

Hochschule RheinMain

University of Applied Sciences

**Fachbereich Ingenieurwissenschaften
Studiengang Umwelttechnik**

BACHELORARBEIT

Name: Kathrin Künzler

Referent: Prof. Dr. U. K. Deister

Korreferent: Dr. H. Hübener

Thema:

Berechnung eines Belastungsindex aus Temperatur und Feuchte

Ich versichere hiermit, diese Arbeit nur unter Verwendung der in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel selbständig angefertigt zu haben.

Rüsselsheim, den

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Summary	4
1. Einführung	5
1.1. Motivation	6
1.2. Aufgabenstellung.....	7
2. Methoden	7
2.1. Stand der Forschung	7
2.1.1. Predicted mean vote (PMV)/ predicted percentage of dissatisfied (PPD).....	7
2.1.2. Klima-Michel-Modell	8
2.1.3. Hitze Index	10
2.1.4. Verwendeter Index	11
2.2. Datengrundlage	12
2.2.1. Beobachtungsdaten	12
2.2.2. Klimamodelle	17
2.3. Vorgehensweise	20
3. Ergebnisse	20
3.1. Vergleich Beobachtungsdaten mit Klimamodellen.....	20
3.1.1. Vergleich der historischen Daten der Messstationen mit dem Klimamodell WETTREG	21
3.1.2. Vergleich der historischen Daten der Messstationen mit dem Klimamodell CCLM..	23
3.1.3. Vergleich der historischen Daten der Messstationen mit dem Klimamodell REMO .	25
3.2. Beobachtungen und Simulationen 1971-2000 (Belastungstage).....	26
3.2.1. Beobachtungsdaten	27
3.2.2. Klimamodell WETTREG 1971-2000.....	30
3.2.3. Klimamodell CCLM 1971-2000.....	31
3.2.4. Klimamodell REMO 1971-2000	33
3.2.5. Vergleich	35
3.3. Zukunftssimulationen 2071 - 2100.....	36
3.3.1. Darstellung der Anzahl der Sommertage 2071-2100	36
3.3.2. Darstellung der Anzahl der Belastungstage 2071-2100	39
4. Diskussion	43
5. Ausblick	46
6. Abbildungsverzeichnis	47

7.	Tabellenverzeichnis.....	48
8.	Literaturverzeichnis.....	48

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird der Hitze Index (Belastungsindikator) verwendet, der sich aus den zwei Parametern Temperatur und relativer Luftfeuchte errechnet. Bei hohen Außentemperaturen regelt der Körper seinen Temperaturhaushalt durch die Verdunstung von Wasser über die Hautoberfläche. Energie wird verbraucht und es kommt zu einer Abkühlung der Körpertemperatur. Doch bei hoher Luftfeuchte und hohen Temperaturen kann die Umgebungsluft den Wasserdampf der Haut schwer bzw. langsamer aufnehmen. Die natürliche Kühlung des Körpers wird verlangsamt oder gestoppt. Dies kann zu Überhitzungen mit Hitzestress oder erhöhtem Hitzeschlag-Risiko führen.

Der Belastungsindikator soll dazu genutzt werden, die zukünftige Klimaentwicklung unter Anwendung verschiedener Szenarien zu bewerten und dadurch der Öffentlichkeit die gesundheitlichen Auswirkungen besser vorstellbar zu machen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Eignung des Hitze Indexes für Hessen zu prüfen.

In den folgenden Kapiteln werden die Anzahl der Tage mit einem hohen Belastungsindex, mit Hilfe von drei Klimamodellen (WETTREG, CCLM und REMO), für die Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 ausgewertet.

Alle Simulationsergebnisse für den Szenario-Zeitraum von 2071-2100 der drei Klimamodelle zeigen einen Anstieg der Anzahl der Belastungstage an.

Summary

In this bachelor thesis the heat index is used which is calculated of two parameters, the temperature and the relative atmospheric humidity. If the outside temperature is high the body temperature is regulated by means of evaporation of water over the surface of the skin. Energy is consumed and a cooling of the body temperature follows. But at the condition of high atmospheric humidity and high temperature, the surrounding air may include the steam of the skin less easily respectively less quickly. The natural cooling of the body is getting slowed down or even stopped. This may lead to overheating combined with circulation problems or an increasing risk of heat-stroke. The load indicator shall be used to value the future climate development under use of different scenarios and referring to this make the health effects better conceivable to the public. The aim of this work is to check the suitability of the heat index for Hessen. The index shall be used to make the public become aware of the development of climate change and the thereof resulting effects on the state of health. During the following chapters, the amount of days with a high index is evaluated at the help of three climate models (WETTREG, CCLM and REMO) concerning the time periods from 1971 to 2000 and from 2071 to 2100. The results of the simulation of each of these models regarding the years 2071 to 2100 come to the conclusion that there is an increase of the amount of the strain days.

1. Einführung

Die Einflüsse und Auswirkungen des Klimas und des Wetters auf den Menschen ist ein Thema, das in der Medizinischen Meteorologie erforscht und gelehrt wird.

Nach dem heutigen Stand der Forschung sind für die Auslösung oder die Verstärkung von bestimmten Beschwerden oder Erkrankungen besondere Wetterlagen oder komplexe Wettervorgänge verantwortlich (Schuh, 2007).

Die moderne Medizin-Meteorologie unterteilt Störungen des Allgemeinbefindens anhand von drei Reaktionstypen: „*Wetterreagierend*“, „*Wetterfühlig*“ und „*Wetterempfindlich*“ (Schuh, 2007). Die Belastung durch diese Reaktionstypen ist für jeden Menschen je nach Alter, Fitness und Gesundheit unterschiedlich.

„*Wetterreagierend*“ sind grundsätzlich alle Menschen. Der Mensch passt sein Verhalten an die Gegebenheiten an. Es entstehen höchstens Belastungen, die sich durch leichte Stimmungs- oder Befindlichkeitsschwankungen äußern.

Unter „*Wetterfühligkeit*“ leiden nach Angaben des Deutschen Wetterdienstes 50 Prozent (Schuh, 2007) der Menschen in Deutschland. Diese Personen sprechen auf körperlicher und psychischer Seite empfindlicher auf Wetterveränderungen an und weisen eine Einschränkung des Wohlbefindens oder das Auftreten von Krankheitssymptomen auf, wie beispielsweise Kopfschmerzen oder Migräne, Abgeschlagenheit, Benommenheit, Konzentrationsstörungen, Schlafstörungen, Gelenk- oder Muskelschmerzen und Gereiztheit.

„*Wetterempfindliche*“ Personen sind meistens Menschen mit einer Vorerkrankung, wie z.B. Herz- und Kreislauf-Leiden, Bluthochdruck, Rheuma, Migräne oder Asthma. Bestimmte Wetterprozesse verstärken diese vorhandenen Krankheiten bzw. deren Symptome. Zehn Prozent der Bevölkerung zählen zu dieser Gruppe.

Nach den heutigen Erkenntnissen stehen ganz eindeutig die Änderungen der Feuchtigkeit, des Luftdruckes und der Temperatur für diese gesundheitlichen Beeinträchtigungen im Vordergrund (Schuh, 2007).

Diese thermischen Bedingungen treten beim Wetterwechsel, während Kaltlufteinbrüchen oder winterlicher Kälte, sowie bei sommerlichen Hitzeperioden auf. Diese massiven thermischen Veränderungen, wie Temperatur- und Feuchtigkeitswechsel, führen zu einer starken Beanspruchung des Körpers, da der menschliche Körper, abgesehen von geringen Schwankungen, die Körperkerntemperatur auf 37°C halten muss. Zu niedrige oder zu hohe Körperkerntemperaturen können zu lebensbedrohlichen Situationen führen. Damit der Körperkern seine gleichmäßige Temperatur halten kann, benötigt er ein Gleichgewicht zwischen der im Körper produzierten und der an die Umgebung abgegebenen Wärme (Schuh, 2007). Bei drohender Überhitzung wird durch die Schweißdrüsen auf der Haut Flüssigkeit abgegeben und durch die Verdunstung des Schweißes von der Hautoberfläche wird dem Körper Verdunstungswärme entzogen. Es entsteht ein kühlender Effekt. Dadurch wird auch das unter der Haut fließende Blut gekühlt. Die Verdunstung der Feuchtigkeit von der Hautoberfläche wird durch eine hohe Luftfeuchtigkeit mit gleichzeitig hoher Lufttemperatur behindert. Die

Feuchtigkeit des Körpers kann von der Luft nicht mehr aufgenommen werden und bleibt deshalb auf der Haut haften. Der kühlende Effekt bleibt aus.

Die Erwärmung der Haut und des Blutes führen zu einer Steigerung der Durchblutung, dadurch kommt es zu einer Steigerung der Blutversorgung für die einzelnen Organe und somit zu einer Steigerung der Sauerstoff- und Nährstoffversorgung.

Die verstärkte Hautdurchblutung führt zu einer deutlichen Zunahme der Herzfrequenz und der Herztätigkeit und damit zu einer Belastung des Herzmuskels. Bei kranken oder untrainierten Menschen kann es deshalb schon frühzeitig, bei geringen thermischen Belastungen, zu Störungen des Kreislaufes kommen (Schuh, 2007).

Durch eine hohe Luftfeuchte und hohe Temperaturen werden die Menschen einer großen Belastung ausgesetzt. In der folgenden Arbeit soll diese Belastung durch den Hitze Index, der auch als Belastungsindikator verstanden wird, beschrieben werden.

1.1. Motivation

Dieser Index soll dazu verwendet werden, der Öffentlichkeit den Klimawandel zu verdeutlichen und diese zur Zustimmung und Unterstützung zu erforderlichen weitreichenden Maßnahmen gegen einen nicht beherrschbaren Klimawandel zu bewegen.

Für die erhaltenen Informationen aus Simulationen mit Klimamodellen für verschiedene Emissionsszenarien, die mögliche Klimaänderungen aufzeigen, fehlt der Öffentlichkeit das Verständnis. Diese projizierten Temperaturänderungen sind jedoch erheblich. Global gesehen bewegt sich die Erhöhung der Jahresmitteltemperatur in einer Bandbreite von 1,1°C bis 6,4°C für die Dekade 2090-2099 im Vergleich mit der Dekade 1980-1999. (Mäder, 2009)

Diese berechneten Daten von Temperaturänderungen über einen längeren Zeitraum von 50 bis zu 100 Jahren verdeutlichen der Öffentlichkeit jedoch nicht die Auswirkungen die dadurch entstehen können, da die Erfahrungs- und Erlebniswelt der Menschen diese Zeitskalen üblicherweise nicht beinhalten und es daher schwer fällt, daraus Handlungsänderungen abzuleiten.

Der Index soll den Menschen, durch das Aufzeigen einer persönlichen Betroffenheit, die Auswirkungen des Klimawandels verdeutlichen. Die möglichen Bereiche, Gesundheit und das Wohlergehen und die Zukunft der Kinder sind besonders geeignet, um eine persönliche Betroffenheit zu erläutern.

Betrachtet wird in der vorliegenden Arbeit der Bereich Gesundheit, denn extreme Hitzeperioden, schnelle Temperaturwechsel und anhaltende Kältewellen haben nicht nur Auswirkungen auf die Umwelt (Kapitel 1)

1.2. Aufgabenstellung

In der vorliegenden Arbeit wird die Eignung eines Hitze Indexes, der auch als Belastungsindikator verstanden wird, für Hessen überprüft.

Die Anzahl der Tage mit einem hohen Belastungsindex sollen für die Zeiträume 1971-2000 und 2071-2100 ermittelt werden. Die Betrachtung des Klimas über einen Zeitraum von 30 Jahren ist eine Definition der World Meteorological Organization (WMO) und ein ausreichend langer Zeitraum um stabile Mittelwerte zu erhalten.

Das Ziel dieser Arbeit ist, die zukünftige Klimaentwicklung unter Anwendung verschiedener Szenarien mittels dieses Belastungsindex zu bewerten und dadurch die gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels für die Öffentlichkeit besser verständlich zu machen.

2. Methoden

In diesem folgenden Kapitel wird erläutert welcher Index und welche Daten verwendet werden.

2.1. Stand der Forschung

Die zu erbringende Anpassungsleistung des Menschen an die jeweilige klimatische Umgebung lässt sich durch Wärmebilanzmodelle bestimmen. Hier werden im Folgenden drei Beispiele beschrieben.

2.1.1. Predicted mean vote (PMV)/ predicted percentage of dissatisfied (PPD)

Ein solches Modell basiert auf der Berechnung des „predicted mean vote“-Wert (PMV) Bewertungsindex nach Fanger (Fanger, 1972).

In die Formel zur Berechnung des PMV-Wertes geht die innere Wärmeproduktion des Menschen, die Wasserdiffusion durch die Haut, die Verdunstung von Schweiß auf der Hautoberfläche, die Wärmeleitung durch die Kleidung, der Strahlungswärmeverlust und die Wärmeabgabe durch die Konvektion mit ein.

Die Bekleidung ist für diesen Index frei wählbar, beispielsweise zwischen Sommerkleidung und Winterkleidung, auch bei der Tätigkeit kann zwischen Sitzen, Stehen oder Bewegen gewählt werden.

Der erhaltene PMV-Wert ist eine dimensionslose Zahl und gibt auf einer siebenstufigen Skala (Tab. 1) an, wie eine Gruppe von Personen ein Raumklima durchschnittlich bewerten würde. Dabei stellt ein PMV von null ein optimales Raumklima dar.

Tabelle 1: Zuordnung der thermischen Empfindung und der Belastungsstufen zum PMV-Wert

PMV	Thermisches Empfinden	Belastungsstufe	Biologische Wirkung
-3,5	sehr kalt	Extrem	Kältestress
-2,5	kalt	Stark	
-1,5	kühl	Mäßig	keine
-0,5	leicht kühl	Schwach	
0,0	behaglich	Keine	
0,5	leicht warm	Schwach	keine
1,5	warm	Mäßig	
2,5	heiß	Stark	
3,5	sehr heiß	Extrem	Wärmebelastung

(Quelle: (Städtebauliche Klimafibel online, 2009))

Aus dem PMV-Wert kann schließlich noch der PPD-Wert („predicted percentage of dissatisfied“) bestimmt werden.

Dieser Wert quantifiziert den zu erwartenden Prozentsatz von allen Raumnutzern, die mit den herrschenden raumklimatischen Verhältnissen nicht zufrieden sind.

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen PMV und PPD

PMV:	3	2	1	0,5	0	-0,5	-1	-2	-3
thermisches Empfinden	<i>sehr heiß</i>	<i>heiß</i>	<i>warm</i>	<i>leicht warm</i>	<i>behaglich</i>	<i>leicht kühl</i>	<i>kühl</i>	<i>kalt</i>	<i>sehr kalt</i>
PPD:	> 90%	75%	25%	10%	5%	10%	25%	75%	> 90%

(Quelle: (DIN ISO 7730, 2005))

Tabelle 2 gibt den vorausgesagten Prozentsatz, der mit dem Raumklima unzufriedenen Raumnutzer (PPD), in Abhängigkeit von der vorhergesagten mittleren Klimabeurteilung (PMV) durch alle Raumnutzer an. Da nie alle Personen eine Situation gleich beurteilen, sinkt der PPD-Wert nicht unter 5%.

2.1.2. Klima-Michel-Modell

Das Klima-Michel-Modell des Deutschen Wetterdienstes, ist ein weiteres Wärmehaushaltsmodell für den Menschen, zur Bewertung der Behaglichkeit. Es basiert auf der Behaglichkeitsgleichung von Fanger (Fanger, 1972) inkl. einer Korrektur nach Gagge et al. (Gagge, 1986) zur besseren Erfassung feuchtwarmer Bedingungen (DWD, 1996-2009).

Dieses Verfahren beschreibt das Temperaturempfinden anhand eines Durchschnittsmenschen hinsichtlich Behaglichkeit, Wärmebelastung und Kältestress.

Der Durchschnittsmensch "Michel" besitzt eine Körpergröße von 1,75 Metern, ein Körpergewicht von 75 Kilogramm, eine Körperoberfläche von 1,9 Quadratmetern, ist 35 Jahre alt und männlich.

Diese Annahmen und die Wärmeisolation der Bekleidung gehen neben den meteorologischen Parametern Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Wasserdampfdruck und mittlere Strahlungstemperatur in die Berechnung mit ein.

Aus diesen Parametern wird das thermische Empfinden eines Menschen bestimmt und nicht die tatsächlich herrschende Temperatur.

Diese vom Menschen wahrgenommene Umgebungstemperatur wird als „gefühlte Temperatur“ bezeichnet, die von herrschenden Wetterfaktoren wie Temperatur, Wind, Luftfeuchte und Sonneneinstrahlung abhängt. Beispielsweise lässt ein starker Wind niedrigere Temperaturen noch kälter erscheinen und eine hohe Luftfeuchte macht hohe Temperaturen noch schwerer erträglich.

Tabelle 3: Thermische Empfinden und Belastungsstufen für die gefühlte Temperatur (GT) des Klima-Michel-Modells

GT in °C	thermisches Empfinden	Belastungsstufe	physiologische Wirkung
über 38	sehr heiß	extrem	Wärmebelastung
32 bis 38	heiß	stark	
26 bis 32	warm	mäßig	
20 bis 26	leicht warm	schwach	
0 bis 20	behaglich	keine	
-13 bis 0	leicht kühl	schwach	Kältestress
-26 bis -13	kühl	mäßig	
-39 bis -26	kalt	stark	
unter -39	sehr kalt	extrem	

(Quelle: (DWD, 1996-2009))

In Tabelle 3 werden die gefühlten Temperaturen dem thermischen Empfinden des Menschen, sowie den jeweiligen Belastungsstufen zugeordnet.

Die gefühlte Temperatur stammt nicht aus Messungen oder Schätzungen, sondern aus Modellsimulationen. Diese beruhen auf dem Prinzip, die tatsächlich vorgefundenen Bedingungen mit der Temperatur zu vergleichen, die bei Standardbedingungen herrschen müsste, um bei einem Menschen das gleiche Wärme- oder Kältegefühl hervorzurufen. Es handelt sich um ein bioklimatisches Maß für das thermische Wohlbefinden eines Menschen und umfasst damit das Spektrum vom Wärme bzw. Hitzegefühl über Behaglichkeit bis zum Kältegefühl.

2.1.3. Hitze Index

Der Hitze Index, der auch als Belastungsindikator zu verstehen ist, beschreibt die gefühlte Temperatur und stellt die Belastung des Menschen durch erhöhte Außentemperaturen dar. Dieser Index wurde vom amerikanischen Wetterdienst National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) zur effektiveren Alarmierung der Öffentlichkeit vor Hitzewellen entwickelt. (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2009)

Die Formel zur Berechnung dieses Indexes basiert auf den Tageswerten der Parameter Temperatur und relativer Luftfeuchte.

$$HI = -42,379 + 2,0401523 * T + 10,14333127 * F - 0,22475541 * T * F - 6,83783 * 10^{-3} * T^2 - 5,481717 * 10^{-2} * F^2 + 1,22874 * 10^{-3} * T^2 * F + 8,5282 * 10^{-4} * T * F^2 - 1,99 * 10^{-6} * T^2 * F^2$$

T = max. Temperatur (°F)

F = relative Luftfeuchte (%)

Um diese Formel verwenden zu können, müssen zunächst die Werte der Temperaturen von Grad Celsius in Grad Fahrenheit umgerechnet werden.

Die folgende Tabelle 4 zeigt die Zuordnung der vier Belastungsstufen zu Temperatur und Luftfeuchte.

