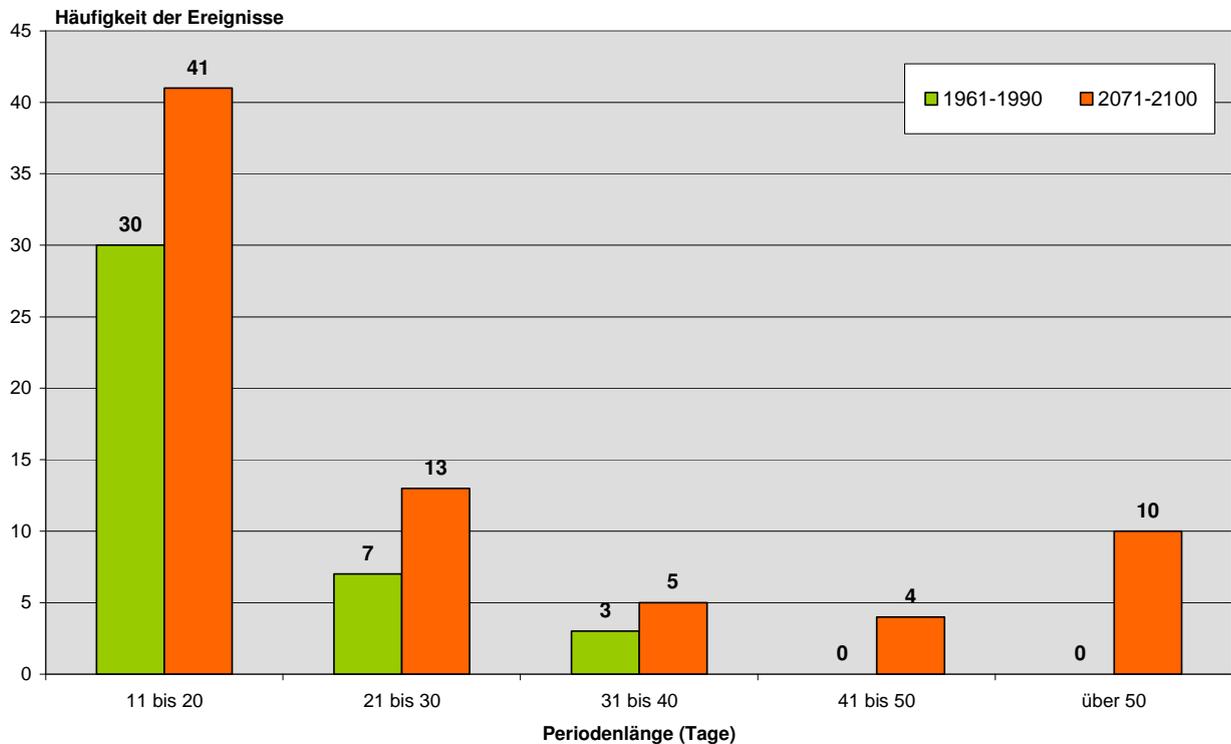


Abb. 60 Erwartete Häufigkeitszunahme von Hitzeperioden mit Sommertagen (max. Tagestemperatur über 25 °C) im Zeitraum 2071-2100 gegenüber dem Zeitraum 1961-1990⁹

⁷ DVGW: Technische Regel – Arbeitsblatt W 410 – Wasserbedarf - Kennwerte und Einflussgrößen. Bonn 2008 (Bild 3).

Roth, U./Berger, H./Müller, A./Wagner, H.: Höhe und Häufigkeit von Wasserbedarfsspitzen bei der Hessenwasser GmbH & Co. KG. gwf-Wasser/Abwasser 149 (2008) Nr. 11, S. 864-871.

⁸ Wiesbaden liegt zwar außerhalb des Untersuchungsraumes, wird jedoch aus diesem beliefert. Der Datenbestand der Hessenwasser für Wiesbaden ist besonders aussagekräftig und die Verhältnisse sind auf den Untersuchungsraum übertragbar.

⁹ Daten: Max Planck-Institut für Meteorologie, 2007 (Szenario B2).

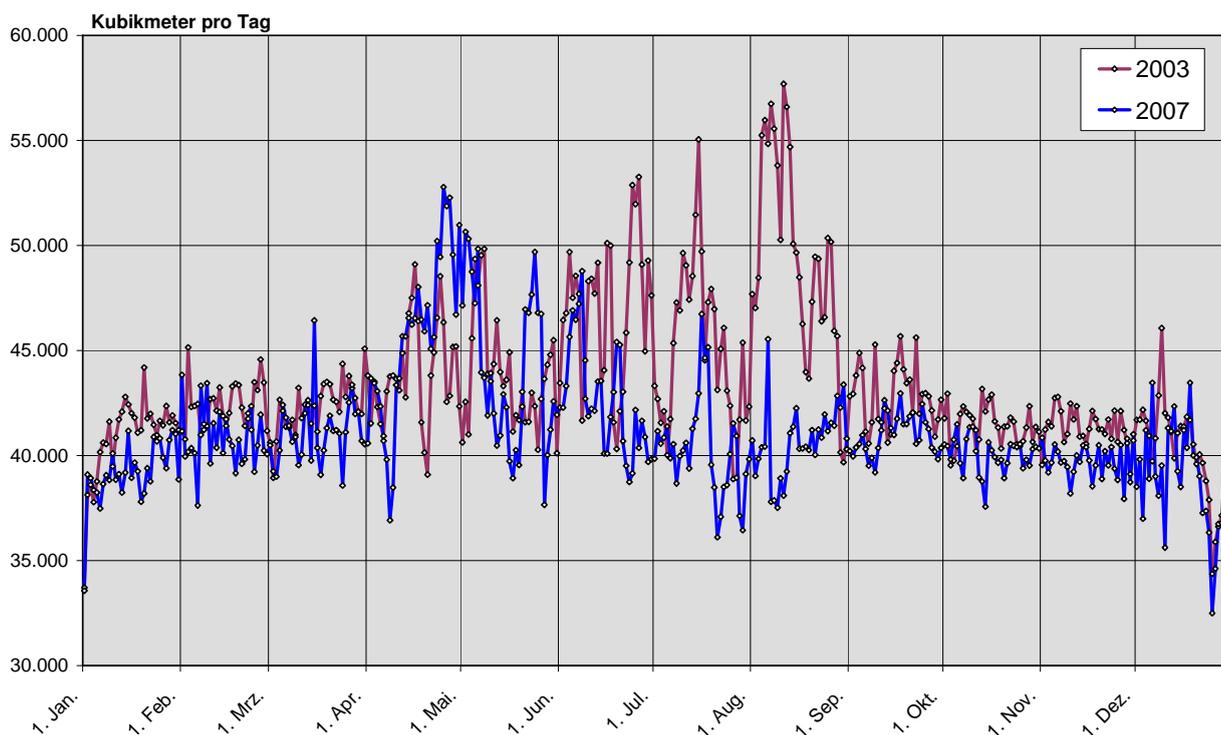


Abb. 61: Ganglinien der Netzeinspeisung in Wiesbaden in den Jahren 2003 und 2007

Die Ganglinie für das relativ ausgeprägte Trockenjahr 2003 zeigt einen entsprechend hohen Wasserbedarf vor allem Anfang August - der Jahresverbrauch lag um etwa 4 bis 5 % über dem langjährigen Durchschnitt bzw. dem Trend der allgemeinen Verbrauchsentwicklung. 2007 folgte auf einen ausgesprochen warmen und trockenen April mit bereits relativ ausgeprägten Verbrauchsspitzen ein weitgehend verregneter Sommer - der Jahresverbrauch lag um etwa 1 bis 2 % unter dem Trend. Bei einer Abfolge mehrerer Trockenjahre, also einer wasserwirtschaftlichen Trockenperiode wie Anfang/Mitte der 1970er Jahre mit dem Höhepunkt in dem Extremjahr 1976 und dann wieder um 1990 nimmt die Höhe der Verbrauchsspitzen und damit auch der Jahresbedarf von Jahr zu Jahr tendenziell zu.

Um den Tagesverbrauch bzw. -bedarf in Relation zum mittleren Bedarf unabhängig von der allgemeinen Bedarfsentwicklung darzustellen, bietet es sich an, die Bedarfszahlen auf 1 zu normieren. Die Bezugszahl ist dann der mittlere Tagesbedarf, wie er in dem betreffenden Jahr vor dem Hintergrund des allgemeinen Trends in einem Normaljahr zu erwarten gewesen wäre. Ein relativer Bedarf von 1,0 entspricht dann gerade dem mittleren Bedarf, eine Bedarfszahl 0,9 einem Bedarf um 10 % darunter, eine Bedarfszahl bzw. ein Spitzenfaktor von 1,5 einer Verbrauchszahl 50 % über dem mittleren Bedarf.

Abb. 62 zeigt normierte Tagesganglinien für die Trockenjahre 1976, 1990, 1991 und 2003 sowie das Jahr 2007 mit der relativ ausgeprägten Verbrauchsspitze im April. Auffällig ist vor allem das außerordentliche Ereignis des Jahres 1976, wobei in der Fachdiskussion allgemein angenom-

men wird, dass aufgrund der strukturellen und technischen Entwicklungen seit den 1970er Jahren derart hohe Bedarfsspitzen nicht mehr zu erwarten sind.

