



## Geofakten 39

■ Klima

### Dokumentation der niedersächsischen Klimaprojektionsdaten AR5-NI v2.1

Hajati, M., Harders, D., Petry, U., Elbracht, J. &amp; Engel, N.

August 2022

*In diesem Geofakt werden Grundlagen und Verwendungseinschränkungen der aktuellen Klimaprojektionsdaten für Niedersachsen und Bremen (AR5-NI v2.1) erläutert. Hierbei handelt es sich um die Aktualisierung des AR5-NI v1.0, welches bereits in diversen Berichten verwendet wurde. Die Unterschiede der beiden Versionen sind im Anhang beschrieben. Als Datengrundlage dienen Klimamodellensembles für die Treibhausgasszenarien RCP2.6 („Klimaschutz“-Szenario) sowie RCP8.5 („Kein-Klimaschutz“-Szenario) des fünften Sachstandsberichts AR5 des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Diese wurden speziell für Niedersachsen und Bremen aufbereitet und ausgewertet. Als Produkte dieser Auswertungen stehen diverse Klimagrößen zur Verfügung: Es liegen klimatische Parameter (z. B. Temperatur, Niederschlag), klimatische Kenntage (z. B. Hitzetage, Trockentage), klimatische Perioden (z. B. Hitzeperioden, Trockenperioden) und Klimawirkungen (z. B. Grundwasserneubildung) vor. Die Daten werden vom Niedersächsischen Kompetenzzentrum Klimawandel (NIKO) des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU) in Kooperation mit dem Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) und dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) bereitgestellt. Visualisiert werden Teile der Auswertungen auf dem Niedersächsischen Klimainformationssystem NIKLIS sowie dem Niedersächsischen Bodeninformationssystem NIBIS®.*

*Die Nutzungs- und Kommunikationshinweise zu den Klimaprojektionsdaten AR5-NI befinden sich auf einem separaten Blatt.*

Projektion, Klimawandel, Klimafolgen, Klimaparameter, Klimawirkung, Klimaszenarien, Nutzungshinweis, AR5-NI.

#### 1. Grundlagen zu Klimamodellen und Klimaprojektionen

Klima ist der mittlere atmosphärische Zustand der an einem Ort bzw. in einem bestimmten Gebiet über einen längeren Zeitraum vorherrscht. Daher ist das Klima eine statistische Auswertung des Wetters und unterscheidet sich dadurch eindeutig vom kurzzeitig betrachteten Wetter. Die World Meteorological Organization (WMO) hat definiert, dass bei der Ermittlung von Klimaveränderungen zwischen Klimaprojektionen und einem in der Vergangenheit liegenden Beobachtungszeitraum stets 30jährige Zeiträume betrachtet werden sollten (WMO 2017). Um das Klima der Zukunft zu projizieren, werden in der Klimaforschung Szenarien möglicher Treibhausgasemissionen herangezogen. Im 5. Sachstandsbericht (AR5) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) werden dafür sogenannte RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) betrachtet. Diese Entwicklungspfade ergeben sich aus zukünftig möglichen sozialen, ökonomischen und politischen Entwicklungen auf der Welt und den resultierenden anthropogenen Treibhausgasemissionen. Die Szenarien sind nach

dem zusätzlichen Strahlungsantrieb („Energiezufuhr“) durch den Treibhauseffekt benannt, welcher bis zum Jahr 2100 gegenüber dem vorindustriellen Niveau erreicht wird (COLLINS et al. 2013). Die verwendeten Szenarien RCP8.5 und RCP2.6 stehen demnach für einen zusätzlichen Strahlungsantrieb durch anthropogene Treibhausgase von 8,5 W/m<sup>2</sup>, bzw. 2,6 W/m<sup>2</sup> (VAN VUUREN et al. 2011). Das RCP8.5-Szenario, genannt „Kein-Klimaschutz“-Szenario, repräsentiert eine Zukunft ohne nennenswerten Klimaschutz, in der vorwiegend auf fossile Energieträger zur Energieerzeugung gesetzt wird. Demgegenüber steht das RCP2.6-Szenario, genannt „Klimaschutz“-Szenario, das eine Zukunft repräsentiert, in der erhebliche Anstrengungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und -konzentrationen auf globaler Ebene umgesetzt werden (Abb. 1) und die globale Erwärmung auf unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt wird (DWD 2018a, COLLINS et al. 2013). Um das mögliche Spektrum des zukünftigen Klimas zu beschreiben, empfiehlt es sich daher, die Szenarien RCP8.5 und RCP2.6 auszuwerten.

Die Ergebnisse eines Klimamodells, das mit den Treibhausgasemissionen eines Szenarios angetrieben wird, werden als Klimaprojektionen bezeichnet. Für die getroffenen Annahmen der RCP-Szenarien liefert eine Klimaprojektion wichtige Hinweise zum möglichen zukünftigen Zustand des Klimasystems. Innerhalb des Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) des globalen Klimaforschungsprogramms World Climate Research Programme (WCRP) werden solche Klimaprojektionen mittels Klimamodellen koordiniert und erzeugt (DWD 2021, COLLINS et al. 2013).

Es wird zwischen globalen und regionalen Klimamodellen unterschieden. Die globalen Klimamodelle (General Circulation Models – GCM) umfassen den gesamten Globus und haben eine vergleichsweise grobe horizontale Auflösung von derzeit mehr als 100 km. Diese räumliche Auflösung reicht oft nicht aus, um regionale Ausprägungen des Klimawandels zu beschreiben. Aus diesem Grund kommen u. a. regionale Klimamodelle (Regional Climate Models – RCM) zum Einsatz, die eine deutlich höhere räumliche Auflösung (1–20 km) erzielen. Hierbei liefern die GCM die antreibenden Randbedingungen für die RCM, wodurch diverse Modellkombinationen entstehen, die für differenziertere regionale Aussagen genutzt werden können. Es wird zwischen dynamischen (physikalische Prozesse und Gleichungen liegen zu Grunde) und statistischen (statistische Methoden und Zeitreihen liegen zu Grunde) RCM unterschieden (DWD 2017).

Die Modellentwickler:innen empfehlen, für räumliche Auswertungen Rasterzellen zu aggregieren, konkret sollen mindestens 3 x 3 Rasterzellen aggregiert werden. Hintergrund ist, dass die Größenordnung der vom Modell erfassten Prozesse ein Vielfaches der Auflösung des RCM beträgt. Somit repräsentieren erst mehrere Rasterzellen der RCM einen Prozess (LINKE 2020).

Standard in der Klimaforschung ist die Betrachtung von Klimamodellensembles, in denen eine Vielzahl von Klimamodellen ausgewertet werden, um die klimatische Entwicklung im Zuge eines Szenarios abzuschätzen. Hintergrund ist, dass jedes Modell nur eine vereinfachte Abbildung der Realität darstellt und diese mit z. T. unterschiedlichen mathematischen Ansätzen berechnet. Gleichzeitig kann es bereits innerhalb eines Modells zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen, wenn andere Anfangsbedingungen oder modifizierte Modellparameter genutzt werden (Realisierungen). Dabei sind alle Ergebnisse verschiedener Modelle gleich wahrscheinlich. Diese Vielfalt an Ergebnissen innerhalb eines Klimamodellensembles führt zu einer Ergebnis-Bandbreite, innerhalb derer sich die zukünftige Entwicklung der klimatischen Verhältnisse abspielen kann. Aus diesem Grund ist es wichtig, sich nicht nur auf die Ergebnisse einer Realisierung eines Klimamodells zu fokussieren (DWD 2021).