Tabelle 4: Klassifizierung des Hitze Indexes nach National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

Temperatur		relative Luftfeuchte [%]																				
°Celsius	°Fahrenheit	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
27	81	78	78	79	79	79	79	80	80	80	81	81	82	83	83	84	85	86	86	87	88	89
28	82	80	80	80	80	80	80	81	81	82	82	83	84	85	86	87	88	90	91	93	94	96
29	84	82	81	81	81	81	82	82	83	83	84	85	87	88	89	91	93	95	97	99	101	104
30	86	83	83	83	83	83	83	84	85	85	87	88	89	91	93	95	97	100	102	105	108	112
31	88	85	84	84	84	84	85	86	86	88	89	91	93	95	97	100	103	106	109	112	116	120
32	90	86	86	86	86	86	87	87	89	90	92	94	96	99	102	105	108	112	116	120	125	129
33	91	88	87	87	87	88	88	90	91	93	95	97	100	103	107	110	114	119	123	128	134	139
34	93	89	89	89	89	90	91	92	94	96	98	101	104	108	112	116	121	126	131	137	143	150
35	95	91	90	90	91	91	93	94	96	99	102	105	109	113	118	123	128	134	140	147	154	161
36	97	92	92	92	92	94	95	97	100	102	106	110	114	119	124	129	136	142	149	157	164	173
37	99	93	93	93	94	96	98	100	103	106	110	114	119	125	130	137	144	151	159	167	176	185
38	100	94	95	95	96	98	100	103	106	110	115	119	125	131	137	145	152	160	169	178	188	198
39	102	96	96	97	98	100	103	106	110	114	119	125	131	138	145	153	161	170	180	190	201	212
40	104	97	97	99	100	103	106	110	114	119	124	131	137	145	153	161	171	181	191	202	214	226
41	106	98	99	100	103	105	109	113	118	124	130	137	144	152	161	171	181	191	203	215	228	241

(Quelle: (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2009))

Bedeutung der 4 Belastungsstufen des Hitze Indexes:

- **Stufe 1:** *Vorsicht* → Erschöpfungserscheinungen, Müdigkeit
- **Stufe 2:** *Erhöhtes Vorsicht* → Möglichkeit von Sonnenstich, Hitzekrampf, und Hitzekollaps
- **Stufe 3:** *Gefahr* → Sonnenstich, Hitzekrampf und Hitzekollaps wahrscheinlich, Hitzeschlag ist möglich
- **Stufe 4:** *Erhöhte Gefahr* → Hitzeschlag und Sonnenstich sind wahrscheinlich

2.1.4. Verwendeter Index

Als Grundlage für die Darstellung der Betroffenheit der Temperaturänderungen auf den Menschen, dient die Gleichung des Hitze Indexes. Diese nutzt zwei wichtige Parameter, Temperatur und Luftfeuchte, die einen großen Einfluss auf die Belastung des Körpers besitzen (Kapitel 1).

Das dafür geeignetste Modell wäre das Klima-Michel-Modell des deutschen Wetterdienstes. Jedoch beinhaltet dieses Modell zu viele meteorologische Parameter sowie eine Betrachtung von Tages- und Nachtunterschieden.

Trotzdem ist die Verwendung des Hitze Indexes sinnvoll, denn dort wo eine größere Belastung auftritt und sich die meisten Menschen aufhalten, in Städten (ca. 70% der Menschen leben in Städten (Statistisches Bundesamt Deutschland, 2005)), sind bei hohen Tageswerten die Nachtwerte weitgehend auch hoch. In den Städten wird den Tag über viel Wärme absorbiert und durch die in größerer Anzahl vorhandenen Aerosole, kann die Wärme nicht so gut abgestrahlt werden. Diese wird von den Aerosolen und von der Luftfeuchte reflektiert und hält sich so in der erdnahen Atmosphäre. Also folgen Tagen mit hohen Temperaturen weitgehend auch Nächte mit hohen Temperaturen.

Ein Vorteil der Nutzung des Hitze Indexes ist: durch wenig Aufwand können die Auswirkungen des Klimawandels auf die körperliche Belastung aufgezeigt werden. Dieser Index kann durch die Aussage über die Belastungssteigerung, die persönliche Betroffenheit verdeutlichen und so für ein Verständnis der Entwicklung des Klimawandels sorgen. Durch die Beschränkung auf leicht verfügbare Größen und eine einfache Berechnung, kann der Index überall relativ einfach berechnet und zur Information der lokalen Bevölkerung eingesetzt werden.

2.2. Datengrundlage

Zur Untersuchung der zukünftigen Klimaentwicklung mittels des Hitze Indexes werden zwei Parameter benötigt, Temperatur und relative Feuchte. Diese Daten liefern zum einen die Beobachtungsdaten des deutschen Wetterdienstes für die Vergangenheit (1971-2007) und zum anderen die simulierten Daten der Klimamodelle WETTREG, CCLM und REMO für den Validierungszeitraum 1971-2000 und den Szenario-Zeitraum 2071-2100.

2.2.1. Beobachtungsdaten

Die folgende Abbildung 1 zeigt die Datengrundlage der Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes in Hessen über einen Zeitraum von 1971-2007. Markiert und aufgetragen sind die Jahre, in denen an den jeweiligen Stationen die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchte, die für die spätere Berechnung des Hitze Indexes benötigt werden, vorhanden sind.

Desweiteren verdeutlicht diese Abbildung, dass bei sehr vielen Stationen die Parameter Temperatur und relativer Luftfeuchte nicht für jedes Jahr verfügbar sind. Doch für den weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die durchgehenden Daten der Parameter für den Zeitraum 1971-2000 benötigt. Da jedoch nicht für jede Station alle Daten existieren, müssen Stationen ausgewählt werden, die charakteristisch für alle Stationen stehen können und für den benötigten Zeitraum eine komplette Datenreihe aufweisen.

Stationen	Jahre mit Datenverfügbarkeit																																						
	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007		
Alsfeld-Eifa																																							
Bad Hersfeld																																							
Bad Nauheim																																							
Beckum-Untenberg																																							
Beerfeld																																							
Biedenkopf																																							
Burgwald-Bottendorf																																							
Coelbe, KR. Marburg-B.																																							
Darmstadt																																							
Dillenburg																																							
Eschwege																																							
Frankfurt/M. (Flug.)																																							
Geisenheim																																							
Gießen																																							
Gießen-Wettenb.																																							
Gilsberg																																							
Gilsberg-Moischeid																																							
Göttingen																																							
Grebenh																																							
Hofgeis																																							
Holzminden-Siberborn																																							
Homberg																																							
Kassel																																							
Kl.Feldberg TS.																																							
Limburg																																							
Lindenfels																																							
Lippstadt-Boekenfoerde																																							
Melsungen																																							
Melsungen-Buerstoss																																							
Michelstadt																																							
Michelstadt-Vielbrunnen																																							
Neukirchen																																							
Neukirchen-Hauptschwend a																																							
Nidderau																																							
Windecken																																							
Runkel-Ennerich																																							
Schaafheim-Schlierbach																																							
Schluchtern-Herolz																																							
Schotten																																							
Sontra																																							
Tann/Rhön																																							
Twistetal-Mühlhausen																																							
Wahlburg-Lippoldsberg																																							
Wahlen																																							
Wahlsburg																																							
Waldems																																							
Waldems-Reinborn																																							
Warburg																																							
Wartenberg-Angersbac																																							
Wasserkuppe																																							
Werl																																							
Wiesbaden																																							
Wiesbaden (Süd)																																							
Wiesbaden-Auringen																																							
Wildung																																							
Willing																																							
Willing-Upland																																							
Willing-Upland-Usseln																																							
Witzenhausen																																							

Abbildung 1: Zeitraumangabe der vorhandenen Daten der Klimastationen in Hessen

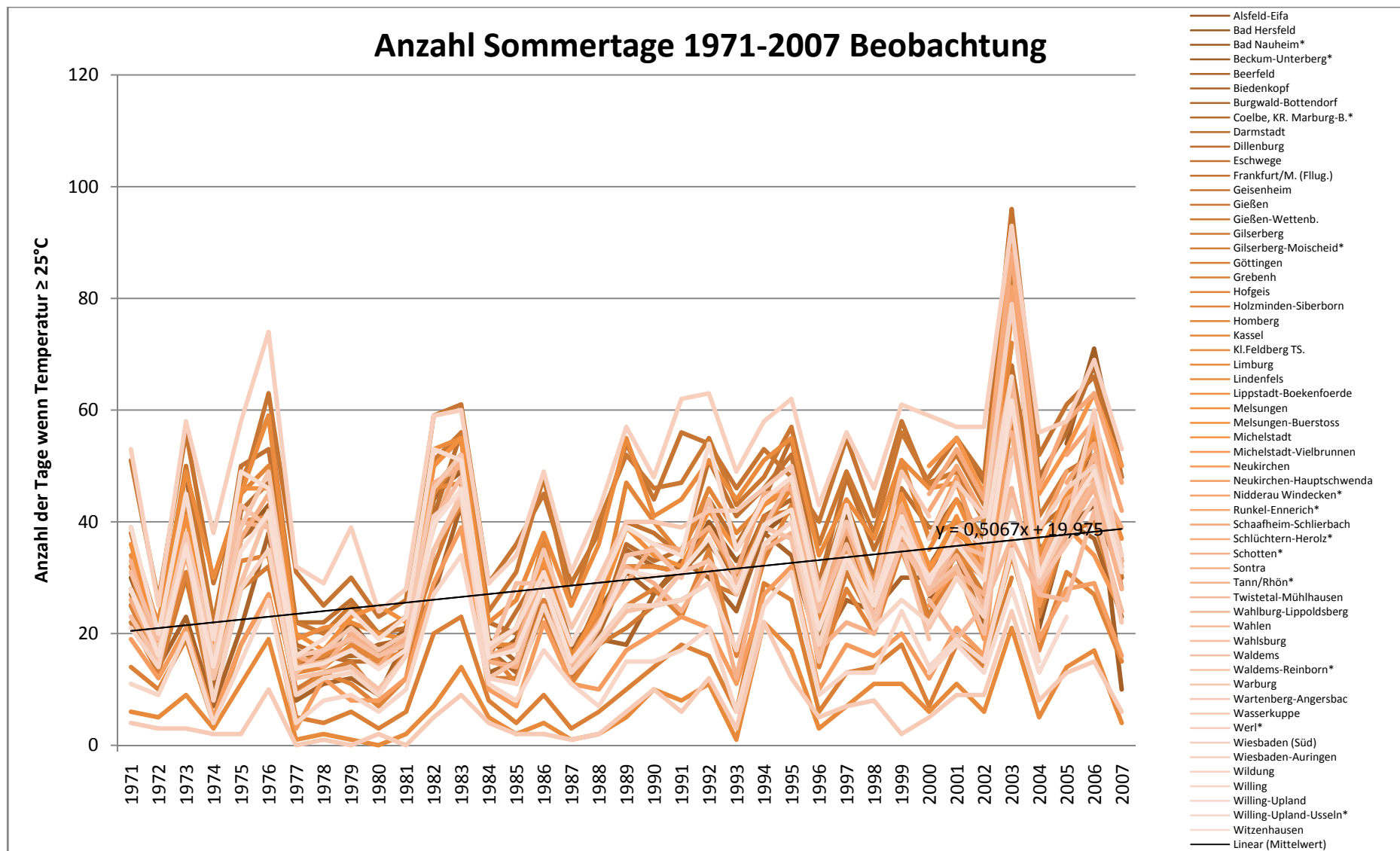


Abbildung 2: Entwicklung der Anzahl der Tage mit Temperaturen $\geq 25^\circ\text{C}$ der Klimastationen in Hessen

Dargestellt werden in Abbildung 2 die Ergebnisse der Beobachtungsdaten (1971-2007) über die Entwicklung des Klimas in der Vergangenheit, durch die Entwicklung der Anzahl der Sommertage (Temperaturen $\geq 25^{\circ}\text{C}$). Diese Temperaturuntergrenze wurde festgelegt, da an Tagen mit Temperaturen von 25°C , die als Sommertage definiert sind, leichte körperliche Belastungen, wie beispielsweise Erschöpfungserscheinungen, auf den Menschen wirken können. Im Laufe des in Abbildung 2 dargestellten Zeitraumes ist ein Anstieg der Anzahl der Tage mit Temperaturen $\geq 25^{\circ}\text{C}$ für die Klimastationen auszumachen. Das Jahr 2003 hebt sich deutlich durch die hohe Anzahl an Sommertagen für jede Station, im Vergleich zu den anderen Jahren, ab. Die Station Frankfurt erreicht in diesem Jahr eine Anzahl von fast 100 Sommertagen, was einen weiten Abstand zu den Jahren mit den zweithöchsten Anzahlen von ca. 70 Sommertagen aufweist. Die Station Wiesbaden stellt mit der höchsten Anzahl an Sommertagen über den gesamten Zeitraum die obere Grenze und die Station Wasserkuppe mit der geringsten Anzahl der Sommertage die untere Grenze dar.

Da jedoch, wie schon durch Abbildung 1 verdeutlicht, nicht an jeder Station die Tageswerte für die Parameter Temperatur und relativer Luftfeuchte vorhanden sind, müssen Stationen ausgewählt werden, die charakteristisch für alle Stationen stehen können und eine komplette Datenreihe aufweisen.

In der folgenden Abbildung 3 sind acht Klimastationen, die für den Zeitraum 1971-2007 eine komplette Datenreihe besitzen, mit ihrer Entwicklung der Anzahl der Sommertage dargestellt.

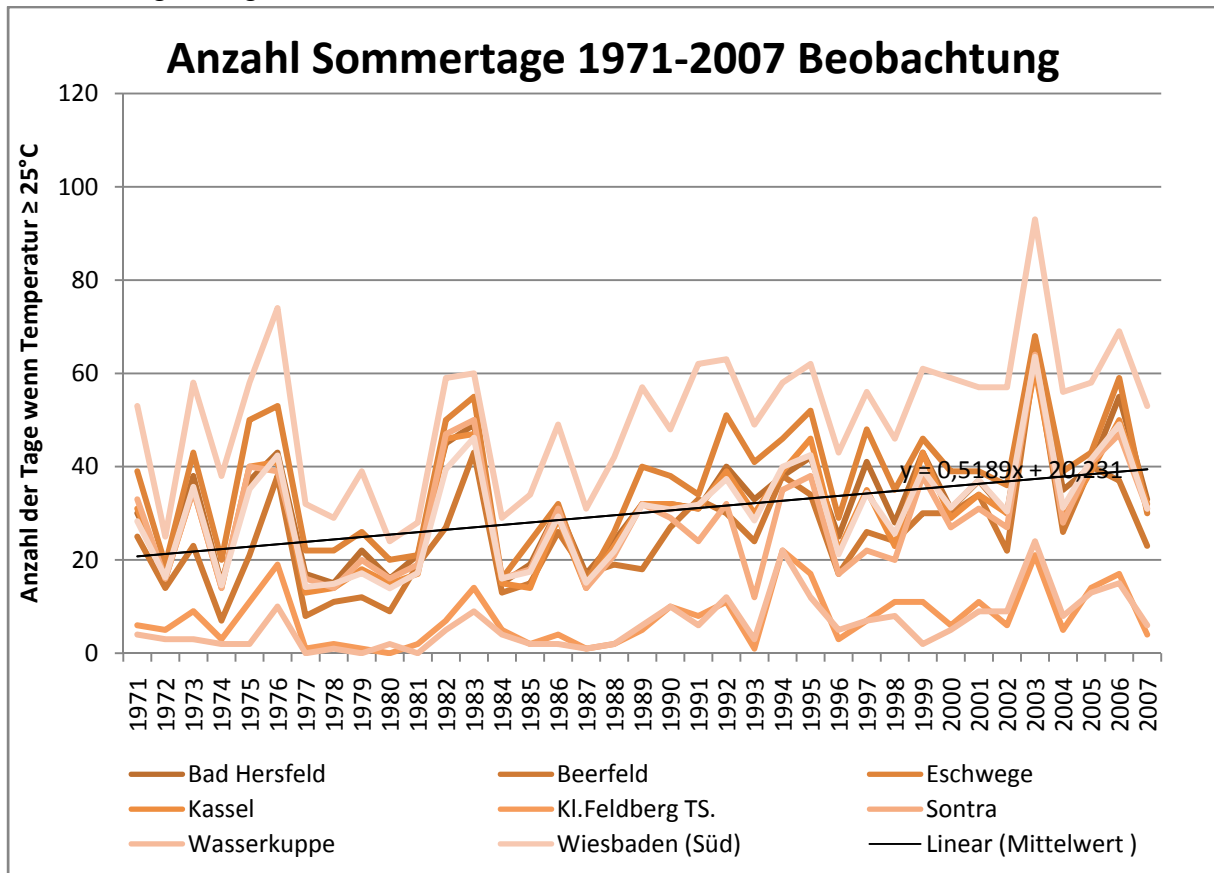


Abbildung 3: Entwicklung der Anzahl der Sommertage acht ausgewählter Klimastationen in Hessen

Der Vergleich der Steigung Trendlinien zeigt, dass die Steigung der ausgewählten Stationen mit einem Wert von 0,51 (Abb. 3), der Steigung aller Stationen 0,5 (Abb. 2) gleicht.

Weiterhin sind die kompletten Datenreihen der Stationen mit der höchsten Anzahl der Tage mit Temperaturen $\geq 25^{\circ}\text{C}$ (Wiesbaden) und die mit den niedrigsten Werten (Wasserkuppe) enthalten. Die Bandbreite von Abbildung 2 mit allen Stationen bleibt somit erhalten.

Die 8 ausgewählten Stationen können als repräsentativ für alle Stationen angesehen werden.

Die Positionen der acht ausgewählten Klimastationen sind in Abbildung 4 markiert.

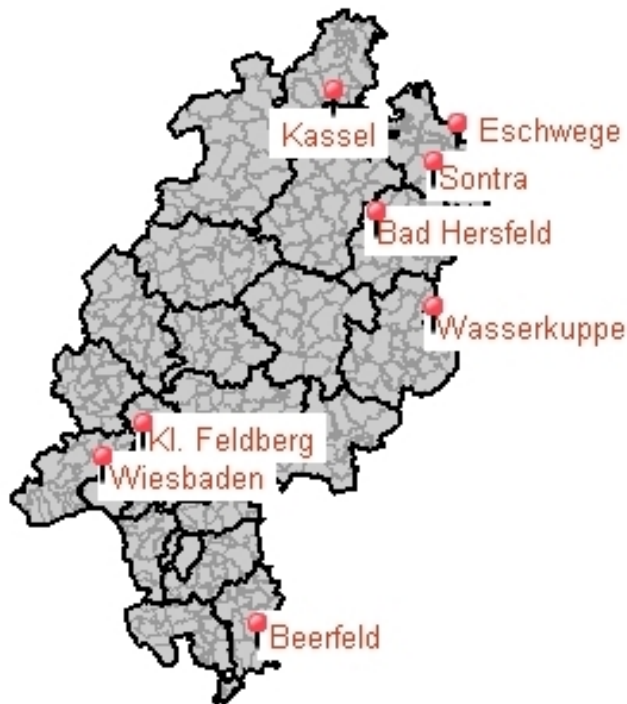


Abbildung 4: Positionskarte der ausgewählten Klimastationen in Hessen

Tabelle 5: Lage (m ü. NN) der ausgewählten Klimastationen in Hessen

Stadt	Höhe
Bad Hersfeld	212 m ü. NN Hersfelder Senke
Beerfeld	450 m ü. NN
Eschwege	165 m ü. NN
Kassel	167 m ü. NN Kasseler Becken (Talkessel)
Kl. Feldberg	811 m ü. NN
Sontra	244 m ü. NN
Wasserkuppe	950 m ü. NN höchster Berg der Rhön
Wiesbaden	115 m ü. NN

2.2.2. Klimamodelle

Klimamodelle zeigen aufgrund von Szenarien Daten möglicher Klimaentwicklungen auf, die als Klimaprojektionen bezeichnet werden. Diese unterschiedlichen Szenarien beschreiben die zukünftige, ökonomische, soziale, politische und technische Entwicklung der Welt und berücksichtigen somit eine bestimmte Bandbreite der künftigen Entwicklung der Bevölkerung, der Wirtschaft und der Treibhausgasemissionen. In dieser Arbeit wird das Szenario A1B verwendet, in dem von einer Welt mit schnellem Wirtschaftswachstum ausgegangen wird und in der eine starke Technologieentwicklung stattfindet. Durch die Globalisierung verbreiten

sich diese Technologien rasch. Diese Information fließt in die Berechnung zukünftiger Emissionen von CO₂ und weiteren Treibhausgasen ein. Aus den Emissionen werden dann mit Kohlenstoff-Kreislauf-Modellen atmosphärische CO₂-Konzentrationen berechnet und diese gehen in die globale Klimamodelle ein. (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2009)

Die horizontale Auflösung eines Globalen Klimamodelles beträgt heutzutage zwischen 100 und 300 km (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2009). Um regionale Informationen aus diesen Modellen zu erhalten, ist daher eine Regionalisierung der globalen Ergebnisse notwendig.