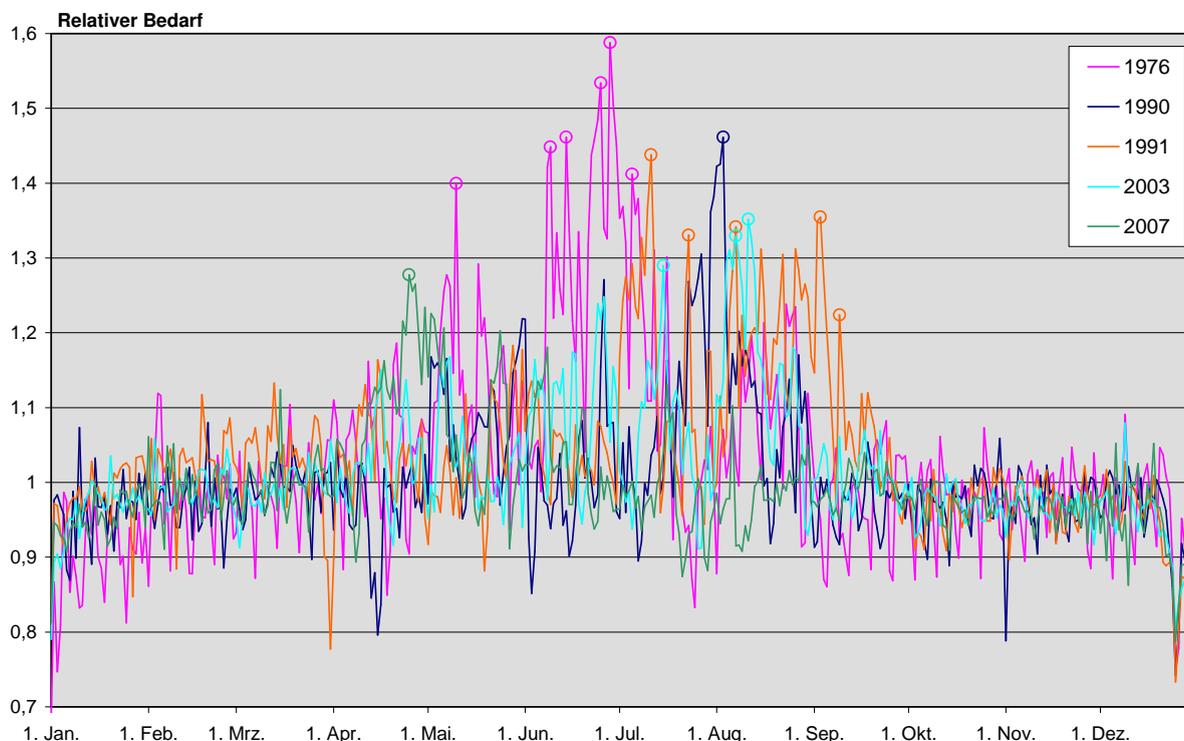


Abb. 62: Normierte Ganglinien dokumentierter Spitzenlast-Ereignisse in Wiesbaden

Für die technische Auslegung der Versorgungsanlagen sind die höchsten anzunehmenden Zahlen für den Verbrauch bzw. Durchfluss an einem Tag oder in noch kürzeren Zeiträumen maßgeblich. Die maßgebliche Bedarfszahl für die längerfristige Grundwasserbewirtschaftung ist dagegen der Jahresbedarf. Im Bestand ist nach der Wasserbilanz Rhein-Main¹⁰ und vorliegenden Fachgutachten¹¹ im Rhein-Main-Raum in Trockenjahren mit einem um bis zu etwa 5 % erhöhten Wasserbedarf zu rechnen. Für die vorliegende Fragestellung stellt sich die Frage, in welchem Umfang dieser Faktor unter zukünftig veränderten Klimabedingungen zunehmen kann.

Für die entsprechende Abschätzung bietet es sich an, die in Abb. 62 dargestellten Ereignisse zu einem lang andauernden Ereignis in einem fiktiven Extremjahr zu überlagern. Dies führt am Beispiel der Netzeinspeisung in Wiesbaden zu dem in Abb. 63 dargestellten Ereignis. Darin ist in den Monaten Januar bis März und Oktober bis Dezember der Verlauf des Jahres 2003 übernommen, in den Monaten April bis September jeweils der höchste Wert aus Abb. 62, wobei die

¹⁰ Arbeitsgemeinschaft Wasserversorgung Rhein-Main (WRM): Wasserbilanz Rhein-Main 1990-2010 – Fortschreibung 1991 bis 1993. Frankfurt/Wiesbaden/Einhausen, 1994.

¹¹ Vgl. Roth e.a.: a.a.O.

Maxima für 1976 auf einen Wert von 1,5 gedämpft und für 1990, 1991 und 2003 auf 1,5 verstärkt sind. Das Ereignis im April 2007 ist ohne Verstärkung übernommen.

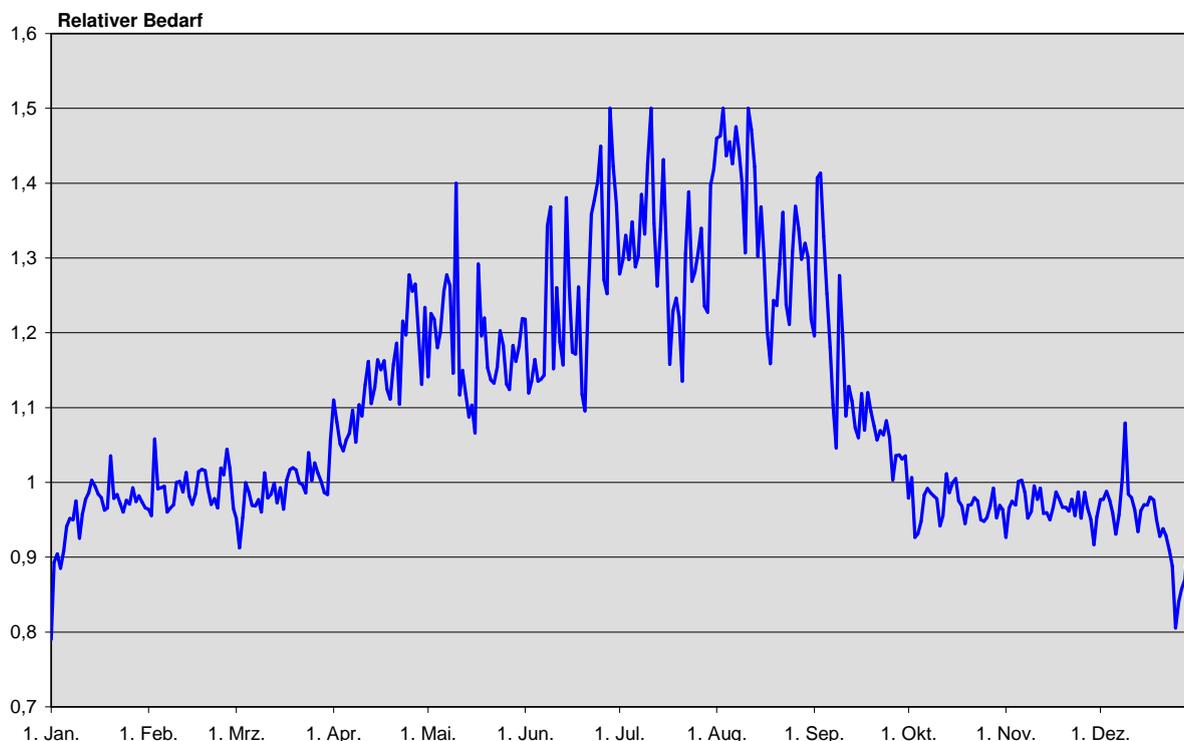


Abb. 63: Fiktiver Verlauf eines extremen Spitzenlast-Ereignisses im Jahr 2100

Für dieses fiktive Spitzenlastszenario wurden somit die klimatischen Randbedingungen aus den genannten Referenzjahren für ausgeprägte Spitzenlastereignisse überlagert. Dies führt zu einem um rund 10 % erhöhten Jahresbedarf.

Der Tagesspitzenfaktor, der für Wiesbaden mit 1,5 anzusetzen ist, ist nach dem DVGW-Arbeitsblatt W 410 von der Größe des Versorgungsgebietes abhängig und kann in kleinen Versorgungsgebieten eine Größenordnung über 2,0 erreichen. Für die vorliegende Fragestellung der Grundwasserbewirtschaftung im Raum „Hessisches Ried und Odenwald“ kann die Situation in Wiesbaden mit einem Spitzenfaktor von 1,5 als repräsentativ angesehen werden. Für den Gesamttraum dürfte der Spitzenfaktor etwas niedriger sein.

Innerhalb des Untersuchungsgebietes der vorliegenden Wasserbedarfsprognose sind unterschiedlich hohe Spitzenfaktoren anzusetzen. Bezogen auf die einzelnen Kommunen bzw. Versorgungsgebiete sind die Spitzenfaktoren umso höher, je kleiner die jeweilige Zahl der angeschlossenen Einwohner ist. Für die Bedarfszahlen im Leitungsverbund ist der jeweilige Anteil an Grundlast- bzw. Spitzenlast-Lieferung maßgeblich, also der Zweck der Lieferungen bzw. auch die Dargebotssituation in den angeschlossenen Kommunen. Für die resultierende Höhe des Jahresbedarfs ist auch die Größe der Verbrauchsschwankungen im Wochengang maßgeblich.

Höhere Tagesspitzen in kleinen Kommunen bewirken demnach nicht unbedingt einen höheren Gesamtbedarf in Trockenjahren.

Für einzelne Kommunen oder kleinere Teilräume sind somit ggf. höhere Spitzenfaktoren maßgeblich als für den Gesamtraum. Je größer der Bezugsraum ist, desto mehr nivellieren sich die Unterschiede. Dies gilt vor allem für größere, an den Verbund angeschlossene Räume, da sich hier die kleinräumigen Unterschiede weitgehend ausgleichen.

Für den Gesamtraum dürfte im Prognosezeitraum bis 2100 auf Grundlage der obigen Abschätzung vermutlich eine Zunahme des Spitzenfaktors für den Jahresbedarf von derzeit ca. 5 % auf maximal etwa 8 % realistisch sein. Tabelle 18 zeigt die resultierenden Bedarfszahlen für den gesamten Untersuchungsraum.

