



M. Quirnbach, E. Freistühler,
I. Papadakis

Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region

Analysen zu den Parametern

Lufttemperatur und Niederschlag

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region

Analysen zu den Parametern Lufttemperatur und Niederschlag

Markus Quirnbach, Elke Freistühler, Ioannis Papadakis

dr. papadakis GmbH, Hattingen

www.drpapadakis.de

dynaklim-Publikation Nr. 30, November 2012



Abstract

Im Rahmen der Projektarbeit der dr. papadakis GmbH wurden umfangreiche Analysen und Trendberechnungen zu den beiden Parametern Lufttemperatur und Niederschlag in der Emscher-Lippe-Region (ELR) durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse werden in dieser Publikation zusammengefasst. Dabei werden die beiden Parameter hinsichtlich unterschiedlichster Kennwerte und Bilanzierungszeiträume ausgewertet. In der Vergangenheit wird anhand von Messdaten untersucht, welche Veränderungen bereits festzustellen sind, und anhand von Zeitreihen des Regionalen Klimamodells CLM werden mögliche zukünftige Veränderungen abgeschätzt. Für ausgewählte Kenngrößen werden die Entwicklungen in den CLM-Daten der Bandbreite an Entwicklungen eines begrenzten Ensembles aus sieben Modellrechnungen gegenübergestellt. Darüber hinaus werden anhand einzelner Kenngrößen die Entwicklungen in der ELR gegenüber den überregional festzustellenden Entwicklungen eingeordnet.

Schlagworte (im *dynaklim*-Wiki)

CLM, Emscher-Lippe-Region, Klimawandel, Lufttemperatur, Niederschlag, Regionales Klimamodell

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Datenbasis	2
3 Parameter Lufttemperatur	5
3.1 Entwicklung der mittleren Jahreslufttemperatur.....	5
3.2 Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in den einzelnen Jahreszeiten	9
3.3 Entwicklung von Kenntagen	11
3.3.1 Entwicklung der Kenntage in den Messdaten.....	11
3.3.2 Entwicklung der Kenntage in den Modelldaten	13
3.4 Entwicklung von Hitzeperioden.....	17
3.4.1 Kriterien zur Beschreibung von Hitzeperioden	17
3.4.2 Zukünftige Entwicklung der Hitzeperioden in den Modelldaten	18
4 Parameter Niederschlag	21
4.1 Entwicklung der Hauptwerte (Jahres- und Monatssummen)	21
4.2 Entwicklung von Tagessummen und Starkregen kurzer Dauerstufen	24
4.2.1 Entwicklung der Auftretenshäufigkeit von Starkregen auf Basis der partiellen Niederschlagsserien	25
4.2.2 Entwicklung der Niederschlagshöhen von Starkregen auf Basis der jährlichen Niederschlagsserien	26
4.2.3 Schwellenwertbetrachtungen von Tagesniederschlagssummen.....	28
4.2.4 Einfluss möglicher Änderungen von Starkregen aufgrund ihrer Auftretenshäufigkeit und ihrer Niederschlagshöhen auf die Niederschlagsstatistik	31
4.3 Entwicklung von Trockentagen und Trockenperioden.....	34
4.3.1 Entwicklung von Trockentagen	34
4.3.2 Entwicklung von Trockenperioden.....	35
4.3.3 Entwicklung des Trockenheitsindex dMI.....	38
5 Zusammenfassung	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der untersuchten CLM-Rasterfelder (rote Umrandung) mit den Einzugsgebieten der Emscher (blau) und der Lippe (grün); die 14 Niederschlagsmessstationen sind rot markiert	3
Abbildung 2: Lage der untersuchten CLM-Rasterfelder (rote Umrandung) mit den Einzugsgebieten der Emscher (blau) und der Lippe (grün); rote Stationen: Tagesmitteltemperaturen 1961 – 2010 (primäre Datenbasis); gelbe Stationen: ergänzende Untersuchungen (zusätzlich zu roten Stationen) .	3
Abbildung 3: Mittlere Jahreslufttemperaturen aus Messdaten im Zeitraum 1961 – 2010 in der ELR ...	6
Abbildung 4: Entwicklung der mittleren Jahreslufttemperaturen im Vergleich zum Mittelwert des Referenzzeitraums 1961 – 1990 (a) global und (b) auf der nördlichen Welthalbkuugel (WMO, 2009) ...	6
Abbildung 5: Entwicklung der mittleren Jahreslufttemperaturen in Europa im Zeitraum 1976 – 2006; links: Jahresmitteltemperaturen, Mitte: Winterquartal, rechts: Sommerquartal (EEA, 2008)	7
Abbildung 6: Unterschiede der mittleren Jahreslufttemperaturen im Vergleich zum langjährigen Mittel im Zeitraum 1961 – 1990; links: Globales Ranking der Lufttemperaturen der wärmsten 50 Jahre (WMO, 2012); rechts: Rangfolge der Lufttemperaturen der letzten 50 Jahre in der ELR.....	7
Abbildung 7: Mittlere Jahreslufttemperaturen aus CLM-Modelldaten im Zeitraum 1961 – 2100 in der ELR; Mittelwerte CLM1 über 30 Jahre für Referenzzeitraum (1961 – 1990), Nahe Zukunft (2021 – 2050) und Ferne Zukunft (2071 – 2100).....	8
Abbildung 8: Änderungen der mittleren Jahreslufttemperaturen in der ELR im begrenzten Ensemble für die Nahe Zukunft (2021 – 2050) und für die Ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990).....	8
Abbildung 9: Rangfolge der Lufttemperaturen in den vier Jahreszeiten / Quartalen der letzten 50 Jahre in den Messdaten der ELR; links oben: Winter, rechts oben: Frühling, links unten: Sommer, rechts unten: Herbst	10
Abbildung 10: Vergleich der mittleren Lufttemperaturen in den vier Jahreszeiten / Quartalen im Regionalen Klimamodell CLM (links: CLM1, rechts: CLM2) für die ELR im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100).....	10
Abbildung 11: Vergleich der Sommertage (links oben), Heißen Tage (rechts oben), Frosttage (links unten) und Eistage (rechts unten) in den Messdaten der ELR für den Zeitraum 1951 – 2010.....	12
Abbildung 12: Vergleich der Kenntage im Regionalen Klimamodell CLM (links: CLM1, rechts: CLM2) für die ELR im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und Fernen Zukunft (2071 – 2100); ergänzend werden in Grün die Anzahl der Kenntage aus Messdaten (gemäß Tabelle 4) für den Referenzzeitraum mit angegeben	13
Abbildung 13: Jahre mit mindestens 10 Heißen Tagen pro Jahr in der ELR; oben: Messdaten im Zeitraum 1961 – 2010; unten: CLM1-Modelldaten im Zeitraum 1961 – 2010, in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100)	15
Abbildung 14: Entwicklung der Sommertage (links oben), Heißen Tage (rechts oben), Frosttage (links unten) und Eistage (rechts unten) in der ELR im begrenzten Ensemble für den Referenzzeitraum (1961 – 1990), die Nahe Zukunft (2021 – 2050) und die Ferne Zukunft (2071 – 2100).....	16
Abbildung 15: Mittlere, minimale und maximale Tagestemperaturen im Sommer 2003 (links) und im Sommer 2006 (rechts) an der Station Herten DWD.....	17
Abbildung 16: Monatsmitteltemperaturen der Sommermonate Juni, Juli und August und Anzahl der Heißen Tage pro Monat in den Messdaten der ELR im Zeitraum 1961 – 2010	18
Abbildung 17: Vergleich der Heißen Tage pro Monat in den Sommermonaten Juni, Juli und August im Regionalen Klimamodell CLM (links: CLM1, rechts: CLM2) in der ELR für den Referenzzeitraum (1961 – 1990), die Nahe Zukunft (2021 – 2050) und die Ferne Zukunft (2071 – 2100).....	19

Abbildung 18: Entwicklung der Jahresniederschlagssummen; links: in den Messdaten (ELR und NRW) im Zeitraum 1951 – 2010, rechts: in den CLM-Modelldaten (nur ELR) im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100).....	21
Abbildung 19: Änderungen der durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen in Europa bis 2100 für das SRES-Szenario A2 (KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN, 2007).....	22
Abbildung 20: Entwicklung der mittleren Jahresniederschlagssummen im begrenzten Ensemble für die Nahe Zukunft (2021 – 2050) und für die Ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990).....	22
Abbildung 21: Änderungen der mittleren Monatsniederschlagssummen in der ELR, links: in Messdaten 1981 – 2010 vs. 1951 – 1980, rechts: in CLM1-Modelldaten 2021 – 2050 vs. 1961 – 1990 (ohne Pfeile) sowie 2071 – 2100 vs. 1961 – 1990 (mit Pfeilen)	23
Abbildung 22: Veränderung der mittleren Monatsniederschlagssummen in der ELR im begrenzten Ensemble aus sieben Modellrechnungen; links: 2021 – 2050 vs. 1961 – 1990; rechts: 2071 – 2100 vs. 1961 – 1990; die Boxen geben die Bandbreite an, in der fünf der sieben Modellrechnungen liegen; die Grenze zwischen den grünen und roten Boxen entspricht dem Median; die „Antennen“ spiegeln das Maximum und das Minimum des Ensembles wider.....	23
Abbildung 23: Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr in der ELR im Zeitraum 1951 – 2010, Messdaten; links: D = 60 min (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von N = 9,5 – 10,9 mm in Abhängigkeit von der Station); rechts: D = 24 h (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von N = 21,4 – 23,7 mm in Abhängigkeit von der Station).....	26
Abbildung 24: Mittlere Höhe der Jahresniederschlagshöchstwerte pro Jahr in der ELR im Zeitraum 1951 – 2010, Messdaten; links: D = 60 min; rechts: D = 24 h	27
Abbildung 25: Anzahl von Starkregentagen über Schwellenwerten in den Messdaten der ELR je Station und Dekade in den Zeiträumen 1951 – 1970, 1971 – 1990 und 1991 – 2010.....	29
Abbildung 26: Anzahl von Starkregentagen über Schwellenwerten in den CLM-Modelldaten je Dekade und Rasterfeld im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100); links: CLM1, rechts: CLM2	29
Abbildung 27: Änderungen der Starkregentage mit $N \geq 20$ mm/d im begrenzten Ensemble in der ELR für die Nahe Zukunft (2021 – 2050) und für die Ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990).....	30
Abbildung 28: Entwicklung der statistischen Niederschlagshöhen für unterschiedliche Wiederkehrzeiten T in der ELR im Zeitraum 1951 – 2010, Messdaten; links: D = 60 min; rechts: D = 24 h.....	31
Abbildung 29: Vergleich der statistisch ermittelten Niederschlagshöhen für verschiedene Wiederkehrhäufigkeiten unter Berücksichtigung eines Toleranzbereichs für die natürliche Klimavariabilität; links oben: CLM1 (1961 – 1990) vs. Messdaten (1961 – 1990); rechts oben: CLM2 (1961 – 1990) vs. Messdaten (1961 – 1990); links unten: CLM1 (2021 – 2050) vs. Messdaten (1961 – 1990); rechts unten: CLM2 (2021 – 2050) vs. Messdaten (1961 – 1990)	32
Abbildung 30: Vergleich der jahreszeitlichen Verteilung von Trockentagen ($N \leq 0,1$ mm/d) in den Messdaten der ELR für die Zeiträume 1961 – 1990 und 1991 – 2010.....	34
Abbildung 31: Vergleich der jahreszeitlichen Verteilung der Trockentage im Regionalen Klimamodell CLM (links: CLM1, rechts: CLM2) für die ELR im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100).....	35
Abbildung 32: Bisherige Entwicklung von Trockenperioden in den Messdaten der ELR – Prozentuale Veränderungen der Auftretenshäufigkeit aufeinanderfolgender Tage mit $N \leq 1$ mm (links) bzw. $N \leq 0,1$ mm (rechts) im Zeitraum 1991 – 2010 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 – 1990.....	36
Abbildung 33: Zukünftige Entwicklung von Trockenperioden in der ELR – Prozentuale Veränderungen der Auftretenshäufigkeit aufeinanderfolgender Tage mit $N \leq 1$ mm (oben) bzw. $N \leq 0,1$ mm (unten) in	