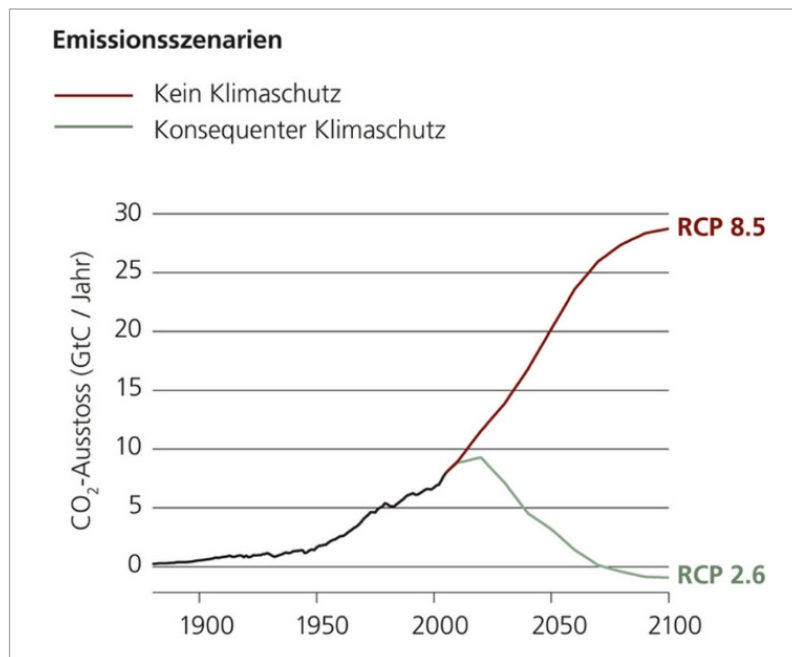


Abbildung 1: Weltweiter Netto-CO<sub>2</sub>-Ausstoß aus fossilen und industriellen Quellen bis 2100 für das RCP2.6- und RCP8.5-Szenario (NCC (2021), angepasst von IPCC (2013)/WGI/Box 1.1/Abbildung 3b).

Die Klimamodelle innerhalb eines Klimamodellensembles sind Modellkombinationen aus einem GCM mit einem RCM (Klimamodellketten). Diese werden im Weiteren Member genannt. Ein Klimamodellensemble kann als Referenzensemble bezeichnet werden, wenn dessen Member ausgewählte Anforderungen erfüllen. Anforderungen können z. B. sein, dass bestimmte Variablen wie Lufttemperatur vorliegen müssen oder dass die Modellentwickler:innen von der Verwendung der Datensätze aus bestimmten Gründen nicht abraten (DWD 2018b). Daneben können auch Qualitäts- und Plausibilitätsprüfungen zum Ausschluss bestimmter Member führen (LFU 2020). Wird aus dem Referenzensemble eine repräsentative Auswahl getroffen, wird dies Kernensemble genannt. So kann z. B. die Redundanz einzelner Member innerhalb des Referenzensembles minimiert werden. Die Ergebnis-Bandbreite bleibt dabei weitestgehend erhalten. Hintergrund ist, dass der Verarbeitungsaufwand mit dem Referenzensemble die Rechenkapazitäten (z. B. bei der Klimafolgenmodellierung) übersteigen kann. In diesen Fällen kann das Kernensemble mit einer reduzierten Anzahl an Mitgliedern genutzt werden (DWD 2018a).

## **2. Erläuterungen zu den Klimamodellensembles RCP8.5 und RCP2.6 für Niedersachsen**

### **2.1 Die Versionsbezeichnungen**

Es wurden bereits diverse Analysen zu den vergangenen und zukünftigen Klimaänderungen in Niedersachsen durchgeführt und veröffentlicht. Hierzu gehören der Klimareport Niedersachsen, der das vergangene, gegenwärtige und projizierte Klima Niedersachsens beschreibt (DWD 2018a), die Klimawirkungsstudie, die die Entwicklung der Klimawirkungen der Themenfelder Oberflächengewässer, Grundwasser und Boden darlegt (MU 2019) und die Niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels 2021, welche Klimaanpassungsmöglichkeiten in Niedersachsen aufzeigt (MU 2022a). Die beiden letzten Veröffentlichungen basieren auf einer vorherigen Version der Klimaprojektionsdaten (AR5-NI v1.0, ausführliche Beschreibung in Anhang A.2).

Für das AR5-NI v2.1 wurde eine speziell für niedersächsische Verhältnisse angepasste und überarbeitete Datengrundlage verwendet, um mögliche Entwicklungen des Klimas in Niedersachsen bis

zum Ende des 21. Jahrhunderts abschätzen zu können. Die Datengrundlage des AR5-NI v2.1 sind, wie auch beim AR5-NI v1.0, ausgewählte Klimamodelle des CMIP5. Diese wurden im AR5 des IPCC ausführlich beschrieben (COLLINS et al. 2013). Allerdings beinhaltet die Version 2.1 nun auch das RCP2.6-Ensemble (Referenzensemble) und die Erweiterung des RCP8.5-Ensembles vom Kern- auf das Referenzensemble. Des Weiteren wurden die verwendeten Klimamodelle vom DWD auf ein 5-km-Raster herunterskaliert und mittels multivariater BIAS-Adjustierung korrigiert (KRÄHENMANN, WALTER & KLIPPEL 2021).

Neben der neuen Datengrundlage haben sich auch die Auswertungsmethoden zur Erstellung der Klimaprojektionen verändert: So wurde die Berechnungsmethode des Änderungssignals und der potenziellen Verdunstung angepasst. Informationen zu den verschiedenen Ensembleversionen (Versionen 1.0, 2.0 und 2.1) finden sich in Anhang A.2.

### **2.2 Die Member der Klimamodellensembles für Niedersachsen**

Die Auswahl der Member für die Referenzensemble wurde vom Bund-Länder-Fachgespräch „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“ (BLFG) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) im Jahr 2018 definiert (Tab. 1). Die Ausweisung für dieses BLFG-Referenzensemble fand auf Basis ausgewählter Qualitätskriterien für die Modelle statt (LFU 2020). Auch der DWD hat Referenzensembles veröffentlicht. Diese beinhalten die Qualitätskriterien nicht und unterscheiden sich daher vom BLFG-Referenzensemble (DWD 2018b).

Das RCP8.5-Ensemble basiert auf elf Mitgliedern, bestehend aus Kombinationen von vier GCM mit vier dynamischen und einem statistischen RCM. Das RCP2.6-Ensemble basiert auf acht Mitgliedern, bestehend aus drei GCM, kombiniert mit vier dynamischen und einem statistischen RCM. Ausgewählte Daten der RCM, welche ursprünglich auf einem 12,5-km-Raster vorlagen, wurden vom DWD auf ein 5-km-Raster herunterskaliert und multivariat BIAS-adjustiert (KRÄHENMANN, WALTER & KLIPPEL 2021). Die statistischen WETTREG-Modelle wurden nicht BIAS-adjustiert, aber mittels bilinearer Interpolation von einem 12,5-km-Raster auf ein 5-km-Raster herunterskaliert, um eine einheitliche Datengrundlage zu erzeugen.

Tabelle 1: Member des BLFG-Referenzensembles. Diese beinhalten Globale Klimamodelle (GCM) und Regionale Klimamodelle (RCM). Dabei bezeichnen r1 und r12 ausgewählte Realisierungen der GCM. Der durchgestrichene Eintrag ist zwar Teil des BLFG-Referenzensembles, konnte aber wegen fehlender Parameter nicht berücksichtigt werden.

