

ReKliEs-HNR

Berechnung und Bereitstellung von Klimasimulationsdaten für hessische Naturräume

Version 1.0

März 2022

ReKliEs-HNR

Berechnung und Bereitstellung von
Klimasimulationsdaten für
hessische Naturräume

Version 1.0

erstellt im Auftrag des

Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)

Projektleitung:
Projektbearbeitung:

Jürgen Lang
Dr. Ulrike Gelhardt

MeteoSolutions GmbH
Wilhelminenstraße 2
64283 Darmstadt
Tel.: 0 61 51 / 59 90 340
Fax.: 0 61 51 / 59 90 339
E-Mail: info@meteosolutions.de
Internet: www.meteosolutions.de

Zweck des Dokuments: Dokumentation der Ermittlung von angepassten hessischen Naturräumen sowie der Anwendung dieser angepassten Naturräume Hessens auf Klimasimulationsdaten

Impressum

Autoren: **Dr. Ulrike Gelhardt**

Datei: WebBericht-ReKliEs-HNR-V1.0.docx

letzter Stand: 28. März 2022

Änderungsverfolgung:

Version	Datum	Bearbeiter:in	Änderung in Kapitel	Anlass
1.0	21.03.22	Gelhardt	Erstellung	

Freigabevermerk

Dokument geprüft und freigegeben

am 28.03.2022

durch Jürgen Lang

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Methodik.....	2
2.1 HYRAS-Daten	2
2.2 Berechnung der naturräumlichen Mittel	2
2.3 Überprüfung und Anpassung der naturräumlichen Gliederung anhand von Beispielen	4
3 Angepasste Naturräume Hessens	7
4 Anwendung auf Klimasimulationen	10
4.1 Datenbasis	10
4.2 Übersicht der aufbereiteten naturräumlichen Größen	11
4.3 Hinweise zum Format der erzeugten Rasterdatensätze.....	13
Literaturverzeichnis	14
Anhang	15
A. Niederschlag.....	15
B. Sommertage.....	17

1 Einleitung

Klimamodelldaten sollen vor der Nutzung in Klimafolgenforschung oder Politikberatung gemittelt werden, um Ungenauigkeiten herauszufiltern. Üblicherweise wird empfohlen, jeweils 3 x 3 Gitterboxen räumlich zu mitteln (Kreienkamp et al., 2012). Hierbei können jedoch Werte entstehen, die nicht repräsentativ für die zu untersuchende Fläche sind (z.B. Flächen im Rheingau werden mit Flächen im Taunus gemittelt).

Daher wurde im Projekt „Berechnung und Bereitstellung von ReKliEs-De Klimasimulationsdaten für hessische Naturräume“ ein Datensatz generiert, bei dem Flächenmittelwerte aus klimatisch ähnlichen Regionen berechnet wurden (z.B. Mittelrheingraben, Rhein-Main-Tiefland und hessisches Ried). Der Wert an einem beliebigen Punkt kann damit direkt in die Klimafolgenforschung oder Politikberatung eingehen, da die wissenschaftlich erforderliche Mittelung bereits erfolgt ist.

In diesem Bericht wird erläutert, wie die klimatisch ähnlichen hessischen Naturräume ermittelt und welche meteorologischen Größen durch die Anwendung auf Klimasimulationsdaten bestimmt wurden.

2 Methodik

Die Ermittlung charakteristischer räumlicher Strukturen in ausgewählten meteorologischen Größen für Hessen erfolgte basierend auf hydrometeorologischen Rasterdaten, den sog. HYRAS-Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) (Razafimaharo et al, 2020).

2.1 HYRAS-Daten

Die HYRAS-Daten liegen als Tageswerte in einer hohen räumlichen Auflösung von 5x5 km² für den 60-jährigen Zeitraum 1951 – 2010 vor. Bei der Auswahl der in der Studie zu berücksichtigten Parameter wurde darauf geachtet, dass die Parameter in den hochaufgelösten Daten der regionalen Klimasimulationen, auf welche die Methodik final angewendet werden soll (siehe Kapitel 4), verfügbar sind, mit dem Ziel, einen in sich konsistenten naturraumbezogenen Datensatz für Hessen bereitzustellen zu können.

Aus diesem Grund wurde die Globalstrahlung nicht berücksichtigt, da für das statistische Modell WETTREG zum jetzigen Zeitpunkt keine Globalstrahlung auf dem hochaufgelösten 5x5 km² Raster vorliegt. Hier waren Fehler in der Sonnenscheindauer aufgetreten. Es liegen zwar beim DWD jetzt die korrigierten Daten auf dem EURO-CORDEX 0.11° Gitter vor, ein Downscaling auf das 5x5 km²-Raster ist jedoch noch nicht durchgeführt worden. Es ist derzeit auch noch offen, ob, und wenn ja, wann diese Berechnungen durchgeführt werden (Stand: 01.10.2020).

Somit wurden die folgenden Parameter aus den HYRAS-Daten ausgewählt:

1. Niederschlag (PR)
2. Relative Feuchte (HURS)
3. Bodennahe Lufttemperatur (TAS)
4. Tagesminimum der bodennahen Lufttemperatur (Tmin)
5. Tagesmaximum der bodennahen Lufttemperatur (Tmax)

Aus den als Tageswerten vorliegenden HYRAS-Daten wurden Monatsmittel (HURS, TAS, Tmin, Tmax) bzw. Monatssummen (PR) gebildet. Des Weiteren wurden aus Tmin und Tmax die folgenden meteorologischen Kenntage abgeleitet:

6. Meteorologische Kenntage (Anzahl der Tage pro Jahr):
 - a. Eistage (Tmax < 0 °C)
 - b. Frosttage (Tmin < 0 °C)
 - c. Sommertage (Tmax > 25 °C)
 - d. Heiße Tage (Tmax > 30 °C)
 - e. Extrem heiße Tage (Tmax > 35 °C, bisher kein offizieller Parameter)
 - f. Tropennächte (Tmin > 20 °C)

Zur Identifikation charakteristischer Strukturen wurden sämtliche meteorologischen Größen monatsweise, jahreszeitenweise bzw. halbjährig über die zur Verfügung stehenden 60 Jahre zeitlich gemittelt. Anschließend wurde auf diese vieljährigen Mittel die folgende naturräumliche Flächenmittelung angewendet.

2.2 Berechnung der naturräumlichen Mittel

Die in diesem Projekt verwendeten Naturräume basieren auf der naturräumlichen Gliederung nach Otto Klausung (Klausung, 1988), welche wiederum u.a. auf Grundlage von klimatologischen und biologischen / phänologischen Daten definiert ist. Diese naturräumlichen Einheiten sind für gesamt Deutschland definiert. Für diese auf Hessen eingeschränkte Studie wurden nur die hessischen Naturräume als Ausgangsbasis verwendet, wobei hier aus der hierarchischen Gliederung die Haupteinheitengruppen verwendet wurden (siehe Abbildung 1 (links)).

Für die Berechnung der naturräumlichen monatlichen Flächenmittel der meteorologischen Parameter \bar{X}^n werden die einzelnen Rasterwerte gemäß ihres Flächenanteils am jeweiligen Naturraum gewichtet berücksichtigt:

$$\bar{X}^n = \frac{\sum w_{ij}^n X_{ij}}{\sum w_{ij}^n}$$

mit

w_{ij}^n : Flächenanteil des Rasterpunktes (i,j) am Naturraum n

X_{ij} : meteorologischer Parameter am Rasterpunkt (i,j)

Die Ergebnisausgabe erfolgt auf demselben 5x5 km²-Raster, auf dem auch die Eingangsdaten vorliegen (Lambert-Kegelprojektion). Rasterpunkte, die komplett innerhalb eines Naturraums liegen, erhalten das Flächenmittel des entsprechenden Naturraumes zugewiesen (siehe Abbildung 1 (rechts), grüne Rasterpunkte). Rasterpunkte, die anteilig in mehreren Naturräumen liegen (Abbildung 1 (rechts), orangene und rote Rasterpunkte), d.h. in den Übergangsbereichen von Naturräumen liegen, erhalten einen aus den einzelnen Naturräumen flächenanteilig gewichteten Wert.