der Nahen und Fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum im Regionalen Klimamodell CLM; links: CLM1, rechts: CLM2	37
Abbildung 34: Zukünftige Entwicklung von Trockenperioden ausgewählter Dauern in der ELR; Veränderungen der Auftretenshäufigkeit aufeinanderfolgender Tage mit $N \leq 0,1$ mm in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und Fernen Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990) im Regionalen Klimamodell CLM	37
Abbildung 35: links: Monatlicher Trockenheitsindex dMI in den Messdaten der ELR von 1961 – 2010; rechts: Ausschnitt für den Zeitraum 1961 – 1990 für sehr kleine dMI ($DMI \leq 2$)	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittlere Jahreslufttemperaturen an fünf ausgewählten Messstationen in der ELR und Umgebung im Referenzzeitraum 1961 – 1990.....	5
Tabelle 2: Zunahmen der mittleren Lufttemperaturen in den vier Jahreszeiten / Quartalen in der ELR im Zeitraum 2001 – 2010 gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990).....	9
Tabelle 3: In <i>dynaklim</i> untersuchte Kenntage und ihre Definitionen	11
Tabelle 4: Bei der Auswertung der Kennwerte berücksichtigte Stationen	12
Tabelle 5: Mittlere Anzahl Heißen Tage und mittlere Anzahl an Jahren mit mindestens zehn Heißen Tagen für die ELR in den CLM-Modelldaten im Zeitraum 1961 – 2010, in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100)	15
Tabelle 6: Anzahl der Monate mit mindestens 10 Heißen Tagen im Regionalen Klimamodell CLM für die ELR im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100).....	20
Tabelle 7: Auftretenshäufigkeit der Starkregenereignisse pro Jahr in der ELR, gemittelt über die Zeiträume 1951 – 1970, 1971 – 1990 und 1991 – 2010, Messdaten.....	26
Tabelle 8: Entwicklung der mittleren Jahresniederschlagshöchstwerte in der ELR; Vergleich der Zeiträume 1951 – 1970, 1971 – 1990 und 1991 – 2010, Messdaten.....	27
Tabelle 9: Untersuchte Schwellenwerte und ihre Wiederkehrzeiten in der ELR.....	28
Tabelle 10: Anzahl von Starkregentagen über Schwellenwerten in den Messdaten der ELR je Dekade und Station im Zeitraum 1951 – 2010.....	28
Tabelle 11: Anzahl von Starkregentagen über Schwellenwerten in den in den CLM-Modelldaten je Dekade und Rasterfeld im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100).....	30
Tabelle 12: Entwicklung der Trockentage im Regionalen Klimamodell CLM für die ELR im Referenzzeitraum (1961 – 1990), der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und der Fernen Zukunft (2071 – 2100).....	34
Tabelle 13: Vergleich der Anzahl der Monate mit einem Trockenheitsindex $dMI \leq 1$ für die ELR im Regionalen Klimamodell CLM im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100)	39

1 Einleitung

Der Klimawandel ist eines der beherrschenden Themen der letzten Jahre in den Medien, in der Gesellschaft, in der Politik und auch bei den Fachleuten in der Wasserwirtschaft. Die Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich aber wesentlich differenzierter als dies in der Regel in den Medien und auch in Publikationen dargestellt wird. So gibt es große regionale Unterschiede und auch die Änderungen einzelner Parameter wie Lufttemperatur und Niederschlag lassen sich wesentlich differenzierter beschreiben als durch medienwirksame Schlagworte wie „die Sommer werden heißer und trockener“, „die Winter werden feuchter“ und „Starkregen nehmen zu“.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens *dynaklim* stehen umfangreiche Messdaten für diverse hydrologische Parameter in der Emscher-Lippe-Region (ELR) zur Verfügung. Zudem wurden für die gleichen Parameter Modelldaten des Regionalen Klimamodells CLM (LAUTENSCHLAGER et al., 2009) in der ELR aufbereitet. In nahezu allen Modellanwendungen der Projektpartner in *dynaklim* stellen dabei die Parameter Lufttemperatur und Niederschlag die wesentlichen Eingangsgrößen dar und auch die Wahrnehmung des Klimawandels in der Öffentlichkeit erfolgt überwiegend anhand dieser beiden Parameter. Neben der Datenbereitstellung für die wasserwirtschaftlichen Modelle werden für die Projektpartner in *dynaklim* auch Analysen zu unterschiedlichen Fragestellungen, insbesondere Trendberechnungen, durch die dr. papadakis GmbH zur Verfügung gestellt. Im Rahmen dieser Projektarbeit wurden für die beiden Parameter Lufttemperatur und Niederschlag für diverse Kenngrößen und Bilanzierungszeiträume umfangreiche Analysen der Mess- und Modelldaten in der ELR durchgeführt, von denen die wesentlichen Ergebnisse in dieser Publikation dargestellt werden.

Den Autoren dieser Publikation ist sehr wohl bewusst, dass Klimamodelle nicht mit dem Ziel entwickelt wurden, die daraus resultierenden Zeitreihen für wasserwirtschaftliche Impact-Modelle zu verwenden bzw. die Entwicklung wasserwirtschaftlich relevanter Kenngrößen zu beschreiben. Dennoch zeigen die Vergleiche der Klimamodelldaten mit den Messdaten in der Vergangenheit eine hinreichend genaue Übereinstimmung. Es wird daher angenommen, dass die Projektionen in der Zukunft für die untersuchten Kenngrößen grundsätzlich möglich sind und daher auch quantitativ beschrieben werden können. Klimaprojektionen stellen aber unter den gemachten Annahmen zur Treibhausgaskonzentration, dem verwendeten Global- und Regionalmodell und den gewählten Startbedingungen der Modellläufe immer nur eine mögliche Entwicklung in der Zukunft dar. Für ausgewählte Kenngrößen werden daher die detailliert untersuchten CLM-Modelldaten in einem begrenzten Ensemble aus fünf weiteren Klimaprojektionen betrachtet, um so die quantitativ beschriebenen Entwicklungen in einer möglichen Bandbreite einordnen zu können.

Die Auswirkungen des Klimawandels treten in unterschiedlichen Regionen differenziert auf und auch das vorherrschende Klima ist in Deutschland nicht homogen. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse z. B. in die norddeutsche Tiefebene, das Alpenvorland bzw. die Alpen oder in die vom kontinentalen Klima stärker geprägten östlichen Landesteile ist daher nicht möglich. Die vorgestellten Methoden sind allerdings übertragbar. Dagegen sind die Unterschiede in einer relativ homogenen und kleinen Region wie der ELR vernachlässigbar. Es werden in dieser Publikation daher mittlere regionale Aussagen und keine Detailaussagen zu Städten oder gar Stadtteilen (Quartieren) gemacht.

2 Datenbasis

Im Verbundforschungsvorhaben *dynaklim* wurde als einheitliche Datengrundlage für die Projektionen in die Zukunft das Regionale Klimamodell CLM (LAUTENSCHLAGER et al., 2009) gewählt. Die beiden in *dynaklim* verwendeten Realisierungen CLM_C20_1_D3 und CLM_C20_2_D3 (C20-Läufe) des Regionalen Klimamodells CLM beginnen ihre Simulationen im Jahr 1850 mit einem Anfangszustand aus einem langen prä-industriellen Gleichgewichtslauf und unterscheiden sich lediglich in diesem unterschiedlich gewählten Anfangszustand aus dem Gleichgewichtslauf. Bis ins Jahr 2000 werden die Modellrechnungen mit den weltweit beobachteten Treibhausgaskonzentrationen durchgeführt. Die beiden Zustände am Ende des 20. Jahrhunderts werden dann wiederum als Initialisierung für die Klimaprojektionen bis ins Jahr 2100 genutzt, bei denen dann die Treibhausgaskonzentrationen des SRES-Emissionsszenario A1B berücksichtigt werden (HOLLWEG et al., 2008; HENNEMUTH et al., 2009). Die beiden resultierenden Datenreihen über den Gesamtzeitraum 1961 – 2100 werden im Folgenden kurz CLM1 und CLM2 genannt.

Für die Bereitstellung der Niederschlagszeitreihen aus CLM war in *dynaklim* die Korrektur eines systematischen Fehlers (Bias) erforderlich (QUIRMBACH et al., 2012, 2012a). Im Rahmen dieser Biaskorrektur wurden umfangreiche Datenanalysen und Datenaufbereitungen für 18 Rasterfelder (Abbildung 1), die den größten Teil der ELR abdecken, durchgeführt. Diese 18 Rasterfelder bilden auch die Datenbasis für sämtliche Untersuchungen zu den CLM-Modelldaten dieser Publikation. In diesem Gebiet liegen zudem Messdaten zahlreicher Niederschlagsstationen von Emschergenossenschaft und Lippeverband (EG/LV) sowie einzelner Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) vor. Aus dem umfangreichen Datenpool wurden 14 Niederschlagsstationen von Emschergenossenschaft und Lippeverband (EG/LV) mit langen, nahezu lückenlosen Niederschlagsmessdaten im Zeitraum 1951 – 2010 ausgewählt (Abbildung 1). An allen 14 Stationen liegen kontinuierliche Niederschlagszeitreihen vor, sodass sämtliche Untersuchungen zum Niederschlag, auch die zu den kleinen Dauerstufen ($D < 1$ Tag), mit derselben Datenbasis durchgeführt werden konnten.