Globalmodell	Regionalmodell									
	CCLM		RACMO		RCA4		WRF		WETTREG	
	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5
EC-EARTH	r12	r12	r12	r1, r12	r12	r12		<del>r12</del>		
HadGEM2-ES								r1		v1-r1
MIROC5	r1	r1								
MPI-ESM-LR	r1	r1			r1	r1	r1	r1	v2-r1	v1-r1

### 2.3 Ausgabedaten der verwendeten Klimamodelle

Für jedes Member liegen als Ergebnis der Klimamodellierung tägliche Werte in Form von netCDF-Daten vor. Hierbei handelt es sich um die klimatischen Parameter mittlere (tas), minimale (tasmin) und maximale (tasmax) Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe (sfcWind), Niederschlag (pr) und relative Luftfeuchtigkeit (hurs). Die sechs dynamischen RCM liefern außerdem die Globalstrahlung (rsds), während das statistische RCM (WETTREG) die Sonnenscheindauer (sund) bereitstellt. Nicht alle Ausgabedaten liegen räumlich und zeitlich einheitlich vor. Details zur Vereinheitlichung sind in Anhang A.1 beschrieben. Um die potenzielle Verdunstung zu berechnen, wird die Sonnenscheindauer des statistischen RCM in die Globalstrahlung umgerechnet (Anhang A.4). Bei tasmin und tasmax handelt es sich nicht um die Ergebnis-Bandbreite, sondern um die berechnete tägliche minimale und maximale Lufttemperatur aus dem jeweiligen Modell.

### 2.4 Aufbereitete Größen und saisonale Auswertungen

Die Ausgabedaten des AR5-NI v2.1 beinhalten für beide Klimamodellensembles RCP2.6 und RCP8.5 jeweils den Ensemble-Mittelwert sowie den oberen und unteren Rand zukünftiger klimatischer Entwicklungen, aufbereitet für die 30jährigen Zeiträume nahe Zukunft (2021–2050) und ferne Zukunft (2071–2100) und als Änderung bezogen auf die Referenzperiode 1971–2000. Die Ergebnisse für den oberen bzw. unteren Rand der Ergebnis-Bandbreite können sich bei räumlich differenzierten Darstellungen (Rasterkarten) ggf. aus verschiedenen Modellen zusammensetzen. Beispiel: Ein Modell berechnet für den Harz sehr hohe Temperaturzunahmen, für die Küste hingegen nicht. Ein weiteres Modell aus dem Ensemble modelliert dagegen hohe Zunahmen für die Küste. Diese jeweiligen (Teil-)Ergebnisse werden zum Gesamtbild für den oberen Rand der Bandbreite zusammengefügt. Das heißt, dass die Ergebnisse nebeneinanderliegender Rasterzellen des oberen/unteren Rands der Ergebnis-Bandbreite aus verschiedenen Klimamodellen stammen können. Die detaillierte Berechnung ist in Anhang A.3 beschrieben.

Um innerjährliche Veränderungen darzustellen, werden für die Zukunftszeiträume Daten für verschiedene Zeitabschnitte ausgewertet (Tab. 2). Diese beziehen sich auf das Kalenderjahr, die meteorologischen Jahreszeiten, die hydrologischen (Halb-)Jahre sowie die Vegetationsperiode und -ruhe. Dabei wurden nicht alle Parameter für alle Zeitabschnitte berechnet. So ist es z. B. nicht sinnvoll, die Anzahl der Eistage im Sommer zu ermitteln (hier wird das gesamte Kalenderjahr betrachtet).

Tabelle 2: Ausgewertete Zeitabschnitte und Kürzel, wie diese bei der Datenabgabe verwendet werden, die innerhalb des AR5-NI v2.1 z. T. zur Verfügung stehen.

Zeitabschnitt	Definition	Monate	Kürzel
Y	Kalenderjahr	Jan. – Dez.	yr
S	Frühling	Mär. – Mai	sp
	Sommer	Jun. – Aug.	su
	Herbst	Sep. – Nov.	au
	Winter	Dez. – Feb.	wi
HYD	Hydrologisches Jahr	Nov. – Okt.	hyr
	Hydrologisches Sommerhalbjahr	Mai – Okt.	hsu
	Hydrologisches Winterhalbjahr	Nov. – Apr.	hwi
VEG	Vegetationsperiode	Apr. – Sep.	gs
	Vegetationsruhe	Okt. – Mär.	vd
Q	Quartal 1	Jan. – Mär.	q1
	Quartal 2	Apr. – Jun.	q2
	Quartal 3	Jul. – Sept.	q3
	Quartal 4	Okt. – Dez.	q4

Neben der mittleren Temperatur und der Niederschlagssumme, welche direkt aus den Klimamodellen ausgegeben werden, wurden weitere klimatische Parameter (Verdunstung und klimatische Wasserbilanz), klimatische Kenntage (z. B. Frosttage), klimatische Perioden (z. B. Trockenperioden) und Klimawirkungen auf Boden, Oberflächenwasser und Grundwasser ermittelt (Tab. 3). Für die meisten Parameter werden das Änderungssignal und der Wert in der nahen und fernen Zukunft abgegeben. Lediglich die Klimawirkungen im Thema Oberflächengewässer umfassen ausschließlich das Änderungssignal. Aufgrund der systematischen Über- und Unterschätzung durch die

Klimamodelle werden die Werte der nahen und fernen Zukunft nicht direkt aus den Modellen abgeleitet, sondern mittels Delta-Change-Verfahren ermittelt (LINKE 2020). Dies bedeutet, dass die Änderungen mit dem beobachteten Wert der Referenzperiode verrechnet werden. Die Klimaprojektionsdaten wurden (mit Ausnahme der statistischen Modelle) anhand der HYRAS-Daten des DWD BIAS-adjustiert (KRÄHENMANN, WALTER & KLIPPEL 2021). Für die Berechnung der absoluten Werte für die Zukunft dienen daher die HYRAS-Daten als Basis für den beobachteten Wert der Referenzperiode, wie anhand des folgenden Beispiels gezeigt wird:

$$tas_{2071-2100} = tas_{1971-2000, HYRAS} + \Delta tas_{2071-2100 \text{ zu } 1971-2000, \text{Projektion}}$$

HYRAS stellt die beobachteten Parameter  $tas$ ,  $tamin$ ,  $tamax$ ,  $hurs$  und  $pr$  zur Verfügung, alle klimatischen Kenntage und klimatischen Perioden werden daraus berechnet. Der klimatische Parameter  $ET_0$  wurde direkt vom DWD bereitgestellt, die Berechnung ist in Anhang A.4 beschrieben. Änderungssignale (Änderung der nahen bzw. fernen Zukunft relativ zur Referenzperiode) sind für alle klimatischen Parameter, klimatischen Kenntage, kli-

matischen Perioden und teilweise für die Klimawirkungen in absoluten Werten gegeben. Ausschließlich die Klimawirkungen im Bereich Oberflächengewässer sind in Prozent bereitgestellt.

Für spezielle Fragestellungen können auf Anfrage auch darüberhinausgehend z. B. tägliche Daten zu ausgewählten Klimaparametern bereitgestellt werden.

Tabelle 3: Verfügbare Klimagrößen mit Einheit, verfügbarem Zeitabschnitt, Definition und Kürzel des AR5-NI v2.1.

