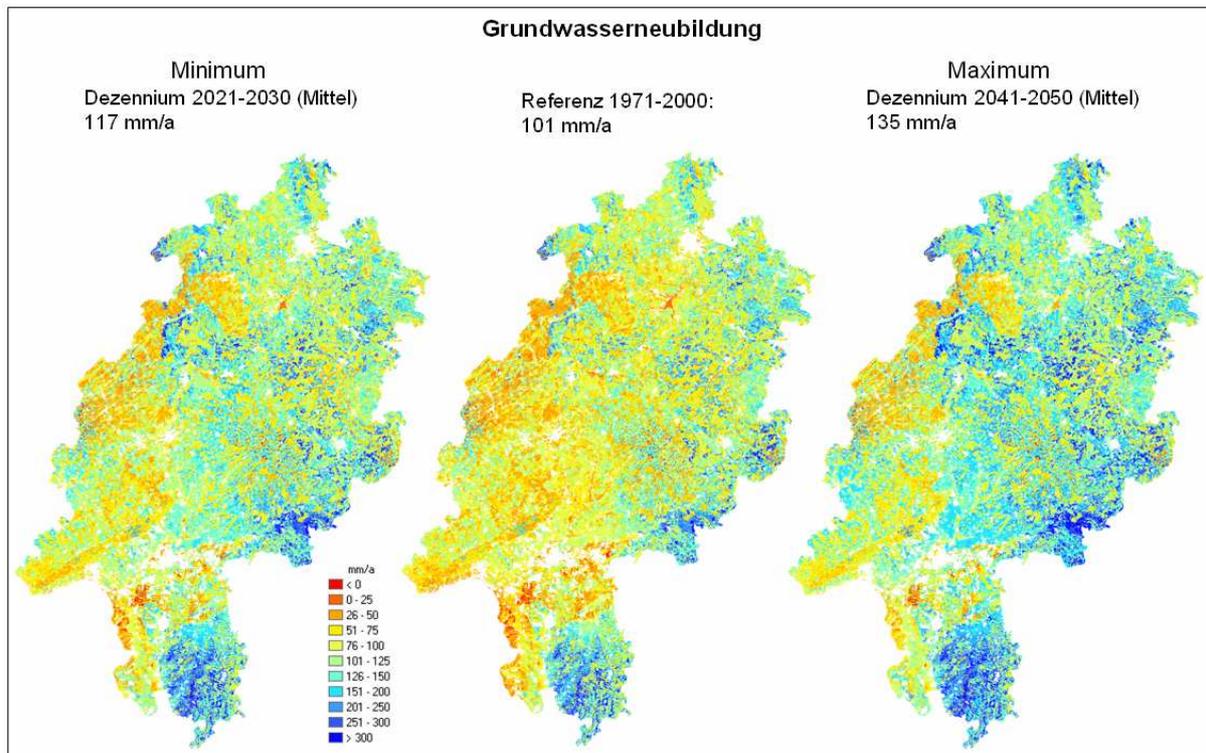


Flächendifferenzierte Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung in Hessen

Abschlussbericht für den Bereich Grundwasser



Bearbeiter:

Dr. Georg Berthold (Projektleitung)
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Mario Hergesell (Auftragnehmer)
GIS-Service GmbH

Wiesbaden, September 2005

Einleitung

Ziel des hier beschriebenen Teilprojektes ist die Untersuchung der zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels in Hessen auf den Grundwasserhaushalt.

Im Vordergrund der Untersuchungen stehen die Ermittlung der Spannbreiten der infolge von Klimaprojektionen zu erwartenden Änderung bezüglich der Grundwasserneubildung sowie die regional unterschiedlichen Verteilungsmuster der geänderten Grundwasserneubildung.

Regional differenzierte Grundwasserneubildungsraten dienen vor allem zur Abschätzung der erschließbaren Grundwassermengen und sind eine Voraussetzung für die nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Grundwasserressourcen. Regional differenzierte Kenntnisse über die Grundwasserneubildung werden auch für die Abschätzung des Gefährdungspotenzials des Grundwassers durch den Eintrag von Schadstoffen, wie z. B. infolge Nitratauswaschung, benötigt.

Die Ergebnisse der GIS-gestützten Modellierung werden für vergangene und zukünftige Dekaden in Form von Diagrammen und Karten präsentiert und Bezug nehmend auf die Referenzperiode 1971-2000 diskutiert. Abschließend werden mögliche Anpassungsmaßnahmen für die prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt erörtert.

Datengrundlage

Als Datengrundlage für die Modellierung des Grundwasserhaushalts dienen die Klimaprojektionsdaten (kurz: Klimaszenarien) der Firma Meteo-Research für den Szenarienzeitraum 2011 bis 2050. Die Klimadaten beruhen auf dem globalen Klimamodell ECHAM4, dem das moderate Emissionsszenario B2 (Verdopplung der CO₂-Emission bis 2100) zu Grunde gelegt wurde (ENKE 2003). Das von der Firma Meteo-Research verwendete Downscaling-Verfahren basiert auf der Zuordnung der atmosphärischen Zirkulationsmuster zu Wetterlagen und berücksichtigt im Gegensatz zu anderen statistischen Regionalisierungsmethoden die Änderungen der Strömungsverhältnisse eines Klimaszenarios.

Für die simulierten Zeitreihen der vier Dezennien zwischen 2011 und 2050 waren zunächst nur stationsbezogene Tageswerte (Punktdaten) der Klimaparameter Temperatur, relative Feuchte, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit und Niederschlag verfügbar. Für die im Rahmen dieses Teilprojektes durchzuführenden räumlichen Modellierungen des Grundwasserhaushaltes waren jedoch Flächen- bzw. Rasterdaten für die Klimaparameter „korrigierter Niederschlag“ und Grasreferenzverdunstung erforderlich. Deshalb wurde der Deutsche Wetterdienst damit beauftragt, auf Basis der von der Firma Meteo-Research bereitgestellten Szenariendaten eine Niederschlagskorrektur gemäß dem Verfahren nach RICHTER (1996) durchzuführen und die Grasreferenzverdunstung aus den stationsweise verfügbaren Klimaparametern abzuleiten. Für quantitative Betrachtungen ist eine Niederschlagskorrektur unerlässlich, da die Messung der Niederschlagshöhe grundsätzlich mit gerätespezifischen und aufstellungsabhängigen Messfehlern behaftet ist. Des Weiteren wurden im Rahmen dieser Beauftragung aus den Tageswerten die langjährigen mittleren Monatswerte berechnet und die stationsweise vorliegenden Szenariendaten auf ein 1000m x 1000m - Raster regionalisiert (ALBRECHT 2005).

Wegen des großen Datenvolumens der Rasterdaten wurden nur ausgewählte Szenariendaten regionalisiert. Als Kriterium für die Selektion wurden die Winterniederschläge herangezogen, die für die Grundwasserneubildung von maßgeblicher Bedeutung sind. Für jedes Dezennium wurden – ausgehend von den hydrologischen Winterhalbjahren – aus den jeweils 10 verfügbaren Simulationsberechnungen eine extrem trockene und eine extrem feuchte Realisierung sowie das Mittel aller 10 Realisierungen für die Regionalisierung und anschließende Model-

lierung ausgewählt. Auf diese Weise wurde gewährleistet, dass trotz deutlicher Datenreduktion die Bandbreiten der Klimavariationen betrachtet werden konnten.

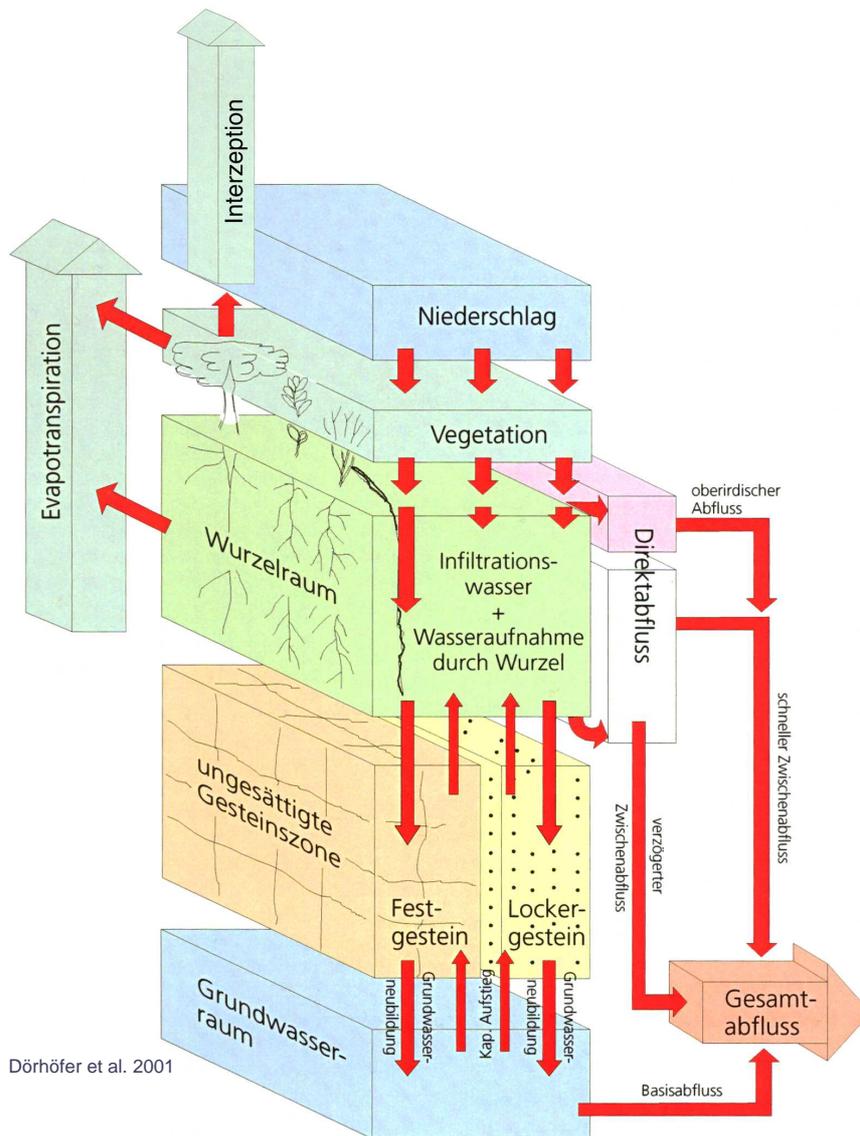
Da die Modellierungen des Grundwasserhaushaltes im Dezernat W3 mit einer räumlichen Auflösung von 100m x 100m durchgeführt werden, wurden die im 1000m x 1000m - Raster vorliegenden Szenariendaten mit dem Downscaling-Verfahren nach ZIMMERMANN (2001) auf eine einheitliche Rasterweite von 100 m überführt.