Für die Analysen zum Parameter Lufttemperatur werden die Zeitreihen der gleichen 18 Rasterfelder wie beim Parameter Niederschlag verwendet. Bei den Messdaten zur Lufttemperatur (Abbildung 2) liegt allerdings keine so umfangreiche und vollständige Datenbasis wie bei den Niederschlagsmessdaten vor. Je nach Fragestellung wird daher auf unterschiedliche Stationen / Zeitreihen zurückgegriffen. Im Einzelnen wird darauf detaillierter in den jeweiligen Kapiteln eingegangen. Im Wesentlichen lagen für die Untersuchungen die folgenden Messdaten zur Verfügung:

Gemessene Lufttemperaturen (Tagesmittelwerte) liegen für den betrachteten Gesamtzeitraum 1961 – 2010 nur an den Stationen Bochum DMT, Essen Bredeney DWD und Kleve DWD (rote Stationen in Abbildung 2) vor, die am südlichen Rand der ELR oder gar etwas außerhalb (westlich der ELR) liegen. Da sich die Lufttemperaturen im Raum wesentlich homogener als die Niederschläge verhalten und im Wesentlichen Trendanalysen durchgeführt werden, kann der Mittelwert dieser drei Stationen als repräsentativ für die gesamte Region angesehen werden. Mögliche Unterschiede zur tatsächlichen mittleren Lufttemperatur in der ELR sind zu vernachlässigen. Für ausgewählte Untersuchungen, z. B. zu den Kenntagen, werden weitere Stationen mit kürzeren Zeitreihen verwendet bzw. miteinander kombiniert (gelbe Stationen in Abbildung 2). Die Auswertungen zu diesen kürzeren bzw. kombinierten Zeitreihen können allerdings nur als Indikator / Tendenz für mögliche Entwicklungen in den Messdaten dienen. Aufgrund der geringen Zeitreihenlängen und den Unterschieden zwischen einzelnen miteinander kombinierten Stationen besitzen diese Auswertungen aber keinen wissenschaftlichen Anspruch.

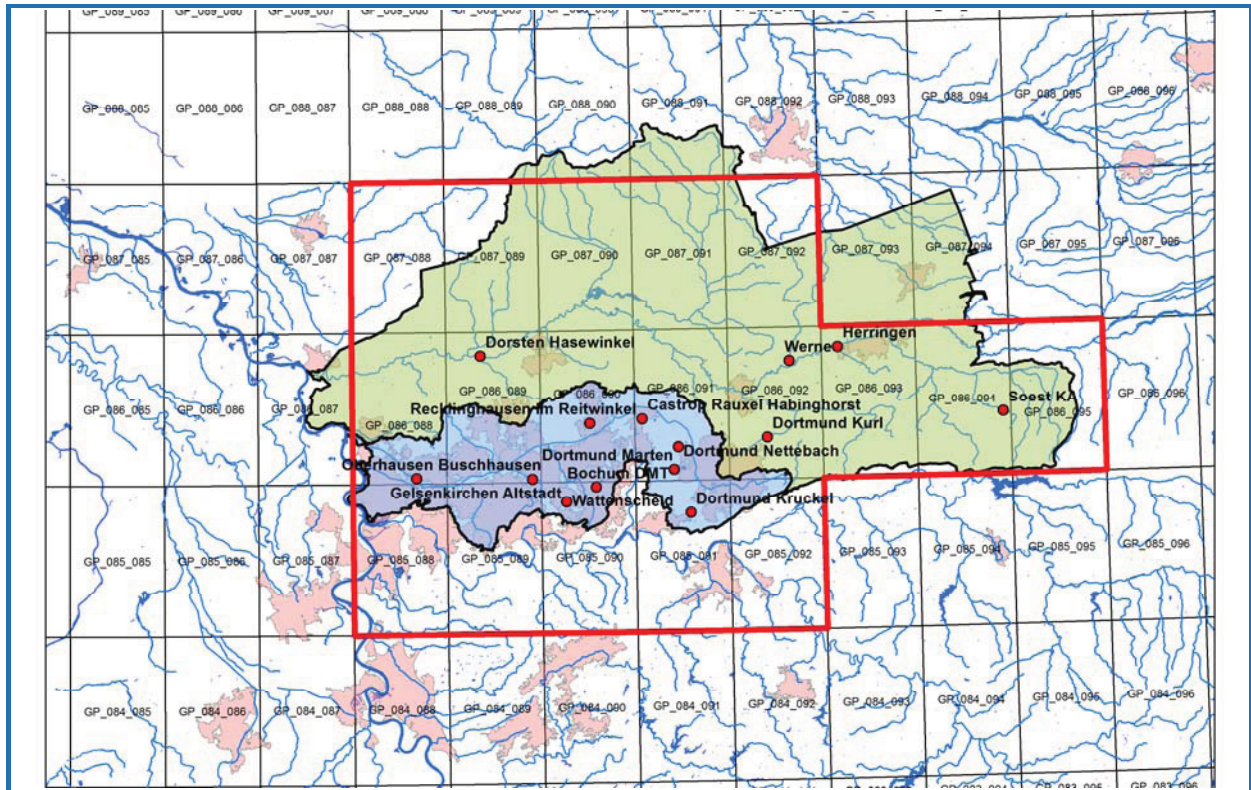


Abbildung 1: Lage der untersuchten CLM-Rasterfelder (rote Umrandung) mit den Einzugsgebieten der Emscher (blau) und der Lippe (grün); die 14 Niederschlagsmessstationen sind rot markiert

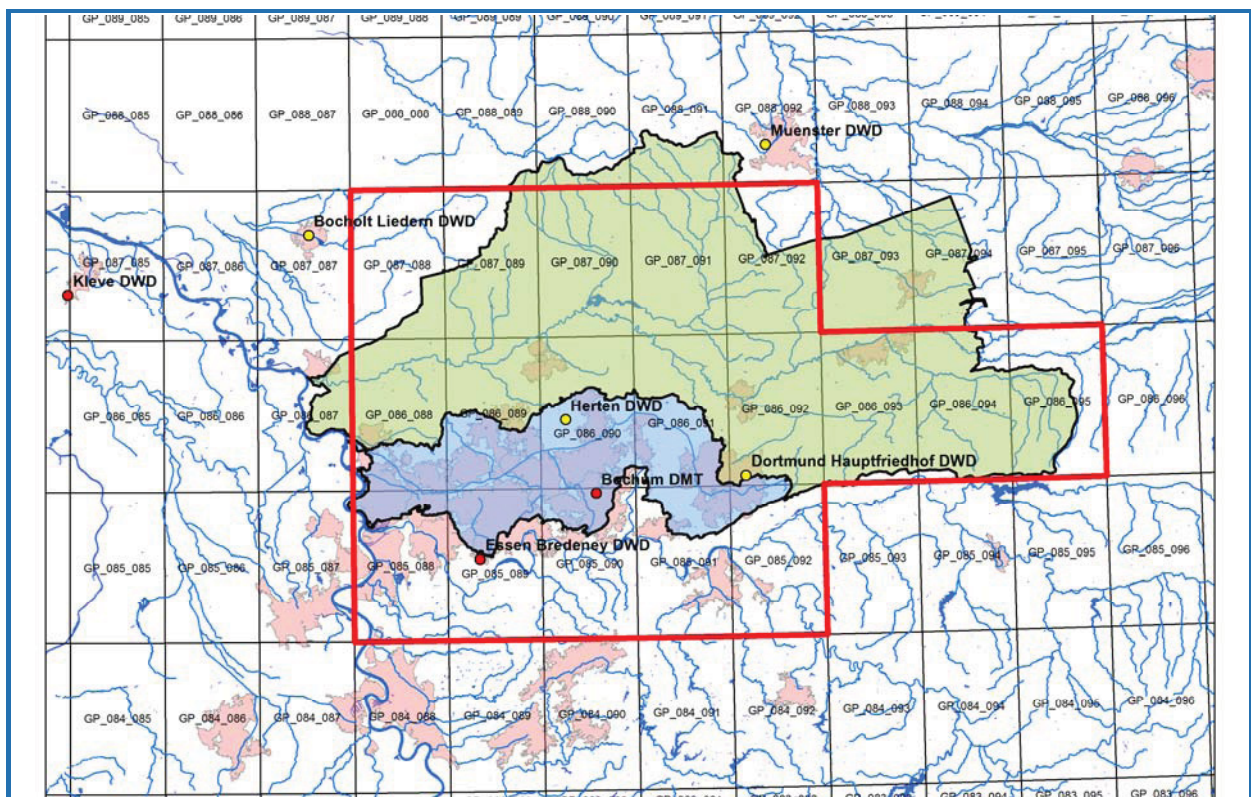


Abbildung 2: Lage der untersuchten CLM-Rasterfelder (rote Umrandung) mit den Einzugsgebieten der Emscher (blau) und der Lippe (grün); rote Stationen: Tagesmitteltemperaturen 1961 – 2010 (primäre Datenbasis); gelbe Stationen: ergänzende Untersuchungen (zusätzlich zu roten Stationen)

Ebenso wie die Niederschlagszeitreihen besitzen die CLM-Zeitreihen zur Lufttemperatur einen systematischen Fehler (Bias). Da für den Parameter Lufttemperatur in *dynaklim* im Wesentlichen Trendaussagen von Interesse sind, wurde auf eine Biaskorrektur bei den Zeitreihen zur Lufttemperatur verzichtet. Es wird davon ausgegangen, dass der in der Vergangenheit festgestellte systematische Fehler ebenso in der Zukunft auftritt und nicht die Trendaussagen und die Werte der absoluten Änderungen beeinflusst. In dieser Publikation erfolgt daher die Darstellung von Daten zur Lufttemperatur aus CLM auf Basis der Bias behafteten, d. h. nicht korrigierten Daten. Bei den Tagesmittelwerten und den daraus abgeleiteten Monats- und Jahresmittelwerten unterschätzen die CLM-Daten die gemessenen Lufttemperaturen in der ELR um ca. 1 °C – 2 °C. Bei der Angabe von konkreten Werten zu mittleren Lufttemperaturen aus CLM ist daher generell davon auszugehen, dass diese sowohl in der Vergangenheit, als auch in der Zukunft um +1 °C bis +2 °C höher liegen. Bei den Tagesmaximum- und Tagesminimumtemperaturen ist der Bias dagegen nicht so einfach und eindeutig zu quantifizieren. Insbesondere die extremen Tagesmaxima, die bei der Bestimmung einzelner Kenntage maßgebend werden, werden im CLM-Modell eher überschätzt. Hierauf wird im Kapitel zu den Kenntagen (Kapitel 3.3) noch näher eingegangen.