Die regionalen Klimamodelle teilen sich in zwei Kategorien auf, die sogenannten statistischen (z. B. WETTREG) und dynamischen Modelle (z. B. CLM, REMO).

Die statistischen Modelle berechnen aus den Beobachtungsdaten den Zusammenhang zwischen den Wetterlagen und Parametern, wie beispielsweise Temperatur oder Niederschlag. In WETTREG wird der Zusammenhang zwischen den zehn am häufigsten vorkommenden Wetterlagen der Vergangenheit mit Temperatur und Niederschlag an ausgewählten Stationen verglichen. Basierend auf (grob aufgelösten) Simulationsergebnissen eines globalen Klimamodells berechnet das Modell WETTREG die zukünftige Auftrittshäufigkeit dieser Wetterlagen. Daraus werden die Temperatur und der Niederschlag an den Stationsorten berechnet, unter der Annahme, dass der statistische Zusammenhang in der Zukunft erhalten bleibt. Die Ergebnisse werden als Stationsdaten ausgegeben.

Abbildung 4 zeigt auch die Standorte für die einzelnen verwendeten Stationsdaten von WETTREG.

Für die dynamische Regionalisierung wird für den betrachteten Bereich der komplette physikalische Zustand der Atmosphäre simuliert. Durch den Antrieb des dynamischen Modells an den Rändern des Simulationsgebietes mit den Daten eines globalen Modells werden auch die Änderungen außerhalb des Simulationsgebietes berücksichtigt. Die Regionalisierung mit einem dynamischen Modell ist jedoch ein höherer Aufwand und erfordert eine längere Rechenzeit auf einem leistungsfähigen Computer.

Im Unterschied zu den statistischen Verfahren ist diese Methode auch in der Lage, Situationen zu modellieren, die in der Vergangenheit noch nicht aufgetreten sind.

Da die dynamischen Modelle mit Gitterpunkten rechnen, für diese Arbeit jedoch Stationsdaten notwendig sind, wird aus den vier Gitterpunkten, die um die betrachteten Stationen liegen ein Mittelwert gebildet (Tab. 6 und Tab. 7).

In dieser Arbeit werden zwei unterschiedliche dynamische Modelle verwendet: CCLM (räumliche Auflösung: 12 km x 18,5 km) und REMO (räumliche Auflösung: 10 km x 10 km). Die Aufteilung der Gitterpunkte der beiden dynamischen regionalen Klimamodelle verdeutlichen die folgenden Abbildungen 5 und 6.

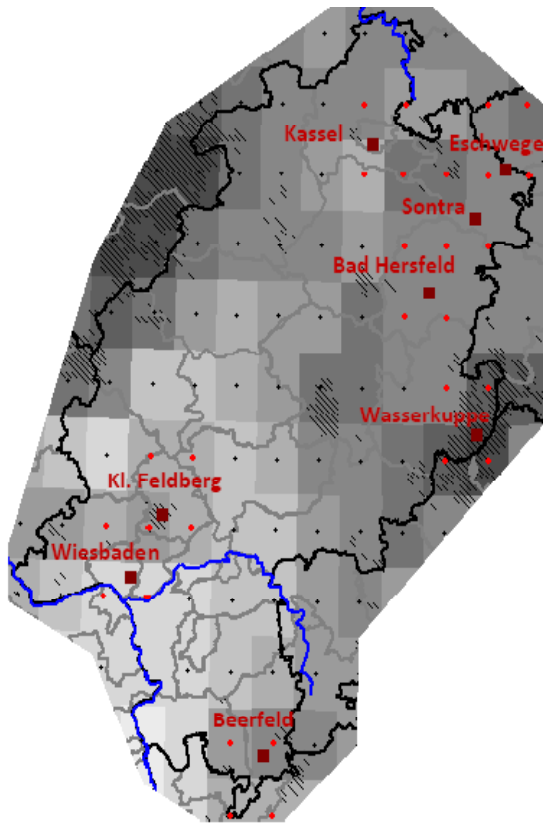


Abbildung 5: Positionskarte der Gitterpunkte CCLM in Hessen

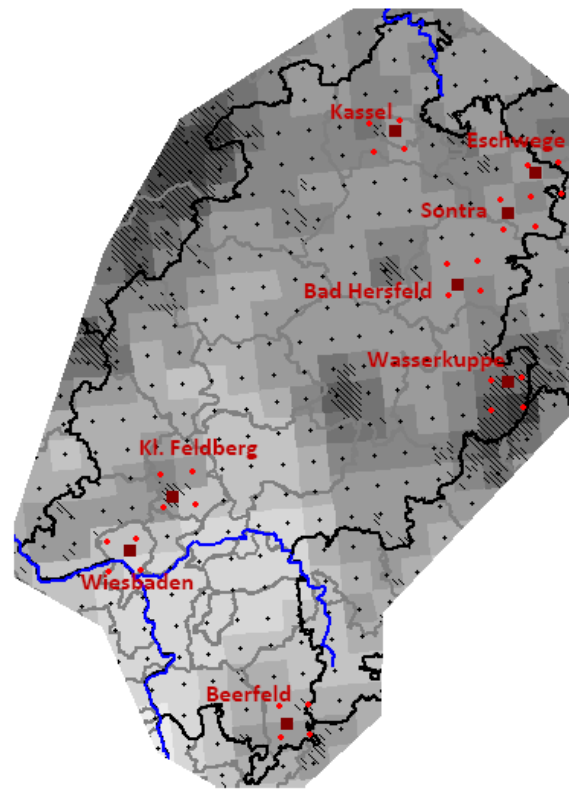


Abbildung 6: Positionskarte der Gitterpunkte REMO in Hessen

Tabelle 6: Zuordnung der CCLM Gitterpunkte zu entsprechenden Stationen

Station	Gitterpunkte
Bad Hersfeld	GP 082_103; GP 082_102; GP 083_103; GP 083_102
Beerfeld	GP 075_099; GP 075_098; GP 076_099; GP 076_098
Eschwege	GP 084_104; GP 084_105; GP 085_104; GP 085_104
Kassel	GP 084_101; GP 084_102; GP 085_101; GP 085_102
Kl. Feldberg	GP 079_096; GP 079_097; GP 080_096; GP 080_097
Sontra	GP 083_104; GP 083_105; GP 084_104; GP 084_105
Wasserkuppe	GP 080_104; GP 080_105; GP 081_104; GP 081_105
Wiesbaden	GP 078_095; GP 078_096; GP 079_095; GP 079_096

Tabelle 7: Zuordnung der REMO Gitterpunkte zu entsprechenden Stationen

Station	Gitterpunkte
Bad Hersfeld	GP 047_062; GP 047_063; GP 048_062; GP 048_063
Beerfeld	GP 040_048; GP 040_049; GP 041_048; GP 041_049
Eschwege	GP 050_065; GP 050_066; GP 051_065; GP 051_066
Kassel	GP 045_067; GP 045_068; GP 046_067; GP 046_068
Kl. Feldberg	GP 037_056; GP 057_063; GP 038_056; GP 038_057
Sontra	GP 049_064; GP 049_065; GP 050_064; GP 050_065
Wasserkuppe	GP 048_058; GP 048_059; GP 049_058; GP 049_059
Wiesbaden	GP 035_054; GP 035_055; GP 036_054; GP 036_055

2.3. Vorgehensweise

Zunächst wird für die Klimastationen des DWD in Hessen (1971-2007) und für die Simulationen des Validierungszeitraumes 1971-2000 der Klimamodelle WETTREG, CCLM und REMO die Entwicklung der Anzahl der Sommertage untersucht.

Damit im späteren Verlauf der Arbeit die Zukunftssimulationen (2071-2100) der drei Modelle genutzt und beurteilt werden können, muss vorher ein Vergleich der Simulation der drei Klimamodelle für den Validierungszeitraum 1971-2000 mit den historischen Daten der Klimastationen durchgeführt werden.

Für die zwei Stationen, die die höchste Anzahl an Sommertagen (Wiesbaden) und die niedrigste Anzahl an Sommertagen (Wasserkuppe) aufweisen, wird im folgenden Schritt der Hitze Index berechnet.

Dieser Index wird nur für Tage mit Temperaturen $\geq 25^{\circ}\text{C}$ ermittelt, nicht für Tage mit geringeren Werten. Mit Hilfe dieses Indexes kann dann eine Einteilung der körperlichen Belastung ermittelt werden.

3. Ergebnisse

3.1. Vergleich Beobachtungsdaten mit Klimamodellen

Da die Klimamodelle als Antrieb die globalen Klimamodelle und nicht die Beobachtungsdaten nutzen, geben diese nie die genauen Beobachtungsdaten wieder. Deshalb werden in dem folgenden Kapitel die simulierten Daten zur Überprüfung der Verläufe mit den gemessenen Daten (Abbildung 3) über einen Zeitraum von 1971-2000 verglichen. So können später durch die Zukunftssimulationen Aussagen über die Entwicklung der Sommertage getroffen werden.

Das Klima wird durch die Klimamodelle dann zutreffend wiedergegeben, wenn der Mittelwert, die Variabilität und die Extrema richtig dargestellt werden. Dabei ist egal, ob Maxima und Minima im gleichen Jahr auftreten wie in den Beobachtungen. Es kommt nur darauf an, dass diese in der richtigen Größenordnung auftreten. Darum dürfen die einzelnen simulierten Jahre der Modelle nicht mit den Beobachtungen verglichen werden.

3.1.1. Vergleich der historischen Daten der Messstationen mit dem Klimamodell WETTREG

Zunächst wird der Vergleich der Entwicklung der Anzahl der Sommertage zwischen den Beobachtungen und dem Simulationsergebnis des Modells WETTREG für den Validierungszeitraum 1971-2000 in der folgenden Abbildung 7 gezeigt.

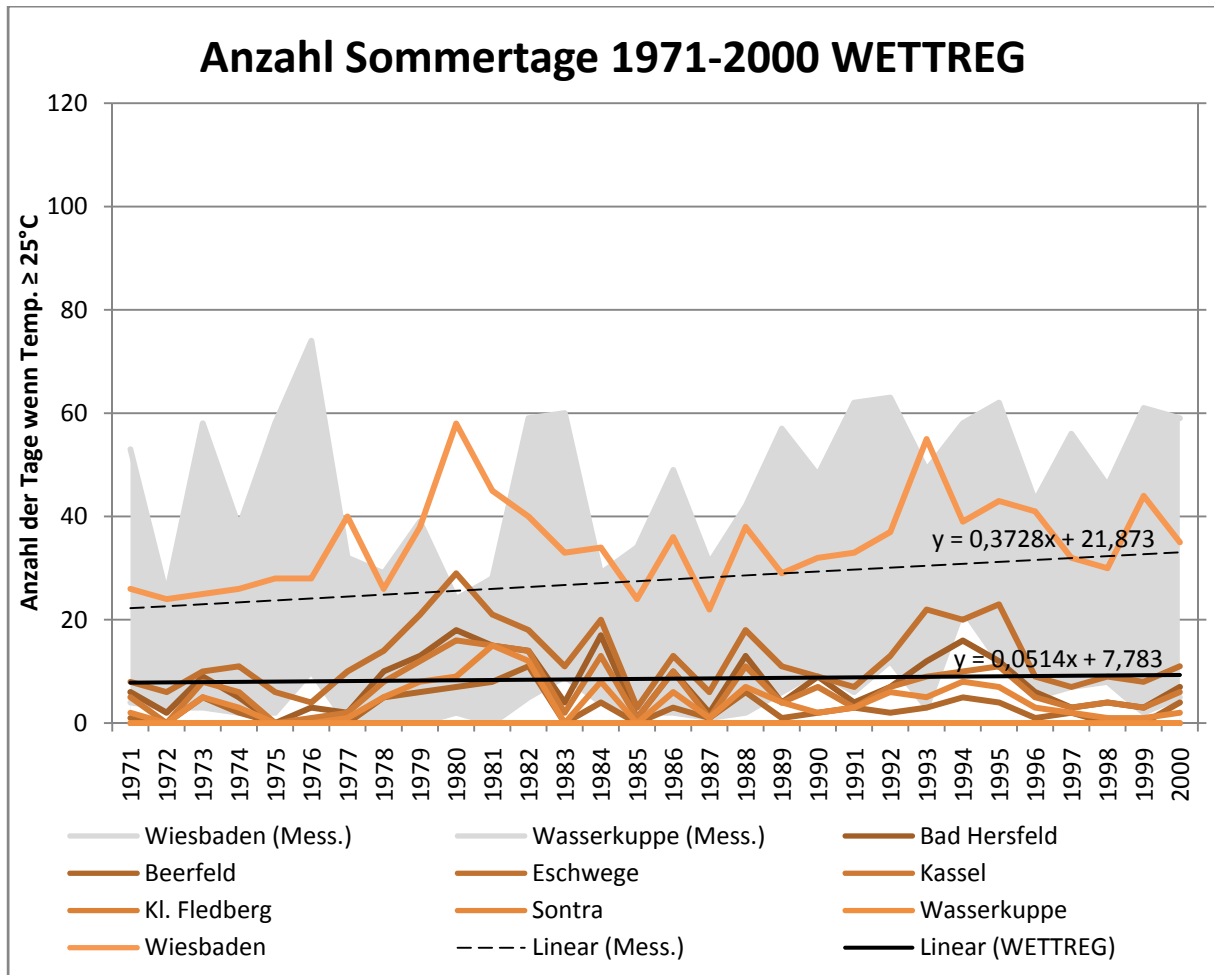


Abbildung 7: Anzahl der Sommertage des Klimamodells WETTREG für Hessen im Zeitraum 1971-2000

Der graue Bereich markiert die Bandbreite der Beobachtungsdaten. Die Station Wiesbaden (Mess.), mit der höchsten Anzahl an Sommertagen im Zeitraum 1971-2000 und die Station Wasserkuppe (Mess.), mit der niedrigsten Anzahl an Sommertagen, stellen die Ober- und Untergrenze dar.

Die Simulationsergebnisse des Modelles WETTREG weisen im Vergleich zu den Beobachtungen eine deutlich geringere mittlere Anzahl an Sommertagen auf. WETTREG simuliert für diesen Validierungszeitraum eine mittlere Anzahl von 8,57 Sommertagen und die Beobachtungen ergaben eine mittlere Anzahl von 25 Sommertagen.

Die meisten Stationen des Modelles überschreiten eine Anzahl von mehr als 20 Sommertagen nicht. Dagegen liegt nach den Beobachtungen die Anzahl der

Sommertage für die meisten Stationen zwischen 20 bis 40 Sommertagen (Abb. 3) im Jahr. Die simulierten Daten für die Station Wiesbaden ergeben als einzige höhere Anzahlen an Sommertagen als die anderen 7 Stationen. Diese befindet sich in einem größeren Abstand zu den anderen Stationen in der oberen Hälfte der Bandbreite der Beobachtungsdaten. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Station Wiesbaden in den Beobachtungsdaten den oberen Rand des grauen Bereichs darstellt. Aus dieser Abbildung 7 ergibt sich also, dass die räumliche Variabilität des Modells WETTREG zu niedrig berechnet wird. Daraus folgt, dass für das Modell WETTREG eine Unterschätzung der Anzahl der Sommertage vorliegt.

Die Beobachtungen decken einen Bereich zwischen einer Anzahl von 0-70 Sommertagen ab und erreichen häufiger ein Maximum mit einer Anzahl von 60 Sommertagen. Die Simulationsergebnisse des Modells WETTREG überschreiten jedoch eine Anzahl von 60 Sommertagen kein einziges Mal. Außerdem weisen die Simulationsergebnisse der Stationen Wasserkuppe und Kl. Feldberg nicht einen Sommertag in diesem Validierungszeitraum auf. Ein Vergleich der Extrema zeigt also, dass das Modell knapp die richtige Größenordnung der Anzahl der Sommertage trifft. Es ist dabei nicht wichtig, dass im Modell im Jahr 1980 der Maximalwert auftritt und die Beobachtungen im Jahr 1976. Wie schon im vorherigen Kapitel 3.1. erläutert, können Einzeljahre nicht verglichen werden, sondern das Modell muss die Höhe der Extremwerte und deren Aufttrittshäufigkeit angemessen darstellen.

Durch eine Gegenüberstellung mit Abbildung 3 wird verdeutlicht, dass auch die zeitliche Variabilität leicht unterschätzt wird.

3.1.2. Vergleich der historischen Daten der Messstationen mit dem Klimamodell CCLM

Dargestellt wird in der folgenden Abbildung 8 der Vergleich der Anzahl der Sommertage über einen Zeitraum von 1971-2000 zwischen den Beobachtungen und dem Klimamodell CCLM.

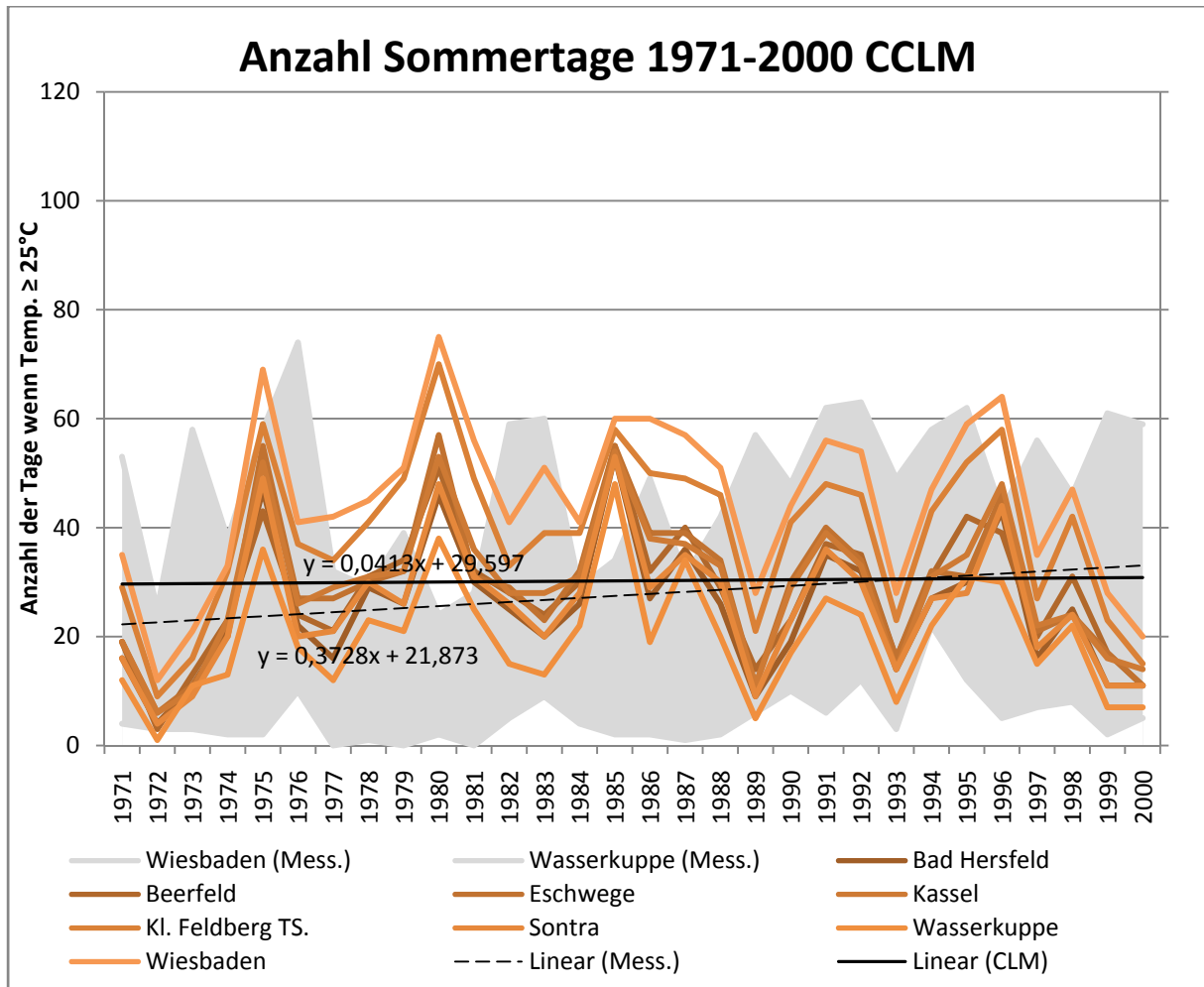


Abbildung 8: Anzahl der Sommertage des Klimamodells CCLM für Hessen im Zeitraum 1971-2000

Auch in dieser Abbildung 8 stellt der graue Bereich die Bandbreite der Beobachtungsdaten dar, eingegrenzt durch die Messwerte an den Stationen Wiesbaden und Wasserkuppe.