	Bestand 2006	Prognose 2100		
		Szenario 1 (Oberes)	Szenario 2 (Mittleres)	Szenario 3 (Unteres)
	Mio. m ³ /a			
Wasserbedarf im Normaljahr	132	132	112	79
Wasserbedarf im Trockenjahr	139	143	121	85

Tabelle 18: Prognose des Wasseraufkommens im Untersuchungsraum in Trockenjahren

In Bezug auf die grundsätzliche Versorgungsstruktur sind die drei Teilräume unterschiedlich zu charakterisieren:

- Im Hessischen Ried befinden sich die großen verbundwirksamen Wasserwerke der Hesenwasser, aus denen über die Riedleitung die Regionen Frankfurt und Wiesbaden und insbesondere auch der westliche Teil des Taunus beliefert werden. Das Hessische Ried ist somit stark durch Verbundstrukturen geprägt, über die regional bedeutsame Lieferbeziehungen abgewickelt werden.
- Der Odenwald weist als Mittelgebirge mit dörflich/kleinstädtischer Prägung praktisch ausschließlich örtliche Versorgungsstrukturen auf.
- Der Raum Offenbach/Dieburg wird im Wesentlichen aus den Wasseraufkommen des Zweckverbandes Gruppenwasserwerk Dieburg und des Zweckverbandes Wasserversorgung Stadt und Kreis Offenbach (ZWO) versorgt. In der WRM-Leitungsverbundstudie¹² ist der Bereich als „kleiner Verbund“ bezeichnet. Die dortigen Verbundstrukturen sind unab-

¹² Arbeitsgemeinschaft Wasserversorgung Rhein-Main –WRM-: Leitungsverbund Wasserversorgung Rhein-Main. Studie. Kurzfassung, Groß-Gerau, 2005.

hängig vom sonstigen Leitungsverband Rhein-Main und dienen lediglich der Wasserverteilung an die angeschlossenen Kommunen innerhalb des Teilraums.

Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass

- der Wasserbedarf im Teilraum Hessisches Ried in zukünftigen Trockenperioden vermutlich tendenziell überdurchschnittlich zunehmen wird,
- der entsprechende Trend im Teilraum Offenbach/Dieburg vermutlich etwa dem Durchschnitt entsprechen wird,
- und im Teilraum Odenwald zwar sehr hohe Tagesspitzen, aber nur eine unterdurchschnittliche Zunahme des Jahresbedarfs zu erwarten sein werden.

Eine weitere quantitative Präzisierung dieser Trends wäre vor dem Hintergrund des langen Prognosezeitraums bis 2100 spekulativ.

7.7 Randbedingungen für die Bedarfsentwicklung

Unsicherheiten bei der langfristigen Bevölkerungsentwicklung bestehen insbesondere in Bezug auf die Entwicklungen der Geburtenrate und der internationalen Wanderungssalden. Die UN erwarten für Mitteleuropa mittel- bis langfristig einen Anstieg der Geburtenrate auf bestandserhaltende Werte und damit ein Ende der aktuell rückläufigen demografischen Trends. Zugleich wird für die Weltbevölkerung ein Anstieg in einer Größenordnung von 50 % auf Werte über 9 Milliarden in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts erwartet. Langfristig ist mit Sicherheit auszuschließen, dass sich die Entwicklung in Mitteleuropa, Deutschland und letztlich auch Südhessen völlig von der weltweiten Entwicklung abkoppelt. Es ist somit damit zu rechnen, dass im Fall eines langfristigen Anhaltens der aktuell negativen natürlichen Bevölkerungsbewegungen diese früher oder später durch entsprechende Wanderungsbewegungen ausgeglichen werden. Ein daraus resultierendes Bevölkerungswachstum könnte ggf. auch zu einem entsprechenden Anstieg des Wasserbedarfs führen.

Ausgehend von der in Deutschland flächendeckend vorhandenen und im dicht besiedelten Südhessen besonders komplexen Infrastruktur der Siedlungswasserwirtschaft, unter Berücksichtigung der Entwicklung des Pro-Kopf-Verbrauchs in den letzten 100 Jahren sowie auf Grundlage der bekannten mittelfristigen Trends ist dagegen eine eher gemäßigte Entwicklung des Pro-Kopf-Bedarfs in die eine oder andere Richtung zu erwarten. In Überlagerung mit den Bevölkerungsprognosen, die für Südhessen mittelfristig ebenfalls gemäßigte Entwicklungen darstellen, ergeben sich für den Wasserbedarf in Südhessen zumindest für diesen Zeithorizont gemäßigte Entwicklungsperspektiven.

Unsicherheiten bei der Entwicklung des Pro-Kopf-Bedarfs bestehen insbesondere in Bezug auf die Ecosan-Konzepte, mit denen letztlich umfassende Strukturänderungen in der Siedlungswasserwirtschaft angestrebt werden und die im Fall ihrer konsequenten Umsetzung entsprechenden Auswirkungen auf die Struktur der öffentlichen Wasserversorgung haben werden. Un-

abhängig von der Frage, ob diese Konzepte den Anforderungen der Nachhaltigkeit im Sinne der Agenda 21 gerecht werden, muss diese Möglichkeit bei einer Prognose für 2100 einbezogen werden. Mit dem im Unteren Szenario gewählten Ansatz eines Bedarfsrückgangs um rd. 40 % wird diese Option in gemäßigter Form berücksichtigt.

Die Auswirkungen einer zukünftig veränderten Versorgungsstruktur auf den Wasserbedarf, sei es im Sinne der Ecosan-Konzepte, die letztlich eine Auflösung der derzeitigen Ver- und Entsorgungsstrukturen zum Ziel haben, sei es durch Fortentwicklung und Anpassung dieser Strukturen an zukünftig veränderte Anforderungen, sind letztlich nicht prognostizierbar, bzw. müssen durch die angesetzten Szenarien abgebildet werden. Dies gilt insbesondere für den Teilraum Hessisches Ried, in dem ein erheblicher Teil der Wassergewinnung in den Verbund eingespeist wird und der Wasserversorgung in angrenzenden Räumen dient.

Vor diesem Hintergrund ist die vorliegende Wasserbedarfsprognose für 2100 nicht weiter zu präzisieren. Durch die dargestellten Varianten bzw. die auf deren Grundlage definierten drei Szenarien sind die auf Grundlage heutiger Kenntnisse abzuleitenden Entwicklungsperspektiven vollständig beschrieben. Die Szenarien gehen ein in die anderen Teilprojekte des Verbund-Projektes AnKliG.

8 Grundwasserhaushalt und Nutzungskonflikte im Hessischen Ried bis 2100

Zur Abschätzung der Veränderungen in der Grundwasserbewirtschaftungen aufgrund eines sich verändernden Trinkwasserbedarfs wurden Szenarienrechnungen mit den Ergebnissen der Grundwasserneubildung des CLM-Datensatzes auf Grundlage der Wasserbedarfsprognose für den Untersuchungsraum (s. Kap. 7.5) durchgeführt. Der CLM-Datensatz wurde ausgewählt, weil mit diesem Regionalmodell die bisher beobachteten Schwankungsamplituden in den Grundwasserständen von den untersuchten regionalen Klimamodellen am besten abgebildet wurde. Zudem wird für das A1B-Szenario der Trend zu trockeneren Verhältnissen auch mit dem CLM-Modell wiedergegeben (s. Kap. 3.4). Bei einer quantitativen Betrachtung der berechneten Grundwasserstandsänderungen ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Grundwasserneubildungsraten mit den Eingangsdaten des CLM zu hoch berechnet werden.

Die Reduzierung der Grundwasserentnahmen im Hessischen Ried in den Szenarien 2 (mittlere Grundwasserentnahme von 74,4 Mio. m³/a in 2100) und 3 (mittlere Grundwasserentnahme von 52,4 Mio. m³/a in 2100) zu der derzeitigen Grundwasserentnahme von 87,4 Mio. m³/a wurde durch anteilige Förderreduzierung in allen Wasserwerken und linear über den Betrachtungszeitraum modelltechnisch umgesetzt. Die derzeit von den Wasserversorgern geplanten Anpassungen in den Gewinnungen wurden dabei als umgesetzt angenommen.

Die Grundwasserentnahmen zur Bedarfsdeckung in Trockenjahren wurde pauschal um 10 % für die öffentliche Trinkwasserversorgung gegenüber den mittleren Grundwasserentnahmen erhöht (vgl. Kap. 7).

Um die Grundwasserbewirtschaftung innerhalb der einzelnen Szenariorechnungen möglichst realitätsnah abzubilden, wurden hierbei die Infiltrationsmengen der infiltrationsgestützten Wasserwerke im Rahmen der Prognose-Simulationen indirekt über sich an den Richtwerten des Grundwasserbewirtschaftungsplans orientierenden Festpotentiale an den Infiltrationsstandorten bestimmt.

Abb. 64 zeigt beispielhaft 2 Grundwasserstandsganglinien der CLM-Szenario- und der WETTREG-T-Simulationen an Messstellen, die nicht in der Nähe eines größeren Wasserwerks liegen und damit im wesentlichen den Einfluss des Klimaänderungssignals auf die Grundwasserstände zeigen. Zusätzlich ist der Einfluss der stark witterungsabhängigen Beregnungstätigkeit zu berücksichtigen, die auf Grund der großen räumlichen Ausdehnung der Beregnungsflächen im Hessischen Ried flächenhaft wirkt. Während nach der mit den CLM-Daten berechneten Grundwasserneubildung (s. Abb. 28) keine signifikante Veränderung in den Grundwasserständen angenommen werden kann, sind die sich abzeichnenden höheren Schwankungsamplituden der Grundwasserstände auf die stärkeren Bedarfsschwankungen in der intensivierten Beregnung gegen Ende des Betrachtungszeitraums in Verbindung zu bringen.