Für ausgewählte Untersuchungen / Kenngrößen zu den Niederschlagsmessdaten werden ergänzend Ergebnisse für Gesamt-NRW aus der ExUS-Studie (LANUV NRW, 2010; QUIRMBACH et al., 2010; QUIRMBACH et al., 2013) angegeben. Außerdem erfolgt für ausgewählte Untersuchungen / Kenngrößen eine Darstellung eines begrenzten Ensembles aus sieben Klimaprojektionen. Dies ist erforderlich, da die verwendeten CLM-Klimaprojektionen nur zwei mögliche Entwicklungen des zukünftigen Klimas darstellen. Anhand einzelner repräsentativer Kenngrößen wird durch fünf weitere Projektionen mit unterschiedlichen Regionalen Klimamodellen, SRES-Szenarien und Realisierungen eine Bandbreite möglicher Klimaentwicklungen angegeben, in die die detaillierten Untersuchungen mit den CLM-Datensätzen eingeordnet werden können. Für die Auswertungen der fünf weiteren Projektionen wurden die Daten aus der Softwareumgebung IDP (CEC, 2006) genutzt, die durch den Kooperationspartner LANUV NRW für die Arbeiten in *dynaklim* bereitgestellt wurde.

3 Parameter Lufttemperatur

3.1 Entwicklung der mittleren Jahreslufttemperatur

Die mittlere Jahreslufttemperatur stellt einen geeigneten Parameter dar, um die Entwicklung der globalen Erwärmung und ihre regionalen Auswirkungen zu beschreiben. Dieser Parameter sagt noch nichts über unterschiedliche jahreszeitliche Ausprägungen oder die Entwicklung über zeitlich begrenzte Extreme aus. Hierzu folgen im Anschluss gesonderte Untersuchungen.

Da für den Gesamtzeitraum 1961 – 2010 nur Zeitreihen für drei Messstationen zur Verfügung stehen, die zum Teil sogar am Rand oder gar außerhalb der ELR liegen (siehe Kapitel 2), wird für den Zeitraum 1961 – 1990 anhand von zwei weiteren Stationen geprüft, ob die drei verwendeten Stationen repräsentativ für die ELR sind. Die beiden zusätzlichen Stationen Dortmund Hauptfriedhof DWD und Münster DWD liegen gegenüber den anderen drei Stationen im weiter südöstlich liegenden Bereich und etwas außerhalb der nördlichen Grenze der ELR. Die mittleren Jahreslufttemperaturen zeigen im Zeitraum 1961 – 1990 an allen fünf Stationen ähnliche Werte (Tabelle 1). Der Mittelwert aus allen fünf Stationen beträgt 9,8 °C, der Mittelwert aus den für den Gesamtzeitraum 1961 – 2010 verwendeten drei Stationen beträgt 9,9 °C, sodass diese drei Stationen als repräsentativ für die gesamte ELR gesehen werden.

Tabelle 1: Mittlere Jahreslufttemperaturen an fünf ausgewählten Messstationen in der ELR und Umgebung im Referenzzeitraum 1961 – 1990

Station	Mittlere Jahreslufttemperatur
Bochum DMT	10,4 °C
Essen Bredeneby DWD	9,6 °C
Kleve DWD	9,7 °C
Dortmund Hauptfriedhof DWD	9,8 °C
Münster DWD	9,5 °C
Mittelwert Bochum / Essen / Kleve	9,9 °C
Mittelwert alle Stationen	9,8 °C

Die Entwicklung der mittleren Jahreslufttemperatur ist in der ELR seit 1961 stetig positiv. In der Dekade 1991 – 2000 ist die mittlere Lufttemperatur gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 – 1990 um +0,6 °C, in der Dekade 2001 – 2010 um +0,8 °C gestiegen (Abbildung 3). Auch die Entwicklungen der mittleren Lufttemperaturen in den drei Dekaden innerhalb des Referenzzeitraums, die nicht separat dargestellt werden, ist von 9,7 °C auf 10,2 °C stetig positiv. Im Vergleich zur weltweiten Entwicklung der mittleren Jahreslufttemperaturen (Abbildung 4), ist somit ein sogar geringfügig stärkerer Temperaturanstieg in der ELR zu verzeichnen, auch wenn der europaweite Vergleich eher eine mittlere Zunahme aufzeigt (Abbildung 5, links). In dieser Abbildung ist zu beachten, dass ein anderer Bilanzierungszeitraum zu Grunde liegt, der zu anderen absoluten Werten führt, ansonsten aber das gleiche Trendverhalten widerspiegelt.

In Abbildung 6 werden zudem die Rangfolge der weltweit wärmsten 50 Jahre (links) und die Rangfolge der letzten 50 Jahre in der ELR (rechts) gegenübergestellt. Es sei explizit darauf hingewiesen, dass die beiden Abbildungen nicht genau das Gleiche darstellen, da die letzten 50 Jahre in der ELR nicht zwingend die wärmsten 50 Jahre waren. Die Abbildungen zeigen aber deutlich, dass

wie zu erwarten in einer kleineren Region wie der ELR größere Schwankungen und Unterschiede in einzelnen Jahren auftreten können, während bei den weltweiten Angaben lokale Unterschiede einzelner Jahre geglättet werden. Während weltweit die wärmsten 18 Jahre alle 1990 und später aufgetreten sind, sind in der ELR sechs der wärmsten 18 Jahre vor 1990 aufgetreten. Außerdem sind die Unterschiede einzelner Jahre gegenüber dem Mittelwert des Referenzzeitraums in der ELR stärker ausgeprägt.

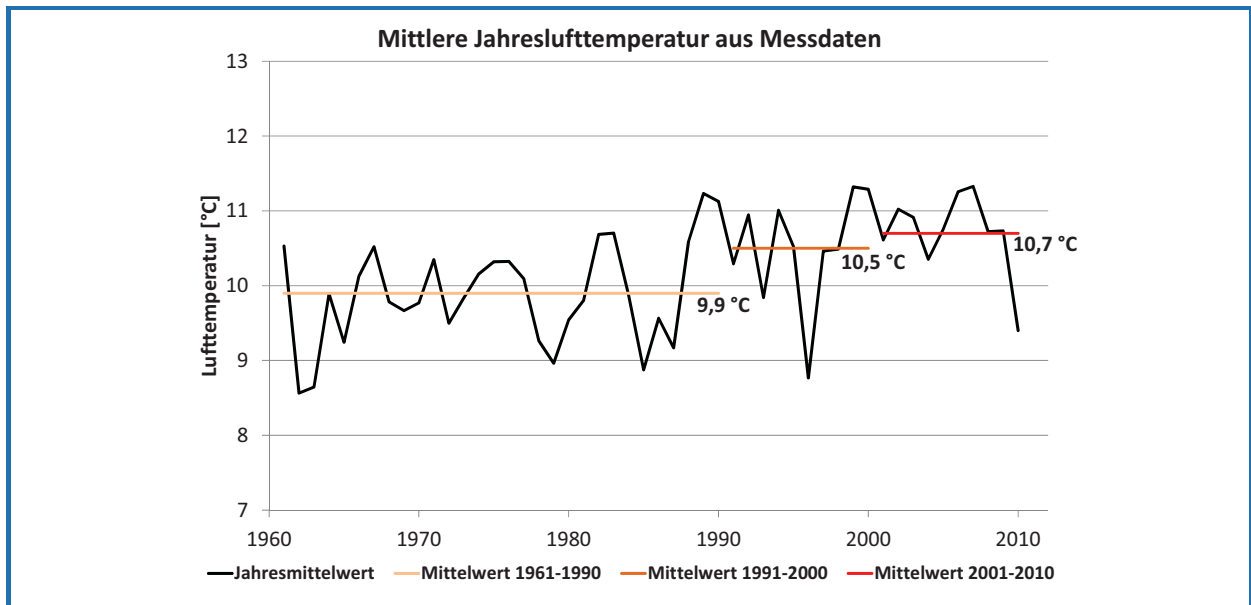


Abbildung 3: Mittlere Jahreslufttemperaturen aus Messdaten im Zeitraum 1961 – 2010 in der ELR

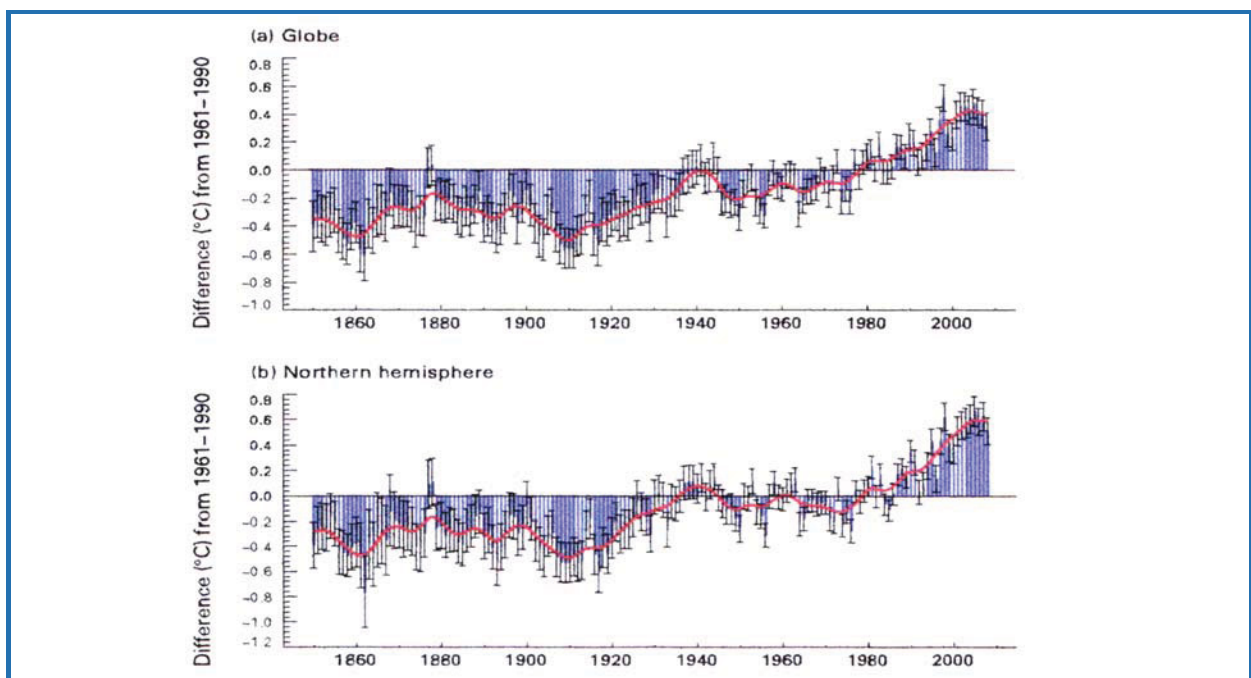


Abbildung 4: Entwicklung der mittleren Jahreslufttemperaturen im Vergleich zum Mittelwert des Referenzzeitraums 1961 – 1990 (a) global und (b) auf der nördlichen Welthälfte (WMO, 2009)