Flächenanteile von Rasterpunkten, die in Nachbarbundesländer fallen, werden bei der Mittelung nicht berücksichtigt, da Werte außerhalb Hessens nicht berechnet werden. Rasterpunkte, die komplett außerhalb Hessens liegen erhalten eine Fehlkennung zugewiesen.

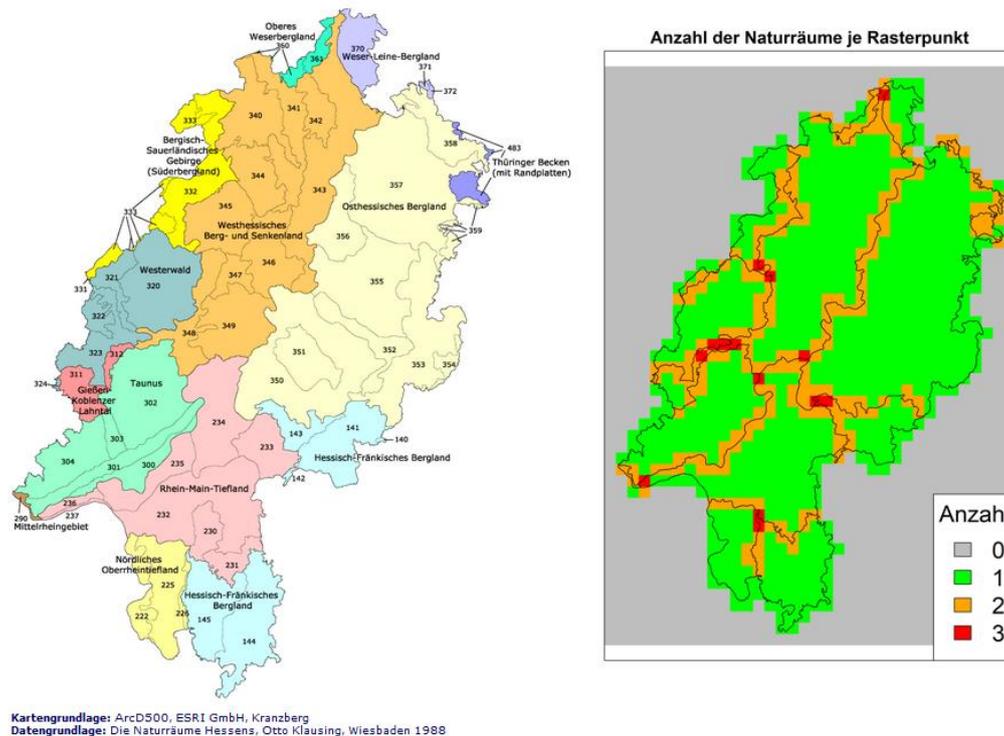


Abbildung 1: Links: Die Naturräume Hessens nach Otto Klausung, 1988. Die auch in der Studie verwendeten Haupteinheitengruppen sind hier farblich hervorgehoben. Rechts: Zuordnung der Rasterpunkte, auf denen die Eingangsdaten vorliegen, zu den Naturräumen Hessens (Haupteinheitengruppen) unter Angabe der Anzahl der zugeordneten Naturräume je Rasterpunkt.

2.3 Überprüfung und Anpassung der naturräumlichen Gliederung anhand von Beispielen

Zur Überprüfung, ob die Naturräume die charakteristischen Strukturen in den ausgewählten Parametern widerspiegeln oder ob die Naturräume angepasst werden müssen, wurde an allen vorliegenden Rasterpunkten Hessens die Abweichung vom naturräumlichen vieljährigen Flächenmittel für jeden Parameter untersucht.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise der Überprüfung und Anpassung der Naturräume Hessens exemplarisch anhand der bodennahen Lufttemperatur (TAS) für das vieljährige Mittel über das Winterhalbjahr (Oktober – März) aufgezeigt.

Abbildung 2 zeigt die räumliche Verteilung des vieljährigen Mittels der bodennahen Lufttemperatur gemittelt über das Winterhalbjahr für Hessen. Man erkennt, dass bereits die ursprüngliche Gliederung der hessischen Naturräume nach Klausning im Wesentlichen mit der räumlichen Struktur des Temperaturfeldes übereinstimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die naturräumliche Gliederung nach Klausning nicht auf Verwaltungseinheiten beruht, sondern auf naturwissenschaftlichen Daten, welche insbesondere die Geographie und damit auch die klimatologischen Unterschiede in

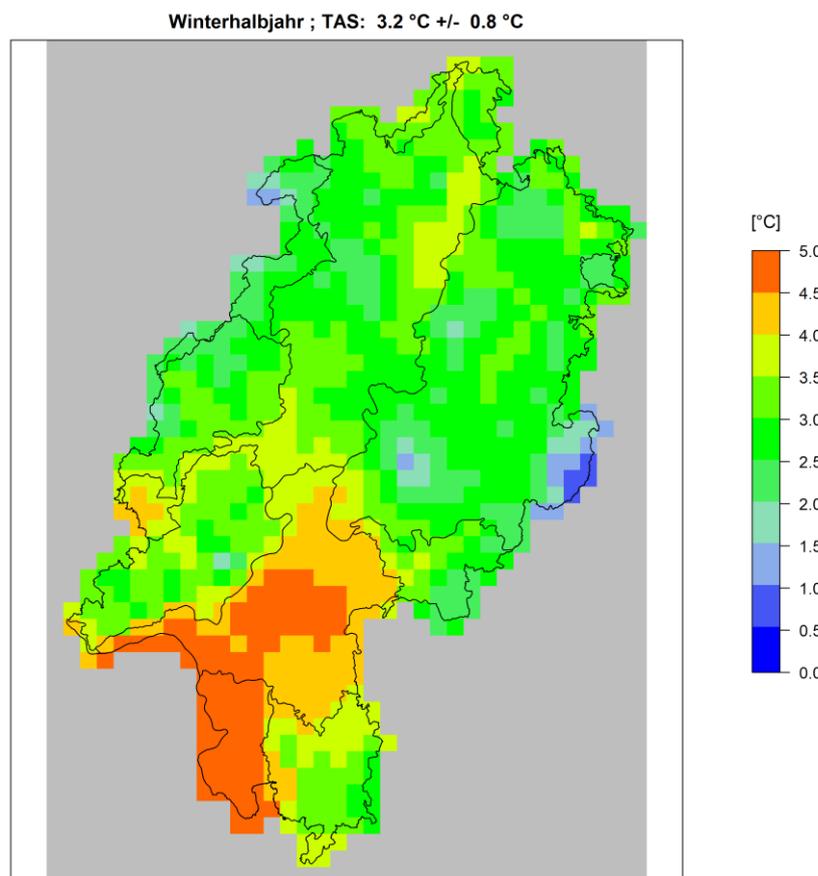


Abbildung 2: Über den Zeitraum von 1951 bis 2010 und über das Winterhalbjahr (Oktober bis März) gemittelte Monatsmittel der bodennahen Lufttemperatur in Hessen basierend auf HYRAS Daten. Das räumliche Mittel über Hessen beträgt hierbei 3.2 °C mit einer Standardabweichung von 0.8°C. Die Naturräume Hessens nach Otto Klausning sind als Polygonzüge in schwarz eingezeichnet.