Zur Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt wurde das 30-jährige Mittel von 1971 bis 2000 als Referenzperiode gewählt. Dieser Zeitraum umfasst das Trockendezennium 1971-1980, das Nassdezennium 1981-1990 und das Dezennium 1991-2000 mit mittleren Verhältnissen und repräsentiert somit mittlere Klimaverhältnisse der Gegenwart bzw. der jüngsten Vergangenheit.

Methodik

Die Grundwasserneubildung (GWN) ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig, wie z. B. Niederschlag, Verdunstung, Landnutzung, Bodenart, geologischer Aufbau des Untergrundes und Topographie (Abb. 1). Sie ist daher ein sehr komplexer Prozess. 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.

Für die räumlich differenzierte Modellierung der Grundwasserneubildung werden hydrologische Modelle mit Geographischen Informationssystemen (GIS) gekoppelt. Erst durch die Funktionalitäten eines GIS ist die Integration verschiedener raumbezogener Daten und eine raumbezogene Modellierung der Grundwasserneubildung möglich. Für großräumige Untersuchungen auf regionaler Maßstabsebene kommen in der Regel nur einfache, empirisch-statistische Modelle in Frage, die nur wenige Eingangsparameter benötigen. Komplexe physikalische Modelle, die die für die Grundwasserneubildung relevanten Teilprozesse mathematisch beschreiben, erfordern eine Vielzahl von Eingangsdaten, die für große Einzugsgebiete in der Regel nicht flächendeckend vorhanden sind.



Dörhöfer et al. 2001

Abb. 1: Der terrestrische Wasserhaushalt (nach DÖRHÖFER et al., 2001)

Für die Modellierung der Grundwasserneubildung in Hessen kommt ein zweistufiges, GIS-gestütztes Verfahren zum Einsatz, bei dem das empirische Einsicht-Bodenwasserhaushaltsmodell (BWHM) nach GROSSMANN (1995, 1997, 1998, 2001) und DOMMERMUTH & TRAMPF (1991) mit einem speziell für Hessen entwickelten Regressionsmodell (HERGESELL & BERTHOLD 2005) gekoppelt wurde (Abb. 2).

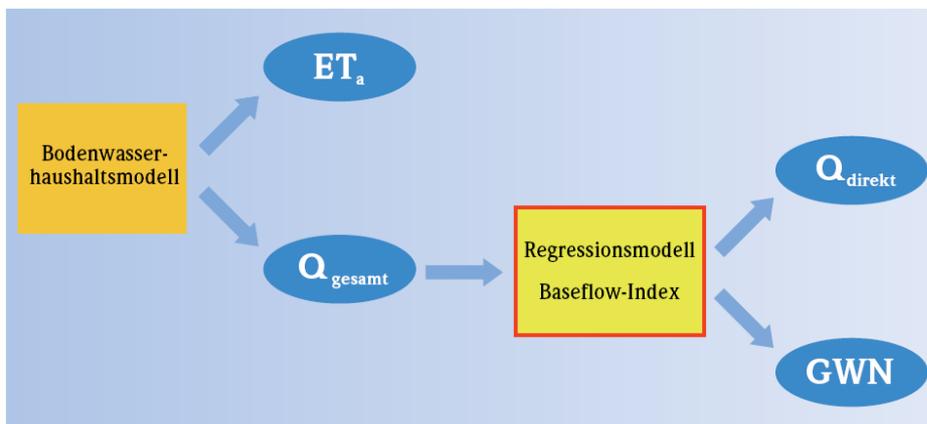


Abb. 2: 2-stufiger Verfahrensablauf zur Berechnung flächendifferenzierter Abflusskomponenten

Vergleichbare Verfahren werden gegenwärtig sowohl auf Bundesebene im Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD) als auch auf Länderebene in Baden-Württemberg und Bayern erfolgreich angewendet (Tab. 1).

Tab. 1: Beispielhafte Anwendungen des Modellkonzeptes

Modell / Verfahren	Untersuchungsgebiet	Quelle
HAD-GWNeu	Bundesrepublik Deutschland	BMU, 2003 NEUMANN 2005
Weiterentwicklung des HAD-Verfahrens	Bundesland Bayern	NEUMANN 2004
TRAIN-GWN	Bundesland Baden-Württemberg	ARMBRUSTER 2002
Hessen-GWN	Bundesland Hessen	HERGESELL & BERTHOLD 2005

Das für den ersten Verfahrensschritt verwendete BWHM wurde in exemplarisch untersuchten Einzugsgebieten auf der Basis von Abfluss- und Lysimetermessungen entwickelt. Das BWHM berechnet in Abhängigkeit von Klima, Landnutzung und Bodeneigenschaften im ersten Verfahrensschritt 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.

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

mit $N_{korr.}$ = korrigierter Niederschlag

Das BWHM rechnet in Monatsschritten und berücksichtigt sieben Landnutzungsklassen, die phänologische Entwicklung der Pflanzen, Interzeptionsverdunstung für Waldflächen und kapillaren Aufstieg für grundwasserbeeinflusste Böden. Die Eingangsdaten sind in Tab. 2 aufgeführt. Als klimatische Eingangsparameter gehen der korrigierte Niederschlag und die Grasreferenzverdunstung als Monatssummen in das Modell ein.

Tab. 2: Eingangsdaten des BWHM

	Parameter	Datengrundlage	Maßstab/ Auflösung	Quelle
Klimadaten	Niederschlag (korr.) Grasreferenzverdunstung	(Monatssummen)	1 km - Raster	DWD
Bodendaten	nFK-DB ¹ Grundnässestufen	BFD50 ²	1 : 50000	HLUG
Landnutzung	7 Klassen: Siedlung, Acker, Grünland, Laub-, Nadel-, Mischwald, Gewässer	ATKIS	1 : 25000	AdV ³
¹ nutzbare Feldkapazität des durchwurzelbaren Bodenraums				
² digitale Bodenflächendaten 1:50000				
³ Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland				

Die flächendifferenzierten Modellergebnisse (Q_{gesamt}) wurden einzugsgebietsbezogen mit gemessenen Abflüssen (MQ = mittlerer Abfluss) validiert (Abb. 3).

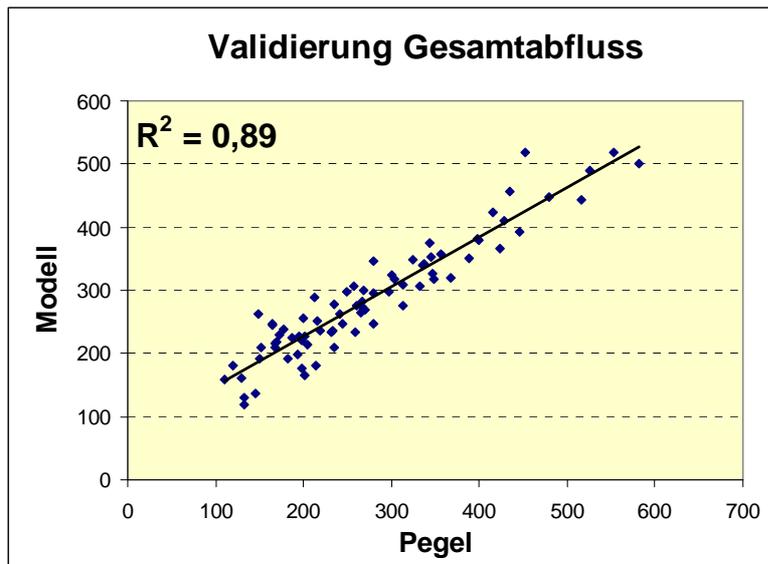


Abb. 3: Vergleich zwischen modelliertem Q_{gesamt} und am Pegel gemessenem MQ

Die gute Übereinstimmung zwischen modellierten und an hessischen Pegeln gemessenen Abflüssen zeigt, dass das BWHM für Hessen plausible und zuverlässige Ergebnisse für den Gesamtabfluss liefert.

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.

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

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:

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

Für eine repräsentative Auswahl von Pegeleinzugsgebieten, die das breite Spektrum der klimatologischen, pedologischen und hydrogeologischen Variabilitäten Hessens abdecken, wurden zunächst aus den Pegel­daten der Periode 1971–2000 auf das Einzugsgebiet bezogene BFI-Werte (Zielgröße) ermittelt (Abb. 4).

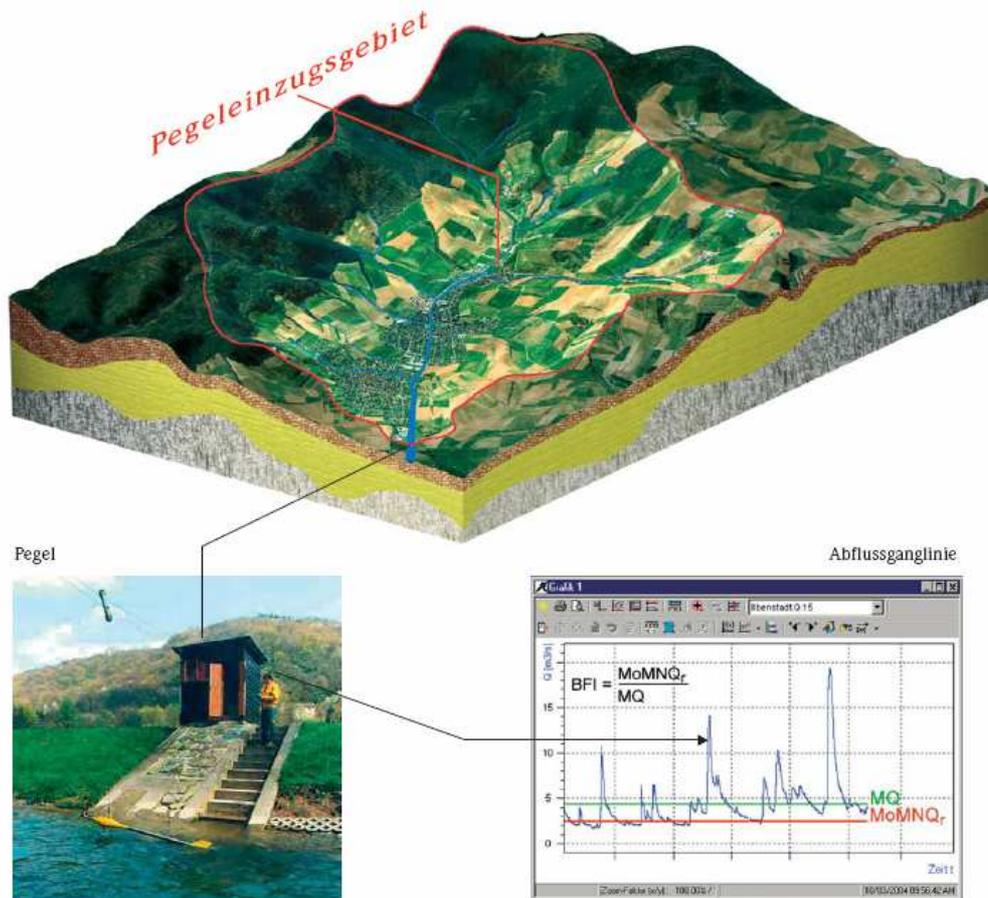


Abb. 4: Ermittlung einzugsgebietsbezogener Baseflow-Indizes

Für die Pegeleinzugsgebiete wurden zusätzlich alle verfügbaren Gebietsparameter ermittelt, die einen signifikanten Einfluss auf den BFI haben können. Durch multiple lineare Regressionsanalyse wurde der statistische Zusammenhang zwischen den auf Einzugsgebiete bezogenen BFI-Werten (Zielgröße) und mehreren relevanten unabhängigen Gebietsmerkmalen (Prädiktoren), wie z. B. Bodeneigenschaften, Bodenbedeckung oder geologische Untergrundverhältnisse, in Form einer mathematischen Gleichung (Schätzfunktion) ermittelt (Abb. 5):