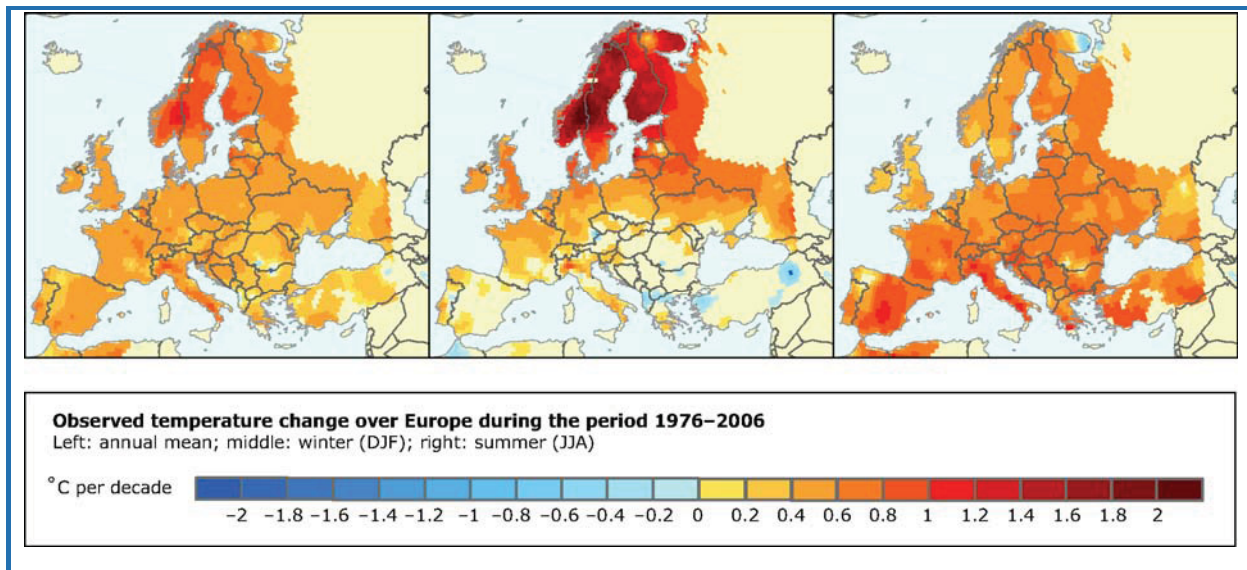


Abbildung 5: Entwicklung der mittleren Jahreslufttemperaturen in Europa im Zeitraum 1976 – 2006; links: Jahresmitteltemperaturen, Mitte: Winterquartal, rechts: Sommerquartal (EEA, 2008)

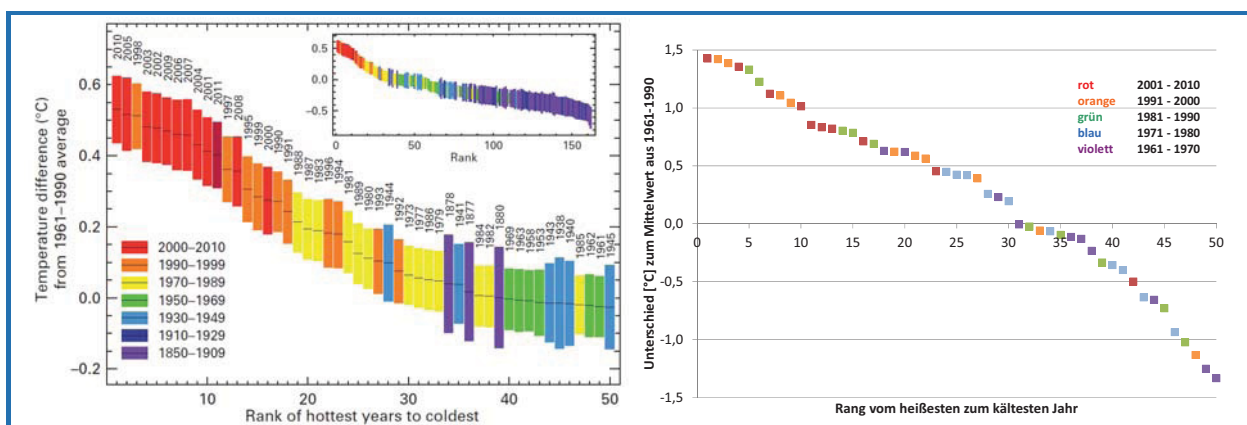


Abbildung 6: Unterschiede der mittleren Jahreslufttemperaturen im Vergleich zum langjährigen Mittel im Zeitraum 1961 – 1990; links: Globales Ranking der Lufttemperaturen der wärmsten 50 Jahre (WMO, 2012); rechts: Rangfolge der Lufttemperaturen der letzten 50 Jahre in der ELR

Die bisher festgestellte Zunahme der mittleren Jahreslufttemperaturen setzt sich in den Modelldaten des Regionalen Klimamodells CLM kontinuierlich fort (Abbildung 7). Insbesondere in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts ist mit einer wesentlich stärkeren Zunahme der mittleren Jahreslufttemperaturen als bisher und bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts zu rechnen. Während die Zunahme in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990) etwa +1 °C beträgt, nimmt die mittlere Lufttemperatur in der Fernen Zukunft (2071 – 2100) um mehr als +3 °C zu.

In den beiden Realisierungen des CLM-Modells sind zwar zum Teil große Unterschiede in einzelnen Jahren festzustellen, die Mittelwerte über 30 Jahre und die Trendentwicklungen sind dagegen nahezu gleich. Die Unterschiede in den mittleren Jahreslufttemperaturen im Referenzzeitraum zwischen den Modell- und den Messdaten (CLM1: 8,8 °C, CLM2: 8,6 °C, Messdaten: 9,9 °C) sind auf einen systematischen Fehler (Bias) in den Modelldaten zurückzuführen, der zu unterschiedlichen absoluten Werten, nicht aber zu unterschiedlichen Trendaussagen führt. Anders als beim Parameter Niederschlag erfolgt im Rahmen von *dynaklim* keine Korrektur des Temperaturbias (siehe auch Kapitel 2).

Das Ensemble aus sieben Modellrechnungen (Abbildung 8) zeigt in allen Modellrechnungen eine qualitativ ähnliche Entwicklung der mittleren Jahreslufttemperaturen. Alle Modellrechnungen zeigen eine stetige Temperaturzunahme, die insbesondere in der Fernen Zukunft deutlich stärker ist. Im Vergleich zu den anderen fünf Modellrechnungen zeigen die beiden in *dynaklim* genutzten Temperaturzeitreihen des Regionalen Klimamodells CLM eine überdurchschnittliche, nicht aber die größte Zunahme auf.

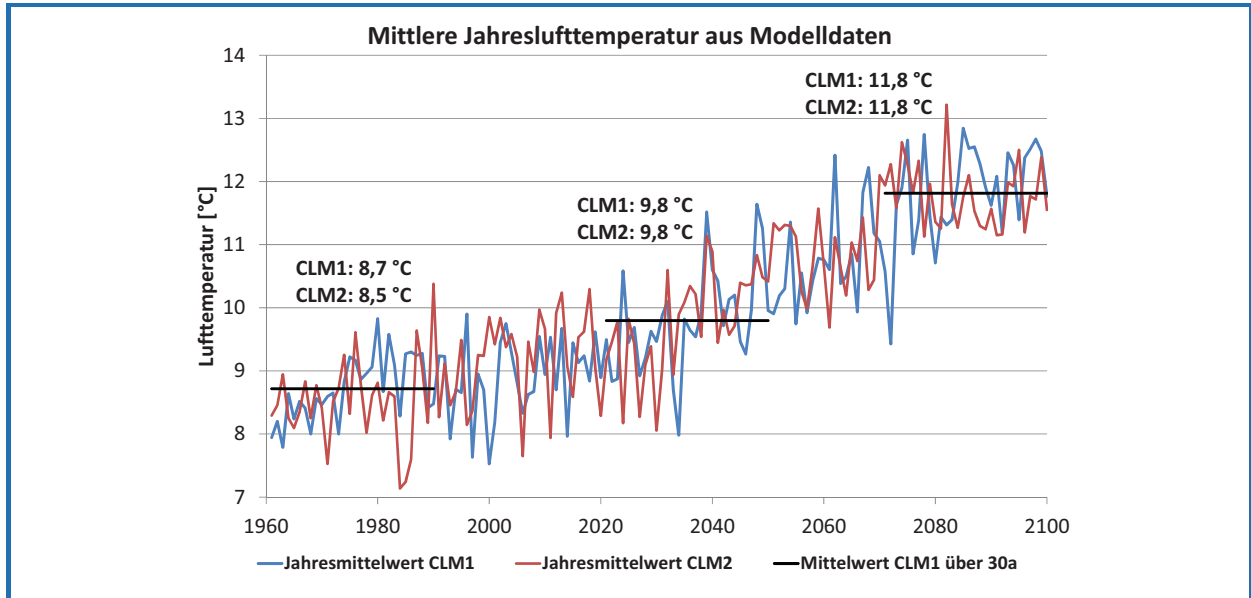


Abbildung 7: Mittlere Jahreslufttemperaturen aus CLM-Modelldaten im Zeitraum 1961 – 2100 in der ELR; Mittelwerte CLM1 über 30 Jahre für Referenzzeitraum (1961 – 1990), Nahe Zukunft (2021 – 2050) und Ferne Zukunft (2071 – 2100)