Variable	Einheit	Zeitabschnitt	Anmerkung	Kürzel
<b>Klimatische Parameter</b>				
Mittlere Temperatur	°C	Y, S, HYD, VEG	Durchschnittstemperatur	$tas$
Niederschlagsmenge	mm	Y, S, HYD, VEG	Mittlere Niederschlagsmenge	$pr$
Verdunstung	mm	Y, S, HYD, VEG	FAO-Grasreferenzverdunstung (Berechnung siehe Anhang A.4)	$ET_0$
Klimatische Wasserbilanz	mm	Y, S, HYD, VEG	Differenz aus Niederschlagsmenge und Verdunstung	KWB



Variable	Einheit	Zeitraum	Anmerkung	Kürzel
<b>Klimatische Kenntage</b>				
Frosttage	d	Y	Anzahl Tage mit Tagesminimum der Temperatur < 0°C	KT_fd
Eistage	d	Y	Anzahl Tage mit Tagesmaximum der Temperatur < 0°C	KT_id
Sommertage	d	Y	Anzahl Tage mit Tagesmaximum der Temperatur ≥ 25°C	KT_su
Hitzetage	d	Y	Anzahl Tage mit Tagesmaximum der Temperatur ≥ 30°C	KT_hd
Starkregentage	d	Y, S, HYD, VEG	Anzahl Tage mit Tagesniederschlagsmenge > 20 mm	KT_r20mm
Trockentage	d	Y, S, HYD, VEG	Anzahl Tage mit Tagesniederschlagsmenge < 1 mm	KT_dd
Schwüle Tage	d	Y	Anzahl Tage mit Wasserdampf-Partialdruck > 18,8 hPa (Taupunkt > 17°C)	KT_md
Tropennächte	d	Y	Anzahl Tage mit Tagesminimum der Temperatur ≥ 20°C	KT_tn
Spätfrosttage	d	Y	Anzahl Tage mit Tagesminimum der Temperatur < 0°C zwischen dem 01.04 und 30.06.	KT_ldf
Vegetationstage	d	Y, S, HYD	Anzahl Tage mit Mittlerer Tagestemperatur > 5°C	KT_tas5C
Max. Tagestemperatur	°C	Y, S, HYD, VEG	90. Perzentil der Tagesmaximumtemperatur	KT_txq90
Min. Tagestemperatur	°C	Y, S, HYD, VEG	10. Perzentil der Tagesminimumtemperaturen	KT_tnq10
Abflussrelevanter Niederschlag	mm	Y, Q	Niederschlagssumme von Tagen mit Niederschlag > 1 mm	KT_rMean1mm
Maximale 1/3/5-Tagesniederschlags-summe	mm	Y, S, HYD, VEG	Maximum der über 1, 3, 5 Tage aufsummierten Niederschlagsmenge	KT_rx1day, KT_rx3day, KT_rx5day
Anzahl feuchter Tage	d	Y, S, HYD, VEG	Mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlagsmenge > 90%-Langzeitquantil (1971–2000)	KT_r90p
<b>Klimatische Perioden</b>				
Maximale Trockenperiode	d	Y, S, HYD, VEG	Maximale Andauer von Perioden mit ununterbrochen aufeinanderfolgenden Trockentagen	KT_cdd
Maximale Frostperiode	d	Y	Maximale Andauer von Perioden mit ununterbrochen aufeinanderfolgenden Frosttagen	KT_fsdi0
Maximale Hitzeperiode	d	Y	Maximale Andauer von Perioden mit ununterbrochen aufeinanderfolgenden Hitzetagen	KT_hdd
Hitzeperioden (mindestens 6 Tage)	–	Y	Anzahl der Hitzeperioden von mindestens 6 aufeinanderfolgenden heißen Tagen	KT_hd30fr
Hitzeperioden (mindestens 3 Tage)	–	Y	Anzahl der Hitzeperioden von mindestens 3 aufeinanderfolgenden heißen Tagen	KT_3hd30fr
thermische Vegetationsperiode	d	Y	Erstmaliges Auftreten (im 1. Halbjahr) von 6 aufeinanderfolgenden Tagen über 5°C Tagesmitteltemperatur und erstmaliges Auftreten (im 2. Halbjahr) von 6 aufeinanderfolgenden Tagen unter 5°C Tagesmitteltemperatur	KT_gsl
Niederschlagsperioden-dauer	d	Y, S, HYD, VEG	(Maximale) Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit einem Niederschlag von ≥ 1 mm/d	KT_cwd

Variable	Einheit	Zeitraum	Anmerkung	Kürzel
<b>Klimawirkungen</b>				
Potenzielle Beregnungsbedürftigkeit <sup>*)</sup>	mm	VEG (gs)	Die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit wird mittels der MeMaS <sup>®</sup> -Methode „Mittlere Beregnungsmenge (mBm)“ (BUG et al. 2020) auf Basis der digitalen nutzungsdifferenzierten Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK50) berechnet. Dabei werden nur Flächen berücksichtigt, deren Nutzung in der BK50 als „Acker“ ausgewiesen ist. Es gehen korrigierte Niederschlagshöhen nach RICHTER (1995) ein.	mBm
Standörtliches Verlagerungspotenzial (Austauschhäufigkeit) <sup>*)</sup>	1/a	Y	Das Standörtliche Verlagerungspotenzial für nichtsorbiebare Stoffe (auch Austauschhäufigkeit des Bodenwassers pro Jahr) wird mittels der MeMaS <sup>®</sup> -Methode „Standörtliches Verlagerungspotenzial (Austauschhäufigkeit)“ (BUG et al. 2020) auf Basis der digitalen nutzungsdifferenzierten Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000 (BK50) berechnet. Es gehen korrigierte Niederschlagshöhen nach RICHTER (1995) ein.	AH
Grundwasserneubildung <sup>*)</sup>	mm	Y, HYD (hsu, hwi)	Berechnet mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA (ERTL et al. 2019). Es gehen korrigierte Niederschlagshöhen nach RICHTER (1995) ein.	gwnb
Mittelwasserabfluss <sup>**)</sup>	m <sup>3</sup> /s (Änderung in %)	HYD (hydr)	Mittelwasserabfluss (MQ) über alle Tage des Zeitabschnittes. Die Datenbasis bilden simulierte Abflüsse aus dem Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI auf Tageswertbasis.	MQ
Mittlerer Hochwasserabfluss <sup>**)</sup>	m <sup>3</sup> /s (Änderung in %)	HYD (hydr)	Mittelwert aus allen Jahreshöchstflüssen innerhalb des 30jährigen Betrachtungszeitraumes. Die Datenbasis bilden simulierte Abflüsse aus dem Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI auf Tageswertbasis.	MHQ
Hochwasserscheitel <sup>**)</sup>	m <sup>3</sup> /s (Änderung in %)	HYD (hydr)	Scheitelabfluss für ein 100jähriges Hochwasserereignis (im statistischen Mittel einmal in 100 Jahren zu erwarten). Die Datenbasis bilden simulierte Abflüsse aus dem Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI auf Tageswertbasis.	HQ100
Hochwasserhäufigkeit <sup>**)</sup>	– (Änderung in %)	HYD (hydr)	Als Hochwasserereignis wird in diesem Zusammenhang ein Abfluss bezeichnet, der über dem 2jährlichen Hochwasserabfluss (HQ2) liegt. Die Datenbasis bilden simulierte Abflüsse aus dem Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI auf Tageswertbasis.	HWH
Wellenvolumen bei Hochwasser <sup>**)</sup>	m <sup>3</sup> (Änderung in %)	HYD (hydr)	Volumen von Hochwasserwellen oberhalb eines Schwellwertes (hier: Abfluss, der über dem 2jährlichen Hochwasserabfluss (HQ2) liegt). Die Datenbasis bilden simulierte Abflüsse aus dem Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI auf Tageswertbasis.	HWV
Niedrigwasserabfluss <sup>**)</sup>	m <sup>3</sup> /s (Änderung in %)	HYD (hydr)	Niedrigster Abfluss, gemittelt über 7 Tage. Die Datenbasis bilden simulierte Abflüsse aus dem Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI auf Tageswertbasis.	NM7Q
Maximale Dauer von Niedrigwasserphasen <sup>**)</sup>	d (Änderung in %)	HYD (hydr)	Maximale Anzahl aufeinanderfolgender Tage mit einem Abfluss kleiner als das 20%-Langzeitquantil des 30jährigen Referenzzeitraumes. Die Datenbasis bilden simulierte Abflüsse aus dem Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI auf Tageswertbasis.	maxD20
Maximales Volumendefizit während Niedrigwasserphasen <sup>**)</sup>	m <sup>3</sup> (Änderung in %)	HYD (hydr)	Maximal akkumuliertes Defizitvolumen aufeinanderfolgender Tage mit einem Abfluss kleiner als das 20%-Langzeitquantil des 30jährigen Referenzzeitraumes. Die Datenbasis bilden simulierte Abflüsse aus dem Wasserhaushaltsmodell PANTA RHEI auf Tageswertbasis.	maxV20

<sup>\*)</sup> Berechnungen vom LBEG. Nicht für Bremen verfügbar.