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_{m-1}x_{m-1} + b_mx_m + z$$

mit

- y = abhängige Variable (Zielgröße = BFI)
- a = Regressionskonstante
- b_i = Regressionskoeffizienten

x_i = unabhängige Variablen (Prädiktoren)
 z = Zufallsfehler

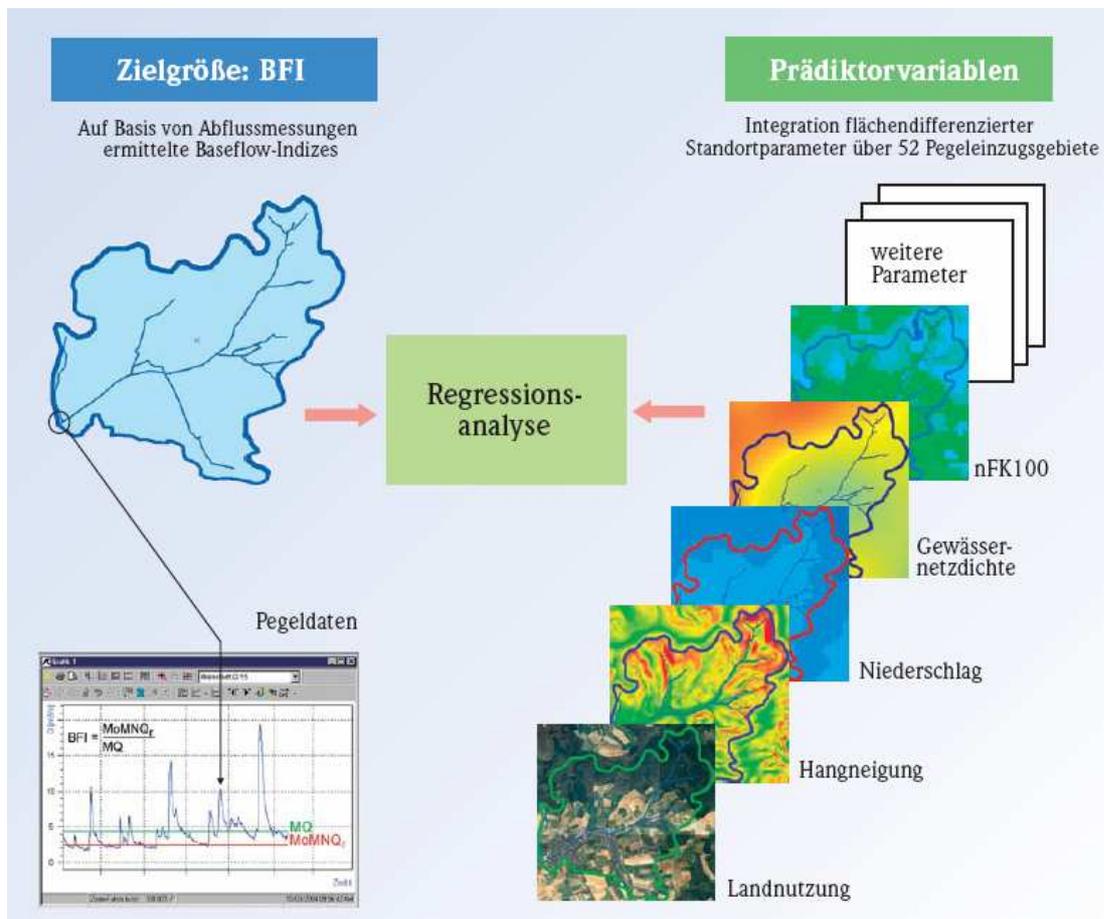


Abb. 5: Regressionsanalytische Modellbildung

Mit Hilfe dieser ermittelten Übertragungsfunktion wurden die BFI-Werte für die gesamte Fläche Hessens flächendifferenziert berechnet. Hierzu wurde das Regressionsmodell auf das 100m-Raster des BWHM übertragen, indem die Regressionsgleichung auf die Rasterdatensätze der signifikanten Gebietsparameter angewendet wurde.

Die Regionalisierung von BFI-Werten auf Grundlage gemessener Abflussdaten und einer gebietsspezifischen Auswahl von Standortmerkmalen stellt ein plausibles und praktikables Verfahren zur flächendifferenzierten Beschreibung der Abflusskomponenten dar.

Zur Validierung des Regressionsmodells und zur weiteren Beurteilung der Güte des Modells wurden die vom Regressionsmodell berechneten flächendifferenzierten BFI-Werte einzugsgebietsbezogen integriert und mit den auf Basis von Abflussmessungen ermittelten BFI-Werten verglichen. Das Ergebnis der Validierung des regionalisierten BFI ist in Form eines xy-Plots in Abb. 6 dargestellt. Ein Bestimmtheitsmaß (R^2) in der Höhe von 0.81, wie in dem xy-Plot zu sehen ist, kann im Vergleich zu den Regressionsansätzen im HAD ($R^2 = 0.71$) und in anderen Bundesländern als sehr zufrieden stellend angesehen werden.

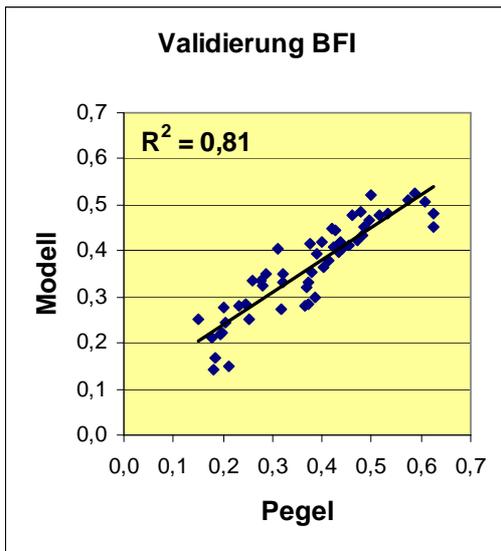


Abb. 6: Vergleich zwischen modelliertem und am Pegel gemessenem BFI

Durch die Multiplikation der flächendifferenzierten BFI-Werte mit dem durch das Bodenwasserhaushaltsmodell zuvor ermittelten Gesamtabfluss wurde abschließend die flächendifferenzierte Grundwasserneubildung berechnet (Abb. 7).

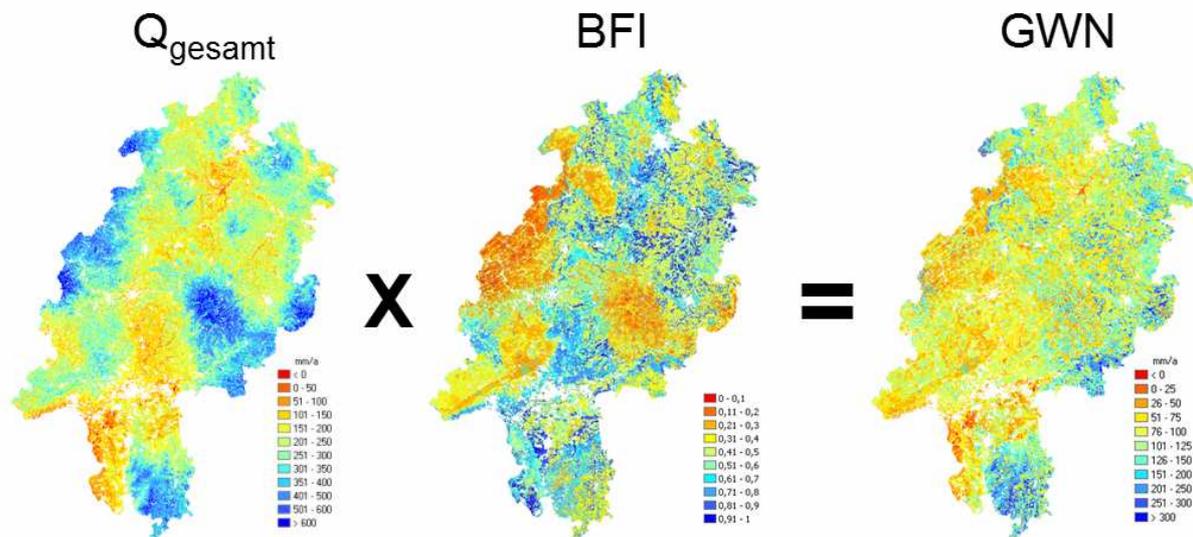


Abb. 7: Multiplikative Verknüpfung von Q_{gesamt} und BFI

Zur Validierung der modellierten Grundwasserneubildung wurden die berechneten flächendifferenzierten GWN-Werte einzugsgebietsbezogen integriert und mit den auf Basis von Pegeldaten ermittelten Basisabflüssen verglichen. Das Ergebnis der Validierung der flächendifferenzierten GWN ist in Form eines xy-Plots in Abb. 8 dargestellt. Wie bereits beim BFI ist auch hier eine gute Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Werten zu beobachten.