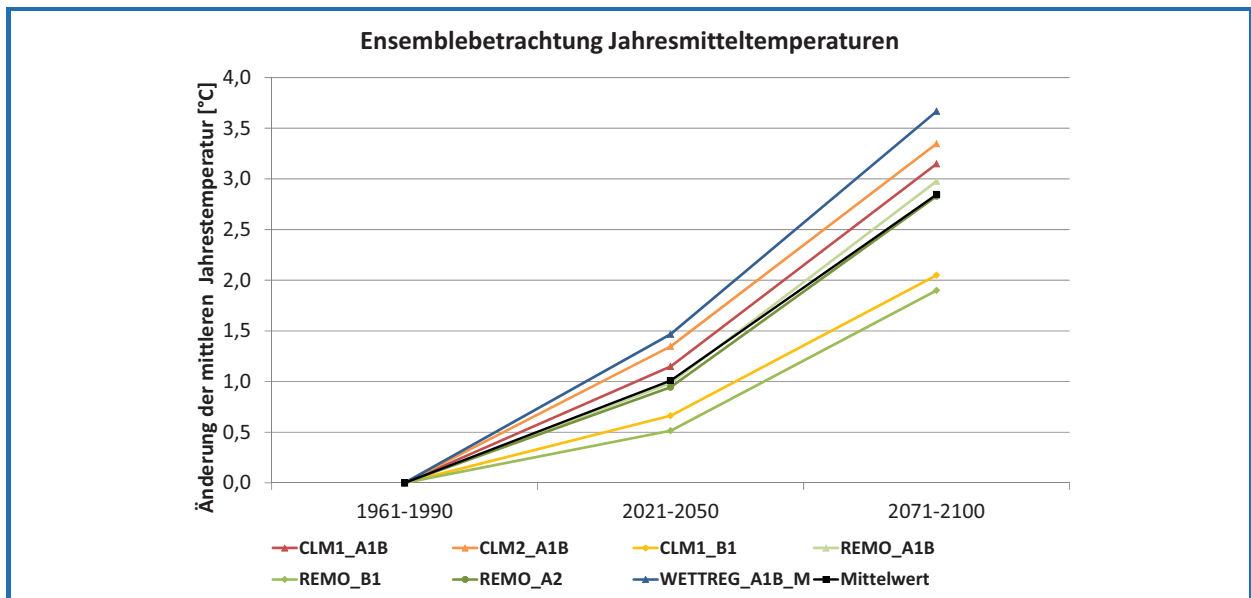


Abbildung 8: Änderungen der mittleren Jahreslufttemperaturen in der ELR im begrenzten Ensemble für die Nahe Zukunft (2021 – 2050) und für die Ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990)

3.2 Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in den einzelnen Jahreszeiten

Betrachtet man die vier Jahreszeiten, so wird deutlich, dass die Zunahme der Lufttemperatur über das Jahr nicht gleichmäßig erfolgt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der Meteorologie die Jahreszeiten immer am 1. des jeweiligen Monats beginnen, in dem der Jahreszeitenwechsel stattfindet (z. B. Sommer: 01.06. – 31.08.). In Tabelle 2 wird zunächst die Zunahme in den Messdaten pro Quartal dargestellt. Es zeigt sich, dass die Zunahmen in der Dekade 2001 – 2010 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 – 1990 in den Quartalen Frühling und Sommer überdurchschnittlich und in den Quartalen Herbst und Winter unterdurchschnittlich waren.

Tabelle 2: Zunahmen der mittleren Lufttemperaturen in den vier Jahreszeiten / Quartalen in der ELR im Zeitraum 2001 – 2010 gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990)

Jahreszeit	1961 – 1990	2001 – 2010	Zunahme	Bandbreite [Min – Max]
Winter	+2,7 °C	+3,4 °C	+0,7 °C	-2,8 °C bis +6,3 °C
Frühling	+9,2 °C	+10,4 °C	+1,2 °C	+7,2 °C bis +12,4 °C
Sommer	+17,1 °C	+18,1 °C	+1,0 °C	+15,5 °C bis +19,6 °C
Herbst	+10,4 °C	+11,0 °C	+0,6 °C	+8,1 °C bis +13,7 °C
Jahr	+9,9 °C	+10,7 °C	+0,8 °C	+8,6 °C bis 11,3 °C

Betrachtet man die unterschiedlichen Entwicklungen in den einzelnen Quartalen im europäischen Vergleich, so sind diese relativ ausgewogen über das Jahr verteilt. Abbildung 5 (S. 7) zeigt, dass die Zunahmen im Winter (mittleres Bild) in Nordeuropa und im Sommer (rechtes Bild) in Südeuropa überproportional zunehmen. Die Auswirkungen des Klimawandels sind daher in diesen beiden Regionen noch viel deutlicher spürbar als in der ELR. Die winterliche Zunahme in Nordeuropa wirkt sich direkt auf den (sinkenden) Schneeanteil am gefallenen Niederschlag aus. In Südeuropa addieren sich die überproportional hohen Zunahmen auf einen bereits hohen Basiswert der mittleren sommerlichen Lufttemperaturen. Auch wenn die Zunahmen der mittleren Lufttemperaturen, zumindest im Jahresmittel, in der ELR ähnlich hoch sind wie im übrigen Europa, so sind sowohl die jahreszeitlichen Unterschiede, als auch die daraus resultierende Betroffenheit geringer als in weiten Teilen Europas.

Analog zu den Auswertungen der Jahresmitteltemperaturen sind in Abbildung 9 die Rangfolgen der Lufttemperaturen in den vier Jahreszeiten der letzten 50 Jahre in der ELR abgebildet. Auch hier zeigt sich, dass die Auswirkungen der Temperaturzunahmen im Herbst am wenigsten stark ausgeprägt sind. Es wird in gleich vielen Jahren der Mittelwert der Referenzperiode 1961 – 1990 über- und unterschritten, und auch die Rangfolge einzelner Jahre aus den fünf Dekaden ist relativ gut „durchmischt“. In den anderen drei Quartalen wird der Mittelwert dagegen von ca. 60 % der Einzeljahre überschritten und insbesondere im Frühling ist der Anteil der Einzeljahre aus den beiden letzten Dekaden 1991 – 2010 in den oberen Rängen mit den größten Überschreitungen überproportional groß. Zudem zeigen Tabelle 2, Abbildung 6 und Abbildung 9, dass die Bandbreiten der mittleren Lufttemperaturen in den Quartalen, insbesondere im Winter, im Vergleich zu den Änderungen über die Jahrzehnte und zu den Jahresmittelwerten relativ groß sind.

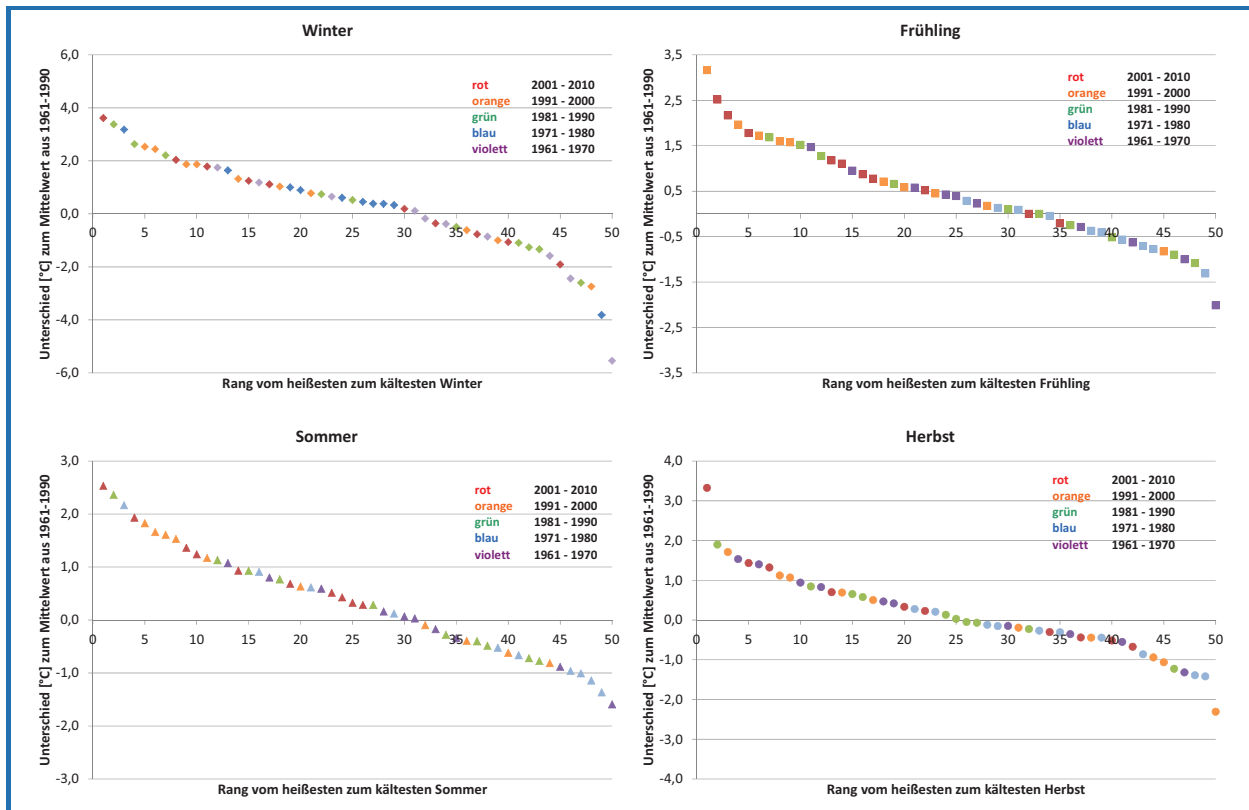


Abbildung 9: Rangfolge der Lufttemperaturen in den vier Jahreszeiten / Quartalen der letzten 50 Jahre in den Messdaten der ELR; links oben: Winter, rechts oben: Frühling, links unten: Sommer, rechts unten: Herbst

In Abbildung 10 sind die mittleren Lufttemperaturen in den vier Quartalen aus den Modellläufen CLM1 und CLM2 gegenübergestellt. In beiden Realisierungen zeigen sich in allen Jahreszeiten / Quartalen Zunahmen der mittleren Lufttemperaturen. Wie bei den Jahresmitteltemperaturen sind die Zunahmen in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts (Ferne Zukunft) stärker ausgeprägt als bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (Nahe Zukunft). Anders als in den Messdaten der Vergangenheit werden in der Zukunft aber weniger starke Zunahmen im Frühling erwartet. Dagegen sind die zukünftig zu erwartenden Zunahmen im Herbst und Winter stärker ausgeprägt als in den Messdaten. Die größte Zunahme der mittleren Lufttemperatur wird aber in der Fernen Zukunft für das Sommerquartal erwartet. Hinsichtlich der angegebenen absoluten Werte und ihre Unterschiede zu den Messwerten im Referenzzeitraum (1961 – 1990) gelten die im Kapitel 2 gemachten Hinweise.