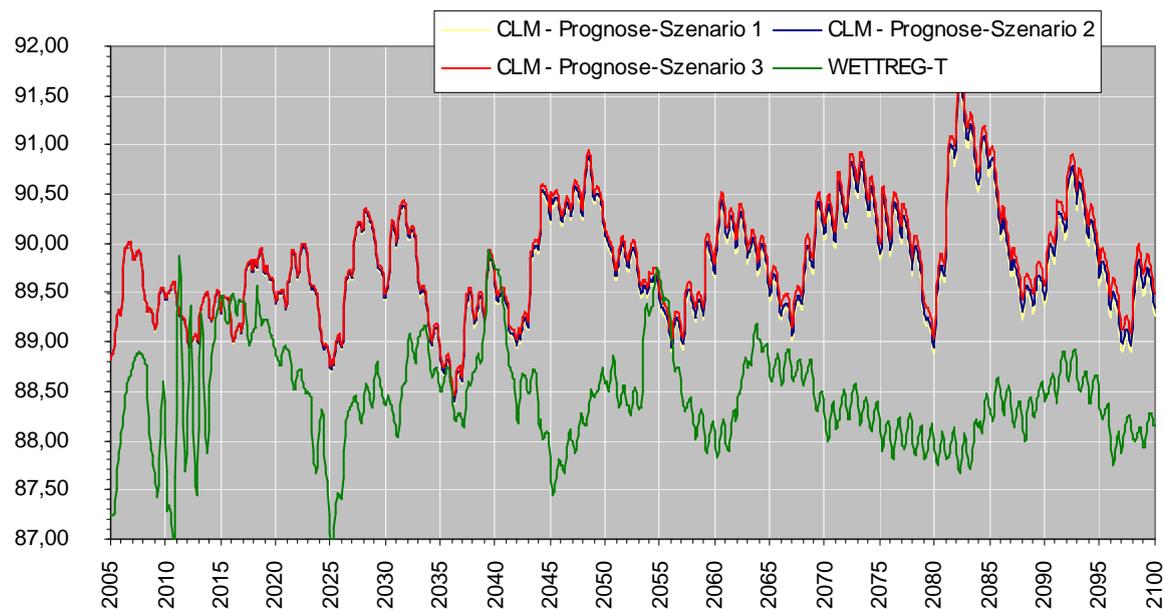
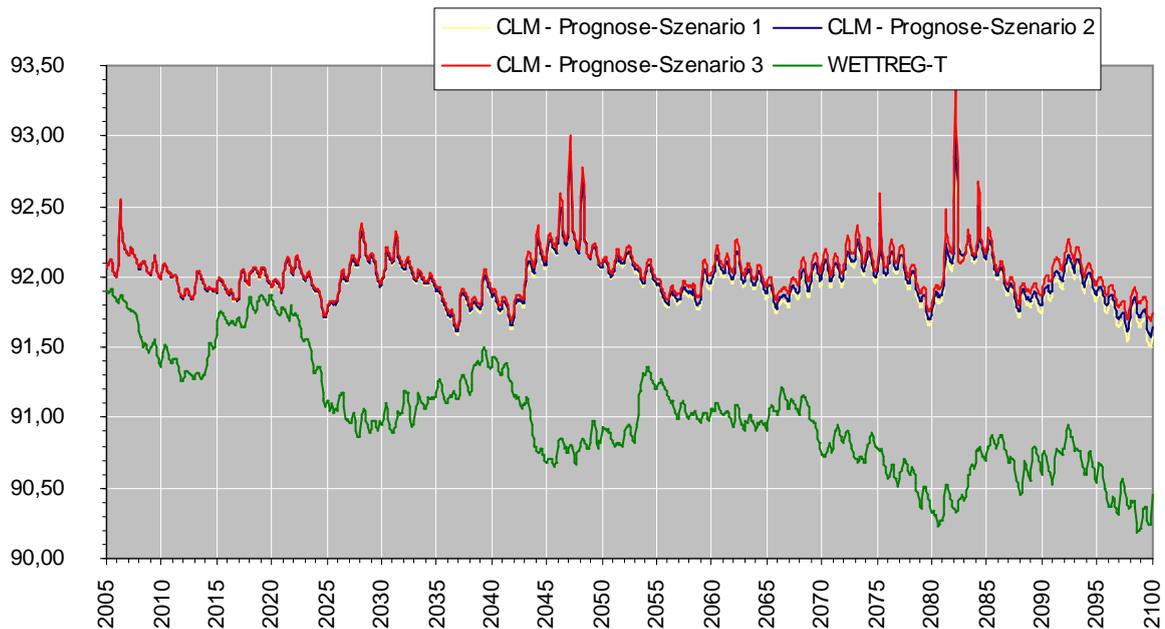


Abb. 64: Beispielhafte Ganglinien der Szenarienrechnungen

Aufgrund ihrer deutlich höheren Grundwasserneubildungsraten (vgl. Abb. 27 und Abb. 28) bewegen sich die resultierenden Grundwasserstände der CLM-Szenariosimulationen auf einem bis zu 1,20 m höheren Niveau als die des WETTREG-T-Laufes.

Abb. 65 zeigt flächenhaft die sich aus den Prognoseszenarien 2 und 3 zum Prognoseszenario 1 ergebenden Differenzen der Grundwasserstände für den Oktober 2099 bei etwa mittleren klimatischen Verhältnissen.

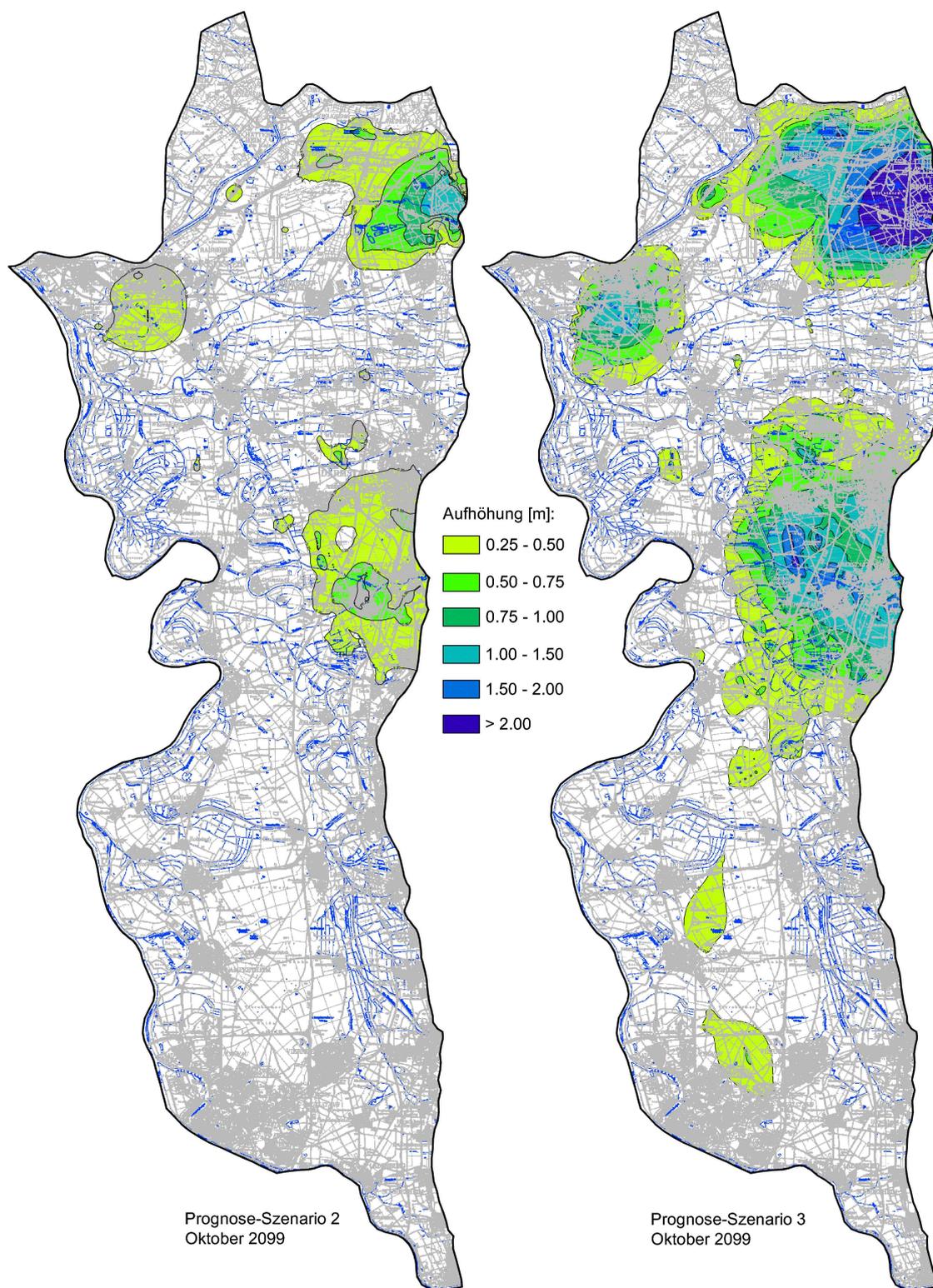


Abb. 65: Aufhöhung der Grundwasserstände im Oktober 2099 infolge der Prognose-Szenarien 2 und 3 gegenüber derzeitigen mittleren Grundwasserständen

Die Veränderungen in den Grundwasserständen durch rückläufige Grundwasserentnahmen für die öffentliche Wasserversorgung ist weniger flächenhaft ausgeprägt. Es ist ein deutlicher Bezug zu den größeren Wasserversorgern im Hessischen Ried zu erkennen. Im näheren Umfeld der größerer Wasserwerke beträgt die Aufhöhung teilweise bis zu 2-3 m.

Deutlich sind hierbei die unterschiedlichen Veränderungen infiltrationsgestützter Wasserwerke im Vergleich zu Wasserwerken ohne aktiver Bewirtschaftung des Grundwasserleiters zu erkennen. Bei infiltrationsgestützten Wasserwerken wird ein moderater Förderrückgang zu wesentlichen Teilen durch eine verringerte Infiltration kompensiert. In Szenario 2 sind im südlichen Modellgebiet mit mehreren infiltrationsgestützten Wasserwerken praktisch keine großflächig wirkenden Aufhöhungen der Grundwasserstände in Folge einer Förderreduzierung rechnerisch zu erkennen. Im mittleren Bereich mit dem Wasserwerk Eschollbrücken sind die Grundwasserstandsaufhöhungen vergleichsweise moderat.