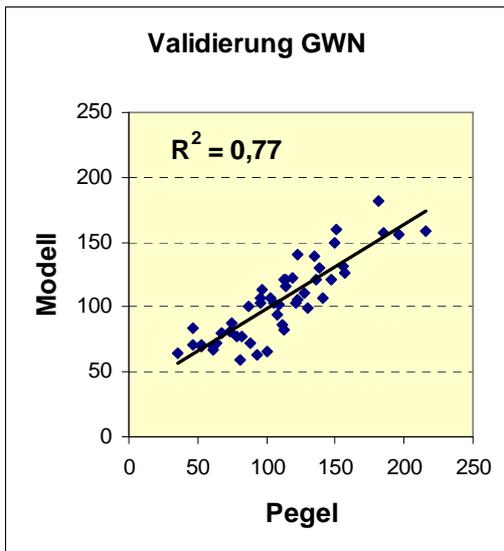


Abb. 8: Vergleich zwischen modellierter GWN und am Pegel gemessenen Basisabflüssen

Ergebnisse

Das hier beschriebene gekoppelte Rechenmodell (BWHM + Regressionsmodell) wurde iterativ mit den oben beschriebenen Szenariendaten betrieben. Für jedes Dezennium (2011-2020, 2021-2030, 2031-2040 und 2041-2050) wurden jeweils 3 Modellläufe, nämlich mit einer Trocken- und einer Feuchtrealisierung sowie dem Mittel aller 10 Realisierungen eines Dezenniums, durchgeführt. Die Feucht- und Trockenrealisierungen entsprechen extremen Einzeljahreereignissen innerhalb des jeweils 10-jährigen Simulationszeitraumes. Durch sie wird die klimatische Bandbreite des jeweiligen Dezenniums beschrieben.

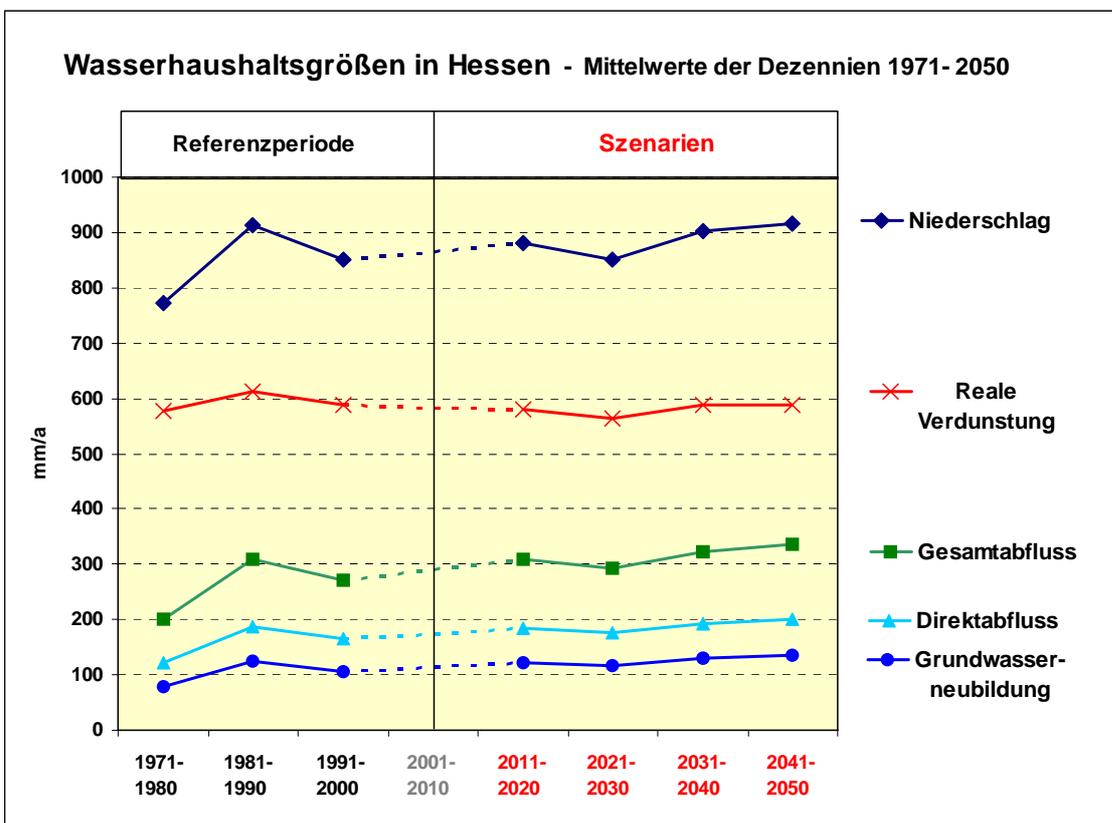


Abb. 9: Trendlinien der Wasserhaushaltskomponenten

In Abb. 9 sind die Dezennienmittel der Grundwasserneubildung und der übrigen Wasserhaushaltsgrößen bezogen auf die Gesamtfläche Hessens graphisch dargestellt. Gegenüber der Referenzperiode 1971-2000 (links) ist bei allen Wasserhaushaltsgrößen, mit Ausnahme der realen Verdunstung, eine tendenzielle Zunahme zu erkennen. Die geringfügige Abnahme der realen Verdunstung ist auf die fortschreitende Verlagerung der Sommerniederschläge in das Winterhalbjahr zurückzuführen (s. u.), wodurch im Sommerhalbjahr weniger Wasser für Verdunstungsprozesse zur Verfügung steht.

Wichtigste Steuergröße der Grundwasserneubildung ist der Niederschlag. In Abb. 10 ist der Niederschlag dezennienweise als auf die Landesfläche bezogene Mittelwerte dargestellt.

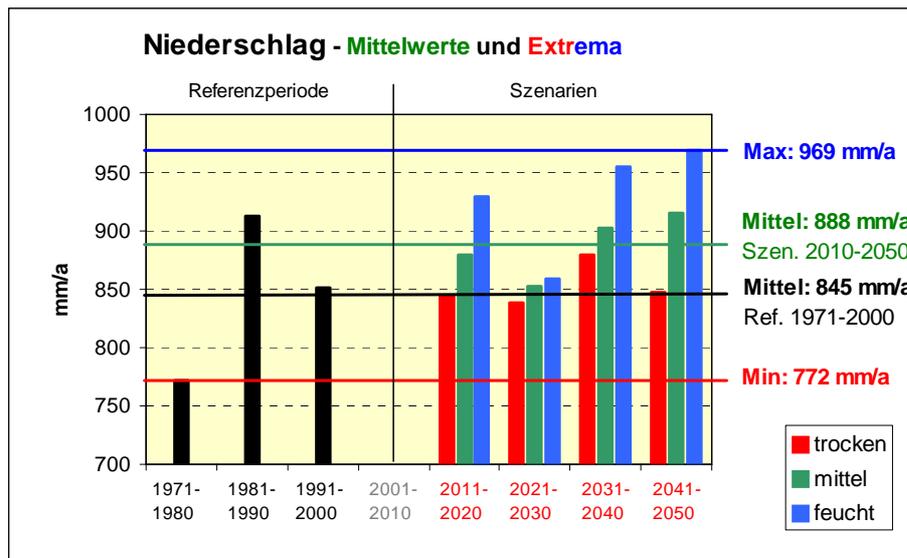


Abb. 10: Zeitliche Variabilität des Niederschlags in Hessen

Die schwarzen Balken in der linken Diagrammhälfte entsprechen jeweils den Mittelwerten der drei Dezennien der Referenzperiode 1971-2000. Die Mittelwerte der vier Dezennien des Szenarienzeitraums 2011-2050 sind durch die grünen Balken dargestellt. Die roten bzw. blauen Balken entsprechen den extremen Trocken- bzw. Feuchtrealisierungen und sind als einzelne extreme Trocken- bzw. Feuchttjahre der jeweiligen Dezennien zu verstehen.

Über den gesamten Szenarienzeitraum betrachtet nimmt der Niederschlag gegenüber dem Mittelwert der Referenzperiode von 845 mm/a auf 888 mm/a um ca. 5 % zu. Extrem trockene Verhältnisse, wie sie im Dezennium 1971-1980 vorherrschten, werden durch keine Simulation auch nur annähernd erreicht. Selbst die trockensten Extrem-Realisierungen (Trockenjahre) liegen im Mittel über dem Mittelwert der Referenzperiode. Tendenziell ist erkennbar, dass die zukünftig mittleren Verhältnisse (grüne Balken) in etwa der historischen Nassperiode von 1981-90 entsprechen. Dagegen entsprechen die zukünftigen "Trockenjahre" den mittleren Verhältnissen der Gegenwart.

In Abb. 11 sind die mittlere Zunahme für den gesamten Szenarienzeitraum und die maximalen Spannbreiten der Veränderung der Mittelwerte der Dezennien und der extremen Einzelrealisierungen gegenüber der Referenzperiode dargestellt. Während der mittlere Niederschlag des gesamten Szenarienzeitraums 43 mm/a (5 %) oberhalb des Mittelwertes des Referenzzeitraumes liegt, schwankt die Zunahme der Mittelwerte der Dezennien 2021-2030 und 2041-2050 zwischen 7 mm/a (0,8 %) und 71 mm/a (8,4 %). Die maximale Spannbreite wird durch die Trockenrealisierung des Dezenniums 2021-2030 und die Feuchtrealisierung des Dezenniums 2041-2050 erreicht. Die Bandbreite schwankt hier zwischen minus 6 mm/a (-0,7 %) und plus 124 mm/a (14,6 %). Rot gestrichelt dargestellt ist die negative Abweichung des

mittleren Niederschlages des historischen Dezenniums 1971-1980 gegenüber der 30-jährigen Referenzperiode.

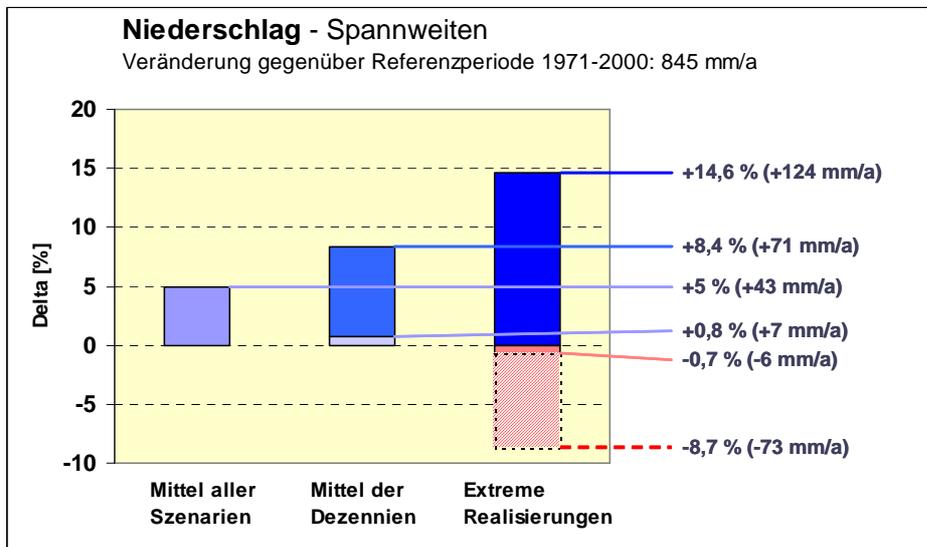


Abb. 11: Spannweiten der Veränderung gegenüber der Referenzperiode – Niederschlag

In Abb. 12 wird die räumliche Verteilung des Niederschlages für die Dezennien mit der geringsten (2021-2030) und der höchsten (2041-2050) Zunahme des Niederschlages der Referenzperiode gegenübergestellt.