Die Simulationsergebnisse des Modells CCLM weisen eine höhere mittlere Anzahl mit 30,2 Sommertagen im Unterschied zu den Beobachtungen mit einer mittleren Anzahl von 25 Sommertagen auf.

Die simulierten Werte befinden sich eng beieinander liegend im oberen Bereich der Beobachtungen mit einer Anzahl von 1-60 Sommertagen. Die Stationen Wasserkuppe und Kl. Feldberg weisen den größten Unterschied im Vergleich zu den Beobachtungen auf. Das dynamische Modell CCLM erreicht für diese beiden Stationen mehrere Jahre mit über 20 Sommertagen, jedoch lagen die Anzahl der

Sommertage nach den Beobachtungen unter diesem Bereich (Abb.3). Das Modell CCLM simuliert also etwas mehr Sommertage, wie durch die Beobachtungen tatsächlich nachgewiesen wurden. Aus dieser Abbildung 8 ergibt sich, dass die räumliche Variabilität zu niedrig berechnet wird.

Sowohl für die Beobachtungen, als auch für das Modell CCLM, erreichen die Maxima häufiger eine Anzahl von über 60 Sommertagen an der Station Wiesbaden. Auch gibt das Modell den Maximalwert der Beobachtungen mit über 70 Sommertagen wieder. Ein Vergleich der Extrema zwischen den Beobachtungen und diesem Modell CCLM verdeutlicht also, dass die Maximalwerte realistisch wiedergegeben werden, jedoch die Minima für diesen Validierungszeitraum leicht überschätzt werden.

Dabei gilt wieder zu beachten, wie im Kapitel 3.1. erläutert, dass die einzelnen Jahre der Beobachtungen nicht mit denen der Simulationsergebnisse des Modells verglichen werden dürfen.

Durch einen Vergleich mit Abbildung 3 folgt, dass die zeitliche Variabilität von diesem Klimamodell CCLM überschätzt wird.

3.1.3. Vergleich der historischen Daten der Messstationen mit dem Klimamodell REMO

Abbildung 9 zeigt den Vergleich der Anzahl der Sommertage der Beobachtungen und des dynamischen Modells REMO im Validierungszeitraum 1971-2000.

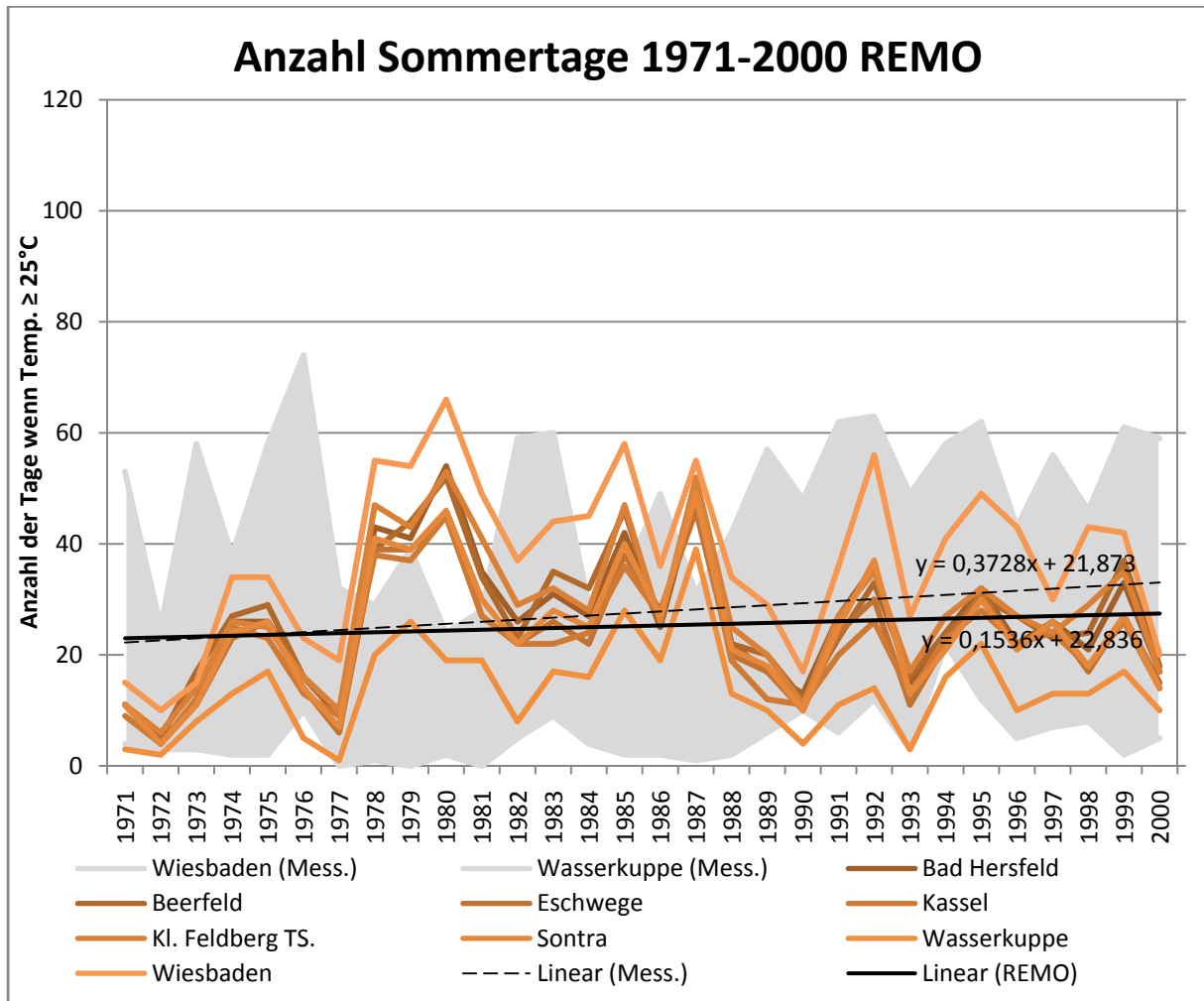


Abbildung 9: Anzahl der Sommertage des Klimamodells REMO für Hessen im Zeitraum 1971-2000

Auch in dieser Abbildung 9 stellt der graue Bereich die Bandbreite der Beobachtungsdaten dar, eingegrenzt durch die Messwerte der Stationen Wiesbaden und Wasserkuppe.

Die Simulationsergebnisse des Modelles REMO weisen im Vergleich zu den Beobachtungen eine gleiche mittlere Anzahl an Sommertagen auf. REMO simuliert für diesen Validierungszeitraum eine mittlere Anzahl von 25,2 Sommertagen und die Beobachtungen ergaben eine mittlere Anzahl von 25 Sommertagen.

Die simulierten Werte der zwei Stationen Wiesbaden und Wasserkuppe liegen etwas von den anderen 6 Stationen ab. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Station Wiesbaden den oberen Rand des grauen Bereiches der Beobachtungen darstellt und die Station Wasserkuppe den unteren Rand des grauen Bereiches. Daraus folgt, wie

im vorangegangenen dynamischen Modell CCLM aufgezeigt, auch das Modell REMO die Werte für die Stationen Wasserkuppe und auch für die Station Kl. Feldberg überschätzt. Die simulierten Werte befinden sich in einem Bereich mit Anzahlen von 0-60 Sommertagen.

Aus dieser Abbildung 9 folgt, dass auch dieses Klimamodell die räumliche Variabilität zu niedrig darstellt.

Ein Vergleich der Extrema zwischen den Beobachtungen (Abb. 3) und dem dynamischen Modell REMO zeigt, dass die Maximalwerte leicht unterschätzt und die Minima überschätzt werden. Den Maximalwert der Beobachtungen mit einer Anzahl von 70 Sommertagen erreichen die simulierten Werte nicht. Auch die Anzahl von 60 Sommertagen, die in den Beobachtungen häufiger nachgewiesen werden, überschreiten die simulierten Werte des Modells REMO nur ein einziges Mal. Außerdem überschätzen die simulierten Werte der Stationen Wasserkuppe und Kl. Feldberg die gemessenen Werte. Es gilt auch hier wieder zu beachten, wie im Kapitel 3.1. erläutert, dass die einzelnen Jahre der Beobachtungen nicht mit denen der Simulationsergebnisse des Modells verglichen werden dürfen. Es kommt auf die Größenordnung der Extrema an.

Eine Gegenüberstellung mit Abbildung 3 verdeutlicht, dass auch dieses dynamische Modell die zeitliche Variabilität überschätzt.

Alle drei Modelle zeigen in den Abbildungen 7-9 eine unterschiedliche Größenordnung der Anzahl der Sommertage für die einzelnen Stationen auf. Das statistische Modell WETTREG unterschätzt die Anzahl der Sommertage. Die dynamischen Modelle CCLM und REMO hingegen überschätzen die Anzahl der Sommertage, besonders für die Stationen Wasserkuppe und Kl. Feldberg. Beide dynamischen Modelle sind sich in ihrer Größenordnung sehr ähnlich, die simulierten Werte des Modells REMO sind jedoch ein wenig niedriger als die des Modells CCLM.

Doch für alle drei Modelle, sowie für die Beobachtungen, gibt die Station Wiesbaden immer die obere Grenze der Anzahl der Sommertage und die Station Wasserkuppe immer die untere Grenze der Anzahl der Sommertage an.

3.2. Beobachtungen und Simulationen 1971-2000 (Belastungstage)

In den folgenden Kapiteln wird mithilfe des Hitze Indexes für die beiden Stationen Wiesbaden und Wasserkuppe für die Beobachtungsdaten und die simulierten Daten der drei Klimamodelle für den Validierungszeitraum 1971 – 2000 die Entwicklung der körperlichen Belastung untersucht.

Dieser Index errechnet sich aus den zwei Parametern Temperatur und relativer Luftfeuchte aus der im Kapitel 1.3.3. aufgezeigten Formel. Durch die Berechnung des Hitze Indexes wird aus den bisher betrachteten Sommertagen die Anzahl derjenigen Tage berechnet, bei denen eine körperliche Belastung auftritt. Dazu werden 4 Belastungsstufen bestimmt. Die geringste Belastungsstufe wird in gelb

dargestellt und die Stufen 2 und 3 in unterschiedlichen Orangetönen. Die vierte und gefährlichste Stufe wird in rot abgebildet (vgl. Tab. 4).

Wie in Tabelle 4 gezeigt, herrscht z.B. bei einer Temperatur von 32 °C schon bei einer relativen Luftfeuchte von unter 35 % die erste Belastungsstufe, die bei Menschen zu Erschöpfungserscheinungen und Müdigkeit führen kann. Mit steigender Luftfeuchte bei gleich bleibender Temperatur nehmen die Belastungsstufen und die daraus folgenden Auswirkungen zu.

Aus dieser Tabelle wird also ersichtlich, je höher die Luftfeuchte an warmen Tagen ist, umso größer werden die Belastungen für den Menschen.

3.2.1. Beobachtungsdaten

Abbildung 10 zeigt die Entwicklung der Belastungsstufen, berechnet aus den Beobachtungsdaten der Klimastation Wiesbaden, über den Zeitraum 1971-2000.

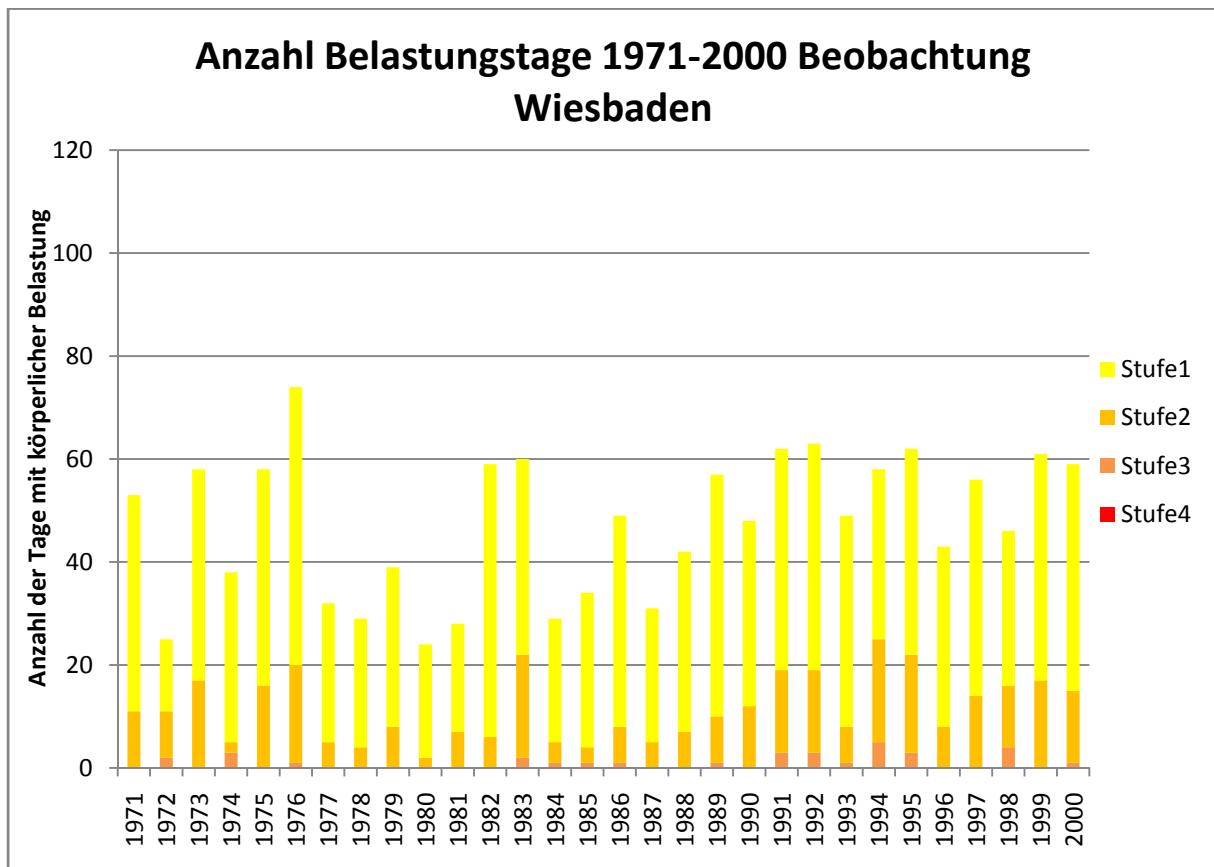


Abbildung 10: Entwicklung der Belastungstage der Klimastation Wiesbaden im Zeitraum 1971-2000

In dem Zeitraum 1971-2000 treten die ersten drei der 4 Belastungsstufen auf, davon die erste am häufigsten. Die ersten beiden Stufen kommen die ganzen 30 Jahre durchgehend vor, wohingegen die 3. Belastungsstufe nur in bestimmten Jahren auftritt.

Das Jahr 1976 weist mit einer Anzahl von ca. 70 Tagen die größte Belastung in diesem Zeitraum auf. Doch kann nicht davon ausgegangen werden, dass dieses Jahr in diesem Zeitraum das gefährlichste war. Die Jahre mit einer zwar geringeren Gesamtanzahl der Belastungstage, aber mit einer größeren Anzahl an Tagen mit Belastungsstufen 2 und 3, dürfen nicht unterschätzt werden. An Tagen mit einer Belastungsstufe 2, muss mit Möglichkeiten von Sonnenstichen oder Hitzekrämpfen gerechnet werden und bei Stufe drei besteht die Gefahr von einem Hitzeschlag und einem Sonnenstich.

Ab dem Jahr 1988 sinkt in keinem dieser Jahre die Anzahl der Belastungstage unter eine Gesamtanzahl von 40 Tagen pro Jahr.

In der folgenden Abbildung 11 wird die Entwicklung der Belastungstage der berechneten Beobachtungsdaten der Klimastation Wasserkuppe dargestellt.

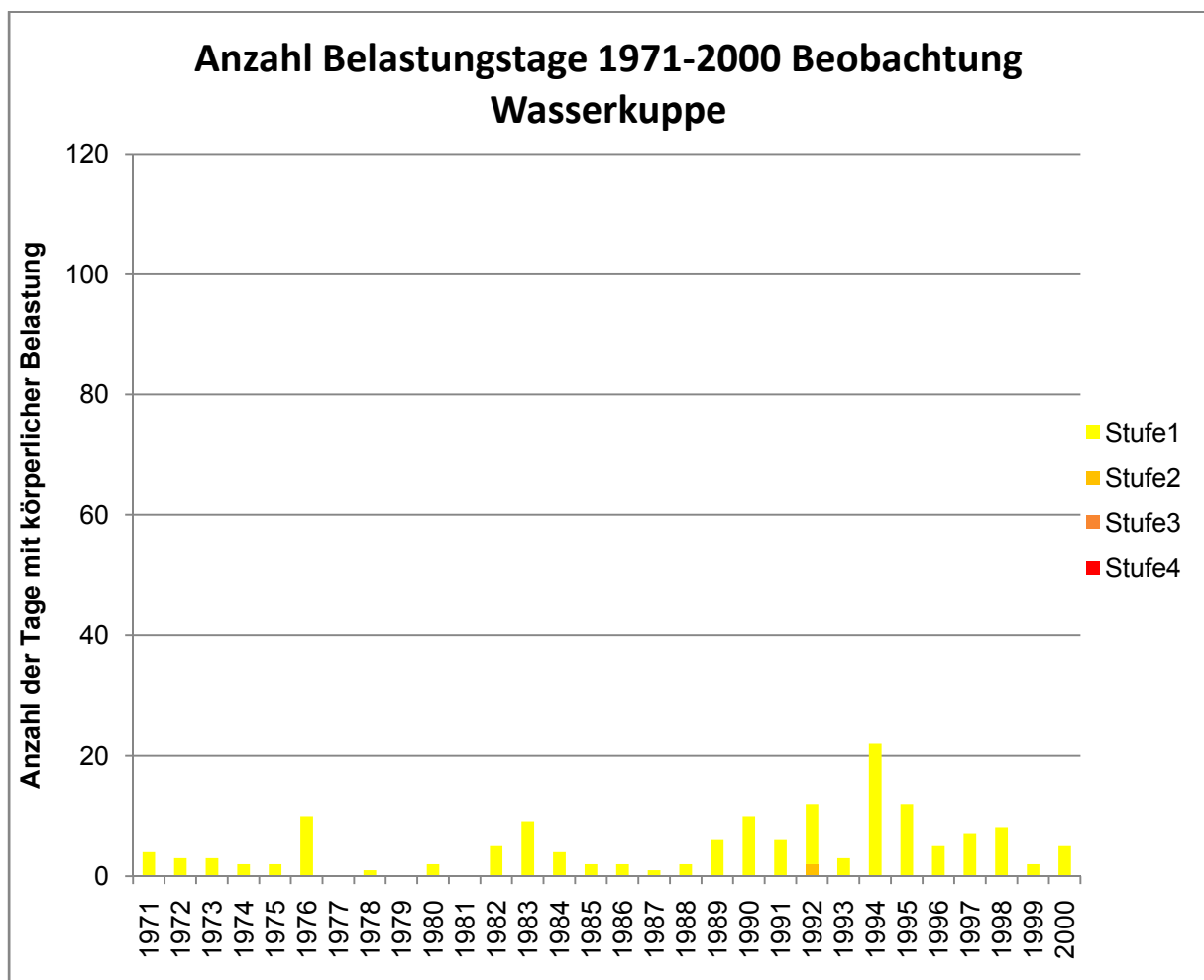


Abbildung 11: Entwicklung der Belastungstage der Klimastation Wasserkuppe im Zeitraum 1971-2000

Die Klimastation Wasserkuppe weist in dem Zeitraum von 1971 bis 2000 fast nur die Belastungsstufe 1 auf und diese nicht in jedem Jahr. Eine Ausnahme bildet das Jahr 1992. In diesem tritt an ein bis zwei Tagen die Belastungsstufe 2 auf.