<sup>\*\*)</sup> Berechnungen vom NLWKN. Derzeit nur mit den Klimaprojektionen des AR5-NI v2.0 vorhanden (RCP8.5). Hier sind ausschließlich Änderungssignale (in %) verfügbar. Der Wind wurde hierbei auf 10 m Höhe betrachtet und nicht auf 2 m heruntergerechnet.

### 3. Fazit

Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Klimaprojektionsdaten für Niedersachsen und Bremen (derzeit AR5-NI v2.1) und der vorliegenden Dokumentation werden wesentliche Beiträge zur Klimawandelforschung geleistet, welche die Auswertungen zum Klimawandel und den Klimafolgen in Niedersachsen und Bremen wissenschaftlich fundiert und in Anlehnung an die Abstimmungen zwischen den Bundesländern einheitlich beschreiben. Es ist ausdrücklich gewünscht, dass die Daten für weitere Auswertungen, Analysen und Wirkmodellierungen herangezogen werden und so für Niedersachsen eine Vereinheitlichung der Datengrundlage der Klimaprojektionsdaten gewährleistet wird. Die hier und in den „Nutzungs- und Kommunikationshinweisen zu den Klimaprojektionsdaten AR5-NI“ dargelegten Hinweise und Anmerkungen zur Kommunikation und Auswertung der Ergebnisse sind zu berücksichtigen. Durch die Veröffentlichung auf dem *NIKLIS* sowie auf dem *NIBIS®-Kartenserver* werden die Auswertungen für die breite Öffentlichkeit einfach zugänglich gemacht und visualisiert.

### 4. Dank

Die Autor:innen danken Tobias Schlinsog und Christina Scharun für ein sehr detailliertes und hilfreiches Korrekturlesen, welches die Lesbarkeit dieses sehr technischen Themas verbessert hat. Auch danken wir Anja Waldeck, die maßgeblich an der Entwicklung der vorherigen AR5-NI-Versionen beteiligt war.

### 5. Literatur

BUG, J., HEUMANN, S., MÜLLER, U. & WALDECK, A. (2020): Auswertungsmethoden im Bodenschutz - Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS®). – *GeoBerichte* **19**: 9. Aufl., 383 S., 36 Abb., 384 Tab.; Hannover (LBEG), [DOI 10.48476/geober\_19\_2020].

BUG, J., PLINKE, A.-K., AFFELT, L. T. & HARDERS, D. (2021): Standortpotenziale Grundwasserabhängiger Landökosysteme in Niedersachsen - Erläuterung zur Kulissenerstellung und Bewertung der Vulnerabilität. – *GeoBerichte* **43**: 66 S., 38 Abb., 9 Tab.; Hannover (LBEG), [DOI 10.48476/geober\_43\_2021].

COLLINS, M., KNUTTI, R., ARBLASTER, J., DUFRESNE, J.-L., FICHEFET, T., FRIEDLINGSTEIN, P., GAO, X., GUTOWSKI, W. J., JOHNS, T., KRINNER, G., SHONGWE, M., TEBALDI, C., WEAVER, A. J. & WEHNER, M. (2013): Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. – *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1535 S.; Cambridge (UK) and New York (NY, USA) (Cambridge University Press).

DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (o. J.): Glossar – Ensemblevorhersagen. – <<https://rcccm.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=100652&lv3=100736>>, Zugriff 16.05.2022.

DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2017): Klimavorhersagen und Klimaprojektionen. – 36 S.; Offenbach am Main.

DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2018a): Klimareport Niedersachsen. – 52 S.; Offenbach am Main.

DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (2018b): Datensätze auf der Basis der RCP-Szenarien. – <[https://www.dwd.de/DE/forschung/klima\\_umwelt/klimaprojektionen/fuer\\_deutschland/fuer\\_dtsl\\_rcp\\_datensatz\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtsl_rcp_datensatz_node.html)>, Zugriff 11.07.2022.

DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.) (2021): Klimavorhersagen und Klimaprojektionen. – 36 S.; Offenbach am Main.

ERTL, G., BUG, J., ELBRACHT, J., ENGEL, N. & HERRMANN, F. (2019): Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen. Berechnungen mit dem



- Wasserhaushaltsmodell mGROWA18. – GeoBerichte **36**: 54 S., 20 Abb., 9 Tab.; Hannover (LBEG), [DOI 10.48476/geober\_36\_2019].
- KRÄHENMANN, S., WALTER, A. & KLIPPEL, L. (2021): Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Downscaling und multivariate Bias-Adjustierung - Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerkes entwickelte Verfahren zum Postprocessing von Klimamodelldaten. – Berichte des Deutschen Wetterdienstes **254**, 25 S.; Offenbach am Main (DWD).
- LBEG – LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE (Hrsg.) (o. J. a): Projekt „Netzwerke Wasser“. – <[https://www.lbeg.niedersachsen.de/startseite/boden\\_grundwasser/klimawandel/netzwerke\\_wasser/projekt-netzwerke-wasser-142107.html](https://www.lbeg.niedersachsen.de/startseite/boden_grundwasser/klimawandel/netzwerke_wasser/projekt-netzwerke-wasser-142107.html)>, Zugriff 26.07.2022.
- LBEG – LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE (Hrsg.) (o. J. b): Netzwerke Wasser 2.0. – <[https://www.lbeg.niedersachsen.de/startseite/boden\\_grundwasser/klimawandel/netzwerke\\_wasser\\_20/netzwerke-wasser-20-173749.html](https://www.lbeg.niedersachsen.de/startseite/boden_grundwasser/klimawandel/netzwerke_wasser_20/netzwerke-wasser-20-173749.html)>, Zugriff 26.07.2022.
- LFU – BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (Hrsg.) (2020): Das Bayerische Klimaprojektionsensemble - Audit und Ensemblebildung. – 52 S.; München.
- LINKE, C. (Redaktionsleitung) (2020): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“. – 66 S.; Potsdam.
- MU – MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, BAUEN UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2019): Klimawirkungsstudie Niedersachsen. – wissenschaftlicher Hintergrundbericht, 187 S.; Hannover.
- MU – MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, BAUEN UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2022a): Niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels 2021. – 251 S.; Hannover.
- MU – MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, BAUEN UND KLIMASCHUTZ (Hrsg.) (2022b): Wasserversorgungskonzept Niedersachsen. – 99 S.; Hannover.
- NCC – NATIONAL CENTRE FOR CLIMATE SERVICES (Hrsg.) (2021): Klimaszenarien verstehen. – <<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/klimaszenarien-verstehen.html>>, Zugriff 04.05.2022.
- NIBIS®-KARTENSERVEN IM NIEDERSÄCHSISCHEN BODENINFORMATIONSSYSTEM. – <<http://nibis.lbeg.de/cardomap3/>>; Hannover (LBEG).
- NLWKN – NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ (2021): Globaler Klimawandel - Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland. Abschlussbericht Projektphase 6. – NLWKN-Schriftenreihe Oberirdische Gewässer **45**, 96 S.; Norden.
- NUTZUNGS- UND KOMMUNIKATIONSHINWEISE ZU DEN KLIMAPROJEKTIONSDATEN AR5-NI (2022): Hinweise zu Geofakten 39. – <[https://dx.doi.org/10.48476/geofakt\\_39\\_1\\_2022](https://dx.doi.org/10.48476/geofakt_39_1_2022)>, Hannover (LBEG).
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. – Offenbach am Main (DWD).
- VAN VUUREN, D. P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A., HIBBARD, K., HURTT, G. C., KRAM, T., KREY, V., LAMARQUE, J.-F., MASUI, T., MEINSHAUSEN, M., NAKICENOVIC, N., SMITH, S. J. & ROSE, S. K. (2011): The representative concentration pathways: an overview. – Climatic Change **109**, Art. 5, <<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>>.
- WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (Hrsg.) (2017): WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. – 18 S.; Genf.