Hessen berücksichtigen. So werden beispielsweise die niedrigeren Temperaturen im Hessisch-Fränkischen Bergland gut vom nördlichen Oberrheintiefland und dem Rhein-Main-Tiefland abgegrenzt. Auch die leicht höheren Temperaturen im Gießen-Koblenzer Lahntal werden gegenüber dem Taunus südlich und dem Westerwald nördlich in einem eigenen Naturraum abgebildet.

Andererseits ist jedoch auch zu erkennen, dass kleinräumigere Strukturen in der ursprünglichen Gliederung nach Klausling fehlen. So fallen zum Beispiel die Rhön und der Vogelsberg mit niedrigeren Temperaturen und damit auch weniger Sommertagen (siehe Anhang B) und höheren Niederschlägen (siehe Anhang A) als im zugeordneten übrigen osthessischen Bergland auf.

Durch Betrachtung der rasterpunktspezifischen Abweichung vom jeweils zugeordneten naturräumlichen Mittel werden die lokalen Unterschiede deutlicher und durch Anpassung der naturräumlichen Gliederung können Verbesserungen in der Untergliederung in Form von geringeren Abweichungen sichtbar gemacht werden. Diese Vorgehensweise wird in Abbildung 3 deutlich. Während bei einer zugrundeliegenden Gliederung nach Klausling Abweichungen von -2 K bis -2.5 K für den Vogelsberg und die Rhön zu verzeichnen sind (Abbildung 3, oben rechts), konnten nach Separierung dieser beiden Regionen die Abweichungen in der Temperatur auf -1 K reduziert werden (Abbildung 3, unten rechts).

Dieses Verfahren wurde unter Berücksichtigung aller gewählten meteorologischen Größen durchgeführt, so dass am Ende eine angepasste naturräumliche Gliederung mit den folgenden maximalen Abweichungen in den einzelnen meteorologischen Größen (ohne Kennstage) entstand: TAS (-1.7 K / +1.6 K), T_{min} (-1.1 K / + 1.4 K), T_{max} (-2.5 K / +1.7 K), PR (-18 mm / +34 mm) und HURS (-3 % / +4 %).

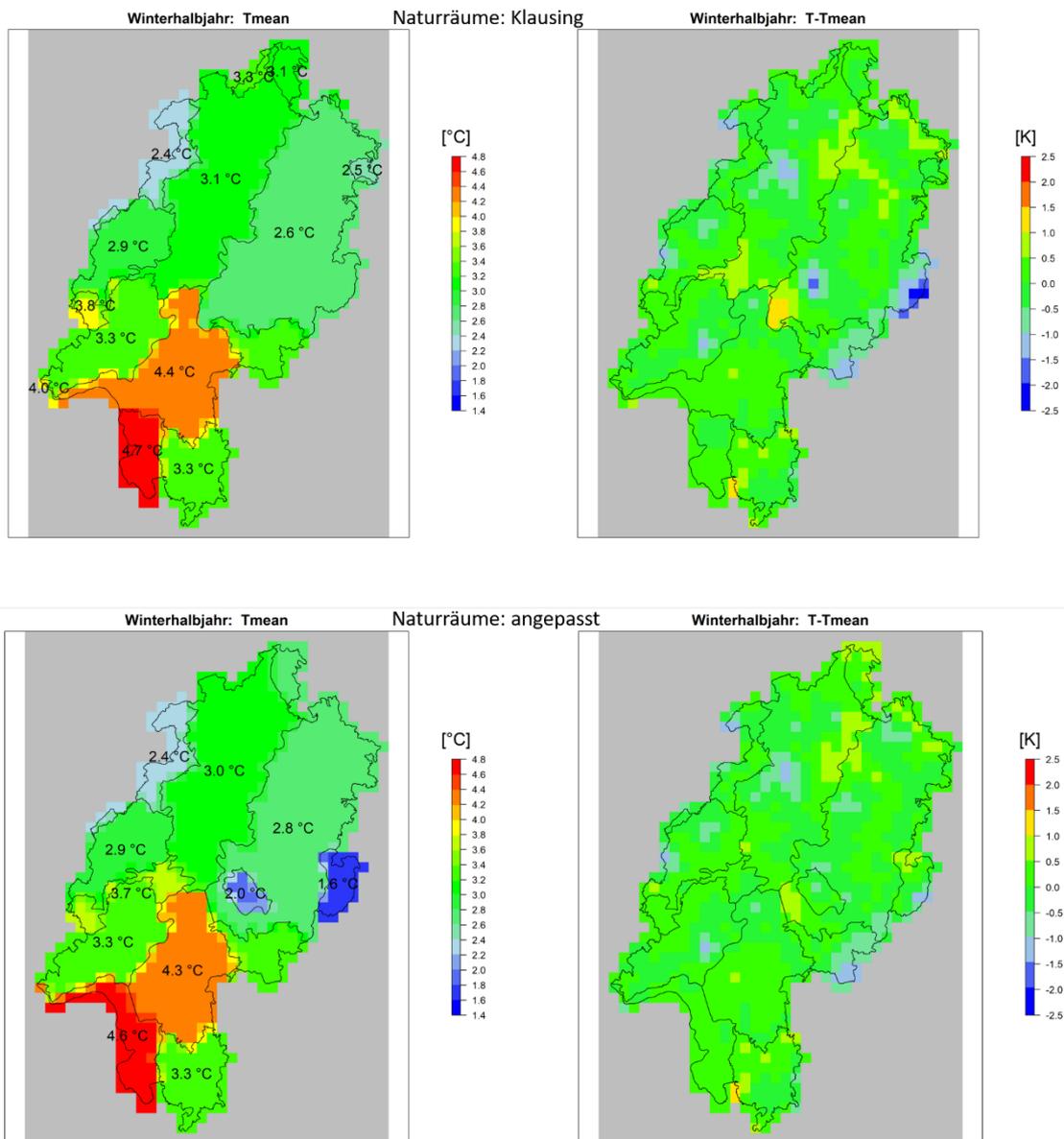


Abbildung 3: Links: Vieljährige (1951 bis 2010), über das Winterhalbjahr (Oktober bis März) gemittelte und über die Naturräume gemittelte Monatsmittel der bodennahen Lufttemperatur in Hessen basierend auf HYRAS Daten (Tmean). Rechts: Rasterpunktspezifische Abweichungen vom naturräumlichen vieljährigen Flächenmittel der über das Winterhalbjahr gemittelten bodennahen Lufttemperatur in Hessen (T-Tmean). Die entsprechend für die Mittelung verwendeten Naturräume Hessens sind als Polygonzüge in schwarz eingezeichnet (oben: Naturräume nach Otton Klausing, unten: angepasste Naturräume).

3 Angepasste Naturräume Hessens

Insgesamt wurden die folgenden Anpassungen an der ursprünglichen naturräumlichen Gliederung Hessens nach Otto Klausung durchgeführt (Abbildung 4 und Tabelle 1):

1. Die Rhön und der Vogelsberg als Mittelgebirge, die zum Naturraum osthessisches Bergland gehören (Haupteinheitennummer (HENr. 35) werden als separate Naturräume berücksichtigt. Hier treten bedingt durch die Stauwirkung des Gebirges bzw. durch die Höhenlage deutlich höhere Niederschläge bzw. niedrigere Temperaturen als im restlichen osthessischen Bergland auf.
2. Es wurden Anpassungen im Übergang vom Rhein-Main-Tiefland (HENr. 23) zum osthessischen Bergland (HENr. 35) vorgenommen. Der südwestliche Teil des westlichen unteren Vogelsbergs wurde dem Rhein-Main-Tiefland zugeordnet, da hier das vieljährige saisonale Monatsmittel der Temperatur höher als das Flächenmittel des Osthessischen Berglandes ist.
3. Das Rheintal, welches nach Klausung dem nördlichen Oberrheintiefland (HENr. 22) und dem Rhein-Main-Tiefland (HENr. 23) zugeordnet wird, wurde komplett in das nördliche Oberrheintiefland (HENr. 22) integriert und mit dem sehr kleinen Naturraum Mittelrheingebiet (HENr. 29), der nur von 3 Rasterpunkten abgedeckt wird, zusammengeführt.