In Szenario 3 mit einer Förderreduzierung auf 79 Mio. m³/a am Ende des Betrachtungszeitraumes in 2100 werden auch im südlichen Untersuchungsgebiet moderate Grundwasseranstiege berechnet. Bei den in Szenario 2 bereits identifizierten Aufhöhungsbereiche wirkt sich der Rückgang der Grundwasserförderung nochmals deutlich verstärkt aus. Bei der Bewertung von Fördermengenänderungen sind immer die erheblichen Einflüsse der hydrogeologischen Situation im Einflussbereich eines Wasserwerks zu berücksichtigen.

Gegen Ende des Betrachtungszeitraums ist in Szenario 3 mit Ausnahme von Trockenjahren die Infiltration nicht mehr erforderlich, damit die Richtwerte des Grundwasserbewirtschaftungsplanes überschritten werden.

In beiden Szenarien ist darüber hinaus zu beachten, dass die Beregnungstätigkeit auf das mittlere und das südliche Untersuchungsgebiet begrenzt ist. In diesen Bereichen wird die Aufhöhung der Grundwasserstände in Folge des geringeren Trinkwasserbedarfs durch die höheren Grundwasserentnahmen zu Beregnungszwecken zumindest teilweise kompensiert.

In Bezug auf schadbringende Grundwasserstände sind die möglichen Veränderungen räumlich differenziert zu betrachten. Das nordöstliche Untersuchungsgebiet ist von überwiegend großen Grundwasserflurabständen geprägt. Auch eine dauerhafte Aufhöhung der mittleren Grundwasserstände um ca. 2-3 m ist weitgehend raumverträglich (Abb. 66).

Wesentlich ungünstiger wirken sich hingegen die Grundwasserstandsänderungen infolge der Förderreduzierung im nordwestlichen Untersuchungsgebiet (Raum Rüsselsheim) aus. Dort sind verstärkt Vernässungsschäden in Folge einer verringerten Grundwasserförderung zur Trinkwasserversorgung zu erwarten. Vergleichbares gilt auch für Bereiche im mittleren Untersuchungsgebiet.

Die in Folge des Klimawandels intensivierte Beregnung mit größeren Bedarfsschwankungen wird im mittleren und südlichen Untersuchungsgebiet zu stärkeren Schwankungen in den Grundwasserständen führen. In witterungsbedingten Nassperioden mit entsprechend geringeren Grundwasserentnahmen zu Beregnungszwecken werden sich Rückgänge in der Grundförde-

zung für die Trinkwasserversorgung stärker als in Abb. 65 dargestellt auswirken und die Gefahr vor Vernässung in den dort vorhandenen Bereich mit geringen Flurabständen vergrößern.

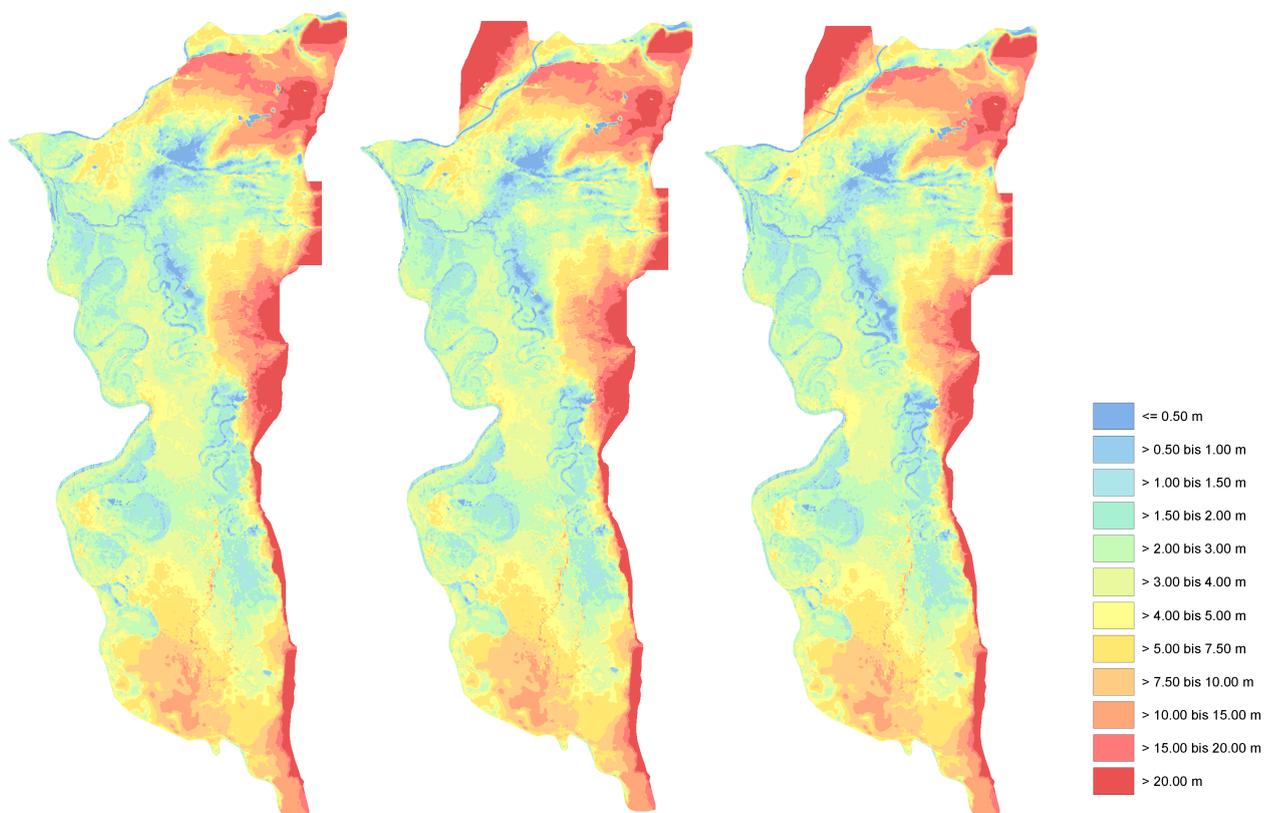


Abb. 66: Mittlere Flurabstände nach Grundwasserbewirtschaftungsplan, Szenario 2 (2099) und Szenario 3 (2099), von links nach rechts

9 Zukünftige Grundwasserbewirtschaftung

a) Entwicklung des Klimas im Untersuchungsgebiet

Die zukünftige Entwicklung des Klimas wird von der Konzentration der Treibhausgase beeinflusst, die vom demographischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technischen Wandel abhängt (anthropogener Einfluss). Unterschiedliche Annahmen in den genannten Feldern führen zu Emissions-Szenarien (SRES), die eine weltweit einheitliche Grundlage für die Beschreibung der zukünftigen Klimaentwicklung darstellen. Mit Hilfe globaler Klimamodelle werden aus diesen Szenarien die Wirkungen der Treibhausgasemissionen auf das Klimasystem quantifiziert (s. Abb. 41).

Für räumlich differenzierte, d.h. Aussagen auf regionaler Maßstabsebene, ist wegen der groben Auflösung der Globalmodelle der Einsatz von Regionalmodellen erforderlich, mit denen die Klimaänderungen im kleineren Maßstab berechnet werden. Im räumlichen Mittel ähneln die Berechnungsergebnisse denen des Globalmodells.

Bei prozessbasierten Modellen wie dem CLM wird unter Berücksichtigung der globalen Informationen an den Modellrändern bei feinerer räumlicher Auflösung der Strukturen innerhalb des Gebiets (Berge, Vegetation usw.) eine kleinräumigere Berechnung aller relevanten Prozesse für das Modellgebiet durchgeführt. Bei statistischen Regionalisierungsansätzen wie STAR und WETTREG werden für ausgewählte Messstellen Beobachtungsreihen der Vergangenheit mit Methoden der Statistik analysiert und mittels der gewonnenen statistischen Zusammenhänge unter Aufprägung des Klimaänderungssignals der Globalmodelle neue Zeitreihen für ausgewählte Klimagrößen innerhalb des Regionalmodells erzeugt.

Die derzeitigen Beobachtungen lassen Entwicklungen mit stärkeren Ausprägungen des Klimawandels - wie das im Rahmen dieses Vorhabens als Schwerpunkt untersuchte A1B-Szenario (rasches wirtschaftliches Wachstum, Anstieg der Weltbevölkerung bis Mitte des 21. Jahrhunderts, rasche Einführung effizienter Technologien) - wahrscheinlicher erscheinen als die moderateren Szenarien. Für das Untersuchungsgebiet sagen die betrachteten Regionalmodelle CLM, STAR und WETTREG für das A1B-Szenario übereinstimmend eine geringe Veränderung der Jahresniederschläge, allerdings mit einer deutlichen Umverteilung von Sommer- hin zu Winter-niederschlägen, voraus. Ein entsprechender Trend ist im Untersuchungsgebiet bereits in den letzten Jahrzehnten aus den Beobachtungsdaten erkennbar. Gekoppelt an steigende Temperaturen steigt ganzjährig auch die potentielle Verdunstung an.

b) Grundwasserneubildung und Grundwasserstände

Hinsichtlich der Entwicklung der Grundwasserneubildung konnte keine gerichtete Tendenz ermittelt werden. Obwohl die klimatische Wasserbilanz bei allen drei untersuchten Regionalmodellen im Trend negativ ist, bleiben die Grundwasserneubildungsraten für das A1B-Szenario in den Modellrechnungen sowohl mit dem konzeptionellen BFI-Ansatz als auch in den prozessbasierten Berechnungen im Mittel stabil. Der Klimawandel hat damit keinen signifikanten direkten Einfluss auf die mittleren Grundwasserstände und auf das mittlere Dargebot. Die projizierten

Grundwasserneubildungsraten bewegen sich, zumindest bis zum Jahr 2050, im gleichen Korridor des Vergleichszeitraums.