## Anhang

### A.1 Räumliche und zeitliche Vereinheitlichung der Klimamodell-Ausgabedaten für das AR5-NI v2.1

Die Parameter der einzelnen Klimamodelle stehen räumlich und zeitlich nicht einheitlich zur Verfügung. Eine Liste der sich daraus ergebenden Anpassungen sowie Aufbereitungsschritte wird im Folgenden erläutert.

1. Werte für die Küstenregionen sind nicht einheitlich von allen Klimamodellen vorhanden. Aus diesem Grund wurden fehlende Werte, bzw. Rasterzellen, für Niedersachsen mit Werten aus Nachbarzellen gefüllt. Wenn möglich, wurden fehlende Festland-Rasterzellen mit der am nächsten liegenden Festland-Rasterzelle ersetzt und fehlende Insel-Rasterzellen mit den am nächsten liegenden Insel-Rasterzellen.
2. Da nicht alle Klimaprojektionen einheitlich die Jahre der WMO-Standardreferenzperiode 1961–1990 beinhalten, werden die Modellierungen der Zukunft auf die Referenzperiode 1971–2000 bezogen, um Klimaänderungen zu beschreiben (LINKE 2020). Die Methode ist in Anhang A.3 beschrieben.
3. Das statistische Modell WETTREG2013 hat grundsätzlich eine andere Ausdehnung als die anderen vom DWD BIAS-adjustierten und herunterskalierten dynamischen Klimamodelle. Zum Beispiel fehlen bei WETTREG2013 die Nordseeinseln. Gleichzeitig liegt WETTREG2013 in einem gröber aufgelösten Gitter (12,5 km) vor, welches über die Methode „Bilinear“ durch das NIKO auf das Raster der anderen Member (5 km) übertragen wurde.
4. Das statistische Modell WETTREG2013 stellt die Sonnenscheindauer (sund), wohingegen alle andere Modelle die Globalstrahlung (rsds) bereitstellen. Zur Berechnung der potenziellen Verdunstung muss sund in rsds überführt werden. Die Berechnung ist in Anhang A.4 beschrieben.
5. HadGEM2-ES\_r1\_WRF361H geht als einziges Modell nur bis 31.12.2099, alle anderen Modelle hingegen bis 31.12.2100. Daher sind nicht alle Jahre für die Berechnung des 30jährigen Mittels der fernen Zukunft (2071–2100) vorhanden. Für dieses Modell gehen deshalb nur 29 Jahre in die Berechnung ein.

Hinweis WETTREG2013: Inzwischen stehen beim DWD auch Daten zu WETTREG2018 bereit. Diese Daten stellen mit Bezug auf Ausreißer im Datensatz WETTREG2013 bei den Kenngrößen sund (Sonnenscheindauer) und ps (Luftdruck) eine Korrektur dar. Interne und unveröffentlichte Auswertungen des NLWKN haben jedoch gezeigt, dass diesbezüglich für Niedersachsen keine besonderen Auffälligkeiten festzustellen waren. Da bereits mit der Aufbereitung mit WETTREG2013 begonnen wurde und Niedersachsen wenig von diesen Ausreißern betroffen ist, fand kein Austausch für AR5-NI v2.1 statt.

### A.2 Änderungen und Aktualisierungen zu vorangegangenen Versionen

#### Definition AR5-NI v1.0

Das AR5-NI v1.0 war das erste Klimamodellensemble Niedersachsens. Es wurde 2018 fertiggestellt und beinhaltet ein Klimamodellensemble, das sich aus dem Kernensemble RCP8.5 zusammensetzt. Das Klimamodellensemble des AR5-NI v1.0 wurde u. a. in der Klimawirkungsstudie Niedersachsen (MU 2019), im Projekt DAS - Netzwerke Wasser (2016–2019, LBEG o. J. a), in der Niedersächsischen Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels 2021 (MU 2022a) und teilweise im Wasserversorgungskonzept (MU 2022b) sowie im NIBIS®-Kartenserver bis Herbst 2022 verwendet.

Betrachtete Klimagrößen waren u. a. Temperatur, Niederschlagsmenge, potenzielle Verdunstung  $ET_0$  (FAO-Grasreferenzverdunstung nach BUG et al. (2020)), die Klimatische Wasserbilanz und die daraus abgeleiteten Klimawirkungen im Bereich Boden, Grundwasser und Oberflächenwasser. Die räumliche Auflösung der Projektionsdaten liegt bei 12,5 km. Die wasserwirtschaftlich besonders relevanten Klimamodelldaten Temperatur und Niederschlag wurden einer BIAS-Adjustierung durch das NLWKN und das LBEG unterzogen. Hierbei wurde das Verfahren des Linear Scaling monatsweise angewendet. Als Referenz dienten die HYRAS-Daten. Veröffentlicht wurden Ergebnisse des AR5-NI v1.0 in der Niedersächsischen Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels 2021 (MU 2022a) sowie in der Klimawirkungsstudie Niedersachsen (MU 2019).

Die zu Grunde liegenden Member des Klimamodellensembles waren damals noch nicht für alle Klimawirkungen einheitlich verwendet worden (Tab. 4). Die Ergebnis-Bandbreite der verwendeten Klimamodellensembles war jedoch ähnlich, sodass beide als gleichwertige Eingangsdaten für die jeweiligen Wirkmodelle angesehen werden konnten (MU 2019).

Tabelle 4: Member des AR5-NI v1.0. Es beinhaltet Globale Klimamodelle (GCM) und Regionale Klimamodelle (RCM). Das Ensemble für das Handlungsfeld Oberflächengewässer enthält die mit „O“ gekennzeichneten Member, das Ensemble für die Themenfelder Boden und Grundwasser die mit „BG“ gekennzeichneten.

Globalmodell	Regionalmodell					
	CCLM	REMO	WR13	RCA4	RACMO	HIRHAM
Can-ESM2	BG	BG				
CNRM-CM5			BG	BG, O		
EC-EARTH			BG	O	O	O
HadGEM2-ES	BG			O	BG	
IPSL-CM5A				O		
MIROC5			BG			
MPI-ESM-LR	BG, O			BG, O		

### Definition AR5-NI v2.0

Das AR5-NI v2.0 beinhaltet, wie auch AR5-NI v1.0, das Kernensemble des Szenarios RCP 8.5. Dargestellt und verwendet wurde das AR5-NI v2.0 u. a. in den Projekten Netzwerke Wasser 2.0 (2019–2022, LBEG o. J. b) sowie Standortpotenziale Grundwasserabhängige Landökosysteme (2016–2021, BUG et al. 2021) und teilweise im Wasserversorgungskonzept (MU 2022b) sowie im Projekt KliBiW (NLWKN 2021).