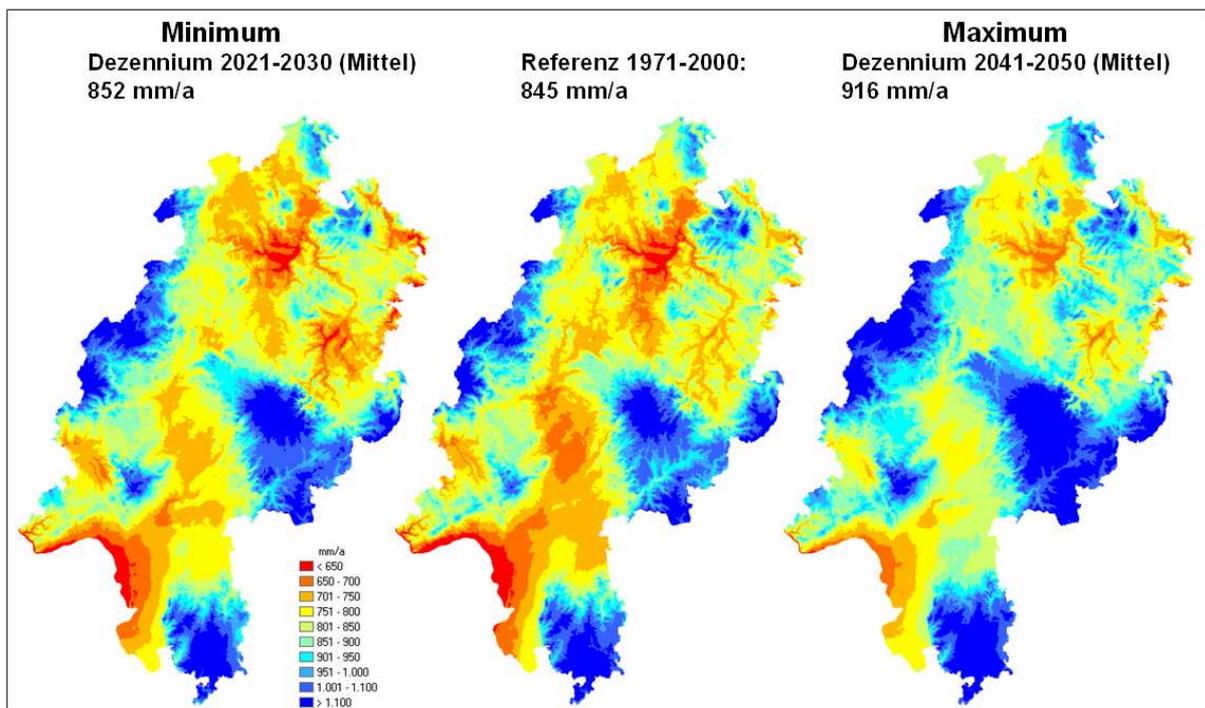


Abb. 12: Flächendifferenzierte Darstellung des Niederschlages

Da der Niederschlag mit der Höhe zunimmt, sind hohe Niederschläge großflächig in den Mittelgebirgsregionen zu beobachten, während niedrige Niederschläge in den Niederungen anzutreffen sind. Die lokalen Änderungen der Niederschlagsverhältnisse gegenüber der Referenzperiode lassen sich am deutlichsten in Differenzkarten darstellen (Abb. 13).

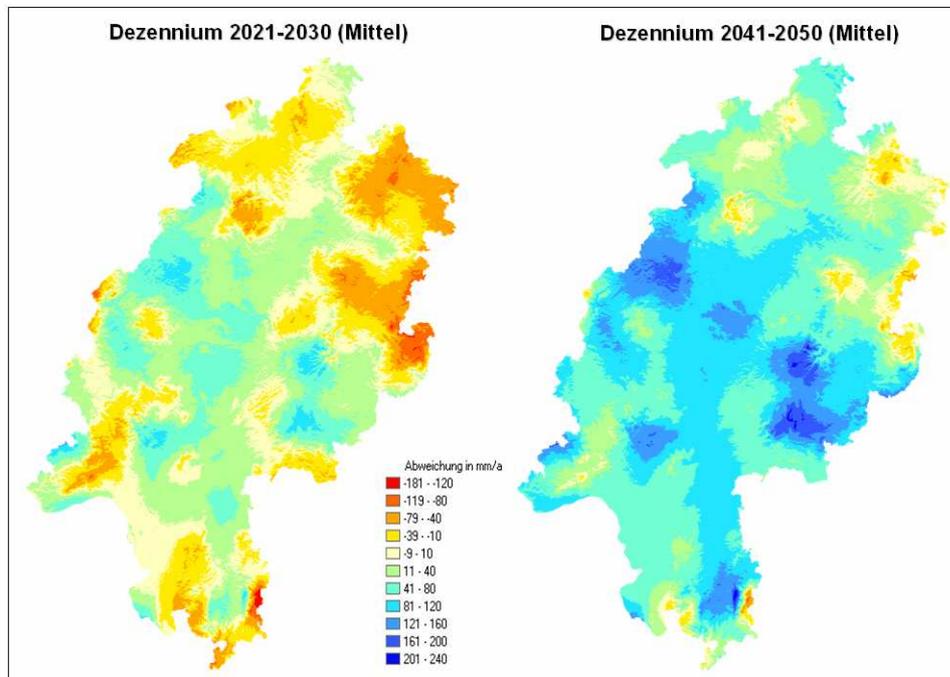


Abb. 13: Differenzkarten des Niederschlags – Abweichungen gegenüber der Referenzperiode

Links sind die regional differenzierten Änderungen des Niederschlags des Dezenniums mit der geringsten landesweiten Zunahme, rechts mit der größten landesweiten Zunahme dargestellt. Obwohl für das Dezennium 2021-2031 im Landesmittel der Niederschlag um 0,8 % zunimmt, sind vor allem im Nordosten Hessens großflächig Gebiete mit einer Abnahme des Niederschlags zu erkennen. Für das sehr feuchte Dezennium 2041-2050 ist mit einer deutlichen Zunahme des Niederschlags in fast allen Regionen Hessens zu rechnen. Aber selbst in diesem feuchten Dezennium, welches im Mittel 8,4 % höhere Niederschläge gegenüber der Referenzperiode aufweist, kommt es lokal zu Abnahmen der Niederschlagsverhältnisse. In den Regionen mit Niederschlagsabnahmen ist auch mit einer klimatisch bedingten Abnahme der Grundwasserneubildung zu rechnen.

Auf das Landesmittel bezogen wird sich die moderate Zunahme der Jahresniederschlags-summe positiv auf die Grundwasserneubildung auswirken. Einen noch größeren Einfluss auf die Grundwasserneubildung hat allerdings die Verteilung des Niederschlags im Jahresgang. Da die Grundwasserneubildung überwiegend in den Wintermonaten stattfindet, bewirkt die zu beobachtende innerjährliche Verlagerung des Niederschlags vom Sommer- in das Winterhalbjahr eine deutliche Zunahme der Grundwasserneubildung. Die moderate Zunahme des Jahresniederschlags ist in erster Linie auf die deutliche Zunahme des Winterniederschlags zurückzuführen. Die fortschreitende innerjährliche Verlagerung des Niederschlags ist in Abb. 14 dargestellt. Während in der Referenzperiode 1971-2000 ungefähr ausgewogene Verhältnisse zwischen den Sommer- und Winterniederschlägen vorherrschten, ist im rechten Teil der Grafik für den Szenarienzeitraum 2011-2050 eine deutliche und kontinuierliche Abnahme des Verhältniswertes Sommer-/Winterniederschlag zu erkennen.

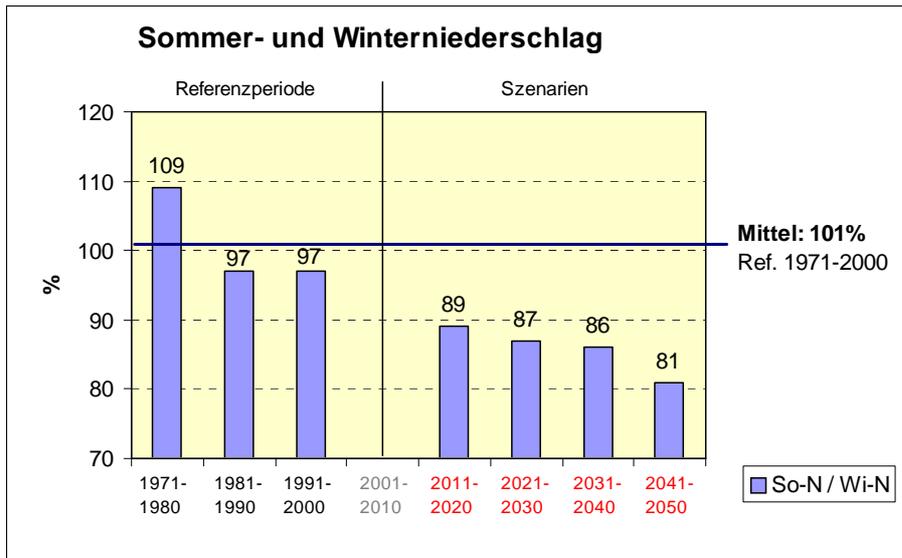


Abb. 14: Verhältnis Sommer- zu Winterniederschlag in Prozent

In Abb. 15 ist die räumliche Verteilung des Verhältniswertes für das Dezennium 1971-1980, die Referenzperiode 1971-2000 und die Feucht-Realisierung des Dezenniums 2041-2050 dargestellt. Wie sich gut erkennen lässt, ist das Verhältnis Sommer- zu Winterniederschlag von der Höhe abhängig. Mit zunehmender Höhe nimmt der Sommerniederschlag gegenüber dem Winterniederschlag ab. In Abb. 15 ist die drastische Umstellung der Niederschlagsverhältnisse deutlich erkennbar. Während für das Dezennium 1971-1980 die Sommerniederschläge (blau) gegenüber den Winterniederschlägen (rot) noch flächenhaft dominiert haben, sind für die Feucht-Realisierung des Dezenniums 2041-2050 dominiert dagegen in fast allen Landesteilen der Winterniederschlag. Allein diese deutliche innerjährliche Verlagerung der Niederschlagsverhältnisse bedingt bei einer unveränderten Jahresniederschlagssumme eine deutliche Zunahme der Grundwasserneubildung.