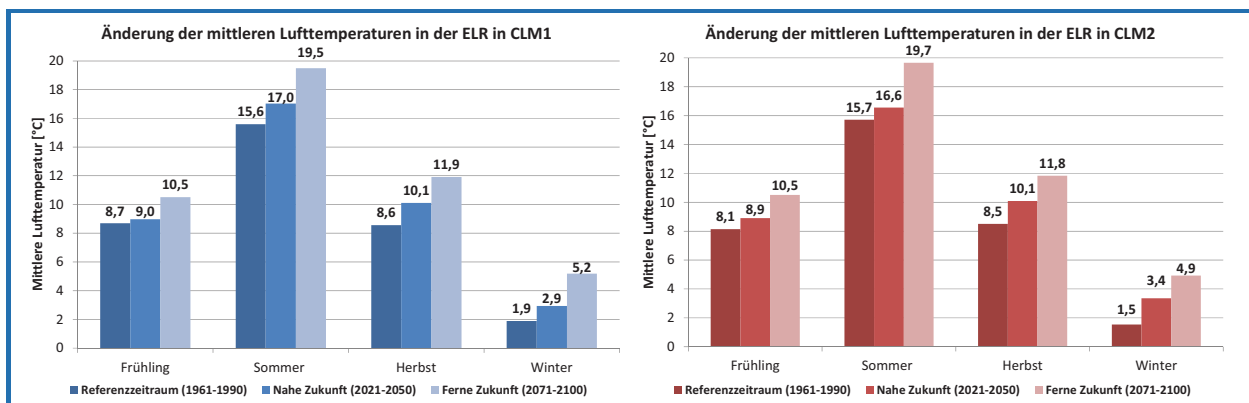


Abbildung 10: Vergleich der mittleren Lufttemperaturen in den vier Jahreszeiten / Quartalen im Regionalen Klimamodell CLM (links: CLM1, rechts: CLM2) für die ELR im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100)

3.3 Entwicklung von Kenntagen

Um besonders hohe oder besonders niedrige bzw. gar extreme Lufttemperaturen quantifizieren und vergleichen zu können, werden diese über sogenannte Kenntage charakterisiert. Tabelle 3 gibt einen Überblick über Kenntage und ihre Charakteristika (siehe auch DWD, 2012), wie sie auch in *dynaklim* untersucht wurden.

Tabelle 3: In *dynaklim* untersuchte Kenntage und ihre Definitionen

Kenntag	Kriterium	Beschreibung
Eistag	$T_{\max} < 0^{\circ} \text{C}$	Die Lufttemperatur bleibt an einem Tag immer unterhalb des Gefrierpunktes (0°C)
Frosttag	$T_{\min} < 0^{\circ} \text{C}$	Die Lufttemperatur sinkt an einem Tag mindestens einmal unterhalb des Gefrierpunktes (0°C)
Sommertag	$T_{\max} \geq 25^{\circ} \text{C}$	Die Lufttemperatur beträgt mindestens einmal am Tag 25°C oder mehr
Heißer Tag	$T_{\max} \geq 30^{\circ} \text{C}$	Die Lufttemperatur beträgt mindestens einmal am Tag 30°C oder mehr
Tropennacht	$T_{\min} \geq 20^{\circ} \text{C}$	Die Lufttemperatur sinkt an einem Tag nicht unter 20°C ab

3.3.1 Entwicklung der Kenntage in den Messdaten

Für die Identifikation von Kenntagen und die Beschreibung einer zeitlichen Entwicklung sind, wie Tabelle 3 zeigt, nicht die Tagesmittel-, sondern die Tagesmaximum- und Tagesminimumtemperaturen maßgebend. Lange Zeitreihen zu Tagesmaxima und Tagesminima liegen aber seltener als Zeitreihen zu Tagesmittelwerten vor. Im Rahmen von *dynaklim* kann bis ins Jahr 2001 oft nur auf 1 – 2 Stationen mit Tagesmaxima und Tagesminima zurückgegriffen werden, die zudem noch nicht einmal den gesamten und auch nicht den gleichen Zeitraum abdecken. Ab 2002 liegen an mehreren Stationen Tagesmaxima und Tagesminima vor, die aber aufgrund der kurzen Zeitreihenlänge alleine keine Aussagen über langfristige Entwicklungen liefern. Für die Untersuchungen zu den Kenntagen (Abbildung 11) werden daher die Zeitreihen von mehreren Stationen miteinander kombiniert, bzw. es werden mittlere Angaben gemacht, die auf einer wechselnden Datenbasis (unterschiedliche berücksichtigte Stationen) beruhen (siehe auch Kapitel 2). Die Auswertungen aus diesen kürzeren bzw. kombinierten Zeitreihen können allerdings nur als Indikator / Tendenz für mögliche Entwicklungen in den Messdaten dienen. Aufgrund der geringen Zeitreihenlängen und den Unterschieden zwischen einzelnen miteinander kombinierten Stationen besitzen diese Auswertungen daher keinen wissenschaftlichen Anspruch. Bei der Auswertung der Kenntage wurde aber der gesamte zur Verfügung stehende Datenpool gesichtet, und es wurden möglichst repräsentative sowie vergleichbare Stationen ausgewählt. Es wurde somit eine insgesamt sehr gewissenhafte Stationsauswahl getroffen, sodass die darauf aufbauenden generellen Aussagen belastbar sind. Die absoluten Werte einzelner Jahre können dagegen vom tatsächlichen regionalen Mittel abweichen. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die bei der Auswertung der Kennwerte berücksichtigte Stationen und die Zeiträume, die in die Auswertung eingegangen sind.

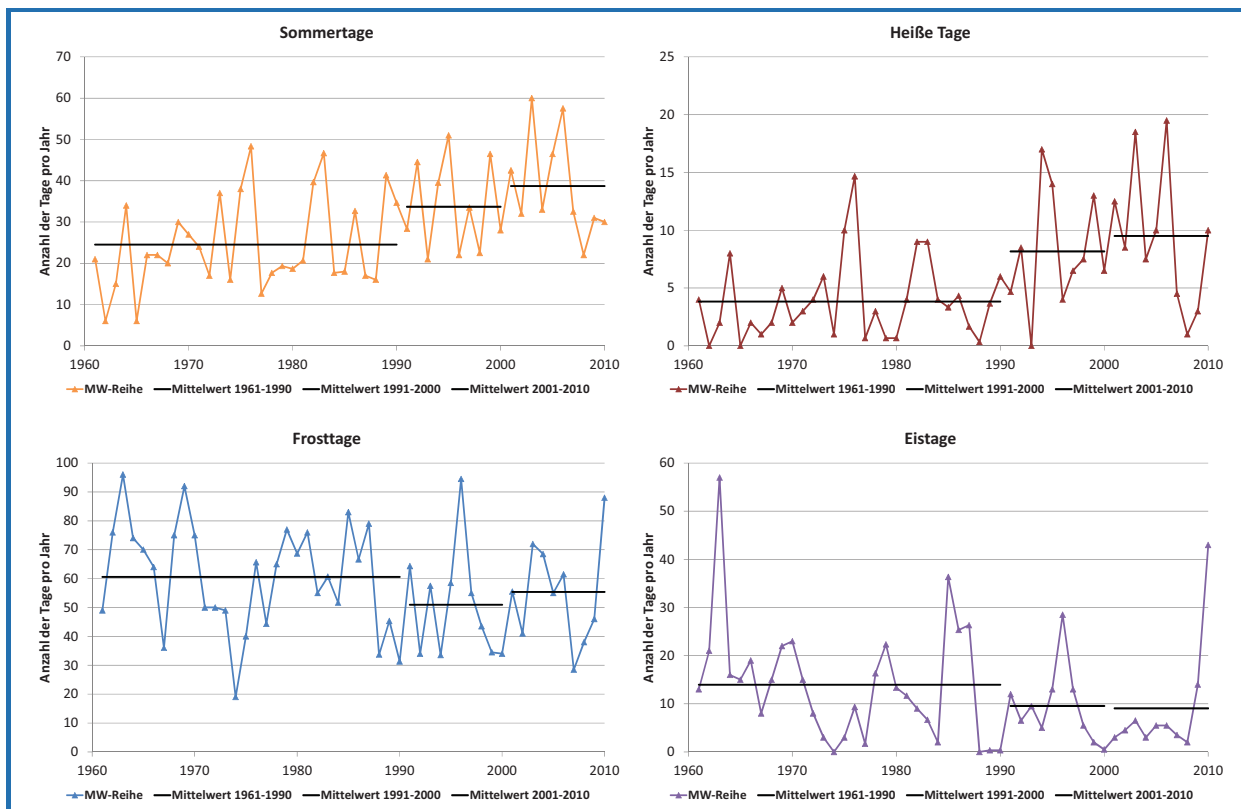


Abbildung 11: Vergleich der Sommertage (links oben), Heißen Tage (rechts oben), Frosttage (links unten) und Eistage (rechts unten) in den Messdaten der ELR für den Zeitraum 1951 – 2010

Tabelle 4: Bei der Auswertung der Kennwerte berücksichtigte Stationen

Zeitraum	Verwendete Stationen
1951 – 1975	Münster DWD
1976 – 1991	Münster DWD, Herten DWD, Bocholt Liedern DWD
1992 – 2005	Herten DWD, Bocholt Liedern DWD
2006 – 2007	Herten DWD, Essen Bredeney DWD
2008 – 2010	Essen Bredeney DWD

In Abbildung 11 (oben) wird besonders die Zunahme der Sommertage und der extremeren Heißen Tage in den letzten beiden Jahrzehnten deutlich. Gegenüber der Referenzperiode (1961 – 1990) haben die Sommertage um +9 Tage (1991 – 2000) bzw. +14 Tage (2001 – 2010) zugenommen, dies sind im Mittel +7 Tage pro Dekade, während im Zeitraum 1961 – 1990 die Sommertage im Mittel nur um +4 Tage pro Dekade zugenommen haben. Bei den Heißen Tagen ist eine ähnliche überproportionale Zunahme seit 1991 festzustellen. Gegenüber der Referenzperiode (1961 – 1990) haben die Heißen Tage um +4 Tage (1991 – 2000) bzw. +6 Tage (2001 – 2010) zugenommen, dies sind im Mittel +3 Tage pro Dekade, während im Zeitraum 1961 – 1990 die Heißen Tage im Mittel nur um +1 Tag pro Dekade zugenommen haben. Die hohen Mittelwerte bei den Sommertagen und bei den Heißen Tagen im Zeitraum 2001 – 2010 werden dabei durch die hohe Anzahl in den beiden Jahren 2003 und 2006 geprägt (siehe auch Abbildung 11, oben). Da sehr kurze Bilanzierungszeiträume über zehn Jahre nicht geeignet sind, langfristige Änderungen zu beschreiben,

dienen die Änderungen der letzten beiden Dekaden allerdings mehr als ein Hinweis für eine mögliche Entwicklung und sind weniger hinsichtlich der absoluten Werte von Bedeutung.