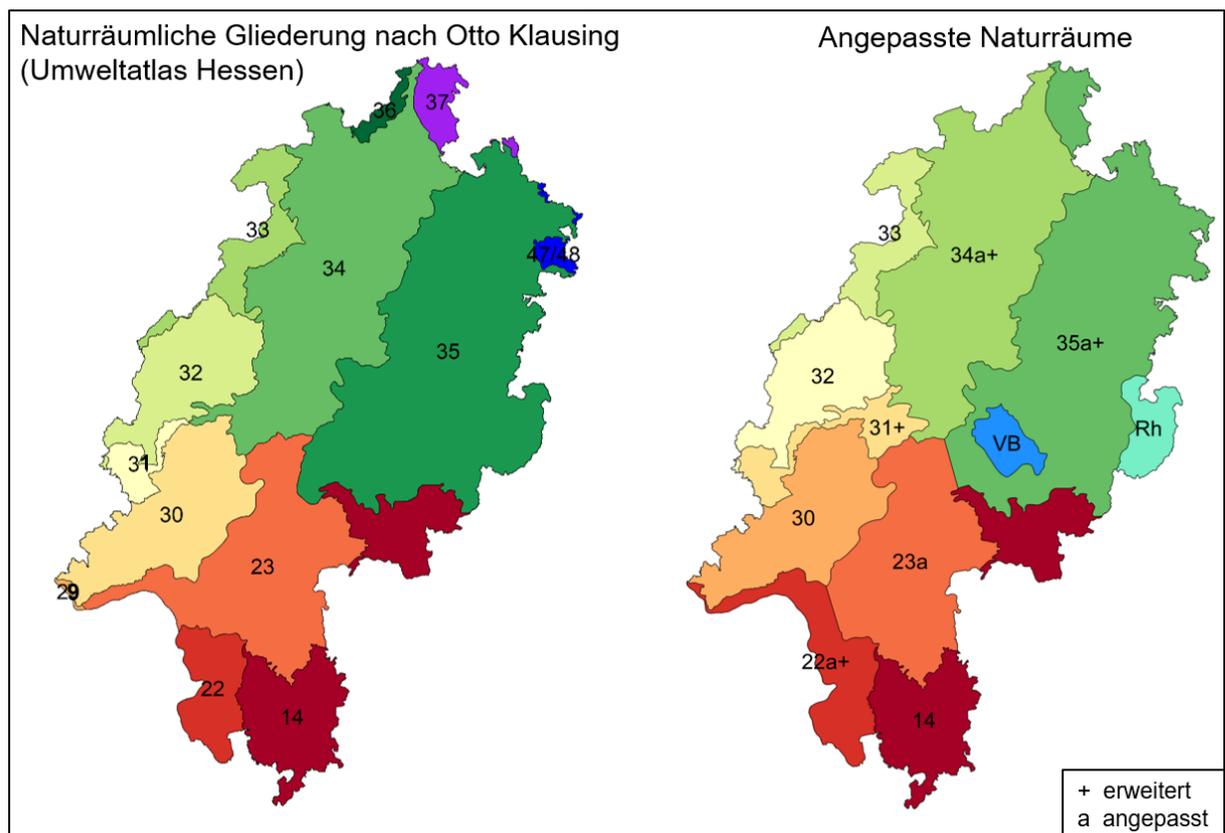


Abbildung 4: Naturräumliche Gliederung nach Otto Klausung mit Angabe der Haupteinheitennummern HENr (links). Flächen der angepassten Naturräume Hessens (HNRA, rechts). Die den Flächen neu zugeordneten Nummern der HNRA sind in Tabelle 1 näher erläutert. Zu beachten ist, dass der Naturraum HENr. 14 sich in zwei räumlich getrennte Flächen (dunkelrot) untergliedert.

Tabelle 1: Zuordnung der angepassten hessischen Naturräume (HNRA) zur naturräumlichen Gliederung nach Klausing (HENr). Die neu vergebenen Kennungen orientieren sich an den basierenden Haupteinheitennummern sowie nach Erweiterungen (+) und Anpassungen (a). Weitere Erläuterungen siehe Text.

Angepasste Naturräume HNRA	Gliederung nach Klausing HENr	Bemerkung
34a+	34, 36	Zusammenführung der Naturräume Westhessisches Berg- und Senkenland (34) und Oberes Weserbergland (36); Entfernung des Gießener Lahntals (Unterräume: Gießener Lahntalsenke, Gießener Landrücken, Großenlindener Hügelland)
35a+	35, 37, 47/48	Zusammenführung der Naturräume Osthessisches Bergland (35), Weser-Leine-Bergland (37) und Thüringer Becken (47/48); ohne Vogelsberg und Rhön; Anpassung der Abgrenzung zu HENr. 23 (Rhein-Main-Tiefland)
33	33	Bergisch-Sauerländisches Gebirge, unverändert
32	32	Westerwald, unverändert
31+	31	Zuordnung des Gießener Lahntals (Unterräume: Gießener Lahntalsenke, Gießener Landrücken, Großenlindener Hügelland) zum Gießen-Koblenzer Lahntal (31)
30	30	Taunus, unverändert
22a+	22, 29	Zusammenführung der Naturräume Nördliches Oberrheintiefland (22) und Mittelrheingebiet (29); Anpassung der Abgrenzung zu HENr. 23 (Rhein-Main-Tiefland)
23a	23	Rhein-Main-Tiefland; Anpassung der Abgrenzung zu HENr. 22 (Nördliches Oberrheintiefland) und zu HENr. 35 (Osthessisches Bergland)
14	14	Hessisch-Fränkisches Bergland, unverändert
Vb	/	Vogelsberg, aus HENr. 35 (Osthessisches Bergland) separiert
Rh	/	Rhön, aus HENr. 35 (Osthessisches Bergland) separiert

4. Das obere Weserbergland (HENr. 36) wurde in das westhessische Berg- und Senkenland integriert (HENr. 34).
5. Das Thüringer Becken (HE 47/48) sowie das Weser-Leine-Bergland (HENr. 37) wurden mit dem osthessischen Bergland (HENr. 35) zusammengeführt.
6. Das Gießener Lahntal, welches nach Klausing dem westhessischen Berg- und Senkenland (HENr. 34) zugordnet wird, wurde mit dem Gießen-Koblenzer Lahntal zusammengeführt (HENr. 31), da hier das vieljährige saisonale Monatsmittel der Temperatur höher bzw. das vieljährige saisonale Monatsmittel der relativen Feuchte niedriger als das Flächenmittel des westhessischen Berg- und Senkenlands ist.

Die Polygone der 11 angepassten hessischen Naturräume stehen im shape-Format zur Verfügung. In der shape-Datei sind den Polygonen die in Abbildung 1 bzw. Tabelle 1 verwendeten Kennungen (HNRA) zugeordnet (shapefile Parameter: NATRAUM_ID).