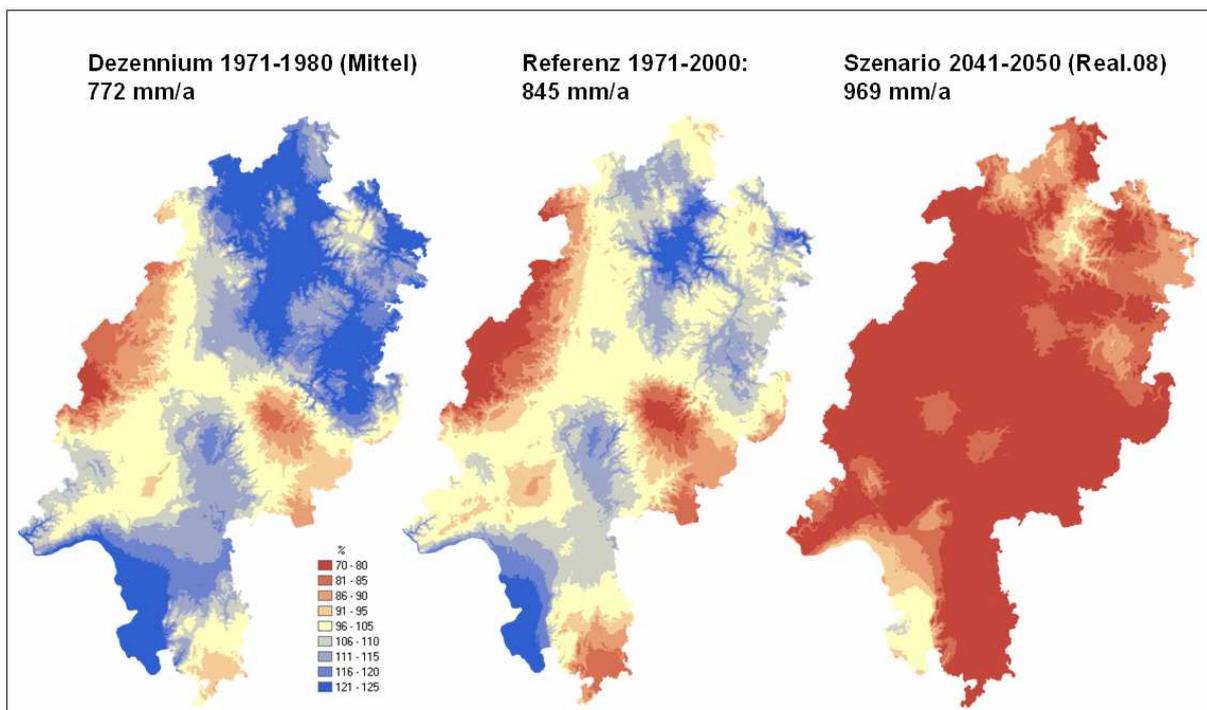


Abb. 15: Räumliche Verteilung vom Verhältnis Sommer- zu Winterniederschlag

Die Ergebnisse der modellierten Grundwasserneubildung sind in Abb. 16 als auf die Landesfläche bezogene Mittelwerte dezennienweise dargestellt. Wie in Abb. 10 (Niederschlag) entsprechen die schwarzen Balken in der linken Diagrammhälfte jeweils den Mittelwerten der drei Dezennien der Referenzperiode 1971-2000. Die Mittelwerte der vier Dezennien des Szenarienzeitraums 2011-2050 sind durch die grünen Balken dargestellt. Die roten bzw. blauen Balken entsprechen wieder den extremen Trocken- bzw. Feuchtrealisierungen.

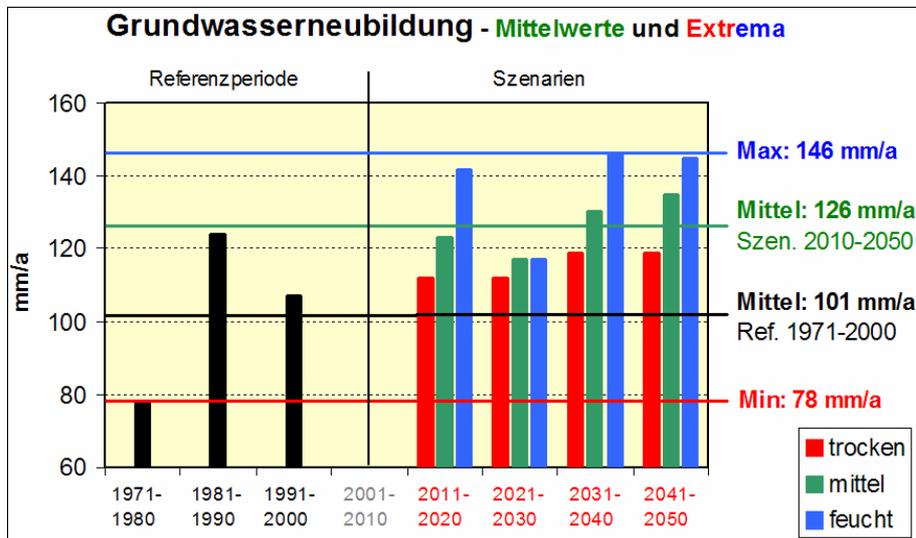


Abb. 16: Zeitliche Variabilität der Grundwasserneubildung in Hessen

Über den gesamten Szenarienzeitraum betrachtet nimmt die Grundwasserneubildung gegenüber dem Mittelwert der Referenzperiode von 101 mm/a auf 126 mm/a um ca. 25 % zu. Der Mittelwert des gesamten Szenarienzeitraums überschreitet somit den Wert der Nassperiode des Dezenniums 1981-1990. Das bedeutet, dass die mittleren Verhältnisse der Zukunft den Feuchtperioden der Vergangenheit entsprechen werden. Die Mittelwerte der Dezennien 2031-2040 und 2041-2050 liegen deutlich über dem maximalen Wert des Feuchtdezenniums 1981-1990. Selbst die Grundwasserneubildung der einzelnen extremen Trockenrealisierungen liegt deutlich über dem Mittelwert des Referenzzeitraums, der von keiner der Realisierungen unterschritten wird. Mit geringen Grundwasserneubildungsraten, wie sie für das Trockendezennium 1971-1980 vorherrschten, ist daher zukünftig nicht zu rechnen.

In Abb. 17 sind die mittlere Zunahme für den gesamten Szenarienzeitraum und die maximalen Spannbreiten der Veränderung der Mittelwerte der Dezennien und der extremen Einzelrealisierungen gegenüber der Referenzperiode dargestellt. Während die mittlere Grundwasserneubildung des gesamten Szenarienzeitraums 25 mm/a (24,8 %) oberhalb des Mittelwertes des Referenzzeitraumes liegt, schwankt die Zunahme der Mittelwerte der Dezennien 2021-2030 und 2041-2050 zwischen 16 mm/a (15,8 %) und 34 mm/a (33,7 %). Die maximale Spannbreite wird durch die Trockenrealisierung des Dezenniums 2011-2020 und die Feuchtrealisierung des Dezenniums 2031-2040 mit Zunahmen der Grundwasserneubildung zwischen 11 mm/a (10,9 %) und 45 mm/a (44,5 %) erreicht.

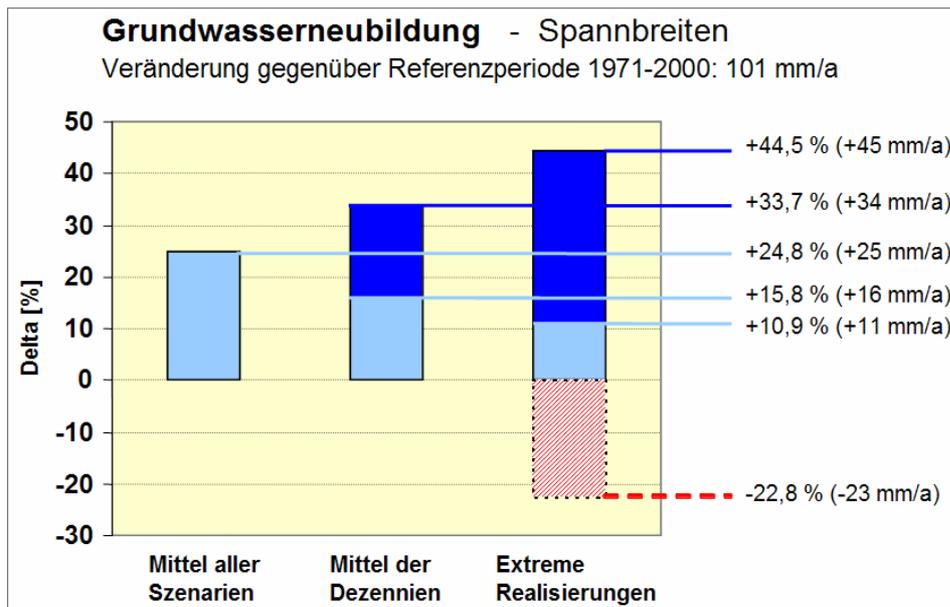


Abb. 17: Spannweiten der Veränderung gegenüber der Referenzperiode – Grundwasserneubildung

Rot gestrichelt ist die negative Abweichung der mittleren Grundwasserneubildung des historischen Dezenniums 1971-1980 gegenüber der 30-jährigen Referenzperiode dargestellt.

In Abb. 18 wird die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung der Dezennien mit der geringsten (2021-2030) und der höchsten (2041-2050) Zunahme der Grundwasserneubildung der Referenzperiode gegenübergestellt.