Die höchste Anzahl an Belastungstagen zeigt sich im Jahr 1994 mit einer Anzahl von ca. 20 Tagen. Dies ist im Vergleich zur Station Wiesbaden, die eine Maximalanzahl von ca. 70 Tagen aufweist, sehr gering. Doch wie schon durch die vorherigen Untersuchungen in dem Kapitel 2.1.1. festgestellt, weist die Station Wiesbaden von allen 8 ausgewählten Stationen immer die höchste Anzahl an Sommertagen auf und die Station Wasserkuppe immer die niedrigste. Also sollte in den weiteren Untersuchungen die Station Wasserkuppe immer geringere Werte aufweisen. Die beiden Belastungsstufen 3 und 4 treten an dieser Station Wasserkuppe nicht ein einziges Mal auf.

In den folgenden Untersuchungen dürfen keine Vergleiche der einzelnen Jahre der simulierten Werte mit den Beobachtungsdaten durchgeführt werden, da die Simulationen der Klimamodelle nicht die einzelnen Jahre wieder geben, sondern das statistische Mittel. Die Modelle nutzen als Antrieb die globalen Klimamodelle und nicht die Beobachtungsdaten. Dadurch können Mittelwert und Variabilität dargestellt werden, jedoch nicht das exakte Jahr.

Die simulierten Daten werden in den folgenden Kapiteln zur Überprüfung der Verläufe mit den gemessenen Daten verglichen, um so später durch die Zukunftssimulationen Aussagen über die Entwicklung der Belastungstage anstellen zu können.

3.2.2. Klimamodell WETTREG 1971-2000

Die Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das statistische Klimamodell WETTREG für den Validierungszeitraum 1971-2000 wird in der folgenden Abbildung 12 dargestellt.

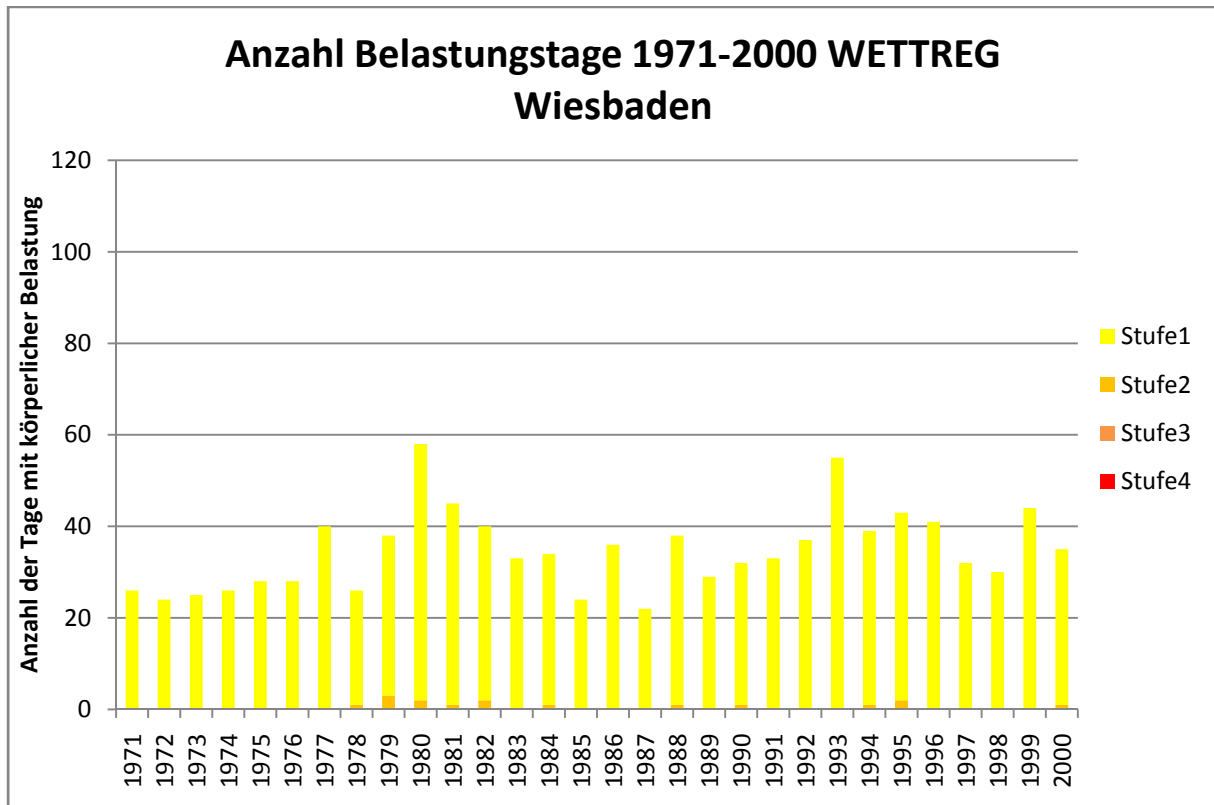


Abbildung 12: Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das Klimamodell WETTREG im Zeitraum 1971-2000

In den Simulationsergebnissen mit dem Modell WETTREG treten im Zeitraum von 1971 – 2000 überwiegend nur die Belastungsstufe 1 und in geringer Anzahl die Belastungsstufe 2 für die Station Wiesbaden auf. Die simulierten Werte des Modell WETTREG geben für die Stufe 2 nur eine Anzahl von ein bis zwei Tagen im Jahr an, wohingegen die Belastungsstufe 1 eine Anzahl von 20 Belastungstagen nicht unterschreitet. Im Vergleich zu den Beobachtungsdaten (Abb. 10) die in jedem Jahr die Belastungsstufe 2 mit einer höheren Anzahl aufweisen, unterschätzen die simulierten Werte des Klimamodells diese deutlich. Eine Anzahl von 60 Belastungstagen erreichen die Simulationsergebnisse nicht, die Beobachtungen hingegen überschreiten diese mehrmals und weisen in einem Jahr sogar einen Maximalwert von über 70 Belastungstagen auf.

Die Belastungsstufe 3, die bei den Beobachtungen zwar in geringer Anzahl aber vorhanden ist, tritt in diesem Modell nicht auf.

Für die Station Wasserkuppe simuliert das Modell WETTREG keinen einzigen Tag mit körperlicher Belastung. Jedoch zeigt ein Vergleich mit den Beobachtungsdaten, dass über den Zeitraum 1971-2000 eine geringe Anzahl an Belastungstagen mit der

Belastungsstufe 1 auftrat. Sogar wurde in einem Jahr an ein bis zwei Tagen die zweite Belastungsstufe festgestellt.

3.2.3. Klimamodell CCLM 1971-2000

Abbildung 13 zeigt für das dynamische Modell CCLM die Entwicklung der Belastungstage für die Station Wiesbaden im Validierungszeitraum 1971-2000.

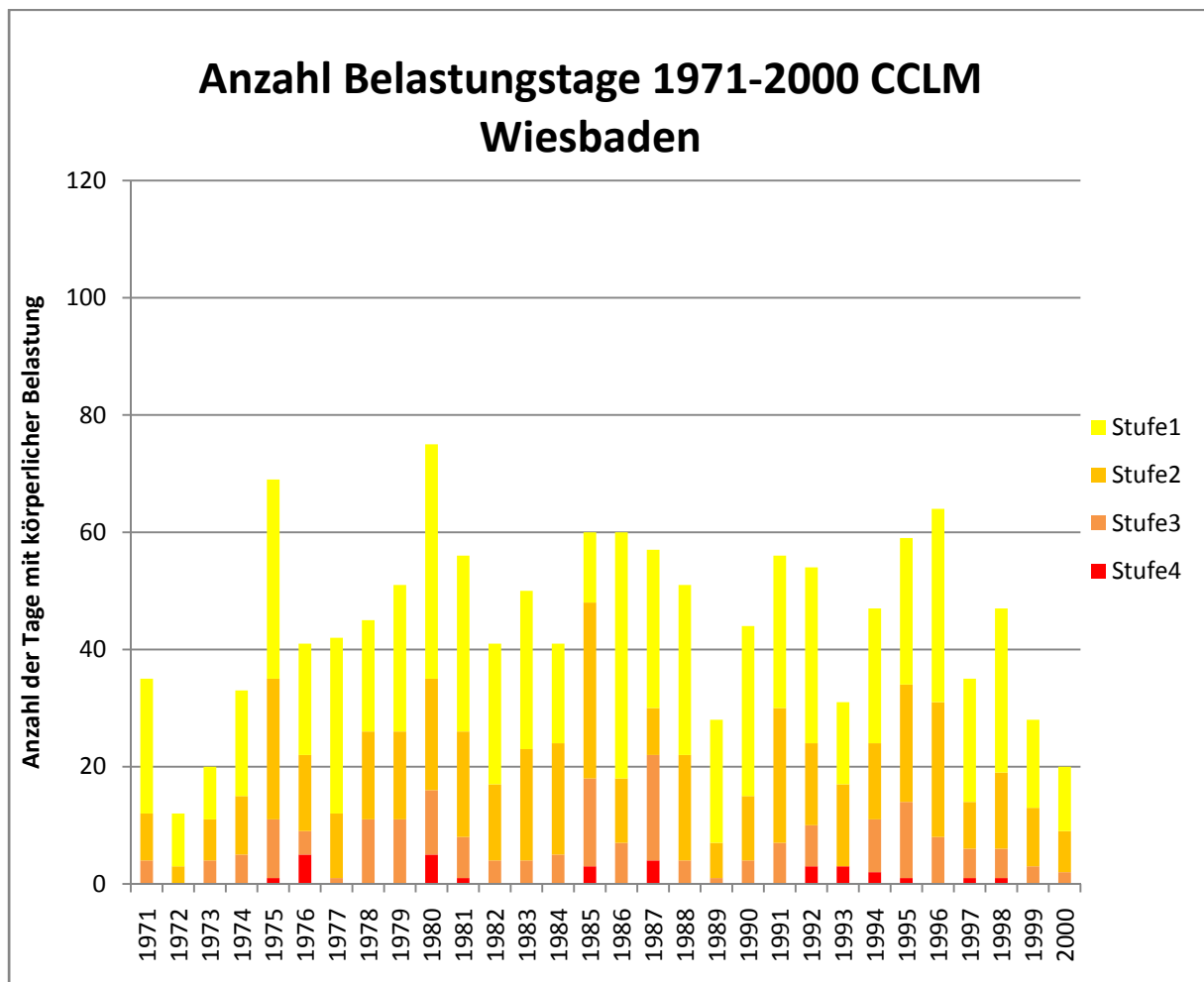


Abbildung 13: Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das Klimamodell CCLM im Zeitraum von 1971-2000

Das Modell CCLM simuliert in den meisten Jahren eine Anzahl von Belastungstagen von 20 bis 60 Tagen pro Jahr. In diesem Zeitraum von 30 Jahren treten allerdings alle 4 Belastungsstufen auf, die ersten drei Stufen in fast jedem Jahr und die vierte unregelmäßig mit einer geringen Anzahl. Dieses Modell simuliert Jahre mit sehr hohen Belastungen und somit auch höheren Auswirkungen auf den Körper. In Belastungsstufe 4 ist die Gefahr von einem Hitzeschlag oder Sonnenstich sehr wahrscheinlich und auch die anderen Belastungsstufen sind durch ihre größere Anzahl an Tagen nicht ungefährlich.

Die folgende Abbildung 14 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Belastungstage der Station Wasserkuppe des Modells CCLM für den Validierungszeitraum 1971-2000.

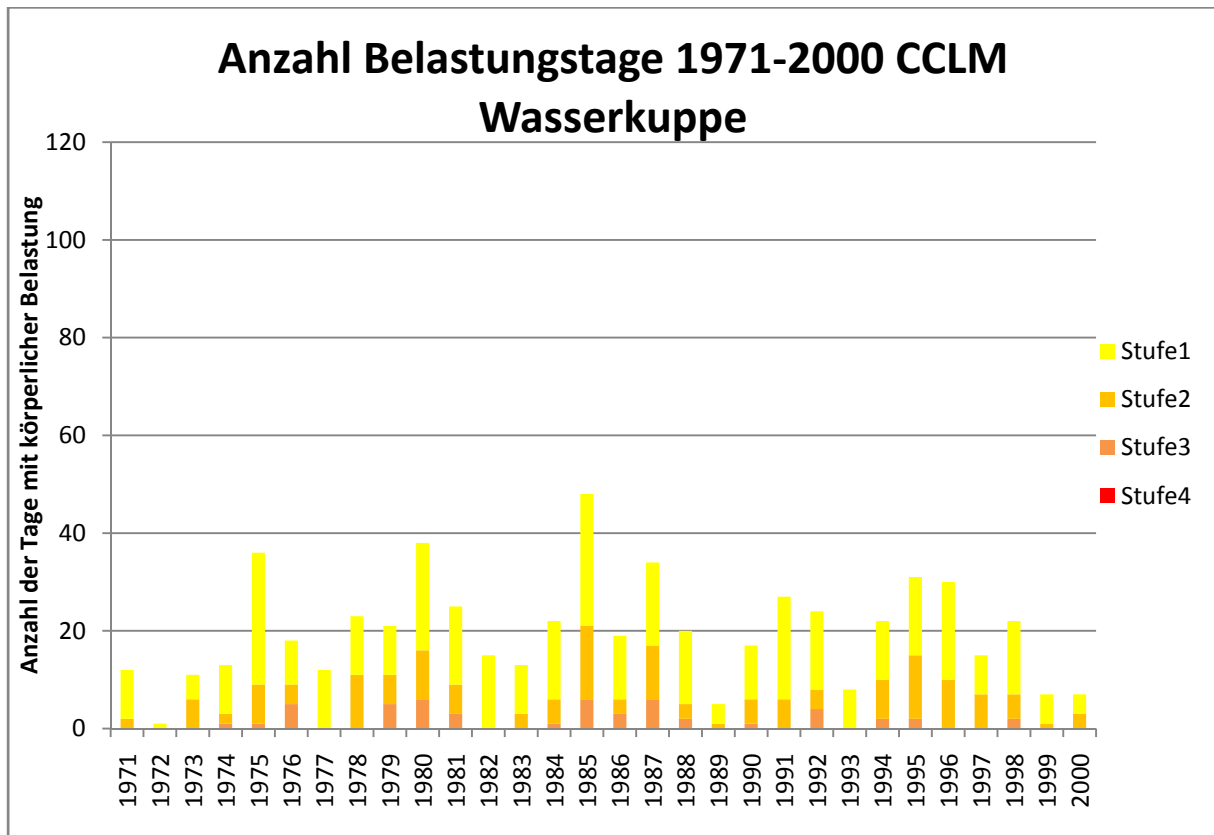


Abbildung 14: Entwicklung der Belastungstage der Station Wasserkuppe durch das Klimamodell CCLM im Zeitraum von 1971-2000

Für die Station Wasserkuppe wird in dem Modell CCLM eine Anzahl von Belastungstagen in dem Bereich von 1 bis über 20 Tagen simuliert. Einmal erreichen die simulierten Werte sogar eine Anzahl von über 40 Belastungstagen. In diesem Zeitraum 1971-2000 treten die ersten drei der vier Belastungsstufen auf. Davon tritt die erste Stufe regelmäßig und die andern beiden unregelmäßig auf.

Im Vergleich zu den Beobachtungen (Abb. 11) ist eine deutliche Überschätzung der simulierten Werte auszumachen. Die simulierten Werte des Modells CCLM überschätzen die Anzahl der Belastungstage für die Station Wasserkuppe im Vergleich zu den Beobachtungsdaten. Außerdem tritt in den Beobachtungen die Belastungsstufe 2 nur in einem einzigen Jahr mit einer geringen Anzahl an Tagen auf und die Stufe 3 nicht ein einziges Mal.

3.2.4. Klimamodell REMO 1971-2000

Dargestellt wird in der folgenden Abbildung 15 die Entwicklung der Anzahl der Belastungstage der Station Wiesbaden des dynamischen Modells REMO für den Validierungszeitraum 1971-2000.

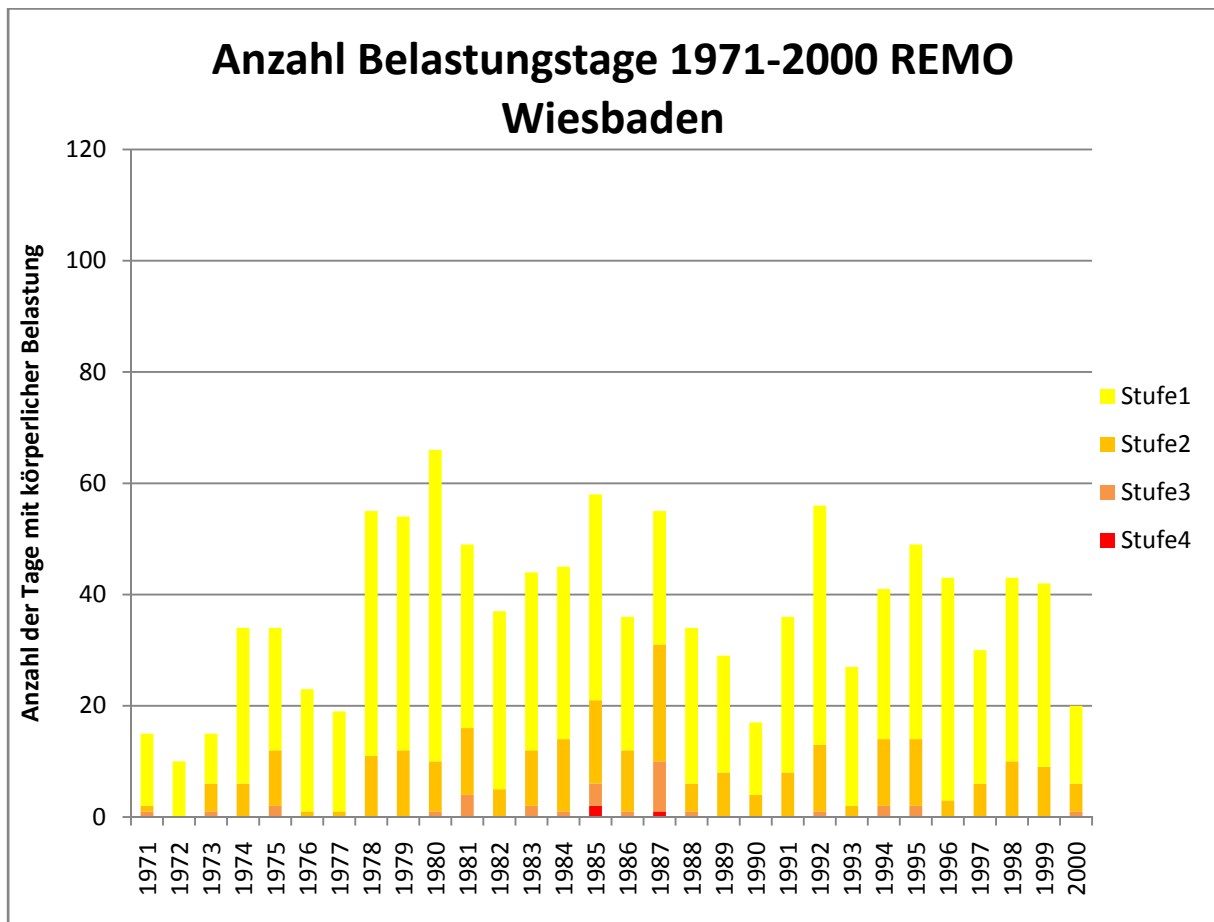


Abbildung 15: Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das Klimamodell REMO im Zeitraum von 1971-2000

In dem Validierungszeitraum von 1971 – 2000 treten in den Simulationsergebnissen des Modells REMO alle vier Belastungsstufen auf, überwiegend die Stufe 1 mit der höchsten Gesamtanzahl von Tagen pro Jahr. Diese liegen im Bereich von 10 bis über 60 Belastungstagen. Die Belastungsstufe 3 tritt nicht regelmäßig sondern nur selten und mit geringen Werten auf. Auch die Belastungsstufe 4, bei der körperliche Belastungen wie Hitzeschlag und Sonnenstich auftreten, wird mit sehr geringen Werten simuliert. Im Vergleich zu den Beobachtungen (Abb. 10) zeigt sich folgender Unterschied: die Gesamtanzahl der Belastungstage wird durch das Modell REMO für die Station Wiesbaden unterschätzt, doch das Auftreten der Belastungsstufen wird überschätzt. Dies wird verdeutlicht durch das Vorkommen der Belastungsstufe 4 im Modell REMO, im Gegensatz zu den Beobachtungsdaten.