Die Bereitstellung der Polygone erfolgt sowohl in der ursprünglichen Mercatorprojektion

```
proj-string="+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=9 +k=1 +x_0=3500000 +y_0=0 +ellps=bes-  
sel +units=m +no_defs"
```

als auch in der Lambert-Kegelprojektion (EPSG:3034), in der auch die Klimasimulationsdaten vorliegen:

```
proj-string="+proj=lcc +lat_1=35 +lat_2=65 +lat_0=52 +lon_0=10 +x_0=4000000  
+y_0=2800000 +ellps=GRS80 +units=m +no_def".
```

4 Anwendung auf Klimasimulationen

Die mit Hilfe von HYRAS-Daten herausgearbeiteten angepassten Naturräume Hessens wurden bei der Aggregation von Klimasimulationsdaten zu naturräumlichen Einheiten angewendet.

4.1 Datenbasis

Als Datenbasis wurden Klimasimulationen von Tageswerten der Parameter PR, HURS, TAS, Tmin und Tmax aus verschiedenen Kombinationen von antreibendem Globalmodell (GCM) und angewendetem Regionalmodell (RCM) aus den Projekten ReKliEs-De (Hübener et al., 2017) und EURO-CORDEX (Jacob et al., 2013) verwendet. Die ursprünglich in 12 km Auflösung (EUR-11; 0.11°) vorliegenden Daten wurden vom DWD basierend auf HYRAS Daten Bias-korrigiert (Cannon, 2018) und auf ein 5x5 km² Raster in Lambert Kegelprojektion gebracht (Krähenmann, 2021).

In Tabelle 2 sind die in diesem Projekt verwendeten Modellläufe mit den entsprechend berücksichtigten Szenarien aufgeführt.

Die Daten wurden seitens des DWD auf einem Hessen abdeckenden Raster mit 37 x 52 Rasterpunkten zur Verfügung gestellt. Analog zur Aufbereitung der HYRAS-Daten (siehe Kapitel 2.1) wurden die bereitgestellten Tageswerte der Modelldaten zu Monatswerten aggregiert bzw. aus Tmin und Tmax die entsprechenden meteorologischen Kenntage abgeleitet.

Tabelle 2: Kombinationen von antreibendem GCM (globales Klimamodell) und RCM (regionales Klimamodell) aus der ReKliEs-DE / EURO-CORDEX Initiative, für welche die naturraumbezogenen Berechnungen durchgeführt wurden. Durch ein Kreuz sind die je Modellkombination entsprechend berücksichtigten Szenarien (RCP2.6 bzw. RCP8.5) gekennzeichnet. Für die Berechnung von Klimaänderungssignalen werden zudem die jeweils passenden simulierten Referenzdaten (historisch) benötigt.

GCM	RCM	Historisch	RCP2.6	RCP8.5
Name	Name			
CanESM2_r1i1p1	WETTREG2013_v1-r1	X		X
CanESM2_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	X		X
CanESM2_r1i1p1	REMO2015_v1	X		X
CNRM-CM5_r1i1p1	WETTREG2013_v1-r1	X		X
EC-EARTH_r12i1p1	WRF361H_v1	X		X
EC-EARTH_r12i1p1	WETTREG2013_v1-r1	X		X
EC-EARTH_r12i1p1	CCLM4-8-17_v1	X	X	X
EC-EARTH_r12i1p1	REMO2015_v1	X		X
EC-EARTH_r12i1p1	RACMO22E_v1	X	X	
EC-EARTH_r1i1p1	RACMO22E_v1	X		X
EC-EARTH_r12i1p1	RCA4_v1	X	X	X
IPSL-CM5A-MR_r1i1p1	RCA4_v1	X		X
MIROC5_r1i1p1	WETTREG2013_v1-r1	X		X
MIROC5_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	X		X

GCM	RCM	Historisch	RCP2.6	RCP8.5
Name	Name			
MIROC5_r1i1p1	REMO2015_v1	X		X
HadGEM2_r1i1p1	WETTREG2013_v1-r1	X		X
HadGEM2_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	X		X
HadGEM2_r1i1p1	REMO2015_v1	X		X
HadGEM2_r1i1p1	RACMO22E_v2	X	X	X
HadGEM2_r1i1p1	RCA4_v1	X	X	X
HadGEM2_r1i1p1	WRF361H_v1	X		X
MPI-ESM-LR_r1i1p1	WETTREG2013_v1-r1	X	X	X
MPI-ESM-LR_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	X	X	X
MPI-ESM-LR_r1i1p1	REMO2009_v1	X	X	X
MPI-ESM-LR_r1i1p1	RCA4_v1a	X	X	X
MPI-ESM-LR_r1i1p1	WRF361H_v1	X	X	X
MPI-ESM-LR_r2i1p1	REMO2009_v1	X	X	X

4.2 Übersicht der aufbereiteten naturräumlichen Größen

Es wurden die in der Studie ermittelten angepassten 11 Naturräume für Hessen genutzt und naturraumbezogene Werte in Form von arithmetischen Flächenmitteln berechnet. Dabei wurden Werte an Rasterpunkten, die mehreren Naturräumen zuzuordnen sind, flächenanteilig gemittelt (siehe Kapitel 2.2).

Als Referenz diente der jeweils simulierte Zeitraum von 1971 – 2000. Als Szenarioperiode der fernen Zukunft wurde der Zeitraum 2071 bis 2100 gewählt. Beim GCM HadGEM2 enden die Simulationen am 31.12.2099. Hier wurde somit abweichend der Zeitraum 2071 bis 2099 verwendet.

Für die Parameter

1. Niederschlag (PR)
2. Relative Feuchte (HURS)
3. Bodennahe Lufttemperatur (TAS)
4. Tagesminimum der bodennahen Lufttemperatur (Tmin)
5. Tagesmaximum der bodennahen Lufttemperatur (Tmax)
6. Meteorologische Kenntage (Anzahl der Tage pro Jahr):
 - a. Eistage ($T_{max} < 0 \text{ °C}$)
 - b. Frosttage ($T_{min} < 0 \text{ °C}$)
 - c. Sommertage ($T_{max} > 25 \text{ °C}$)
 - d. Heiße Tage ($T_{max} > 30 \text{ °C}$)
 - e. Extrem heiße Tage ($T_{max} > 35 \text{ °C}$, bisher kein offizieller Parameter)
 - f. Tropennächte ($T_{min} > 20 \text{ °C}$)

wurden insgesamt die folgenden naturräumlichen Größen berechnet und die jeweiligen Ergebnisdaten im netCDF Format abgelegt:

1. HURS, TAS, Tmin und Tmax:
 - a. Naturraumbezogene Monatsmittel für den Referenzzeitraum 1971 – 2000
 - b. Naturraumbezogene Monatsmittel für den zukünftigen Zeitraum 2071 – 2100 (+ Erweiterung um den Zeitraum 2001 – 2070) für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5
 - c. Naturraumbezogene 30-jährige monatliche Mittelwerte des Monatsmittels für den Referenzzeitraum 1971 – 2000
 - d. Naturraumbezogene 30-jährige monatliche Mittelwerte des Monatsmittels für den zukünftigen Zeitraum 2071 – 2100 (+ Erweiterung um 30-jährige Zeiträume 2001 – 2030, 2011 – 2040, ..., 2061 – 2090) für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5
 - e. Naturraumbezogenes Klimaänderungssignal für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 als Differenz des Monatswertes **einzelner** zukünftiger Jahre (2071 – 2100) und dem 30-jährigen monatlichen Mittelwert des Referenzzeitraums 1971 – 2100
2. PR:
 - a. Naturraumbezogene Monatssummen für den Referenzzeitraum 1971 – 2000
 - b. Naturraumbezogene Monatssummen für den zukünftigen Zeitraum 2071 – 2100 (+ Erweiterung um den Zeitraum 2001 – 2070) für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5
 - c. Naturraumbezogene 30-jährige monatliche Mittelwerte der Monatssummen für den Referenzzeitraum 1971 – 2000
 - d. Naturraumbezogene 30-jährige monatliche Mittelwerte der Monatssummen für den zukünftigen Zeitraum 2071 – 2100 (+ Erweiterung um 30-jährige Zeiträume 2001 – 2030, 2011 – 2040, ..., 2061 – 2090) für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5
 - e. Naturraumbezogenes Klimaänderungssignal für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 als Differenz der Monatssumme **einzelner** zukünftiger Jahre (2071 – 2100) und dem 30-jährigen monatlichen Mittelwert der Monatssummen des Referenzzeitraums 1971 – 2100
3. Meteorologische Kenntage:
 - a. Naturraumbezogene Jahreswerte für den Referenzzeitraum 1971 – 2000
 - b. Naturraumbezogene Jahreswerte für den zukünftigen Zeitraum 2071 – 2100 (+ Erweiterung um den Zeitraum 2001 – 2070) für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5
 - c. Naturraumbezogene 30-jährige Mittelwerte für den Referenzzeitraum 1971 – 2000
 - d. Naturraumbezogene 30-jährige Mittelwerte für den zukünftigen Zeitraum 2071 – 2100 (+ Erweiterung um 30-jährige Zeiträume 2001 – 2030, 2011 – 2040, ..., 2061 – 2090) für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5
 - e. Naturraumbezogenes Klimaänderungssignal für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 als Differenz der Werte **einzelner** zukünftiger Jahre (2071 – 2100) und dem 30-jährigen Mittelwert des Referenzzeitraums 1971 – 2000
4. Ensemblemittel
 - a. 30-jährige naturraumbezogene Ensemblemittel des Klimaänderungssignals von Kenntagen für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5
 - b. 30-jährige saisonale naturraumbezogene Ensemblemittel des Klimaänderungssignals von PR, HURS, TAS, Tmin und Tmax für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5

4.3 Hinweise zum Format der erzeugten Rasterdatensätze

Für jede berechnete Größe (siehe Kapitel 4.2) wird je Modellkombination, Szenario und Parameter eine netCDF-Datei, die alle entsprechenden Zeitscheiben mit jeweils einem Rasterdatensatz von 37 x 52 Gitterpunkten enthält, erzeugt.

Bei der Erzeugung der netCDF-Dateien wurde darauf geachtet, dass die Daten in ArcMap (Version 10.6.1) in der hinterlegten Projektion (grid_mapping = "Lambert_Conformal") darstellbar sind, d.h. insbesondere, dass den als X- und Y-Dimensionen angegebenen Koordinatenvariablen das Attribut "standard_name" mit den Werten "projection_x_coordinate" bzw. "projection_y_coordinate" hinzugefügt ist. Die Variable "Lambert_Conformal" enthält u.a. die folgenden Attribute:

- grid_mapping_name = "lambert_conformal_conic"
- longitude_of_central_meridian = 10.
- latitude_of_projection_origin = 52.
- standard_parallel = 35., 65.
- false_easting = 4000000.
- false_northing = 2800000.
- CoordinateTransformType = "Projection"

Im Folgenden ist beispielhaft der Header einer netCDF-Datei, der mittels "ncdump" erzeugt wurde, angegeben (ohne Datenteil):

30-jährige Mittelwerte des Monatsmittels der bodennahen Lufttemperatur (TAS) des Referenzzeitraums 1971 – 2000 für die Modellkombination MPI-ESM-LR_r1i1p1 (GCM) und WETTREG2013_v1-r1 (RCM):

```
netcdf tas_monmean_MPI-ESM-LR_r1i1p1_WETTREG2013_v1-r1_longtermMonthlyMean_1971-
2000_HNR_5km
dimensions:
  X = 37 ;
  Y = 52 ;
  time = 12 ;
variables:
  double X(X) ;
    X:units = "m" ;
    X:long_name = "x coordinate of projection" ;
    X:axis = "easting" ;
    X:standard_name = "projection_x_coordinate" ;
  double Y(Y) ;
    Y:units = "m" ;
    Y:long_name = "y coordinate of projection" ;
    Y:axis = "northing" ;
    Y:standard_name = "projection_y_coordinate" ;
  double time(time) ;
    time:units = "index of month in year" ;
    time:long_name = "time" ;
    time:axis = "T" ;
  float tas(time, Y, X) ;
    tas:units = "Celsius" ;
    tas:_FillValue = -999.f ;
    tas:long_name = "Long-term Monthly Mean of Bias-Adjusted-Interpolated
Near-Surface Air Temperature (monthly mean)" ;
    tas:grid_mapping = "Lambert_Conformal" ;
    tas:proj4 = "+init=epsg:3034 +proj=lcc +lat_1=35 +lat_2=65 +lat_0=52
+lon_0=10 +x_0=4000000 +y_0=2800000 +ellps=GRS80 +towgs84=0,0,0,0,0,0,0 +units=m
+no_defs" ;
    char Lambert_Conformal ;
      Lambert_Conformal:units = "1" ;
```

Literaturverzeichnis

Cannon, A.J., 2018: Multivariate quantile mapping bias correction: An N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Climate Dynamics*, 50, 31-49.

Hübener, H., K. Bülow, C. Fooker, B. Früh, P. Hoffmann, S. Höpp et al., 2017: ReKliEs-De Ergebnisbericht. doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht

Jacob D., J. Petersen, B. Eggert, A. Alias, O. Bøssing Christensen, L. Bouwer et al., 2013: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research, *Reg. Env. Change*, 14, 563–578. doi: <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>

Klausing, O., 1988: Die Naturräume Hessens. Umweltatlas Hessen des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie. Karte zu den Naturräumen Hessens: https://web.archive.org/web/20141010022448/http://atlas.umwelt.hessen.de/atlas/naturschutz/naturraum/karten/m_3_2_1.htm [Zugriff am 26.01.2022]; Legende zu den Naturräumen Hessens: <https://web.archive.org/web/20201009172346/http://atlas.umwelt.hessen.de/atlas/naturschutz/naturraum/texte/ngl-sy.htm> [Zugriff am 16.01.2022].

Krähenmann, S., A. Walter, L. Klippel, 2021: Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Downscaling und multivariate Bias-Adjustierung. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes (2021)*, 254.

Kreienkamp, F., Huebener, H., Linke, C. et al., 2012: Good practice for the usage of climate model simulation results – a discussion paper. *Environ Syst Res* 1, 9. doi: 10.1186/2193-2697-1-9

Razafimaharo, C., S. Krähenmann, S. Höpp, M. Rauthe and T. Deutschländer, 2020: New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum and maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS). *Theoretical and Applied Climatology* 142:1531-1553. doi: 10.1007/s00704-020-03388-w