Folgende Änderungen wurden im Vergleich zu Version 1.0 vorgenommen:

- Änderung des RCP8.5-Ensembles (Umstellung auf Bund-Länder-Fachgespräch-RCP8.5-Kernensemble),
- Herunterskalierung und BIAS-Adjustierung der Klimamodelldaten aus dynamischen Modellen auf eine höhere räumliche Auflösung (5 km) durch den DWD (KRÄHENMANN, WALTER & KLIPPEL 2021),
- Umrechnung der Windgeschwindigkeit (sfcWind) von 10 m auf 2 m für die Verdunstungsberechnung,
- Änderung der Methodik für die Berechnung des Änderungssignals (Anpassung an die Berechnungsmethode nach Anhang A.3).

### Änderungen AR5-NI v2.1 zu AR5-NI v2.0

Die Klimaprojektionen des AR5-NI v2.1 umfassen ein weiteres Szenario und Veränderungen der Auswertungsmethode. Im Folgenden ist eine Zusammenfassung der Änderungen zur Version 2.0 gegeben:

- Das RCP8.5-Klimamodellensemble wurde auf das Bund-Länder-Fachgespräch-Referenzensemble erweitert,
- Das RCP2.6-Klimamodellensemble wurde auf Basis des Bund-Länder-Fachgespräch-Referenzensembles hinzugefügt,
- Auswertungen weiterer Kennwerte (Tab. 3) sowie Zeitabschnitte (Tab. 2) wurden vorgenommen,
- Aktualisierung der Berechnung der potenziellen Verdunstung  $ET_0$  nach der FAO-Standardmethode (entspricht Grasreferenzverdunstung). Die Methode ist in Anhang A.4 beschrieben,
- Vereinheitlichung der Küstenlinie,
- Verwendung korrigierter Niederschlagshöhen für die Wirkmodelle (nicht betreffend Wirkmodelle zu Oberflächengewässern).

### A.3 Berechnungsmethode der Klimaprojektionen und deren Änderungssignalen im AR5-NI v2.1

Aufgrund der z. T. Über- bzw. Unterschätzung der Klimamodelle im Vergleich zu Beobachtungsdaten sollen Klimamodellergebnisse nicht direkt verwendet werden, um Aussagen für die Zukunft abzuleiten (LINKE 2020). Stattdessen werden Änderungssignale aus den Modelldaten berechnet, welche man zu den beobachteten Werten der Referenzperiode addiert, um absolute Werte für die Zukunft zu erhalten. Die Änderungssignale sind einzeln für jedes Member des Klimamodellensembles zu berechnen. Aus den einzelnen Änderungssignalen ergeben sich wiederum die Ergebnis-Bandbreite (Minimum = unterer Rand der Bandbreite, Maximum = oberer Rand der Bandbreite) und der Mittelwert eines Parameters für die nahe und ferne Zukunft. Diese werden dann zu Beobachtungsdaten des entsprechenden Parameters aus der Referenzperiode 1971–2000 addiert. Für die Klimabeobachtungsdaten wurde im AR5-NI v2.1 der HYRAS-Datensatz des DWD verwendet. Als Resultat ergeben sich der obere und untere Rand der Ergebnis-Bandbreite des Parameters der nahen und fernen Zukunft. Diese Methode wird auch als Delta-Change-Verfahren bezeichnet.

Um die Rechnung zu veranschaulichen, wird im Folgenden die Berechnung der mittleren Lufttemperatur ( $tas$ ) unter Verwendung der Anzahl ( $i$ ) der Member ( $P$ ) für die ferne Zukunft ( $FF$ ) exemplarisch beschrieben. Es ist die Methode für absolute und nicht prozentuale Änderungssignale gezeigt:

1. Zunächst wird das 30jährige Mittel [ $^{\circ}\text{C}$ ] der mittleren jährlichen Lufttemperatur  $tas_{Pi,RP}$  der Referenzperiode 1971–2000 ( $RP$ ) und  $tas_{Pi,FF}$  der fernen Zukunft 2071–2100 ( $FF$ ) aller  $i$  Member  $P_i$  berechnet.

$$tas_{Pi,FF} = \frac{\sum_{a=2071}^{2100} tas(a)_{Pi}}{30}$$

$$tas_{Pi,RP} = \frac{\sum_{a=1971}^{2000} tas(a)_{Pi}}{30}$$

2. Anschließend wird für alle  $i$  Member die Differenz ( $\Delta tas_{Pi,FF}$ ) berechnet. Das ist das Änderungssignal jedes Members  $P_i$ .

$$\Delta tas_{Pi,FF} = tas_{Pi,FF} - tas_{Pi,RP}$$

Von diesen  $i$  Differenzen werden das Minimum, der Mittelwert und das Maximum [ $^{\circ}\text{C}$ ] für jede Rasterzelle berechnet. Dies entspricht der Ergebnis-Bandbreite (Minimum  $tas_{aes,min,FF}$  und Maximum  $tas_{aes,max,FF}$ ) und der mittleren Änderung ( $aes$ ) der Temperatur ( $tas_{aes,mean,FF}$ ) für die ferne Zukunft.

$$tas_{aes,mean,FF} = \text{mean}(\Delta tas_{Pi,FF})$$

$$tas_{aes,min,FF} = \text{min}(\Delta tas_{Pi,FF})$$

$$tas_{aes,max,FF} = \text{max}(\Delta tas_{Pi,FF})$$

3. Das Änderungssignal wird genutzt, um die Ergebnis-Bandbreite der projizierten Lufttemperatur ( $tas_{min,FF}$  und  $tas_{max,FF}$ ) und die mittlere projizierte Lufttemperatur ( $tas_{mean,FF}$ ) für die ferne Zukunft [ $^{\circ}\text{C}$ ] zu berechnen. Hierfür werden die Bestandteile der Ergebnis-Bandbreite (Minimum  $tas_{aes,min,FF}$  und Maximum  $tas_{aes,max,FF}$ ) und des mittleren Änderungssignals ( $tas_{aes,mean,FF}$ ) verwendet und zu der beobachteten mittleren Lufttemperatur ( $tas_{obs,RP}$ ) [ $^{\circ}\text{C}$ ] der Referenzperiode addiert.

$$tas_{mean,FF} = tas_{obs,RP} + tas_{aes,mean,FF}$$

$$tas_{min,FF} = tas_{obs,RP} + tas_{aes,min,FF}$$

$$tas_{max,FF} = tas_{obs,RP} + tas_{aes,max,FF}$$

Da die Klimaprojektionen (mit Ausnahme der statistischen Modelle) anhand der HYRAS-Daten des DWD BIAS-adjustiert worden sind, werden hier die Klimaparameter  $tas$ ,  $tasmin$ ,  $tasmax$ ,  $hurs$  und  $pr$  aus den HYRAS-Daten für die Berechnung der beobachteten Parameter der Referenzperiode genutzt. Diese Methode zur Berechnung des Änderungssignals und des Parameters der Zukunft ist für alle Klimaparameter

(z. B. Niederschlag, Verdunstung), Klimakenntage (z. B. Hitzetage, Frosttage), Klimakennperioden (z. B. Hitzeperioden, Frostperioden) und Klimawirkungen (z. B. Berechnungsbedarf, Grundwasserneubildung) identisch. Falls das Änderungssignal bei klimatischen Kenntagen, wie z. B. Eistagen, größer ist als der gemessene Wert, wird für diesen klimatischen Kenntag der minimale Wert der Zukunft auf Null gesetzt. So werden negative klimatische Kenntage ausgeschlossen.

#### A.4 Berechnung der potenziellen Verdunstung aus Klimamodelldaten (FAO-Standardmethode zur Berechnung der Grasreferenzverdunstung $ET_0$ )

Die Berechnung der potenziellen Verdunstung  $ET_0$  anhand der FAO-Standardmethode wurde für das AR5-NI v2.1 angepasst. In AR5-NI v2.0 wurde die Berechnung anhand Geobricht 19 (BUG et al. 2020) verwendet. Im Folgenden sind die einzelnen Variablen, Konstanten und Rechenschritte zur  $ET_0$ -Bestimmung aufgeführt.