In Folge der Umverteilung von Sommer- hin zu Winterniederschlägen nehmen jedoch die saisonalen Grundwasserstandsschwankungen zu. Entscheidend für die Nutzungskonflikte sind aber die Abfolge mehrerer Nass- oder Trockenjahre, die auch zukünftig zu Grundwasserhöchst- und -tiefstständen führen werden. Hierzu zeigen die regionalen Klimamodelle unterschiedliche Entwicklungen auf. Nach WETTREG ist eher davon auszugehen, dass die Intensität abnehmen wird. Aus den CLM-Berechnungen liegen hingegen Hinweise vor, dass gegen Ende des Betrachtungszeitraums Nass- und Trockenperioden ausgeprägter verlaufen. Auf Grund der physikalisch begründeten Ansätze des CLM ist davon auszugehen, dass derartige Entwicklung mit prozessbasierten Modellen eher vorhergesagt werden können. Das STAR-Modell ist wegen des kürzeren Betrachtungszeitraums nur bedingt diesbezüglich auswertbar.

c) Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft

Sowohl durch die Umverlagerung der Niederschläge innerhalb eines Jahres als auch durch den Temperaturanstieg (höhere Verdunstung, längere Vegetationsperioden, usw.) wird der Zusatzwasserbedarf in der Landwirtschaft deutlich steigen. Derzeit werden nach den Datenerhebungen im Hessischen Ried im Mittel ca. 20 Mio. m³/a an zusätzlichen Bewässerungsgaben aufgebracht. Die theoretischen Berechnungen ergeben hierzu übereinstimmend einen Bedarf von ca. 25 Mio. m³/a bei einer optimalen Bewässerungssteuerung. Nach den Modellrechnungen wird sich ausschließlich auf Grund des klimatischen Wandels der Zusatzwasserbedarf in einem Zeitraum von ca. 50 Jahren verdoppeln. Dies bedeutet, dass die bisher beobachteten Steigerungsraten (10-12 mm/Dekade) auch für die nächsten Jahrzehnte anzusetzen sind. Weitere Einflussgrößen wie die Verlängerung der Vegetationsperioden, mögliche Anpassungen der angebauten Früchte an Markterfordernisse, die Vorzüglichkeit des Raumes Hessisches Ried zur Belieferung naher Metropolregionen, die Beregnungsbedürftigkeit weiterer Kulturen, usw. blieben bei den Betrachtungen u.a. wegen ihres teilweise spekulativen Charakters unberücksichtigt.

Bereits heute bereitet es einigen Beregnungsverbänden wegen des unzureichenden Ausbaugrads der technischen Anlagen Schwierigkeiten, den mittleren Bedarf zu decken. Nur noch in Einzelfällen kann heute der Spitzenbedarf mit den vorhandenen Anlagen vollständig gedeckt werden. Eine derartige Steigerung im Bewässerungsumfang setzt daher einen massiven Ausbau der Beregnungsanlagen voraus. Es wird u.a. erwartet, dass eine Erweiterung ortsfester Anlagen (Rohrberegnung) unumgänglich ist, um zur richtigen Zeit die nötigen Wassergaben zu verabreichen. Die erkennbaren Einsparpotentiale, z.B. durch optimierte Bewässerungssteuerung und Umstellung auf Mikrobewässerung, können den durch den Klimawandel bedingten Anstieg des Zusatzwasserbedarfs bei weitem nicht kompensieren. Sie tragen aber zum effektiveren Umgang mit Bewässerungswasser bei. Prognosemodelle, die den jeweiligen Wasserbedarf einer Kultur unter Berücksichtigung der herrschenden Witterung ermitteln, werden in Zukunft daher zunehmend an Bedeutung gewinnen.

d) Trinkwasserversorgung bei Verbundstrukturen (Hessisches Ried)

Bei der Trinkwasserversorgung wirkt sich auf Grund der Struktur des Trinkwasserverbrauchs der Klimawandel auf den Jahresverbrauch nicht entscheidend aus. Im Hessischen Ried führen Trockenjahre gegenüber mittleren Jahren zu einem Mehrverbrauch an Trinkwasser von weniger als 10%. Es wird allerdings klimatisch bedingt (trockenere, heißere Sommer) eine Trendumkehr zu einem wieder ansteigenden Spitzenbedarf erwartet.

Bevölkerungsentwicklung und Verbraucherverhalten werden auch weiterhin der mit Abstand wichtigste Einflussfaktor auf den Wasserverbrauch bleiben. Die vorliegenden Bevölkerungsprognosen weisen bis 2050 tendenziell stagnierende bis leicht rückläufige Zahlen aus. Die vorliegenden Kenntnisse für die Struktur und Entwicklung des Pro-Kopf-Verbrauchs lassen für mittelfristige Zeiträume ebenfalls stagnierende bis leicht rückläufige Entwicklungen erwarten. Unsicherheiten bei der langfristigen Entwicklung des Trinkwasserbedarfs bis zum Ende des Prognosehorizontes 2100 betreffen sowohl die Bevölkerungsentwicklung als auch den Pro-Kopf-Verbrauch. Die UN erwarten für Mitteleuropa mittel- bis langfristig einen Anstieg der Geburtenrate auf bestandserhaltende Werte. Zugleich wird ein Anstieg der Weltbevölkerung in eine Größenordnung von 9 Milliarden Menschen in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts erwartet. Langfristig ist mit Sicherheit auszuschließen, dass sich die Bevölkerungsentwicklung in Südhessen mit den Metropolregionen Rhein-Main und Rhein-Neckar von der weltweiten Entwicklung abkoppelt. Unsicherheiten bei der langfristigen Entwicklung des Pro-Kopf-Bedarfs an Trinkwasser sind v.a. an eine weitgehende Umsetzung kreislaufwirtschaftlicher Ansätze in der Siedlungswasserwirtschaft (Ecosan) gebunden. Bei einer weitgehenden Umsetzung derartiger Konzepte ist von grundlegenden Auswirkungen auf die Struktur der öffentlichen Wasserversorgung auszugehen.

Der Flächenverbrauch wird vor allem im Umfeld der großen Städte weiterhin zu qualitativ bedingten Dargebotseinschränkungen führen. Die hohe Nutzungsdichte im Rhein-Main-Raum und entsprechende konkurrierende Ansprüche an die Flächennutzung im Allgemeinen und an die Grundwasserstände im Besonderen werden auch weiterhin zu entsprechenden politischen Abwägungsprozessen führen.

Abzuwarten bleibt schließlich und insbesondere auch die Entwicklung der Wasserversorgungsstrukturen im Untersuchungsraum und in den über den technischen Leitungsverbund angeschlossenen Räumen, also vor allem Frankfurt, Wiesbaden und dem Taunus, aber auch darüber hinaus bis in die angrenzenden Bundesländer. Maßgebliche Einflussfaktoren werden hier neben der Bevölkerungsentwicklung im zentralen Teil des Rhein-Main-Raums das nutzbare Grundwasserdargebot vor dem Hintergrund der qualitativen und quantitativen Gefährdungssituation sowie auch die im europäischen Kontext über die diversen Richtlinien vorgegebene Umsetzung von wasserwirtschaftlichen (z.B. EU-Wasserrahmenrichtlinie) und naturschutzfachlichen (z.B. FFH-Richtlinie) Zielen sein.

e) Grundwasserbewirtschaftung

Im Hessischen Ried stehen derzeit einem mittleren Grundwasserdargebot (i.w. Grundwasserneubildung) von rund 180 Mio. m³/a relativ konstante Grundwasserentnahmen zur öffentlichen Wasserversorgung und für Brauchwasser (insgesamt ca. 110 Mio. m³/a) sowie variable Entnahmen von im Mittel rund 20 Mio. m³/a zu Bewässerungszwecken gegenüber. Hieraus wird die herausragende Bedeutung der Grundwasserentnahmen für die öffentliche Wasserversorgung bei der Grundwasserbewirtschaftung deutlich. Um die dort realistischen Grundtendenzen bei der Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels zu berücksichtigen, wurden 3 Szenarien bei der Entwicklung der öffentlichen Wasserversorgung und des Brauchwassers entwickelt.

Bei einem auch zukünftig konstanten Bedarf in Haushalten, Gewerbe und Industrie (oberes Szenario 1) steht einem näherungsweise konstanten Grundwasserdargebot ein weiterhin zunehmender Beregnungsbedarf gegenüber. Im nördlichen Untersuchungsgebiet mit einem relativ geringen Anteil landwirtschaftlicher Fläche werden sich die Bewirtschaftungsverhältnisse nicht grundlegend verändern. Im mittleren und südlichen Hessischen Ried ist der rechnerische Mehrbedarf in einer Größenordnung von 20 Mio. ca. ab Mitte des 21. Jahrhunderts durch entsprechende natürliche Dargebotsreserven nicht abgedeckt. Eine Kompensation durch die vorhandenen Infiltrationsanlagen erscheint nur eingeschränkt möglich. Zum einen fehlt in vielen Fällen der räumliche Bezug der Infiltrationsanlagen zu den landwirtschaftlichen Flächen. Insbesondere eine Steuerung der Grundwasserstände ist nur sehr eingeschränkt möglich. Zum anderen wird der Zeitraum für Infiltrationsmaßnahmen kürzer, da die Rheinwasseraufbereitung durch die durch den Klimawandel verlängerte Vegetationsperiode mit der Beregnung belegt ist und Wasser zu Infiltrationszwecken nur in verringertem Umfang zur Verfügung stehen wird. Zudem ist in den Wintermonaten in Folge der zukünftig saisonal größeren Grundwasserstandsschwankungen die Vernässungsgefahr zu berücksichtigen. Die Sicherung verträglicher Grundwasserstände unter feuchteabhängigen Biotopen wird unter Wahrung der Qualität der Grundwasserressourcen damit weiterhin eine zentrale Aufgabe bei der Grundwasserbewirtschaftung sein. Eine räumliche Abgrenzung der Konfliktbereiche ist jedoch nicht belastbar möglich, da u.a. die Entwicklung der Beregnung auf den einzelnen Ackerflächen offen bleiben muss. Um auch zukünftig das Grundwasser nachhaltig zu bewirtschaften, ist bei stabilem Trinkwasserbedarf eine Limitierung der Grundwasserentnahmen zu Bewässerungszwecken erforderlich, sofern nicht das nutzbare Grundwasserdargebot z.B. durch Infiltrationsmaßnahmen erhöht wird.