Anhang

A. Niederschlag

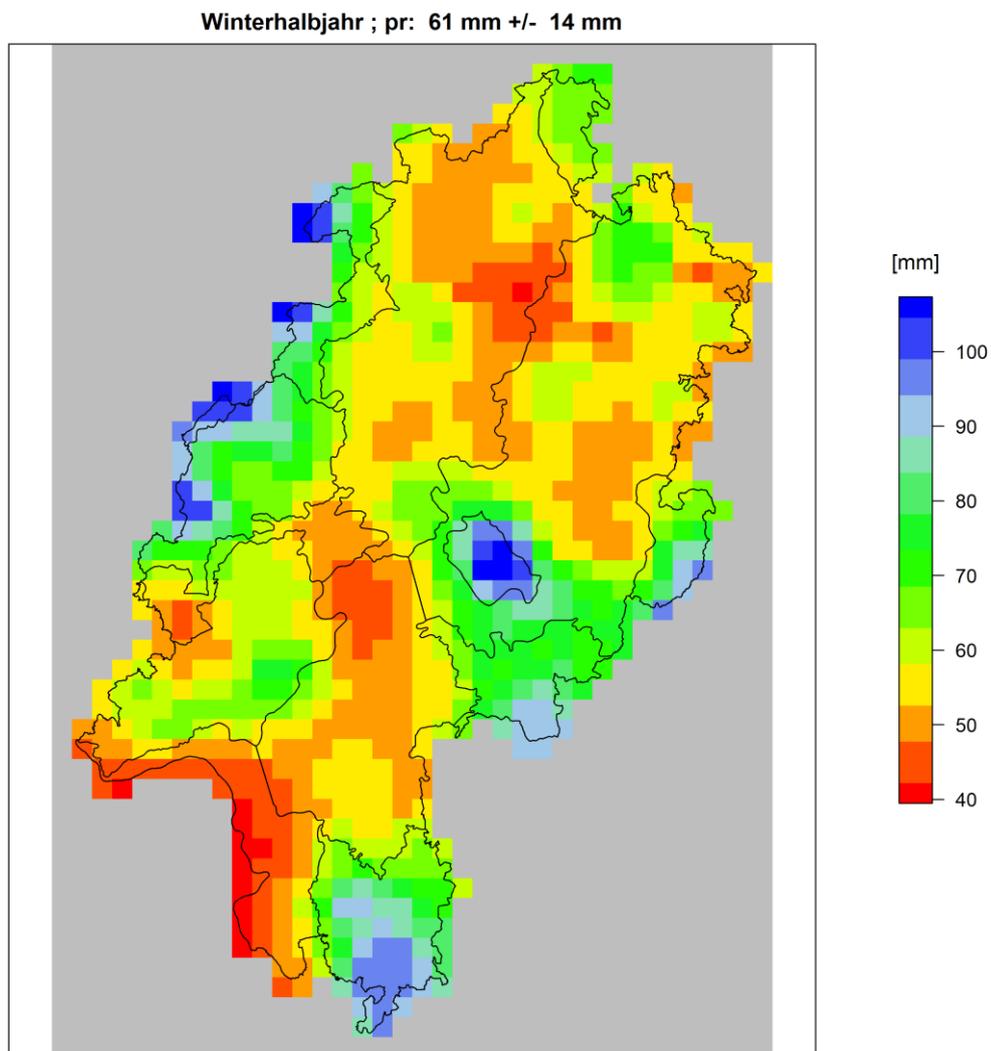


Abbildung 5: Über den Zeitraum von 1951 bis 2010 und über das Winterhalbjahr (Oktober bis März) gemittelte Monatssummen des Niederschlags in Hessen basierend auf HYRAS Daten. Das räumliche Mittel über Hessen beträgt hierbei 61 mm mit einer Standardabweichung von 14 mm. Die angepassten Naturräume Hessens sind als Polygonzüge in schwarz eingezeichnet.

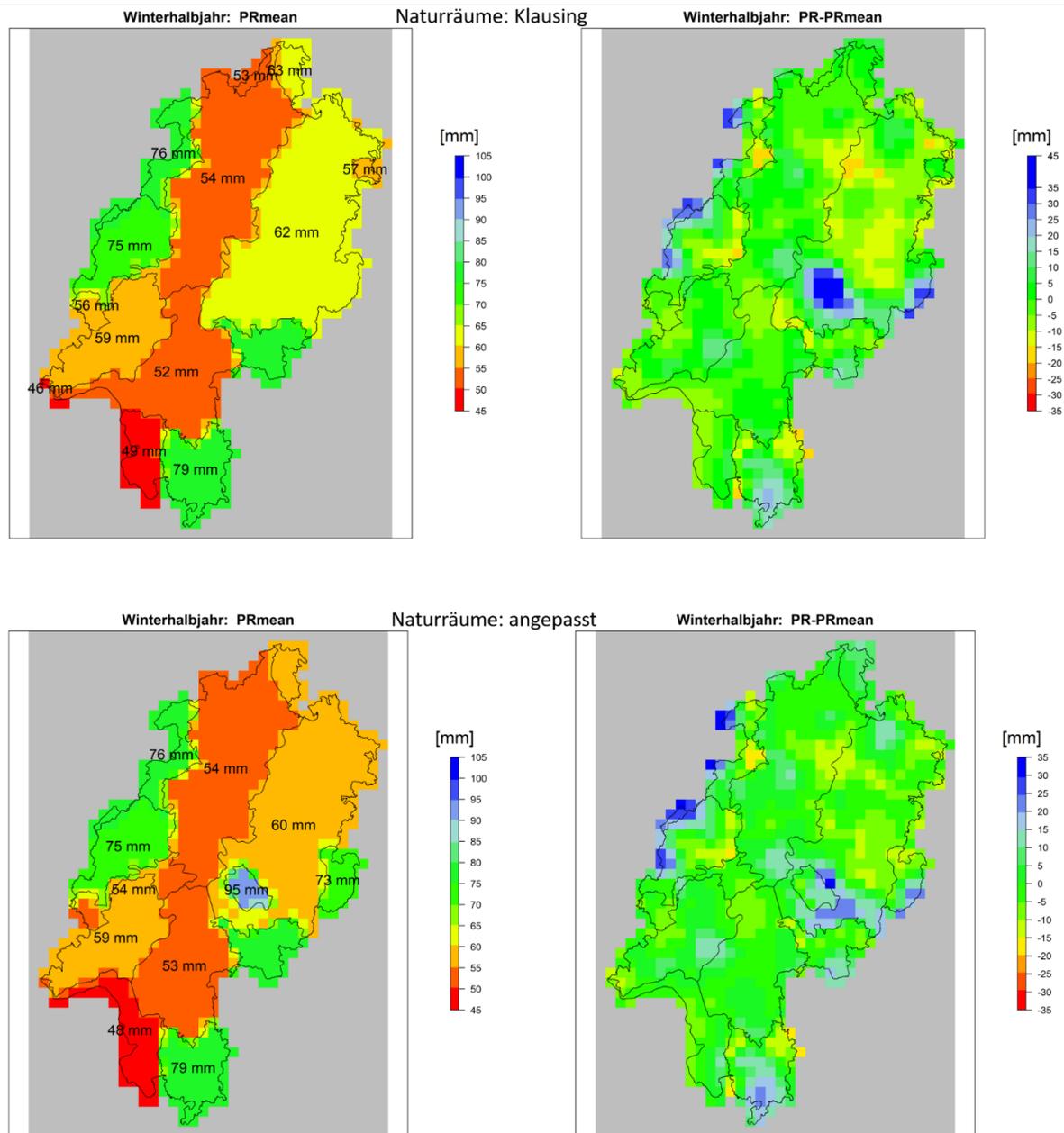


Abbildung 6: Links: Vieljährige (1951 bis 2010), über das Winterhalbjahr (Oktober bis März) gemittelte und über die Naturräume gemittelte Monatssummen des Niederschlags in Hessen basierend auf HYRAS Daten (PRmean). Rechts: Rasterpunktspezifische Abweichungen vom naturräumlichen vieljährigen Flächenmittel der über das Winterhalbjahr gemittelten monatlichen Niederschlagssumme in Hessen (PR-PRmean). Die entsprechend für die Mittelung verwendeten Naturräume Hessens sind als Polygonzüge in schwarz eingezeichnet (oben: Naturräume nach Otton Klausing, unten: angepasste Naturräume).