##### Variablen

DOY	Tag im Jahr
elev	Höhe [m]
lat <sub>WGS84</sub>	Geographische Breite [in WGS84]
sfcWind	Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe [m/s]
hurs	relative Luftfeuchte [%]
rsds	Globalstrahlung [ $W\ m^{-2}$ ]
sund	Sonnenstunden [s]

##### Konstanten

$\lambda$	2,45	latente Wärme/Verdunstungswärme [ $MJ\ kg^{-1}$ ]
$cp$	$1,013 \cdot 10^{-3}$	spezifische Wärme [ $MJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ]
$\epsilon$	0,622	Verhältnis Molekulargewicht Wasserdampf zu trockener Luft
$\alpha$	0,23	Albedo
Gsc	0,082	Solarkonstante [ $MJ\ m^{-2}\ min^{-1}$ ]
Ras Rbs	0,25 0,5	Konstanten in der Angstrom-Gleichung zur Bestimmung der Globalstrahlung aus der Sonnenscheindauer
$\sigma$	$4,903 \cdot 10^{-9}$	Stefan-Boltzmann-Konstante [ $MJ\ K^{-4}\ m^{-2}\ day^{-1}$ ]
G	0	Bodenwärmestrom [ $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ ]

##### Rechnung

(1) Atmosphärischer Druck  $p$  [kPa]:

$$p = 101.3 * ((293.0 - 0.0065 * elev)/293.0)^{5.26}$$

(2) Psychrometerkonstante  $\gamma$  [ $kPa\ ^\circ C^{-1}$ ]:

$$\gamma = \frac{cp * p}{\epsilon * \lambda}$$

(3) Umrechnung der Windgeschwindigkeit von einer Messhöhe zu  $v_2$  in 2 m [m/s]:

$$v_2 = sfcWind * \left( \frac{4.87}{\log(67.8 * 10 - 5.42)} \right)$$

(4) Sättigungsdampfdruck  $e_s$  [kPa]:

$$e_s = 0.6108 * e^{\frac{17.27 * tas}{tas + 237.3}}$$

(5) Steigung des Sättigungsdampfdrucks  $\delta$  [ $kPa\ ^\circ C^{-1}$ ]:

$$\delta = \frac{4098.0 * e_s}{(tas + 237.3)^2}$$

(6) Aktueller Dampfdruck  $ea$  [kPa]:

$$ea = \frac{hurs * es}{100}$$

(7) Geographische Breite  $Ra_\phi$  [rad]:

$$Ra_\phi = \frac{\pi * lat_{WGS84}}{180}$$

(8) inverser relativer Abstand Erde-Sonne  $Ra_{dr}$  [rad]:

$$Ra_{dr} = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} * DOY\right)$$

(9) Deklination der Sonne  $Ra_\gamma$  [rad]:

$$Ra_\gamma = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} * DOY - 1.39\right)$$

(10) Winkel der Sonne bei Sonnenuntergang  $Ra_\Omega$  [rad]:

$$Ra_\Omega = \text{acos}(-\tan(Ra_\phi) * \tan(Ra_\gamma))$$

(11) Extraterrestrische Strahlung  $Ra$  [MJ/m<sup>2</sup>/d]:

$$Ra = \frac{24 * 60}{\pi} * Gsc * Ra_{dr} * (Ra_\Omega * \sin(Ra_\phi) * \sin(Ra_\gamma) + \cos(Ra_\phi) * \cos(Ra_\gamma) * \sin(Ra_\Omega))$$

(12) Globalstrahlung  $Rs$  [MJ/m<sup>2</sup>/d]:

a. Wenn  $rsds$  gegeben ist:

$$Rs = rsds * 0.0864$$

b. Wenn  $rsds$  nicht gegeben ist, sondern  $sund$ :

tägliche Sonnenscheindauer als Tagessumme  $N$ :  $N = Ra_\Omega * \frac{24}{\pi}$

$$Rs = \left(Ras + Rbs * \frac{sund}{3600 * N}\right) * Ra$$

(13) Mögliche Globalstrahlung bei wolkenlosem Himmel  $Rso$  [MJ/m<sup>2</sup>/d]:

$$Rso = (0.75 + 2 * 10^{-5} * elev) * Ra$$

(14) Kurzwelliger Anteil der Globalstrahlung  $Rns$  [MJ/m<sup>2</sup>/d]:

$$Rns = (1 - \alpha) * Rs$$

(15) Langwelliger Anteil der Globalstrahlung  $Rnl$  [MJ/m<sup>2</sup>/d]:

$$Rnl = \sigma * (tas + 273.16)^4 * (0.34 - 0.14 * \sqrt{ea}) * \left(1.35 * \frac{Rs}{Rso} - 0.35\right)$$

(16) Nettostrahlung  $Rn$  [MJ/m<sup>2</sup>/d]:

$$Rn = Rns - Rnl$$

(17) Tägliche Verdunstungshöhe  $ET_0$  [mm/d]:

$$ET_0 = \frac{0.408 * \delta * (Rn - G) + \gamma * \left(\frac{900}{tas + 273}\right) * v_2 * (es - ea)}{\delta + \gamma * (1 + 0.34 * v_2)}$$



---

## Impressum

Die Geofakten werden vom Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) herausgegeben und erscheinen unregelmäßig bei Bedarf.

Die bisher erschienenen Geofakten können unter <http://www.lbeg.niedersachsen.de> abgerufen werden.

© LBEG Hannover 2022

Version: 20.10.2022

DOI: 10.48476/geofakt\_39\_1\_2022

## Autorenschaft

- Dr. Mithra-Christin Hajati, Tel.: 0511/643-3597  
mail: [mithra-christin.hajati@lbeg.niedersachsen.de](mailto:mithra-christin.hajati@lbeg.niedersachsen.de),  
[mithra-christin.hajati@mu.niedersachsen.de](mailto:mithra-christin.hajati@mu.niedersachsen.de)
- Denise Harders, Tel.: 0511/643-3907  
mail: [denise.harders@lbeg.niedersachsen.de](mailto:denise.harders@lbeg.niedersachsen.de),  
[denise.harders@mu.niedersachsen.de](mailto:denise.harders@mu.niedersachsen.de)  
Niedersächsisches Ministerium für Umwelt,  
Energie, Bauen und Klimaschutz  
Archivstraße 2, 30169 Hannover  
Internet: [https://www.umwelt.niedersachsen.de/  
niko/niko\\_uber\\_uns/niko-uber-uns-205852.html](https://www.umwelt.niedersachsen.de/niko/niko_uber_uns/niko-uber-uns-205852.html)
- Uwe Petry, Tel.: 05121/509-115  
mail: [uwe.petry@nlwkn.niedersachsen.de](mailto:uwe.petry@nlwkn.niedersachsen.de)  
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,  
Küsten- und Naturschutz (NLWKN)  
– Hochwasservorhersagezentrale/Klimafolgen/  
Fachdatenmanagement –  
An der Scharlake 39, 31135 Hildesheim  
Internet: <http://www.nlwkn.niedersachsen.de>
- Dr. Jörg Elbracht, Tel.: 0511/643-3613  
mail: [joerg.elbracht@lbeg.niedersachsen.de](mailto:joerg.elbracht@lbeg.niedersachsen.de)
- Nicole Engel, Tel.: 0511/643-3597  
mail: [nicole.engel@lbeg.niedersachsen.de](mailto:nicole.engel@lbeg.niedersachsen.de)  
Landesamt für Bergbau,  
Energie und Geologie  
Stilleweg 2, 30655 Hannover  
Internet: <http://www.lbeg.niedersachsen.de>