Die Abbildung 16 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Belastungstage der Station Wasserkuppe des Klimamodells REMO für den Validierungszeitraum 1971-2000.

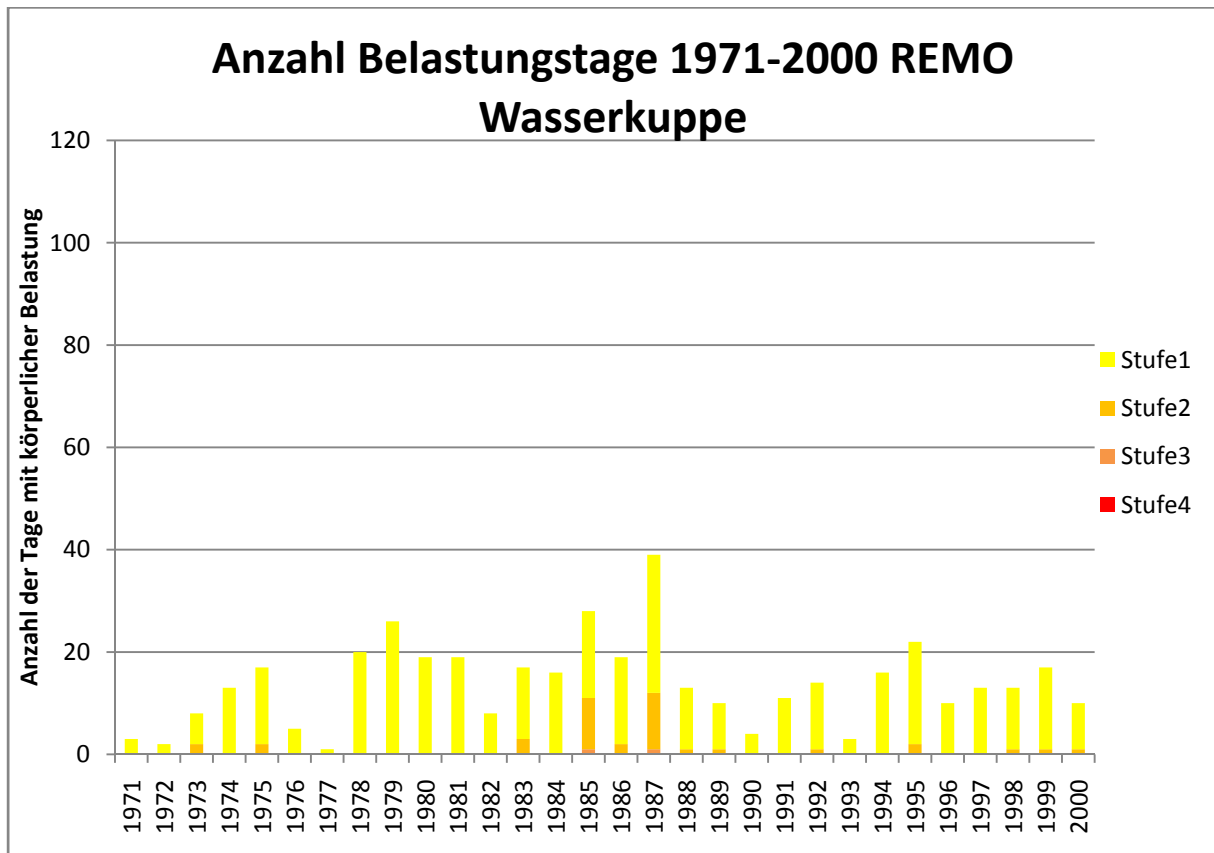


Abbildung 16: Entwicklung der Belastungstage der Station Wasserkuppe durch das Klimamodell REMO im Zeitraum von 1971-2000

Für die Station Wasserkuppe wird in dem Modell REMO überwiegend die Belastungsstufe 1 simuliert. Die Belastungsstufen 2 und 3 treten unregelmäßig in geringer Größenordnung auf. Die Anzahl der simulierten Belastungstage in diesem Modell liegt in den meisten Jahren in dem Bereich von 1 bis 20 Tagen pro Jahr und erreicht einmal sogar einen Wert von fast 40 Belastungstagen pro Jahr.

Dieses dynamische Modell simuliert im Vergleich zum dynamischen Modell CCLM (Abb. 14) geringere Belastungswerte. Jedoch überschätzt auch dieses Modell im Vergleich zu den Beobachtungen (Abb. 11) die tatsächlich gemessenen Belastungen. Die gemessenen Werte überschreiten eine Anzahl von 20 Belastungstagen nur in einem Jahr und liegen sonst im Bereich von 0-15 Belastungstagen pro Jahr. Das Modell REMO simuliert überwiegend Jahre mit einer höheren Anzahl an Belastungstagen und auch die Belastungsstufen werden überschätzt. Die Belastungsstufe 2 tritt in den Beobachtungen nur einmal in einem Jahr auf und die Belastungsstufe 3 nicht einmal.

3.2.5. Vergleich

Die folgende Abbildung 17 zeigt die Anzahl der Belastungstage pro Jahr (1971-2000) für die Stationen Wiesbaden und Wasserkuppe, im Vergleich zwischen den Beobachtungen und der drei Klimamodelle WETTREG, CCLM und REMO.

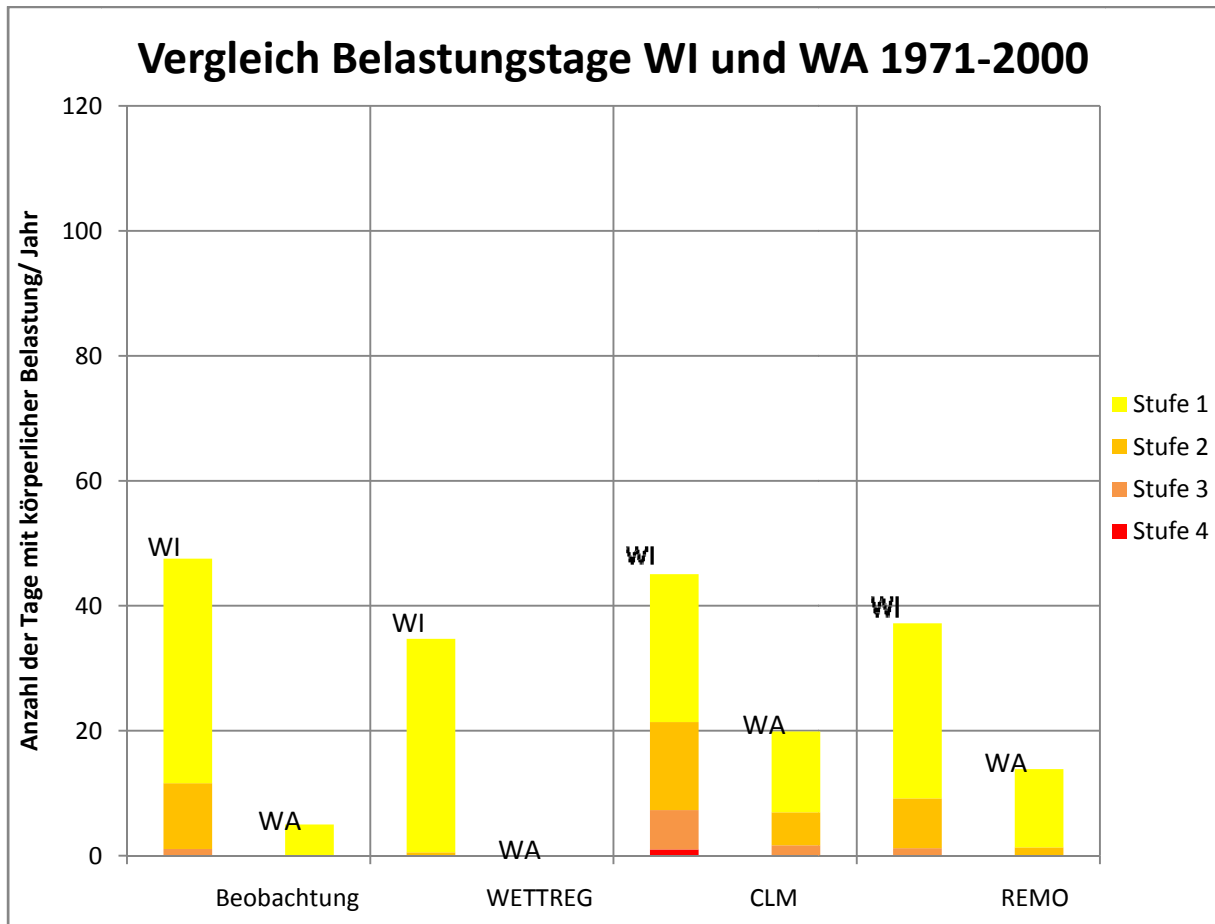


Abbildung 17: Anzahl Belastungstage pro Jahr: Beobachtungsdaten und simulierte Daten (1971-2000), Stationen Wiesbaden (WI) und Wasserkuppe (WA)

Die Simulationsergebnisse des statistischen Modells WETTREG zeigen im Vergleich zu den Beobachtungen und den beiden dynamischen Modellen CCLM und REMO die geringste Anzahl an Belastungstagen. Für die Station Wasserkuppe werden in diesem Modell für den Zeitraum 1971-2000 keine Tage simuliert die eine körperliche Belastung durch Hitzestress aufweisen. Die Station Wiesbaden weist im Vergleich zu den gemessenen Werten eine geringere Anzahl an Belastungstagen auf und eine deutliche Unterschätzung der Belastungsstufen. Überwiegend tritt im Modell WETTREG die Belastungsstufe 1 auf und an einem einzigen Tag die Stufe 2, wohingegen bei den tatsächlich gemessenen Werten sogar Tage mit der Belastungsstufe 3 vorkamen. Das Modell WETTREG unterschätzt also für beide Stationen Wiesbaden und Wasserkuppe die Belastungen.

Die gemessenen Werte weisen für die Station Wiesbaden eine Gesamtanzahl von ca. 50 Belastungstagen pro Jahr auf mit den Belastungsstufen 1-3. Für die Station

Wasserkuppe hingegen liegt die Anzahl der Belastungstage bei ca. 5-10 Tagen pro Jahr mit nur der ersten Belastungsstufe.

Die Simulationsergebnisse des dynamischen Modells CCLM weisen zwar für die Station Wiesbaden eine niedrigere Gesamtanzahl von Belastungstagen auf, doch das Auftreten der Belastungsstufen wird deutlich überschätzt. So tritt im Vergleich zu den Beobachtungen an der Station Wiesbaden sogar die Belastungsstufe 4 auf und auch die Belastungsstufen 2 und 3 werden in diesem Modell mit einer höheren Anzahl simuliert. Für die Station Wasserkuppe zeigen die Simulationsergebnisse dieses Modells eine deutlich höhere Gesamtanzahl an Belastungstagen im Vergleich zu den Beobachtungen und auch an dieser Station werden die Belastungsstufen deutlich überschätzt. So treten an der Station Wasserkuppe in den CCLM Simulationen die ersten drei Belastungsstufen auf und nicht nur die erste Stufe, so wie die Beobachtungen es belegen.

Die Simulationsergebnisse des dynamischen Modells REMO zeigen für die Station Wasserkuppe eine deutliche Überschätzung der Gesamtanzahl der Belastungstage und der Belastungsstufen an. Die simulierten Werte der Station Wiesbaden weisen eine geringere Gesamtanzahl der Belastungstage im Vergleich zu den Beobachtungen auf. Es treten aber im Modell die gleichen Belastungsstufen wie in den Beobachtungen auf.

Aus Abbildung 17 geht also hervor, dass das statistische Modell WETTREG im Vergleich zu den Beobachtungen die Anzahl der Belastungstage und auch die Belastungsstufen für beide Stationen (Wasserkuppe, Wiesbaden) unterschätzt. Das dynamische Modell CCLM hingegen unterschreitet die Gesamtanzahl an Belastungstagen für die Station Wiesbaden, doch überschätzt die Belastungsstufen. Für die Station Wasserkuppe werden die Belastungstage und auch die Belastungsstufen deutlich überschätzt. Auch das dynamische Modell REMO simuliert eine zu hohe Anzahl an Belastungstagen und eine zu hohe Einteilung der Belastungsstufen, jedoch nur für die Station Wasserkuppe. Für die Station Wiesbaden stellt das Modell REMO die tatsächlich beobachtete Situation am besten dar.

3.3. Zukunftssimulationen 2071 - 2100

In diesem folgenden Kapitel wird dargestellt, wie die simulierten Daten der drei Klimamodelle WETTREG, CCLM und REMO die Anzahl der Sommertage und im späteren Verlauf die Anzahl der Belastungstage für den Validierungszeitraum 2071-2100 wiedergeben.

3.3.1. Darstellung der Anzahl der Sommertage 2071-2100

Die folgenden Abbildungen 18-20 zeigen die Anzahl der Sommertage für die Klimamodelle WETTREG, CCLM und REMO für den Szenario-Zeitraum 2071-2100.

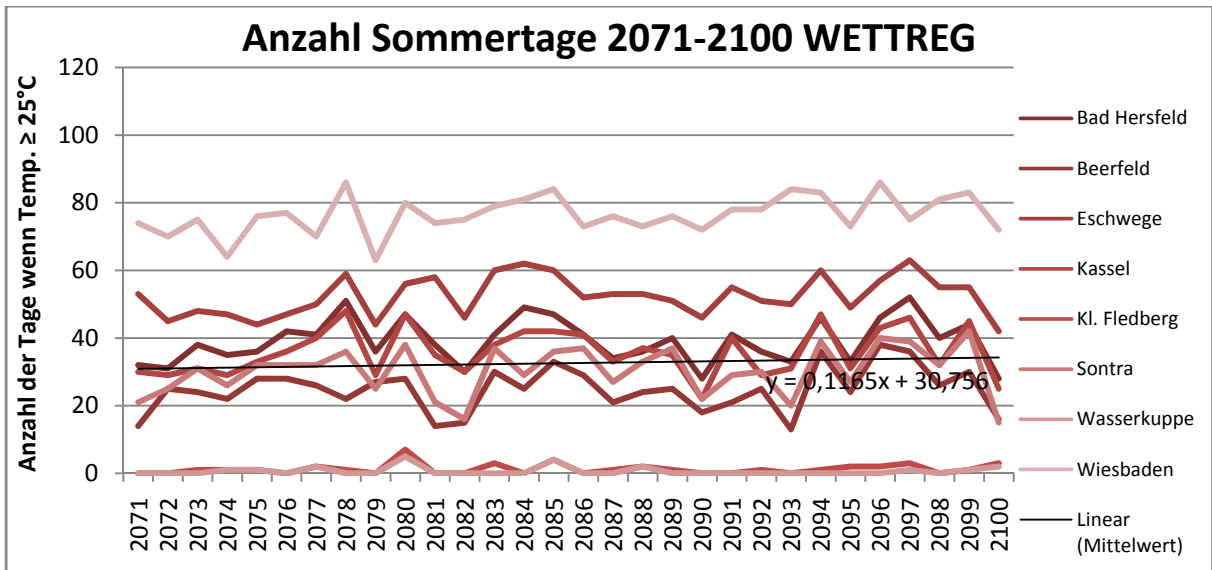


Abbildung 18: Anzahl der Sommertage des Klimamodells WETTREG für Hessen im Zeitraum 2071-2100

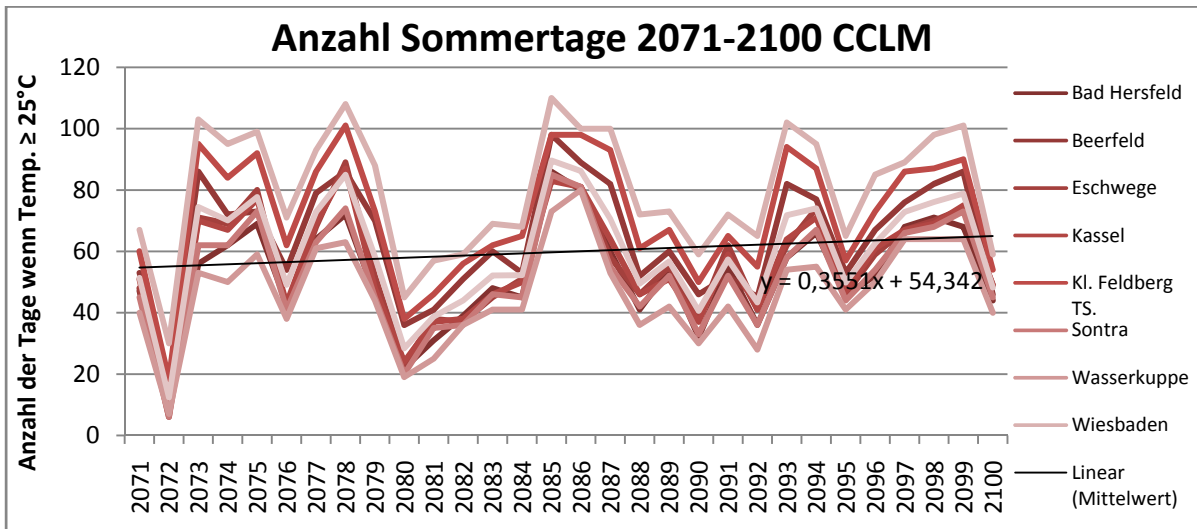


Abbildung 19: Anzahl der Sommertage des Klimamodells CCLM für Hessen im Zeitraum 2071-2100

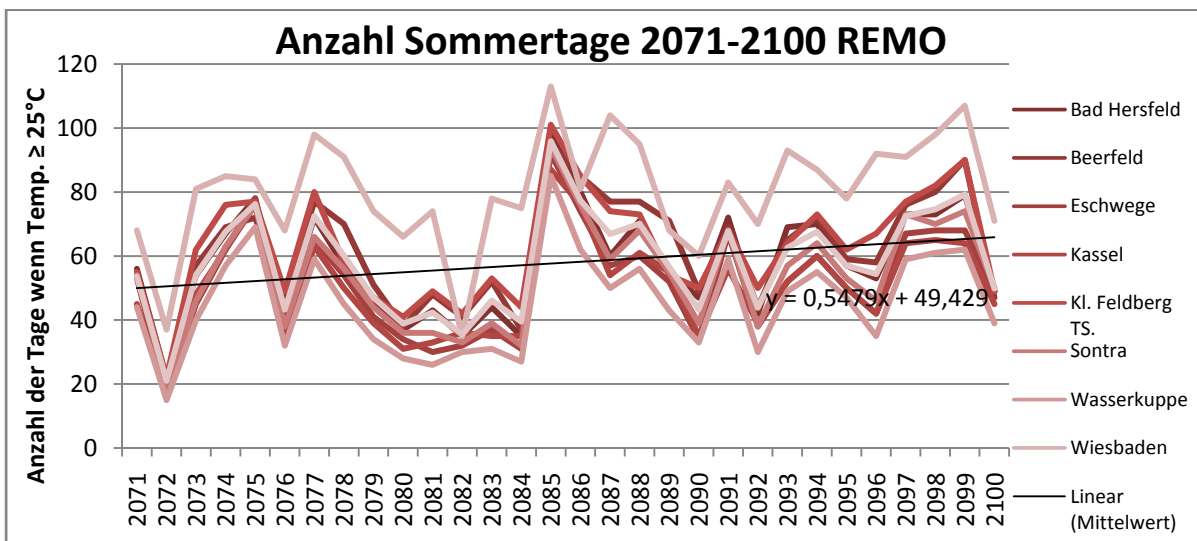


Abbildung 20: Anzahl der Sommertage des Klimamodells REMO für Hessen im Zeitraum 2071-2100

Die simulierten Stationswerte des Modells WETTREG (Abb. 18) weisen im Vergleich zu den im Kapitel 3.1.1. (Abb. 7) betrachteten historischen Darstellungen des Modells eine viel größere Bandbreite auf. Die simulierten Werte liegen nun in einem Bereich mit einer Anzahl von 0- 80 Sommertagen und überschreiten des Öfteren sogar diese Anzahl von 80 Sommertagen. In der Simulation des Validierungszeitraumes 1971-2000 überschritten die Werte nicht einmal eine Anzahl von 60 Tagen mit Temperaturen $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, die Simulationsergebnisse des Modells WETTREG lagen in einem Bereich mit einer Anzahl von 0-60 Sommertagen. In diesem Zeitraum zeigen die simulierten Werte der meisten Station eine Anzahl von 20 bis 60 Sommertagen, was eine Steigerung im Vergleich zu den Simulationsergebnissen des Modells WETTREG für den Validierungszeitraum 1971 – 2000 (Abb. 7) erkennen lässt. Für den betrachteten Szenario-Zeitraum simuliert WETTREG eine mittlere Anzahl von 32,5 Sommertagen. Diese ist im Vergleich zu der im historischen Zeitraum simulierten mittleren Anzahl von 8,57 Sommertagen eine deutliche Steigerung.