Wenn in der Wasserversorgung die derzeitigen Verbrauchsstrukturen weitgehend fortgeschrieben werden, ist auf Grund der Bevölkerungsprognosen bis 2100 von einem moderaten Rückgang der Grundwasserentnahmen zu Trink- und Brauchwasserzwecken von rund 15 % oder 15 Mio. m³ auszugehen (Szenario 2). Im Mittel erscheint dann in Teilbereichen des Hessischen Rieds ein Mengenausgleich in der Grundwasserförderung zwischen Trinkwasserversorgung und Landwirtschaft möglich. Im mittleren und südlichen Hessischen Ried wird die Infiltration weiterhin das entscheidende Instrumentarium bleiben, um verträgliche Grundwasserstände anzusteuern. Dennoch werden die Herausforderungen in der Grundwasserbewirtschaftung wach-

sen, da die Veränderungen in der Grundwasserbewirtschaftung aus dem nachfolgend beschriebenen Szenario 3 in abgeschwächter Form bereits bei einer mittleren Entwicklung gelten.

In Szenario 3 wird von einem deutlichen Verbrauchsrückgang in der Trinkwasserversorgung ausgegangen. Die Grundwasserentnahmen zu Trink- und Brauchwasserzwecken und der Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft erreichen gegen Ende des Betrachtungszeitraums im Mittel jeweils eine Größenordnung von rund 50 Mio. m³/a. Bei Grundwasserentnahmen in derartiger Höhe ist die Infiltration nur noch in Einzeljahren zur Einhaltung der Richtwerte des Grundwasserbewirtschaftungsplans erforderlich. Die technischen Anforderungen durch länger andauernde Stillstandszeiten an die Infiltrationsanlagen sind erheblich und ein wirtschaftlicher Betrieb ist nicht mehr gegeben. Teilweise wird in Bereichen größerer Wasserwerke auch in Abhängigkeit von den hydrogeologischen Verhältnissen ein deutlicher Anstieg der mittleren Grundwasserstände von bis zu wenigen Metern erwartet. Ein derartiger Anstieg kann wie im nordöstlichen Raum Langen/Neu-Isenburg/Dreieich bei großen Grundwasserflurabständen durchaus nutzungsverträglich sein.

In weiten Bereichen des Hessischen Rieds wird die Gefahr von Vernässungen in diesem Szenario allerdings deutlich ansteigen. Anders als die öffentliche Wasserversorgung kennzeichnet die landwirtschaftliche Beregnung witterungsabhängig ausgeprägte Bedarfsschwankungen, die nach den Modellrechnungen durchaus Abweichungen von 20 Mio. m³/a vom langjährigen Mittel betragen können. In Nassjahren mit hoher Grundwasserneubildung ist der Beregnungsbedarf unterdurchschnittlich, während in Trockenjahren bei verminderter Grundwasserneubildung der erhöhte Beregnungsbedarf zusätzlich die Grundwasserstände überdurchschnittlich absenkt. Darüber hinaus ist in diesen Jahren auch ein höherer Spitzenwasserbedarf in der Trinkwasserversorgung abzudecken.

Um unterschiedlichen Entwicklungen in den Grundwasserständen im Untersuchungsgebiet begegnen zu können, eignet sich grundsätzlich der Ausbau des Leitungsverbundes. Allerdings sind die Funktionen der einzelnen Wasserwerke als Spitzen- und/oder Grundlastwasserwerk im Verbundbetrieb festzulegen und die entsprechenden technischen Voraussetzungen zu schaffen. Im Verbundbetrieb verlängern sich erfahrungsgemäß die Zeiträume relativ hoher Belastungen, während in Schwachlastphasen einzelne Wasserwerke außer Betrieb genommen werden müssen. Zudem schränkt die Entfernung zwischen den Gewinnungsanlagen und den zu schützenden Objekten und Flächen eine zielgerichtete Steuerung der Grundwasserstände in Vernässungsgebieten ein.

Um den Anstieg der Grundwasserstände auf ein festgelegtes Maß zu begrenzen, wird daher der Einsatz speziell auf die Begrenzung des Grundwasseranstiegs konzipierter Anlagen unumgänglich sein. Solche Anlagen sind nur saisonal und teilweise auch nur in Nassperioden in Betrieb. Die Nutzung der Anlagen zu verschiedenen Zwecken (z.B. auch zur Bewässerung) ist anzustreben, ist aber u.a. aus Qualitätsgründen nicht überall möglich. Die Ableitung in Fließgewässer wird somit der Regelfall sein, setzt jedoch hinreichende Abflussleistungen der Vorfluter voraus.

Zur Entwässerung vernässungsgefährdeter landwirtschaftlicher Flächen wird oftmals das Grabensystem zu ertüchtigen sein. Durch die Grundwasserentnahmen werden derzeit die Grundwasserstände auf ein für die Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen günstiges Maß abgesenkt und die Entwässerungsleistung vorhandener Gräben wird nur teilweise in Anspruch genommen. In Teilbereichen wird möglicherweise ein Ausbau erforderlich.

Zur nachhaltigen Grundwassernutzung im Hessische Ried trat 1999 der Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried in Kraft. Er wurde im Sinne des Wasserhaushaltsgesetzes als Instrument der wasserwirtschaftlichen Fachplanung aufgestellt und ist als ermessenslenkende Verwaltungsvorschrift qualifiziert. Bei Planungs- und Zulassungsverfahren sind seine Festsetzungen für die Wasserbehörden bindend. Die maßgeblichen Zielsetzungen sind „die dauerhafte Sicherstellung der örtlichen und regionalen Wasserversorgung der Bevölkerung und der Wirtschaft, ein nachhaltiger Grundwasserschutz und eine rationelle Nutzung der vorhandenen Ressourcen unter Berücksichtigung der naturräumlichen und nutzungsspezifischen Anforderungen an den Grundwasserhaushalt, des örtlichen und regionalen Wasserbedarfs der Bevölkerung und der Wirtschaft sowie der vorhandenen und geplanten verbundwirksamen Anlagen und Einrichtungen“ (Regierungspräsidium Darmstadt 1999: Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried).

Der Grundwasserbewirtschaftungsplan umfasst zwei Regelungsstatbestände:

1. Richtwerte und untere Grenzgrundwasserstände an ausgewählten Grundwassermessstellen (Referenzmessstellen)

Die Werte ergeben sich aus der Abwägung teilweise widersprüchlicher naturräumlicher und nutzungsspezifischer Anforderungen an den Grundwasserhaushalt unter Berücksichtigung der örtlichen und regionalen Wasserversorgung. Richtwerte und untere Grenzwerte werden auf der Grundlage der Ergebnisse aus dem Grundwassermonitoring und bei geänderten Rahmenbedingungen fortgeschrieben.

2. Flankierende Maßnahmen der Umsetzung mit den Schwerpunkten

- Gewässerschutz und Grundwasserüberwachung,
- örtliche und betriebliche Wasserversorgungskonzepte,
- Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher Belange in der Regional- und Bauleitplanung,
- integriertes regionales Ressourcenmanagement,
- nutzungsspezifisches und naturräumliches Monitoring,
- Berücksichtigung wasserwirtschaftlicher Zielsetzungen bei der räumlichen Nutzung.

In der Praxis hat der Grundwasserbewirtschaftungsplan seine Wirkung insbesondere bei niedrigen Grundwasserständen entfaltet. In Zulassungsverfahren nach dessen Inkrafttreten wurde die genehmigte Grundwasserentnahme häufig an die Einhaltung von Mindestgrundwasserständen gekoppelt. Durch Infiltrationsmaßnahmen und Steuerung der Grundwasserentnahmen ist sicherzustellen, dass die unteren Grenzgrundwasserstände nicht unterschritten werden.

Der bisherige inhaltliche Schwerpunkt des Grundwasserbewirtschaftungsplans lag auf der Sicherstellung von Mindestgrundwasserständen. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass der Grundwasserbewirtschaftungsplan nur vereinzelt Elemente enthält (z.B. Abschalten der Infiltration), die einen Grundwasseranstieg in witterungsbedingten Nassperioden begrenzen. Insbesondere bei den flankierenden Maßnahmen als zweite Gruppe der Regelungsstatbestände sind ggfs. als Folge des Klimawandels Ergänzungen vorzunehmen, die auch die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Begrenzung des Grundwasseranstiegs sicherstellen (z.B. die Sicherstellung der Vorflut in Gewässern zur Einleitung von Grundwasser aus Maßnahmen zur Begrenzung des Grundwasseranstiegs).

f) Dezentrale Trinkwasserversorgung (Odenwald)

Schließlich sind durch den Klimawandel in zukünftig längeren und intensiveren Trockenperioden bei dezentralen Strukturen (vor allem in den Mittelgebirgen) mit Trinkwasserversorgung aus Quellen bzw. Flachbrunnen in Talauen Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit zu erwarten.

Bei der Anwendung einer WETTREG-T-Realisation, die trockene Verhältnisse innerhalb der WETTREG-Realisationen approximiert, stellte sich heraus, dass bei den Odenwaldquellen die Jahresminima der Quellschüttungen merklich zurückgehen und über größere Zeiträume nur sehr geringe Quellschüttungen ausgewiesen werden. Diese geringen Schüttmengen wären nicht mehr in der Lage eine ausreichende Wasserversorgung sicherzustellen bzw. das Trockenfallen von Waldbächen zu verhindern. Zukünftig sollte die Beobachtung der Mindestschüttmengen intensiviert werden, um frühzeitig auf mögliche Veränderungen reagieren zu können.

Die Analyse der prognostizierten Quellschüttungen ergab bei keiner Quelle mit Hilfe der WETTREG-T-Realisation 7 eine statistisch abgesicherten Trend, wenngleich eine leicht abnehmende Tendenz hinsichtlich der Quellschüttungen bei allen Quellen zu beobachten war. Eine Tendenz zu geringeren Jahresminima der Quellschüttungen ist jedoch erkennbar.