B. Sommertage

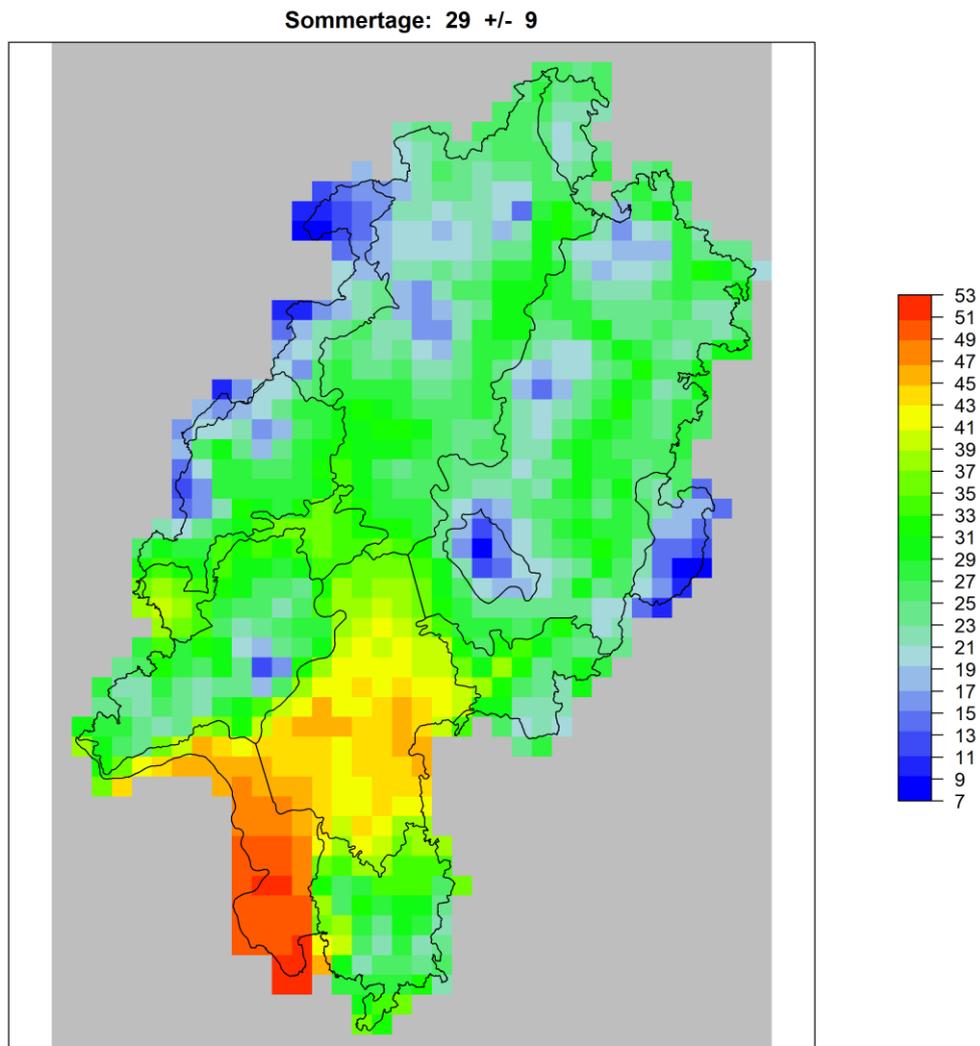


Abbildung 7: Über den Zeitraum von 1951 bis 2010 gemittelte jährliche Sommertage in Hessen basierend auf HYRAS Daten. Das räumliche Mittel über Hessen beträgt hierbei 29 Sommertage mit einer Standardabweichung von 9 Tagen. Die angepassten Naturräume Hessens sind als Polygonzüge in schwarz eingezeichnet.

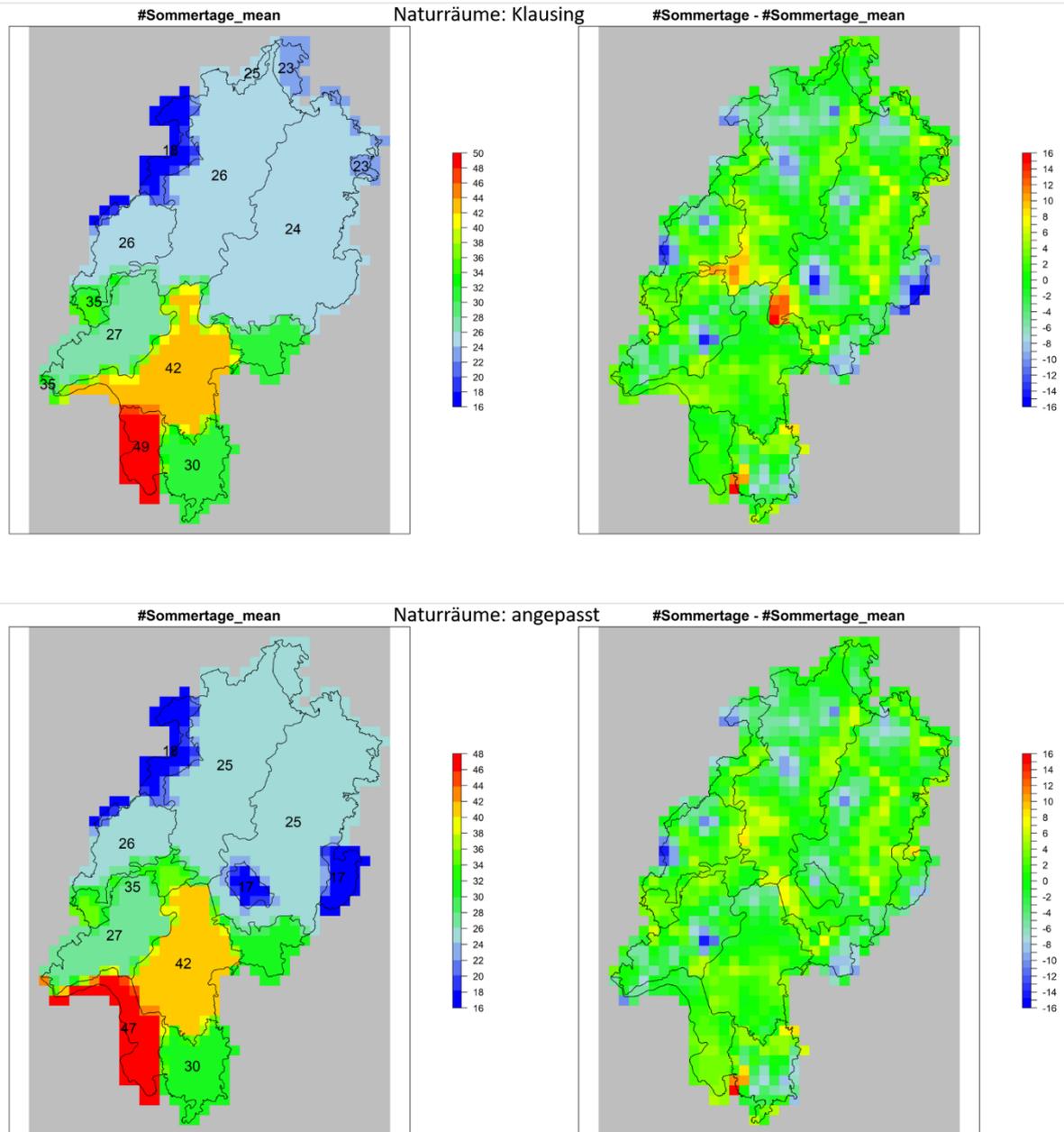


Abbildung 8: Links: Vieljährige (1951 bis 2010), über die Naturräume gemittelte jährliche Sommertage in Hessen basierend auf HYRAS Daten. Rechts: Rasterpunktspezifische Abweichungen vom naturräumlichen vieljährigen Flächenmittel der Sommertage in Hessen. Die entsprechend für die Mittelung verwendeten Naturräume Hessens sind als Polygonzüge in schwarz eingezeichnet (oben: Naturräume nach Otton Klausing, unten: angepasste Naturräume).