In dem dynamischen Modell CCLM (Abb. 19) werden die Werte für den Zeitraum 2071-2100 in einem Bereich mit Anzahlen von 10 bis 100 Sommertagen mit einer geringen Bandbreite simuliert. Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen des Validierungszeitraumes 1971-2000 (Abb. 8), die in einem Bereich mit Anzahlen von 0- 60 Sommertagen auftraten, zeigen diese Daten eine deutliche Steigerung der Anzahl der Tage mit Temperaturen $\geq 25^{\circ}\text{C}$ auf.

Die Station Wiesbaden weist, wie in der Simulation des Validierungszeitraumes, die höchste Anzahl an Sommertagen mit Maximalwerten von über 100 Sommertagen auf. Außerdem wird durch den Vergleich der mittleren Anzahl der Sommertage zwischen den Simulationsergebnissen des Validierungszeitraumes 1971-2000 (Abb. 8) und des Szenario-Zeitraums 2071-2100 (Abb. 21) eine Steigerung der Anzahl an Sommertagen erkennbar. Die mittlere Anzahl der Sommertage des Validierungszeitraumes beträgt 30,2 Sommertage und die des Zeitraums 2071-2100 59,84 Sommertage. Das Modell CCLM zeigt also durch den Vergleich der mittleren Anzahl Tage mit Temperaturen $\geq 25^{\circ}\text{C}$ eine Verdopplung dieser in 100 Jahren.

Das Klimamodell REMO (Abb. 20) simuliert für den Szenario-Zeitraum 2071-2100 eine Anzahl von 20- 100 Sommertagen pro Jahr, mit einer geringen räumlichen Variabilität zwischen den einzelnen Stationen. Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen des Validierungszeitraumes (Abb. 9) in dem die Werte einen Bereich von 0- 60 Sommertagen pro Jahr abdeckten, ist ein deutlicher Anstieg der Anzahl der Tage mit Temperaturen $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu erkennen. Die Station Wiesbaden setzt sich mit ihrem Verlauf von den anderen Stationen ab. Doch durch einen Vergleich mit den historischen Simulationsergebnissen der Station (Abb. 9) zeigt sich, dass diese auch in dem Vergangenheitszeitraum schon einen gewissen Unterschied zu den anderen Stationen aufwies.

Für den betrachteten Szenario-Zeitraum simuliert das Klimamodell REMO eine mittlere Anzahl von 57,9 Sommertagen pro Jahr. Dies verdeutlicht im Vergleich zu der im Validierungszeitraum simulierten Anzahl von 25,2 Sommertagen einen Anstieg der Sommertage.

Die Simulationsergebnisse der drei Klimamodelle für den Szenario-Zeitraum 2071-2100 zeigen alle, im Vergleich mit den Simulationsergebnissen für den Validierungszeitraum 1971-2000 (Abb. 7-9), einen Anstieg der Anzahl der Sommertage an.

Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse des Klimamodells WETTREG ist jedoch zu beachten, dass das Modell für den Vergleichszeitraum 1971-2000 eher zu wenige Sommertage simulierte. Es ist daher zu vermuten, dass dieses Modell die Veränderungen eher unter- als überschätzt.

Für die beiden dynamischen Modelle CCLM und REMO gilt dasselbe. Beide Modelle simulierten für den Vergleichszeitraum zu viele Sommertage. Daher kann vermutet werden, dass diese Modelle die Veränderungen eher überschätzen.

Doch auch für diesen Szenario Zeitraum 2071-2100 stellen die Stationen Wiesbaden, mit der höchsten Anzahl an Sommertagen und die Station Wasserkuppe, mit der niedrigsten Anzahl an Sommertagen, die Ober- und Untergrenze für alle drei Klimamodelle dar. Daher wird im folgenden Kapitel 3.3.2. mithilfe des Hitze Indexes für diese beiden Stationen durch die Simulationsergebnisse der drei Klimamodelle für den Szenario Zeitraum 2071-2100 die Entwicklung der körperlichen Belastung untersucht.

3.3.2. Darstellung der Anzahl der Belastungstage 2071-2100

In den folgenden Abbildungen 21-26 werden die Entwicklungen der Belastungstage der Station Wiesbaden und Wasserkuppe durch die drei Klimamodelle WETTREG, CCLM und REMO für den Szenario-Zeitraum 2071-2100 dargestellt.

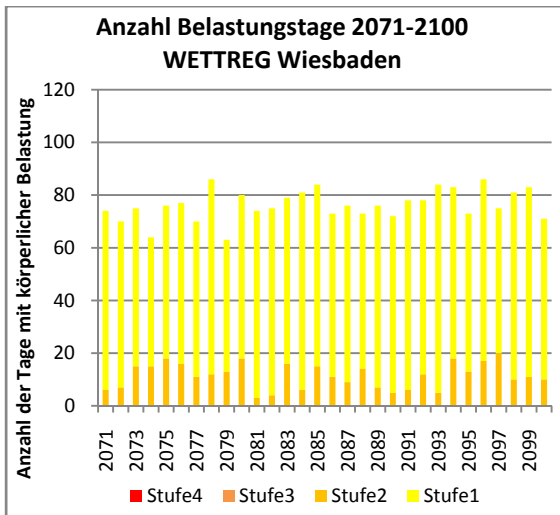


Abbildung 21: Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das Klimamodell WETTREG im Zeitraum von 2071-2100

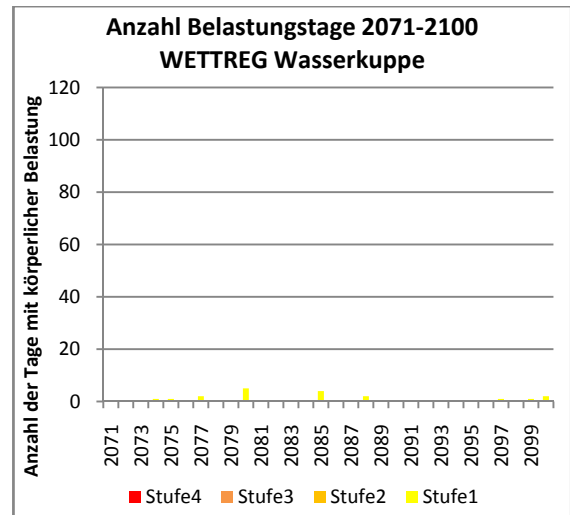


Abbildung 24: Entwicklung der Belastungstage der Station Wasserkuppe durch das Klimamodell WETTREG im Zeitraum von 2071-2100

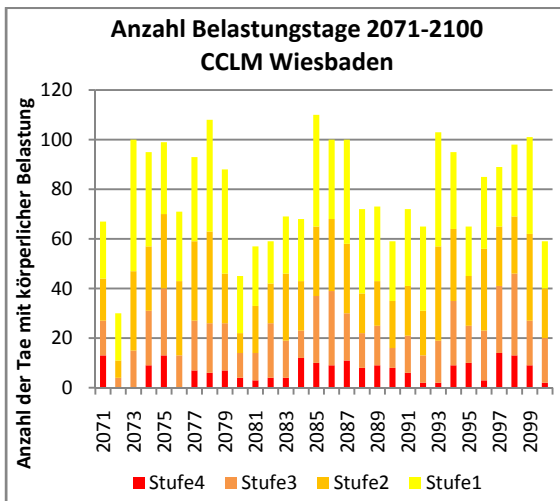


Abbildung 22: Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das Klimamodell CCLM im Zeitraum von 2071-2100

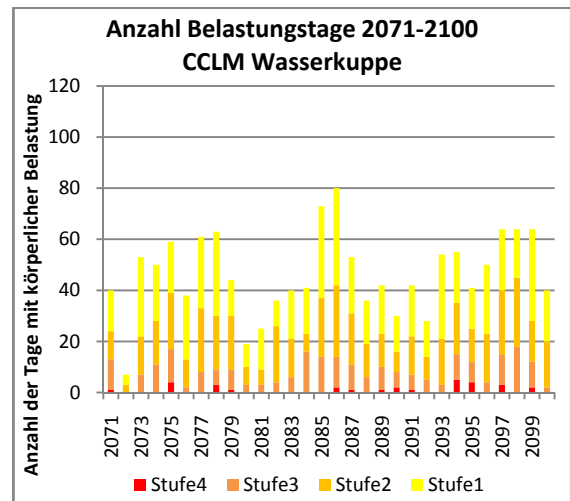


Abbildung 25: Entwicklung der Belastungstage der Station Wasserkuppe durch das Klimamodell CCLM im Zeitraum von 2071-2100

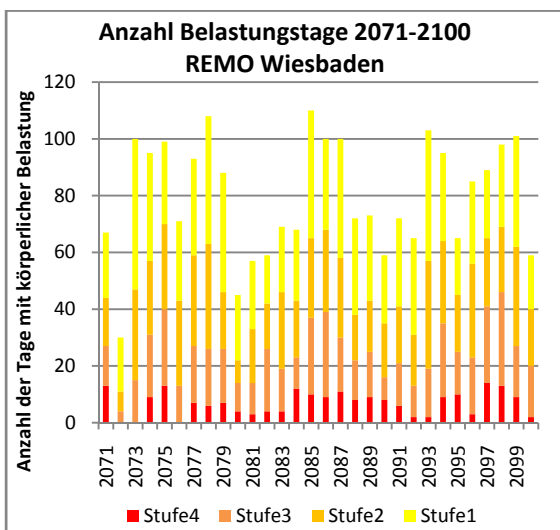


Abbildung 23: Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das Klimamodell REMO im Zeitraum von 2071-2100

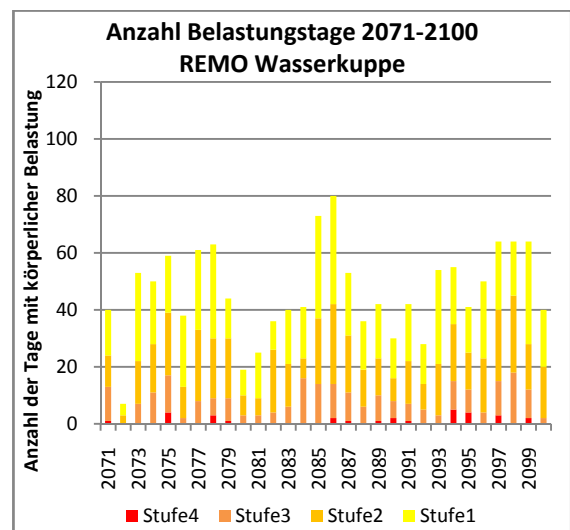


Abbildung 26: Entwicklung der Belastungstage der Station Wasserkuppe durch das Klimamodell REMO im Zeitraum von 2071-2100

Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen im Validierungszeitraum 1971-2000 (Abb. 12) ist eine deutliche Steigerung der Belastungstage an der Station Wiesbaden durch das Modell WETTREG (Abb. 21) erkennbar. Lagen die Anzahlen der Belastungstage für den Validierungszeitraum in einem Bereich von 20 bis 40 Belastungstagen, so überschreiten in diesem Szenario-Zeitraum die Werte alle eine Anzahl von 60 Belastungstagen pro Jahr. In mehreren Jahren treten sogar über 80 Belastungstage auf.

Die Belastungsstufen 3 und 4 treten in den Simulationen mit dem Modell WETTREG in diesem Zeitraum 2071-2100 nicht auf. Überwiegend werden Tage mit der Belastungsstufe 1 simuliert. Die Tage, die die zweite Stufe aufweisen, überschreiten eine Anzahl von 20 Belastungstagen pro Jahr nicht. Auch in der Simulation für den Validierungszeitraum mit diesem Modell traten nur die ersten beiden Belastungsstufen auf, jedoch die Stufe 2 in einer viel geringeren Anzahl und nicht in allen Jahren.

Für die Station Wasserkuppe simuliert das Modell WETTREG (Abb. 24) in geringer Anzahl Belastungstage mit der Belastungsstufe 1, bei der mit Erschöpfungserscheinungen und mit Müdigkeit zu rechnen ist. Die anderen drei Belastungsstufen treten in dieser Simulation an der Station Wasserkuppe nicht auf. Dieses Modell simuliert also nur eine geringe Belastung durch Hitzestress an der Station Wasserkuppe. Auch zeigt diese Abbildung 24 im Vergleich mit den Simulationsergebnissen für den Validierungszeitraum 1971 - 2000 eine Steigerung der Belastungstage. In dem Validierungszeitraum 1971-2000 simulierte WETTREG keinen einzigen Belastungstag, im Szenario- Zeitraum 2071 – 2100 treten jedoch ein paar Belastungstage auf.

Für diesen Zeitraum simuliert das Modell CCLM (Abb. 22) alle 4 Belastungsstufen für die Station Wiesbaden. Es können Belastungen, wie Erschöpfungserscheinungen und Müdigkeit auftreten, oder es können Gefahren wie Hitzeschlag oder Sonnenstich vorkommen. Der Vergleich mit den Simulationsergebnissen des Validierungszeitraumes 1971-2000 (Abb. 13) zeigt, dass die Anzahl der Tage der Belastungsstufen 3 und 4 angestiegen sind. Die Belastungsstufe 4 tritt nun häufiger mit einer höheren Anzahl an Tagen auf.

Außerdem lässt ein Vergleich mit den Simulationsergebnissen im Validierungszeitraum 1971-2000 eine Steigerung der Gesamtanzahl der Belastungstage erkennen. Lagen die Werte der Anzahl der Belastungstage im Validierungszeitraum in einem Bereich von 20-60 Belastungstagen, so überschreiten im Zeitraum 2071 – 2100 die meisten Werte eine Anzahl von 40 Belastungstagen. Mehrere Jahre weisen sogar eine Anzahl von über 100 Belastungstagen auf.

Die Abbildung 25 zeigt im Vergleich zu den historischen Daten (Abb. 14) einen deutlichen Anstieg der Gesamtanzahl der Belastungstage. In der Vergangenheitssimulation überschritten die Werte eine Anzahl von 40 Belastungstagen nur ein einziges mal. Jedoch im Szenario-Zeitraum erreichen die

meisten Jahre eine Anzahl von 40 Belastungstagen und mehrere überschreiten sogar eine Gesamtanzahl von 60 Belastungstagen.

Für diesen Zeitraum simuliert das Modell CCLM alle vier Belastungsstufen. Die Belastungsstufen 2 und 3 weisen im Vergleich mit den historischen Daten (Abb. 14) eine höhere Anzahl an Belastungstagen auf. Außerdem wird im Szenario-Zeitraum die Stufe 4 mit einer geringen Anzahl an Belastungstagen simuliert, die in der Simulation für den Validierungszeitraum gar nicht auftritt.

Im Vergleich mit den Simulationsergebnissen des Zeitraumes 1971-2000 (Abb. 15) ist ein Anstieg der Gesamtanzahl der Belastungstage durch das Modell REMO (Abb. 23) für die Station Wiesbaden auszumachen. Die Werte im Validierungszeitraum lagen in einem Bereich von 20- 60 Belastungstagen pro Jahr. Die simulierten Werte für den Szenario-Zeitraum überschreiten alle eine Anzahl von 20 Belastungstagen pro Jahr, die meisten selbst eine Anzahl von 60 Belastungstagen pro Jahr. Mehrere Jahre weisen sogar eine Anzahl von über 100 Belastungstagen auf.

Für die Station Wiesbaden simuliert das Modell REMO für den Szenario-Zeitraum 2071-2100 alle 4 Belastungsstufen. Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen für den Zeitraum 1971 – 2000 (Abb. 15) wird die Anzahl der Belastungstage mit der Belastungsstufe 4 höher wiedergegeben. Auch die Belastungsstufe 3 tritt im Szenario-Zeitraum häufiger auf.

Die Anzahl der Belastungstage und Belastungsstufen sind im Vergleich zu den Simulationen für den Validierungszeitraum deutlich angestiegen.

Für die Station Wasserkuppe simuliert das Modell REMO (Abb. 26) für diesen Zeitraum alle vier Belastungsstufen. Im Vergleich mit den Simulationsergebnissen für den Validierungszeitraum 1971 – 2000 (Abb. 16) ist ein deutlicher Anstieg der Belastung festzustellen. Die Belastungstage mit einer Belastungsstufe 2, die in der Simulation für den Vergangenheitszeitraum nur in geringer Anzahl vorkamen, weisen einen deutlichen Anstieg auf. Auch treten in der Simulation für den Zeitraum 2071 – 2100 die Belastungsstufen 3 und 4 auf.

Außerdem zeigt ein Vergleich mit dem Validierungszeitraum 1971-2000 einen Anstieg der Gesamtanzahl der Belastungstage an der Station Wasserkuppe. Überschritten die simulierten Werte für den Zeitraum 1971 – 2000 meistens nicht einmal eine Anzahl von 20 Belastungstagen pro Jahr, so überschreiten im Szenario-Zeitraum mehrere Jahre eine Anzahl von 60 Belastungstagen. In einem Jahr wird sogar eine Anzahl von fast 80 Belastungstagen erreicht.

4. Diskussion

In der folgenden Abbildung 27 wird der Trend der Belastungstage pro Jahr für die Station Wiesbaden für die Beobachtungen im Zeitraum 1971-2000 und die Klimamodelle WETTREG, CCLM und REMO für den Validierungszeitraum 1971-2000 und den Szenario-Zeitraum 2071-2100 gezeigt.