Die zu erwartenden Schwankungen in der Wasserführung von Quellen und Bächen werden aber zu Diskussionen über deren Ursachen führen und können nach entsprechender Abwägung auch ökologisch begründete Dargebotsbeschränkungen (Mindestwasserführung) als Ergebnis haben.

Zum Ausgleich resultierender Versorgungsdefizite im Odenwald bietet sich ein Ausbau des technischen Leitungsverbundes mit dem Ziel einer Belieferung aus den infiltrationsgestützten Wasserwerken vor allem aus dem Hessischen Ried an. Entsprechende Strukturen sind in Teilbereichen des Taunus bereits etabliert. Beim Aufbau von Verbundstrukturen in nachfrage-schwachen Gebieten ist allerdings zu beachten, dass diese oftmals nur bei einem Vollanschluss rentabel wären und der aus Gründen der Wasserqualität anzustrebende tägliche Austausch des Leitungsinhaltes den Wasserbedarf in den Versorgungsgebieten übersteigen kann.

g) Schlussbemerkungen

Die Untersuchungen zu den Auswirkungen auf den quantitativen Boden- und Grundwasserhaushalt in Südhessen basieren auf dem Kenntnisstand des globalen Klimamodells ECHAM 5. Beim Übergang von ECHAM 4 zu ECHAM 5 ergaben sich für das Untersuchungsgebiet teilweise deutliche Veränderungen in den Klimadaten. Ähnliches ist auch zukünftig bei weiter verbessertem Kenntnisstand zur Klimamodellierung zu erwarten. Die Langzeit-Kontinuumssimulation des Boden- und Grundwasserhaushalts, z.B. für die Prognose von Grundwasserständen, stellt an die Klimamodellierung hohe Genauigkeitsansprüche, wenn die klimatische Wasserbilanz des Untersuchungsgebiets in etwa ausgeglichen ist.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die heute verfügbaren Regionalmodelle nicht für alle Fragestellungen hinreichend belastbare Zeitreihen für Niederschläge und für die Basisdaten zur Verdunstungsberechnung als Berechnungsergebnisse bereitstellen. So muss aufgrund der derzeitigen Bandbreite der entsprechenden Eingangsdaten beispielsweise offen bleiben, inwieweit der Klimawandel tatsächlich zu längeren und/oder ausgeprägteren Nass-/Trockenperioden mit den zugehörigen extremen Grundwasserständen führen wird.

Die im Rahmen des Vorhabens entwickelten Methoden und Modellwerkzeuge zur Beschreibung des Boden- und Grundwasserhaushalts haben sich jedoch als prognosefähig erwiesen, wie die Modellläufe für den Beobachtungszeitraum zeigen. Sie zeigen die Trends der Grundwasserstandsentwicklung, wie sie sich auf Grundlage der Eingangsdaten aus den Klimamodellen ergeben, zuverlässig und belastbar auf. Mit der Verfügbarkeit verbesserter regionaler Klimaszenarien können die durch dieses Vorhaben nun bereitstehenden Modellwerkzeuge für die Beantwortung der noch offenen Fragestellungen eingesetzt werden. Ihre Anwendung ist ohne Einschränkung auch auf andere Regionen übertragbar.

Literatur

- ATV-DVWK-M 504 2002: Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden.
- Armbruster, V. 2002: Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg.- Freiburger Schriften zur Hydrologie 17: 141 S.; Freiburg/Brsg.
- Berthold, G., Hergesell, M. 2005: Flächendifferenzierte Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung in Hessen. In: Hess. Landesamt für Umwelt und Geologie: Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen INKLIM 2012, Projektbaustein II: Klimawandel und Klimafolgen in Hessen, Abschlussbericht: 16-22.
- Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK) e.V. 2003: Nutzungskonflikte bei hohen Grundwasserständen – Lösungsansätze. Statusbericht 1/2003.
- Dobler, A. und Ahrens, B. 1998: Precipitation by a regional climate model an dbias correction in Europe and South Asia. Meteorologische Zeitschrift, Vol17, No.4, 499-509, Stuttgart.
- Dommermuth, H. & Trampf, W. 1991: Die Verdunstung in der Bundesrepublik 1951 bis 1980 – Teil 1, 2 und 3. – Deutscher Wetterdienst; Offenbach.
- Gerdes, H. 2002: Nutzungskonflikte bei ansteigenden Grundwasserständen – Lösungsansätze anhand von Fallbeispielen, Schriftenreihe WAR, TU Darmstadt Nr. 164, „Grundwasserproblematik im Hessischen Ried: Eine unlösbare Aufgabe?“
- Gerdes, H., Kämpf, M., Ergh, M., Euler, C. 2010: Grundwasserbewirtschaftung im Zeichen des Klimawandels, 24. Trinkwasserkolloquium am 25. Februar 2010, Grundwasser und Grundwasserleiter – Nutzungskonflikte und Lösungsansätze – Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 201.
- Grossmann, J. 1995: Umsetzung eines Modells zur flächendifferenzierten Bestimmung der Grundwasserneubildung mit einem Geo-Informationssystem. – Fachliche Berichte HWW 95/1: 3-15; Hamburg.
- Grossmann, J. 1997: Vergleich von Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung für große Einzugsgebiete. – gfw-Wasser/Abwasser 138: 296-303; München.
- Grossmann, J. 1998: Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag für große Einzugsgebiete. – gfw-Wasser/Abwasser 139: 14-23; München.
- Grossmann, J. 2001: Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag, Beschreibung eines Verfahrens. Dokumentation der Basisdaten und Parameter. – unveröffentlicht, 33 S., Hamburg.
- Herber, W., Wagner, H., Roth, U. 2007: Die demographische Entwicklung als Grundlage für den Regionalen Wasserbedarfsnachweis der Hessenwasser GmbH & Co. KG. gfw-Wasser/Abwasser 148, Nr. 10, S. 684-690.

Herber, W., Wagner, H., Roth, U. 2008: Der Regionale Wasserbedarfsnachweis der Hessenwasser GmbH & Co. KG. gwf-Wasser/Abwasser 149, Nr. 10, S. 773-779.

Hergesell, M., Berthold, G. 2005: Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch die Regionalisierung des Baseflow Index (BFI). Jahresbericht 2004 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 47-66; Wiesbaden.

Hessenwasser GmbH & Co. KG 2009a: Prognose des Grundwasserhaushalts im Hessischen Ried bis 2100 – Heft 1: Bevölkerungsprognose 2100. Dr.-Ing. Ulrich Roth, Bad Ems.

Hessenwasser GmbH & Co. KG 2009b: Prognose des Grundwasserhaushalts im Hessischen Ried bis 2100 – Heft 2: Prognose des Pro-Kopf-Bedarfs 2100. Dr.-Ing. Ulrich Roth, Bad Ems.

Hessenwasser GmbH & Co. KG 2009c: Prognose des Grundwasserhaushalts im Hessischen Ried bis 2100 – Heft 3: Wasserbedarfsprognose 2100. Dr.-Ing. Ulrich Roth, Bad Ems.

Hessische Landesanstalt für Umwelt 1996: Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Hessischen Ried, Wiesbaden.

Kämpf, M., Gerdes, H., Mikat, H., Berthold, G., Hergesell, M., Roth, U. 2008: Auswirkungen des Klimawandels auf eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung, DVGW energie | wasserpraxis, Heft 1, S. 49-53

Krahe, P., Nilson, E., Carambia, M., Maurer, T., Tomassini, L., Bülow, K., Jacob, D & H Moser 2009: Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles für das Rheingebiet. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 5/2009.

Kunkel R., Wendland F. 2009: Aufbau eines konzeptionellen hydrogeologischen Modells für die zeitliche Bewertung von Maßnahmenprogrammen in Hessen unter Einbeziehung der Monitoring – Messnetze der EG – Wasserrahmenrichtlinie; Endbericht, in der Veröffentlichung befindlich.

Mikat, H., Wagner, H., Roth, U. 2009: Die Bevölkerungsentwicklung in Südhessen bis 2100 – Grundlage für eine langfristige Wasserbedarfsprognose im Rahmen eines Klimafolgen-Projektes. gwf-Wasser/Abwasser 150, Nr. 2-3, S. 182-189.

Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz (Hrsg.) 2007: Grundwasserbericht 2007, 86 S., Mainz.

Morhard, A. 2010: Simulation des Bodenwasserhaushalts und Ermittlung der flächenhaften Grundwasserneubildung auf Grundlage der regionalen WETTREG Klimaszenarien für die Länder Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz. Unveröffentlichtes Bericht der HydroS Consult GmbH im Auftrag des Kooperationsvorhabens KLIWA, 142 S., Freiburg/Brsg.

Regierungspräsidium Darmstadt 1999: Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried.

Richter, D. 1995: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194: 93 S., Offenbach.

Roth, U. 1998: Bestimmungsfaktoren für Wasserbedarfsprognosen. gwf-Wasser/Abwasser, 139. Jg., Heft 2, S. 63-69.

Sevruk, B. 1989: Reliability of precipitation measurement, Proc. International Workshop on Precipitation Measurement (edited by B. Sevruk), St. Moritz, Switzerland, WMO/IAHS/ETH, pp. 13-19.

Spekat, A., Kreienkamp, F., Enke, W. 2007: Erstellung von transienten Szenarios für Hessen – Endbericht, Potsdam.

WRM (Hrsg.) 1994: Wasserbilanz Rhein-Main 1990-2010 – Fortschreibung 1991 bis 1993. Frankfurt/Wiesbaden/Einhausen.

WRM (Hrsg.) 1998/1999/2005: Leitungsverbund Wasserversorgung Rhein-Main. Studie. Groß-Gerau, 3 Hefte.

Wessolek, G. 1992: Untersuchungen zum Wasserhaushalt im UVF des Umlandverbandes Frankfurt.- Unveröff. Studie im Auftrag des UVF: 40 S.; Berlin.