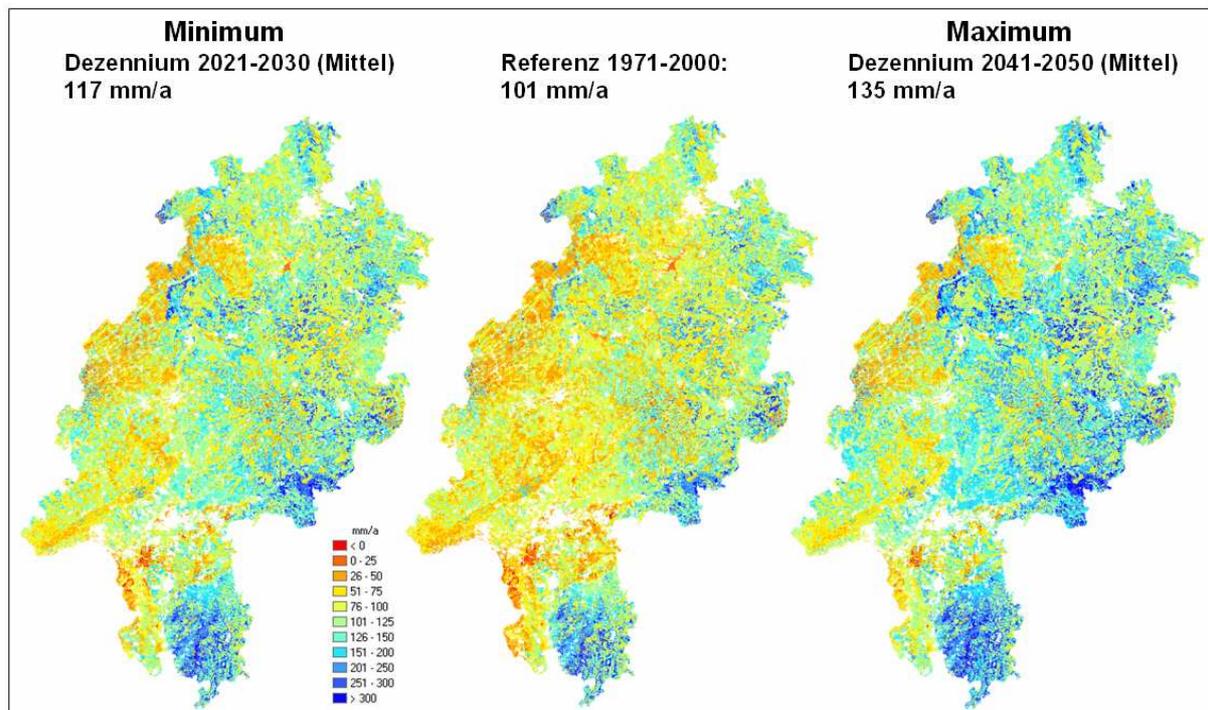


Abb. 18: Flächendifferenzierte Darstellung der Grundwasserneubildung

Hohe Grundwasserneubildungsraten sind großflächig vor allem im Odenwald, in der Vogelsbergregion und in den ostthessischen Mittelgebirgsregionen Spessart, Rhön, Ringgau und Kaufunger Wald zu beobachten. Aber auch im Norden im Gebiet des Reinhardswalds sowie in den westlichen Regionen des Waldecker Uplands und der Frankenberger Bucht werden

höhere Grundwasserneubildungsraten erreicht. Für das hessische Ried und die Hanau-Seligenstädter Senke sowie im westlichen Landesteil des Rheinischen Schiefergebirges werden gleichfalls erhöhte Grundwasserneubildungsraten im Vergleich zur Referenzperiode berechnet.

Die klimatisch bedingten regionalen Veränderungen der Neubildung gegenüber der Referenzperiode lassen sich auch hier am anschaulichsten in Form von Differenzkarten visualisieren (Abb. 19).

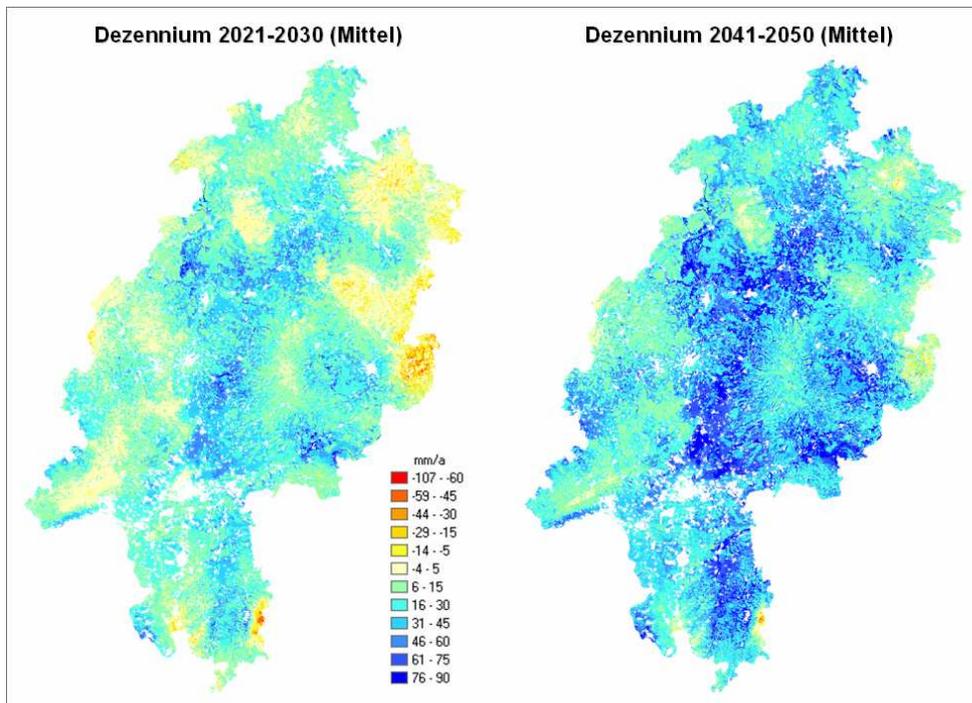


Abb. 19: Differenzkarten der Grundwasserneubildung – Abweichungen gegenüber der Referenzperiode

Links sind die regional differenzierten Änderungen der Grundwasserneubildung des Dezenniums mit der geringsten landesweiten Zunahme, rechts mit der größten landesweiten Zunahme dargestellt. Obwohl für das Dezennium 2021-2031 im Landesmittel die Grundwasserneubildung um fast 16 % zunimmt, sind im Süden und Nordosten Hessens Gebiete mit einer Abnahme der Grundwasserneubildung zu erkennen. Für das sehr feuchte Dezennium 2041-2050 ist mit einer deutlichen Zunahme der Grundwasserneubildung in fast allen Regionen Hessens zu rechnen. Gebiete mit hohen Zunahmen in der Neubildung sind neben Mittelgebirgsregionen im Odenwald, Spessart und Vogelsbergbereich auch landwirtschaftlich intensiv genutzte Bereiche wie Hessisches Ried, Wetterau, Limburger Becken und Kasseler Graben.

Auswirkungen des Klimawandels

Die vorliegenden Ergebnisse machen deutlich, dass die für Hessen prognostizierte Klimaänderung einen wesentlichen Einfluss auf die Grundwasserneubildung ausüben wird. Im Landesmittel zeigen die Berechnungen eine deutliche Erhöhung der Grundwasserneubildung (ca. 25 % zur Referenzperiode, Spannbreite 16 bis 34 %). Ein wesentliches Ergebnis der Modellrechnung ist, dass das Auftreten von Trockendezennien (wie 1971-1980) zukünftig immer unwahrscheinlicher erscheint. Lediglich im Nordosten von Hessen sind Gebiete mit verringerter Grundwasserneubildung zu erkennen. Die zukünftigen mittleren Verhältnisse hinsichtlich der Grundwasserneubildung im betrachteten Zeitraum von 2011 bis 2050 entsprechen etwa den Grundwasserneubildungsraten ausgesprochener Nassperioden in der Vergangenheit (1981-1990).

Nitratverlagerung/Grundwasserbeschaffenheit

Die prognostizierten Klimaveränderungen (feuchte, milde Winter und trockene wärmere Sommer) würden bedingen, dass während der Sommermonate die Nitratbildung trotz hoher Temperaturen durch die geringe Bodenfeuchte nahezu zum Stillstand kommt. Im Herbst, bei Wiederbefeuchtung des Bodenkörpers und noch relativ hoher Bodentemperatur, kann es allerdings zu einer verstärkten N-Mobilisation aus der organischen Bodensubstanz und damit zu einer verstärkten Anlieferung von Nitrat kommen. Damit würde die Nitratanlieferung in eine Zeit fallen, in der das Pflanzenwachstum weitgehend abgeschlossen ist und somit nur ein geringer Entzug durch den Pflanzenaufwuchs gegeben wäre. Die Folge wäre eine erhöhte Nitratanreicherung im Oberboden. Da durch die prognostizierte Erhöhung der Winterniederschläge mit einer erhöhten Grundwasserneubildung zu rechnen ist, ist daher von einer erhöhten Nitratverlagerung auszugehen. Durch diese Mechanismen könnten selbst Böden, die ein hohes Nitratrückhaltevermögen aufweisen (z. B. Lössböden der Wetterau), in Zukunft vermehrt zu Eintrag von Nitrat in den Grundwasserleiter beitragen.

Gleichfalls ist zu erwarten, dass die landwirtschaftliche Beregnung im Sommerhalbjahr intensiviert werden wird. Dies betrifft sowohl die Anzahl der Beregnungsgaben pro Jahr als auch die Ausweitung der Beregnungsflächen. Mit dieser Entwicklung wäre eine erhebliche Zunahme des Wasserverbrauchs im Agrarbereich verbunden.

Durch eine erhöhte Grundwasserneubildung ist ebenfalls ein verstärktes Auslaugen von Schadstoffen denkbar. Dies könnte eine verstärkte Verlagerung von Schadstoffen in den Grundwasserraum zur Folge haben. In der Abb. 20 werden die einzelnen Auswirkungen im Zusammenhang illustriert. Andererseits führt eine Erhöhung der Grundwasserneubildung zu Verdünnungseffekten, die alle Wasserinhaltsstoffe betrifft und somit gegebenenfalls zu einer „Verbesserung“ der Grundwasserqualität beitragen kann (falls nur die Konzentration der Stoffe betrachtet wird). Bei der Betrachtung von zeitlichen Entwicklungen hinsichtlich der Grundwasserqualität muss dieser Aspekt in Zukunft wesentlich stärker berücksichtigt werden.



Abb. 20: Mögliche Auswirkungen der Klimaänderung

Wasserwirtschaft/Grundwasserstände

Für die dezentrale Wasserversorgung von Gemeinden könnte der prognostizierte Rückgang der Sommerniederschläge negative Auswirkungen haben. Insbesondere Quellen, die zur Trinkwasserversorgung herangezogen werden, könnten während der Sommermonate in ihrer Schüttung stark nachlassen, so dass die Trinkwassergewinnung erheblich beeinträchtigt wäre. Dies wäre vor allem in Gebieten mit geringem Speicherpotenzial für Grundwasser der Fall.

In Lockergesteinsgebieten mit ihrem wesentlich höheren nutzbaren Hohlraumvolumen und somit auch größerer Pufferkapazität als in Festgesteinsregionen dürfte dieser negative Effekt keine Rolle spielen, im Gegenteil wird hier das Grundwasserdargebot positiv beeinflusst werden. Davon würden vor allem Großwasserwerke, die insbesondere in Südhessen für die zentrale Wasserversorgung eine bedeutsame Rolle spielen, profitieren.