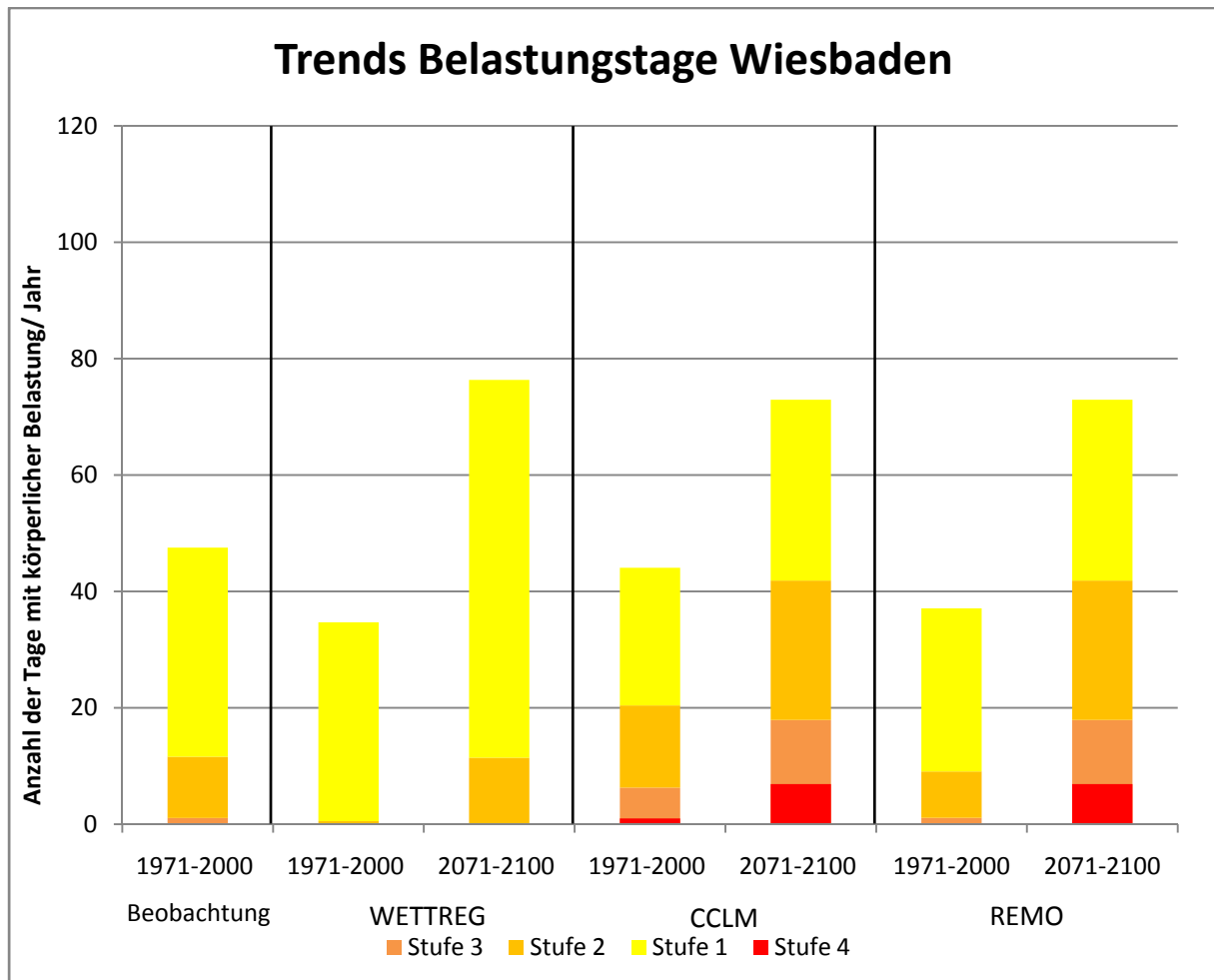


Abbildung 27: Anzahl Belastungstage pro Jahr: Beobachtungsdaten (1971-2000) und simulierte Daten (1971-2000 und 2071-2100), Station Wiesbaden

Diese Abbildung zeigt noch einmal, wie im vorangegangenen Kapitel 3.2.5. (Abb. 17) festgestellt, dass das statistische Modell WETTREG im Vergleich zu den Beobachtungen, sowohl die Anzahl, als auch die Stärke der Belastungstage im Validierungszeitraum deutlich unterschätzt. Die dynamischen Modelle CCLM und REMO unterschätzen ebenfalls die Anzahl der Belastungstage, das Modell CCLM überschätzt aber die Stärke der Belastung (Belastungsindex). Des Weiteren lässt sich aus dieser Darstellung der Trend der Anzahl der Belastungstage für die drei Klimamodelle ablesen. Alle drei Modelle weisen einen deutlichen Anstieg der Anzahl der Belastungstage für den Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zu den Simulationsergebnissen für den Validierungszeitraum der entsprechenden Modelle auf. Die Gesamtanzahl liegt im Szenario-Zeitraum in allen drei Modellen in einem

Bereich zwischen 70 und 80 Belastungstagen pro Jahr. Der prozentuale Anstieg ist dabei im Modell WETTREG größer als in den anderen beiden Modellen, denn die simulierte Anzahl von Belastungstagen im Validierungszeitraum ist in WETTREG geringer als in den beiden dynamischen Modellen. Auch in der Einteilung der Belastungsstufen unterscheiden sich die beiden dynamischen Modelle CCLM und REMO von dem statistischen Modell WETTREG. Alle drei Modelle simulieren einen Anstieg der Tage mit höheren Belastungsstufen im Vergleich mit den jeweiligen Simulationen für den Validierungszeitraum. Jedoch treten im Klimamodell WETTREG für den Szenario-Zeitraum 2071-2100 nur die ersten beiden Belastungsstufen auf während die beiden dynamischen Modelle für diesen Zeitraum alle vier Belastungsstufen simulieren. Bei der Auswertung dieser Ergebnisse sollte jedoch berücksichtigt werden, dass das Modell WETTREG im Validierungszeitraum die Belastungsstufen unterschätzt, und das Modell CCLM die Belastungsstufen im Validierungszeitraum überschätzt.

Die folgende Abbildung 28 zeigt den Trend der Belastungstage pro Jahr für die Station Wasserkuppe, für die Beobachtungen im Zeitraum 1971-2000 und die Klimamodelle WETTREG, CCLM und REMO für den Validierungszeitraum 1971-2000 und den Szenario-Zeitraum 2071-2100.

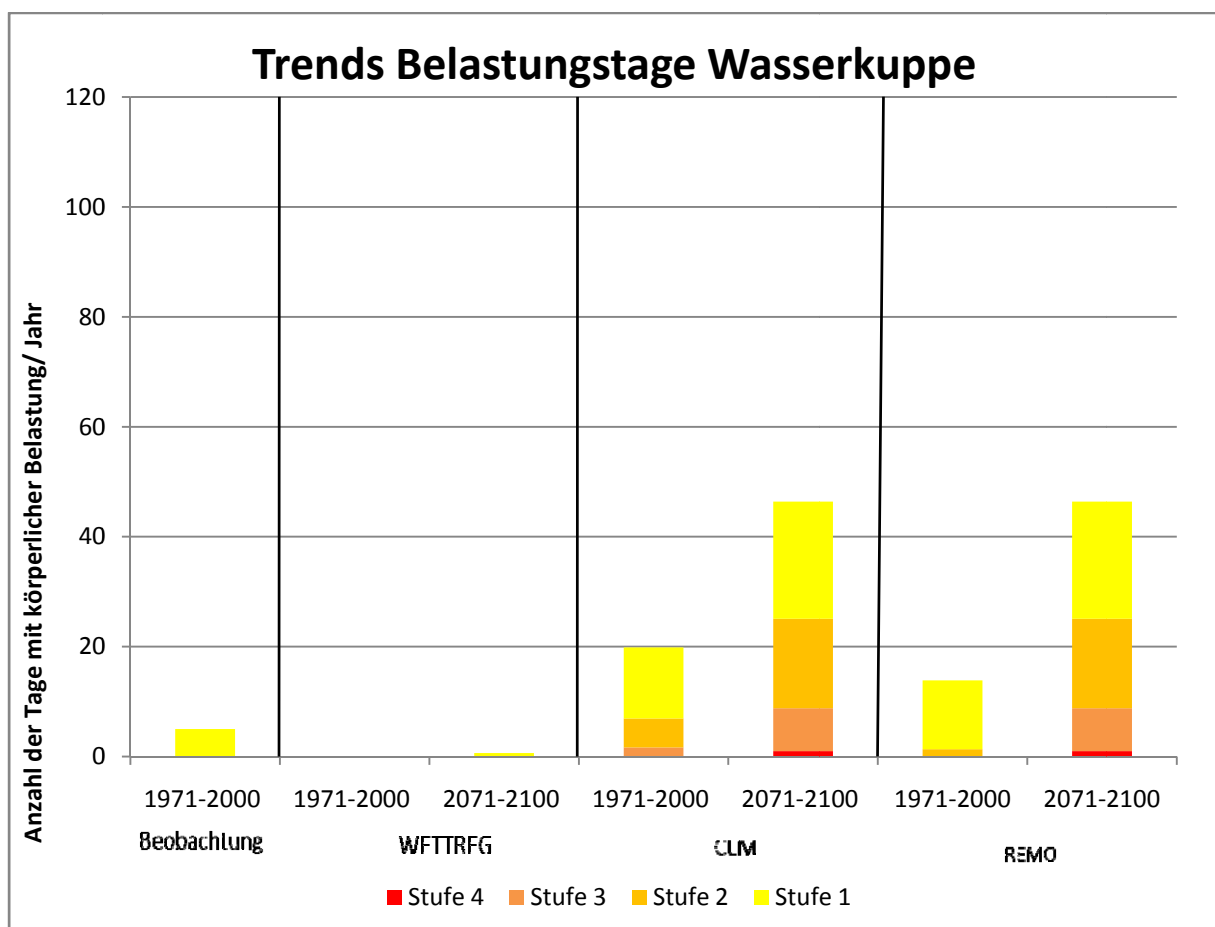


Abbildung 28: Anzahl Belastungstage pro Jahr: Beobachtungsdaten (1971-2000) und simulierte Daten (1971-2000 und 2071-2100), Station Wasserkuppe

Diese Abbildung zeigt für die Station Wasserkuppe noch einmal, wie im vorangegangenen Kapitel 3.2.5. (Abb. 17) festgestellt, dass das statistische Modell WETTREG im Vergleich zu den Beobachtungen die Anzahl der Belastungstage deutlich unterschätzt. Die dynamischen Modelle CCLM und REMO hingegen überschätzen die gemessenen Werte eindeutig, sowohl in der Anzahl der Belastungstage als auch in der Stärke der simulierten Belastungsindices. Des Weiteren lässt sich in dieser Darstellung der Trend der Anzahl der Belastungstage für die drei Klimamodelle ablesen. Alle drei Klimamodelle weisen einen Anstieg der Belastungstage an der Station Wasserkuppe auf. Das Modell WETTREG simuliert im Szenario-Zeitraum 2071 – 2100 nur eine Anzahl von ein bis zwei Tagen mit der Belastungsstufe 1. Die dynamischen Modelle simulieren im Szenario-Zeitraum alle vier Belastungsstufen und die Anzahl der Belastungstage liegt in einem Bereich von über 40 Tagen.

Jedoch stellen alle drei Modelle die historische Situation an dieser Station sehr schlecht dar. Eine Bewertung der Simulationsergebnisse für den Szenario-Zeitraum 2071 – 2100 sollte daher nur qualitativ erfolgen.

Aus diesen beiden Abbildungen folgt also, dass nicht eindeutig bestimmt werden kann, welche Projektion die wahrscheinlichste Einschätzung gibt.

Für die Station Wiesbaden trifft das REMO-Verfahren die beobachteten Werte am besten, jedoch für die Station Wasserkuppe überschreitet dieses Modell die beobachteten Werte deutlich. Keines der drei Klimamodelle kann also alleine betrachtet werden. Daher sollten aus der Gesamtheit aller Modellergebnisse Schlüsse für die Zukunft gezogen werden.

Eine Möglichkeit, warum die beiden dynamischen Modelle, sowohl die Anzahl der Sommertage, als auch die Belastungsstufen überschätzen, könnte die Bildung des Mittelwertes aus vier Gitterpunkten, die die zu betrachtende Station umschließen sein. Ein Gitterpunkt bei REMO weist eine Maschenweite von 10 km x 10 km auf und bei dem Modell CCLM ist die Gittermaschenweite noch größer (12 km x 18,5 km). Die Station Wasserkuppe liegt sehr hoch und müsste eigentlich viel geringere Belastungswerte aufweisen, jedoch wird in die Berechnung der Mittelung eine größere Umgebung miteinbezogen. Dadurch kann ein größerer Fehler entstehen. Doch auch durch eine Betrachtung von nur einem Gitterpunkt könnte die Spitze der Wasserkuppe nicht wiedergegeben werden, denn auch hier würde eine Mittelung stattfinden, da eine Gittermasche je nach Modell mindestens 10 km x 10 km groß ist. Jedoch sind die dynamischen Modelle im Vergleich zu den statistischen die genaueren Klimaprojektionen, da sie für den zu betrachteten Bereich den kompletten physikalischen Zustand der Atmosphäre simulieren. Die Annahme für das WETTREG-Verfahren, dass die zehn am häufigsten in der Vergangenheit beobachteten Wetterlagen auch in der Zukunft die gleichen sind, ist nicht automatisch gesichert. Beide Verfahren (statistische und dynamische Regionalisierung) haben ihre Vor- und Nachteile. Es ist daher sinnvoll, alle Modellergebnisse zu betrachten und daraus Schlüsse für die Zukunft zu ziehen.

Doch beweisen die durchgeführten Untersuchungen unter Verwendung des Hitze Indexes, dass die Temperaturen sich in allen drei Klimamodellen erhöhen werden und somit die Tage mit einer körperlichen Belastung für den Menschen zunehmen. Der Hitze Index ist eine leicht nutzbare Größe, die der Öffentlichkeit die Belastungen des Temperaturanstieges in Bezug auf den Menschen und die gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels verdeutlichen kann.

5. Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Eignung des Hitze Indexes als Belastungsindikator untersucht. Mit diesem Index kann der Öffentlichkeit die Entwicklung des Klimawandels und die daraus entstehenden gesundheitlichen Auswirkungen verdeutlicht werden. Alle Simulationsergebnisse der drei Klimamodelle (WETTREG, CCLM und REMO) zeigten einen Anstieg der Anzahl der Belastungstage an. Jedoch wurde die Auswertung der Anzahl der Belastungstage nur für zwei Klimastationen in Hessen durchgeführt: Für die Klimastation Wiesbaden, mit der höchsten Anzahl an Sommertagen und für die Station Wasserkuppe, mit der niedrigsten Anzahl.

In den folgenden Schritten sollte an weiteren Klimastationen der Hitze Index errechnet werden und eine genauere Betrachtung der Anzahl aufeinander folgender Sommertage angestellt werden. Denn je größer die Anzahl aufeinander folgender Tage mit Temperaturen $\geq 25^{\circ}\text{C}$ ist, desto höher ist die körperliche Belastung.

Außerdem kann, durch eine nach Monaten differenzierte Betrachtung der Sommertage bestimmt werden, in welchen Monaten eine Häufung auftritt. Bleiben die Mehrzahl der Tage mit Temperaturen $\geq 25^{\circ}\text{C}$ in den Sommermonaten Juni, Juli und August oder rücken diese weiter in die Herbst- oder Frühjahrsmonate?

6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Zeitraumangabe der vorhandenen Daten der Klimastationen in Hessen ...	13
Abbildung 2:	Entwicklung der Anzahl der Tage mit Temperaturen $\geq 25^{\circ}\text{C}$ der Klimastationen in Hessen	14
Abbildung 3:	Entwicklung der Anzahl der Sommertage acht ausgewählter Klimastationen in Hessen	16
Abbildung 4:	Positionskarte der ausgewählten Klimastationen in Hessen	17
Abbildung 5:	Positionskarte der Gitterpunkte CCLM in Hessen	19
Abbildung 6:	Positionskarte der Gitterpunkte REMO in Hessen	19
Abbildung 7:	Anzahl der Sommertage des Klimamodells WETTREG für Hessen im Zeitraum 1971-2000	21
Abbildung 8:	Anzahl der Sommertage des Klimamodells CCLM für Hessen im Zeitraum 1971-2000	23
Abbildung 9:	Anzahl der Sommertage des Klimamodells REMO für Hessen im Zeitraum 1971-2000	25
Abbildung 10:	Entwicklung der Belastungstage der Klimastation Wiesbaden im Zeitraum 1971-2000	27
Abbildung 11:	Entwicklung der Belastungstage der Klimastation Wasserkuppe im Zeitraum 1971-2000	28
Abbildung 12:	Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das Klimamodell WETTREG im Zeitraum 1971-2000	30
Abbildung 13:	Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das Klimamodell CCLM im Zeitraum von 1971-2000	31
Abbildung 14:	Entwicklung der Belastungstage der Station Wasserkuppe durch das Klimamodell CCLM im Zeitraum von 1971-2000	32
Abbildung 15:	Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das Klimamodell REMO im Zeitraum von 1971-2000	33
Abbildung 16:	Entwicklung der Belastungstage der Station Wasserkuppe durch das Klimamodell REMO im Zeitraum von 1971-2000	34
Abbildung 17:	Anzahl Belastungstage pro Jahr: Beobachtungsdaten und simulierte Daten (1971-2000), Stationen Wiesbaden (WI) und Wasserkuppe (WA) ..	35
Abbildung 18:	Anzahl der Sommertage des Klimamodells WETTREG für Hessen im Zeitraum 2071-2100	37
Abbildung 19:	Anzahl der Sommertage des Klimamodells CCLM für Hessen im Zeitraum 2071-2100	37
Abbildung 20:	Anzahl der Sommertage des Klimamodells REMO für Hessen im Zeitraum 2071-2100	37
Abbildung 21:	Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das Klimamodell WETTREG im Zeitraum von 2071-2100	40
Abbildung 22:	Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das Klimamodell CCLM im Zeitraum von 2071-2100	40
Abbildung 23:	Entwicklung der Belastungstage der Station Wiesbaden durch das Klimamodell REMO im Zeitraum von 2071-2100	40
Abbildung 24:	Entwicklung der Belastungstage der Station Wasserkuppe durch das Klimamodell WETTREG im Zeitraum von 2071-2100	40
Abbildung 25:	Entwicklung der Belastungstage der Station Wasserkuppe durch das Klimamodell CCLM im Zeitraum von 2071-2100	40

Abbildung 26:	Entwicklung der Belastungstage der Station Wasserkuppe durch das Klimamodell REMO im Zeitraum von 2071-2100	40
Abbildung 27:	Anzahl Belastungstage pro Jahr: Beobachtungsdaten (1971-2000) und simulierte Daten (1971-2000 und 2071-2100), Station Wiesbaden.....	43
Abbildung 28:	Anzahl Belastungstage pro Jahr: Beobachtungsdaten (1971-2000) und simulierte Daten (1971-2000 und 2071-2100), Station Wasserkuppe.....	44

7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zuordnung der thermischen Empfindung und der Belastungsstufen zum PMV-Wert.....	8
Tabelle 2:	Zusammenhang zwischen PMV und PPD	8
Tabelle 3:	Thermische Empfinden und Belastungsstufen für die gefühlte Temperatur (GT) des Klima-Michel-Modells.....	9
Tabelle 4:	Klassifizierung des Hitze Indexes nach National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).....	10
Tabelle 5:	Lage (m ü. NN) der ausgewählten Klimastationen in Hessen.....	17
Tabelle 6:	Zuordnung der CCLM Gitterpunkte zu entsprechenden Stationen	19
Tabelle 7:	Zuordnung der REMO Gitterpunkte zu entsprechenden Stationen	19

8. Literaturverzeichnis

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). (2007). *Die Hightech-Strategie zum Klimaschutz*. Bonn-Berlin: Schotz & Friends Agend.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). (2007). *Klimazwei-Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen*. Bonn- Berlin: Iser und Schmidt GmbH, Bad Honnef-Berlin.

Deutscher Wetterdienst. (2001). *Klimastatusbericht 2001*. Deutscher Wetterdienst.

DIN ISO 7730. (2005). *Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*.

DWD. (1996-2009). *Deutscher Wetterdienst*. Abgerufen am 28. September 2009 von http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_bio&T12201837091139819649992gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FWetter__Warnungen%2FBiowetter%2FGef__Temp%2Fgrundlagen__node.html__nnn%3Dtrue

Fanger. (1972). *Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering*. New York: McGraw-Hill.

Gagge, A. (1986). *A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment*. L.G. Berglund: A.P. Fobelets.

Herbig, A., & Kerschegens, M. (1999). *Stadtklima und Luftreinhaltung*. Springer-Verlag.

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. (2009). *Umweltatlas Hessen*. Abgerufen am 4. November 2009 von <http://atlas.umwelt.hessen.de/atlas/index-ie.html>

Hupfer, P., Kuttler, W., Chmielewki, F.-M., & Pethe, H. (2006). *Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie*. Vieweg + Teubner Verlag.

Mäder, C. (2009). *KLIMAÄNDERUNG, Wichtige Erkenntnisse aus dem 4. Sachstandbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen der Vereinten Nationen (IPCC)*. Berlin-Brandenburg: Umweltbundesamt.

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2009). *NOAA Magazine Online*. Abgerufen am 27. 12 2009 von <http://www.magazine.noaa.gov/stories/mag208.htm>

Neyer, D. (Juni 2007). *TIM- Technologie- und Innovations- Management*. Abgerufen am 18. September 2009 von <http://www.tim.at/>: http://www.tim.at/files/Praesentation_Neyer.pdf

Schuh, A. (2007). *Biowetter, Wie das Wetter unsere Gesundheit beeinflusst*. München: C.H.Beck oHG.

Städtebauliche Klimafibel online. (2009). Abgerufen am 6. August 2009

Statistisches Bundesamt Deutschland. (Mai 2005). *Statistisches Bundesamt Deutschland*. Abgerufen am 12. November 2009 von http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/2005/05/PD05__237__129,templateId=renderPrint.psml