Mit der Erhöhung der Grundwasserneubildung geht gleichzeitig eine Erhöhung der Grundwasserstände einher. Es muss jedoch beachtet werden, dass die simulierten Klimadaten keine Aussage über die Häufung von extrem nassen Jahren bzw. trockenen Jahren erlauben. Diese Abfolge bestimmt jedoch sehr stark die tatsächliche Ausprägung der Grundwasserstände bzw. von extremen Hoch- und Niedrigständen des Grundwassers.

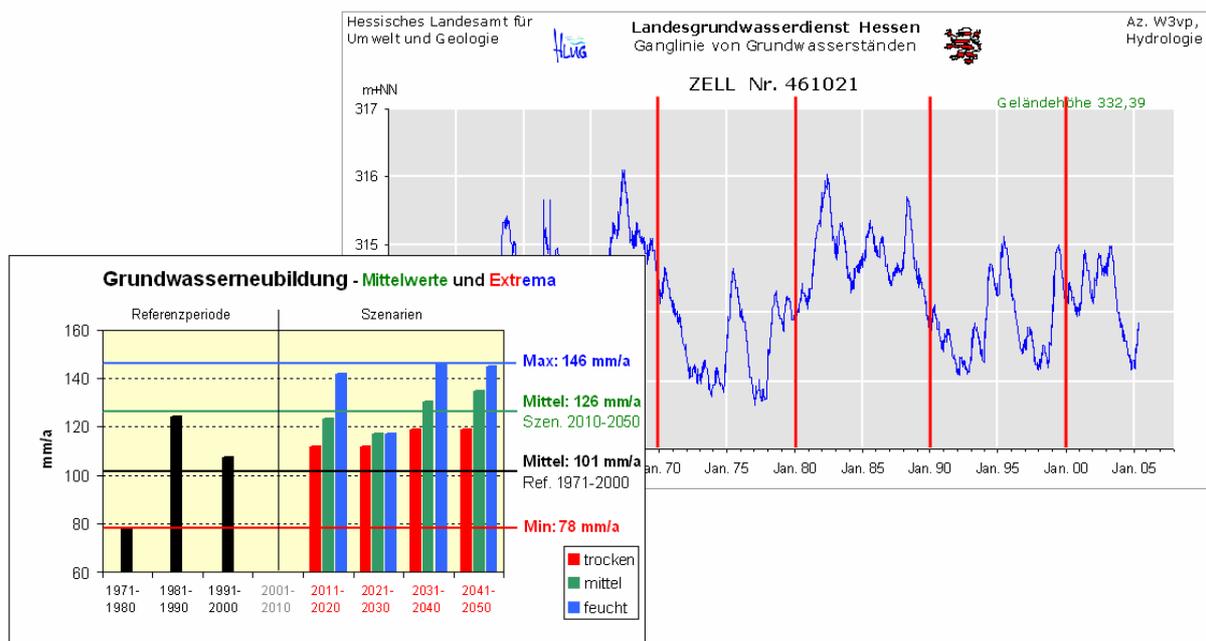


Abb. 21: Zusammenhang zwischen Grundwasserneubildung und Grundwasserständen

In Abb. 21 ist der Zusammenhang zwischen Grundwasserneubildung und Grundwasserständen für die drei Dezennien der Referenzperiode 1971-2000 dargestellt. In Anbetracht dessen, dass die mittlere Grundwasserneubildung des gesamten Szenarienzeitraums 2011-2050 (grüne Linie) die Grundwasserneubildungsraten der Nassperiode 1981-1990 übersteigt, ist es sehr wahrscheinlich, dass sich die bereits vorhandenen Vernässungsflächen ausdehnen werden bzw. die Häufigkeit von Vernässungen in Zukunft deutlich zunimmt. Dies kann zu erheblichen Beeinträchtigungen der gegebenen Landnutzung führen. Ackerflächen könnten infolge der Vernässung nicht termingerecht bestellt werden (Abb. 22), Biotope könnten durch extremer werdende Grundwasserstandsänderungen in Stresssituationen geraten und Waldgebiete (Abb. 23) längere Zeiten im Jahr Staunässe erfahren.



Abb. 22: Vernässung von Ackerland (Pfungstadt)



Abb. 23: Wald unter Wasser (Treburer Unterwald)

Ebenfalls ist eine Zunahme von Vernässungsschäden an Gebäuden zu erwarten (Abb. 24). Das Auftreten feuchter Keller, Tiefgaragen und überschwemmter Unterführungen und Straßen (Abb. 25) könnte in grundwasserbeeinflussten Regionen räumlich und zeitlich eine Anhäufung erfahren.



Abb. 24: Vernässungsschäden an Gebäuden (Nauheim)



Abb. 25: Überflutete Straßen (Bauschheim/Rüsselsh. m.)

Mögliche Anpassungsmaßnahmen

Da eine enge Kopplung von Klima und Wasserkreislauf besteht, werden sich Klimaänderungen immer auch auf alle Komponenten des Wasserkreislaufes auswirken. Alle Maßnahmen müssen daher im Zusammenhang gesehen und diskutiert werden. Wie die bereits bestehende Vernässungsproblematik im Hessischen Ried zeigt, ist ein nachträgliches Reagieren auf Veränderungen im Wasserhaushalt nur mit erheblichem Aufwand möglich. Bestehende Bauwerke können nur mit großem Aufwand gegen Vernässungen geschützt werden. Die prognostizierten Veränderungen hinsichtlich der Grundwasserneubildung sollten daher Eingang in die Planung und Ausgestaltung von regionalen Bewirtschaftungsplänen finden. Diese orientieren sich zurzeit überwiegend an der Aufrechterhaltung einer bestimmten Grundwasserneubildungsrate innerhalb eines Gebietes, die durch Wasserentnahmen nicht unterschritten werden soll. Zukünftig sollte hierbei verstärkt der Aspekt von Vernässungen bzw. verstärkter Auswaschungsgefahr von Schadstoffen betrachtet werden.

Bei der Ausweisung von Baugebieten bzw. Planung von Bauwerken sollte ein zukünftiges Ansteigen der Grundwasserflurabstände stärker Berücksichtigung finden. Baugebiete sollten

möglichst nicht in stark vernässungsgefährdeten Gebieten ausgewiesen werden. Bei geplanten Bauwerken ist auf eine sachgerechte Abdichtung zu achten, auch wenn diese Maßnahmen die Bauvorhaben zunächst mit höheren Kosten belegen.

Aus landbaulicher Sicht muss die Gefahr einer erhöhten Nitratauswaschung stärker als bisher berücksichtigt werden, da die prognostizierte Erhöhung der Grundwasserneubildung auch Gebiete mit intensiver Landnutzung (z. B. Wetterau, Limburger Becken, Kasseler Graben und Hessisches Ried) betrifft. In den auswaschungsgefährdeten Gebieten sollte daher die Zusammenarbeit zwischen Fachbehörden, Landwirtschaft und Wasserwirtschaft verstärkt werden bzw. der Eingangsgröße „Klimaänderung“ eine gewichtigere Rolle zukommen.

Ausblick

Die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Grundwasserneubildung beruht auf einem Emissionsszenario, das für den Raum Hessen als wahrscheinlich angesehen wird. Zugrunde gelegt wurde hierbei das moderate Emissionsszenario B2, das von einem gemäßigten Anstieg der CO₂-Konzentrationen und damit gemäßigten Klimaänderungen ausgeht. Selbst dieses gemäßigte Szenario zeigt eine deutliche Erhöhung der Grundwasserneubildung auf. Aus Sicht des Grundwasserschutzes erscheint es erforderlich, Modellrechnungen auch mit anderen Emissionsszenarien durchzuführen, um mögliche Bandbreiten hinsichtlich der Variation der Grundwasserneubildung ausloten zu können. Gleichfalls sollten neue Erkenntnisse aus der Klimaforschung zeitnah Eingang in den Bereich Grundwasser/Wasserwirtschaft finden.

Literatur

ALBRECHT, F. M.: Regionalisierung von Klimaszenariendaten ausgewählter Klimaparameter für hessische und außerhessische Niederschlags- und Klimastationen auf ein 1x1-km Raster. Auswertung des Programm- und Gutachtenservice Franz M. Albrecht, 19 S., Wahlsburg 2005

ARMBRUSTER, V.: Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. – Freiburger Schriften zur Hydrologie 17: 141 S.; Freiburg/Brsg. 2002

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit – BMU (Hrsg.): Hydrologischer Atlas von Deutschland. – 3. Lieferung, Kartentafel 5.5 „Mittlere jährliche Grundwasserneubildung“, Berlin 2003

DOMMERMUTH, H. & TRAMPF, W.: Die Verdunstung in der Bundesrepublik 1951 bis 1980 – Teil 1, 2 und 3. – Deutscher Wetterdienst; Offenbach 1991

DÖRHÖFER, G., KUNKEL, R., TETZLAFF, B. & WENDLAND, F.: Der natürliche Grundwasserhaushalt in Niedersachsen. – In: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung – NLfB (Hrsg.): Aufbruch nach Europa, Hydrogeologie vor neuen Aufgaben. – Arbeitshefte Wasser 1: 109-167; Hannover 2001

ENKE, W.: Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM4 OPYC3 Klima-Simulationslaufes bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen. Abschlussbericht zum Werkvertrag B.-Nr. 2003/00082 zwischen dem Landesamt für Umwelt und Geologie Hessen und der Firma Meteo-Research, 47 S., Stahnsdorf 2003

GROSSMANN, J.: Umsetzung eines Modells zur flächendifferenzierten Bestimmung der Grundwasserneubildung mit einem Geo-Informationssystem. – Fachliche Berichte HWW 95/1: 3-15; Hamburg 1995

- GROSSMANN, J.: Vergleich von Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung für große Einzugsgebiete. – gfw-Wasser/Abwasser 138: 296-303; München 1997
- GROSSMANN, J.: Verfahren zur Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag für große Einzugsgebiete. – gfw-Wasser/Abwasser 139: 14-23; München 1998
- GROSSMANN, J.: Berechnung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag, Beschreibung eines Verfahrens. Dokumentation der Basisdaten und Parameter. – unveröffentlicht, 33 S., Hamburg 2001
- HERGESELL, M., BERTHOLD, G.: Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch die Regionalisierung des Base-flow Index (BFI). Jahresbericht 2004 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, 47-66; Wiesbaden 2005
- NEUMANN, J.: Persönliche Mitteilung. – Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft; München 2004
- NEUMANN, J.: Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung von Deutschland – Entwicklung und Anwendung des makroskaligen Verfahrens HAD-GWNeu. – Diss. Uni Halle: 133 S.; Halle/S. 2005
- RICHTER, D.: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194: 93 S., Offenbach 1995
- ZIMMERMANN, N. E., ROBERTS, D. W.: Final report of the MLP climate and biophysical mapping project. Swiss Federal Research Institute WSL, 18 S., Birmensdorf 2001