Bei den Kennwerten der kalten Temperaturen, Frost- und Eistagen (Abbildung 11, unten), ist generell ein Rückgang festzustellen, der ebenso wie die Zunahme der „warmen“ Kenntage eine Zunahme der Lufttemperaturen charakterisiert. Allerdings sind die Rückgänge der Frost- und Eistage seit 1991 gegenüber dem Referenzzeitraum weniger stark ausgeprägt als die gleichzeitige Zunahme der Sommertage und Heißen Tage. Bei den Frosttagen tritt dagegen einen Sprung innerhalb der Referenzperiode auf. Während bis 1970 im Mittel 71 Frosttage pro Jahr aufgetreten sind, sind es danach nur noch 55,6 Frosttage pro Jahr, was auch in etwa dem Mittelwert der letzten Dekade (55 Frosttage) entspricht. Bei den Eistagen liegen die Mittelwerte in den einzelnen Dekaden überwiegend zwischen 9 – 12 Tagen. Eine Ausnahme bildet die Dekade 1961 – 1970 mit 21 Tagen. In der letzten Dekade ist aber zu berücksichtigen, dass die beiden Winter 2009 / 2010 und 2010 / 2011 mit den langen Kälteperioden den Mittelwert sehr stark beeinflussen. Ohne Berücksichtigung der beiden letzten strengen Winter ergibt sich für den Zeitraum 2001 – 2008 nur ein kleiner Mittelwert von 4 Eistagen pro Jahr. Es ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht einschätzbar, ob die geringe Anzahl der Eistage im Zeitraum 2001 – 2008 einen Ausreißer oder ein Indiz für eine signifikante Verschiebung auch bei den kalten Temperaturen darstellt. Auch hier gilt der zuvor gemachte Hinweis zu den kurzen Bilanzierungszeiträumen.

3.3.2 Entwicklung der Kenntage in den Modelldaten

In der Zukunft setzt sich in den CLM-Daten der generelle Trend zu mehr Sommertagen und Heißen Tagen sowie zu weniger Frost- und Eistagen fort (Abbildung 12). Ergänzend sind in Abbildung 12 für den Referenzzeitraum auch die mittlere Anzahl der Kennwerte in den gemessenen Zeitreihen (entsprechend Tabelle 4) mit angegeben (grüne Säulen). Die Unterschiede zwischen den beiden Realisierungen CLM1 und CLM2 spiegeln die natürliche Klimavariabilität wider. Bei den Unterschieden zu den Messwerten ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den CLM-Werten um Mittelwerte über die gesamte ELR handelt, während die Messwerte nur die klimatischen Verhältnisse von wenigen Stationen, zum Teil nur an der Station Münster DWD widerspiegeln. Zudem wurde bei den CLM-Zeitreihen für den Parameter Lufttemperatur keine Bias-Korrektur durchgeführt.

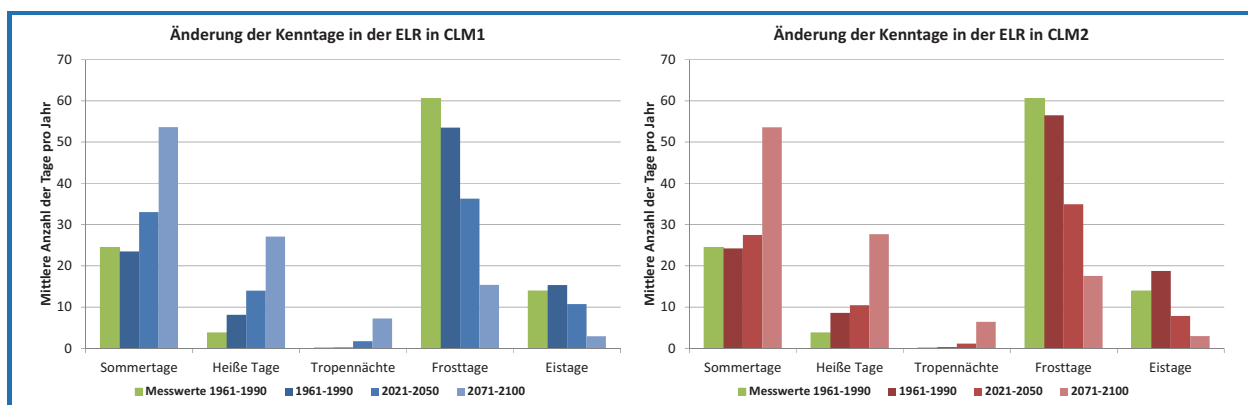


Abbildung 12: Vergleich der Kenntage im Regionalen Klimamodell CLM (links: CLM1, rechts: CLM2) für die ELR im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und Fernen Zukunft (2071 – 2100); ergänzend werden in Grün die Anzahl der Kenntage aus Messdaten (gemäß Tabelle 4) für den Referenzzeitraum mit angegeben

Bei den hohen Temperaturen ist die Zunahme der Kenntage „Sommertage“ und „Heiße Tage“ in der Fernen Zukunft noch einmal höher als in der Nahen Zukunft. In der Fernen Zukunft tritt zudem mit im Mittel sieben Tropennächten pro Jahr erstmals eine signifikant von Null abweichende Anzahl auf. Vergleicht man die projizierte Zunahme der „warmen“ Kenntage mit der hohen Anzahl dieser Kenntage in den Messdaten seit 1991, insbesondere im Zeitraum 2001 – 2010, so lässt dieser

Vergleich zwei Interpretationen zu. Einerseits ist es möglich, dass die betrachteten Klimamodellrechnungen aufgrund zu geringer berücksichtigter Treibhausgasemissionen die tatsächliche Entwicklung unterschätzen. Andererseits sind die absoluten Änderungen in den beiden kurzen Bilanzierungszeiträumen über zehn Jahre nicht überzubewerten.

In der folgenden Abbildung 13 wird durch Thermometer eine anschauliche Darstellung gewählt, um noch einmal die generelle Temperaturzunahme anhand des Kennwerts der Heißen Tage zu veranschaulichen. Die Thermometerdarstellung erfolgt nur exemplarisch für den CLM1-Datensatz, die nachfolgenden Auswertungen (Tabelle 5) werden dagegen für beide CLM-Datensätze angegeben. Es wird ein Thermometer in einem Jahr nur abgebildet, wenn in diesem Jahr mindestens zehn Heiße Tage aufgetreten sind. Die Höhe und Farbe der abgebildeten Säule symbolisiert die tatsächliche Anzahl der Heißen Tage pro Jahr (eine Markierung entspricht fünf Heißen Tagen). Gemeinsam mit der Abbildung 12 bietet die Abbildung 13 auch die Möglichkeit, den Einfluss des Bias in den Temperaturdaten auf die Analysen und ihre Darstellung zu beschreiben.

Um die Ergebnisse der beiden genannten Abbildungen richtig interpretieren zu können, wird daher noch einmal kurz auf den Bias in den Temperaturdaten eingegangen. Im Kapitel 2 wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Modelldaten zu den Lufttemperaturen einen systematischen Fehler (Bias) besitzen. Bei den Tagesmittelwerten und den daraus abgeleiteten Monats- und Jahresmittelwerten unterschätzen die CLM-Daten die gemessenen Lufttemperaturen in der ELR um ca. $1\text{ °C} - 2\text{ °C}$. Bei den Tagesmaxima überschätzen dagegen die CLM-Daten zumindest bei sehr hohen Tagesmaxima die gemessenen Lufttemperaturen. Dies wird deutlich, wenn man die Anzahl der Heißen Tage im Referenzzeitraum betrachtet (Messdaten: 4; CLM1: 8; CLM2: 9). Bereits Abbildung 12 zeigt, dass im Referenzzeitraum im Mittel in den Modelldaten mehr Heiße Tage auftreten als in den Messdaten. Dies spiegelt sich auch in der Darstellung der einzelnen Jahre durch die Thermometer in Abbildung 13 wider. Sowohl im Referenzzeitraum 1961 – 1990 als auch in den beiden letzten Dekaden 1991 – 2010 wird in den Modelldaten der gewählte Schwellenwert von mindestens zehn heißen Tagen öfters überschritten und auch die Mittelwerte über die beiden genannten Zeiträume liegen bei den Modelldaten über den Mittelwerten der Messdaten.

Bei der quantitativen Bewertung der Heißen Tage und ihrer Entwicklung in der Zukunft sind daher unter anderem aufgrund des Bias immer Modelldaten der Zukunft mit Modelldaten der Vergangenheit zu vergleichen (Tabelle 5). Um die dargestellten Ergebnisse mit eigenen Erfahrungen aus der Vergangenheit abzugleichen, eignen sich die Modelldaten zur Lufttemperatur dagegen nicht, da die Klimamodelle nur mittlere Zustände über mehrere Dekaden und nicht reale Werte einzelner Jahre wiedergeben können. In Abbildung 13 werden daher ergänzend zu den Modelldaten auch die Auswertungen der Heißen Tage für die Messdaten dargestellt. Die generellen Aussagen, dass sowohl die Jahre mit mindestens zehn Heißen Tagen als auch die mittlere Anzahl der Heißen Tage pro Jahr ansteigt, sind sowohl bei einem Vergleich von Messdaten (Vergangenheit) mit Modelldaten (Zukunft) als auch bei einem Vergleich von Modelldaten (Vergangenheit) mit Modelldaten (Zukunft) gültig.

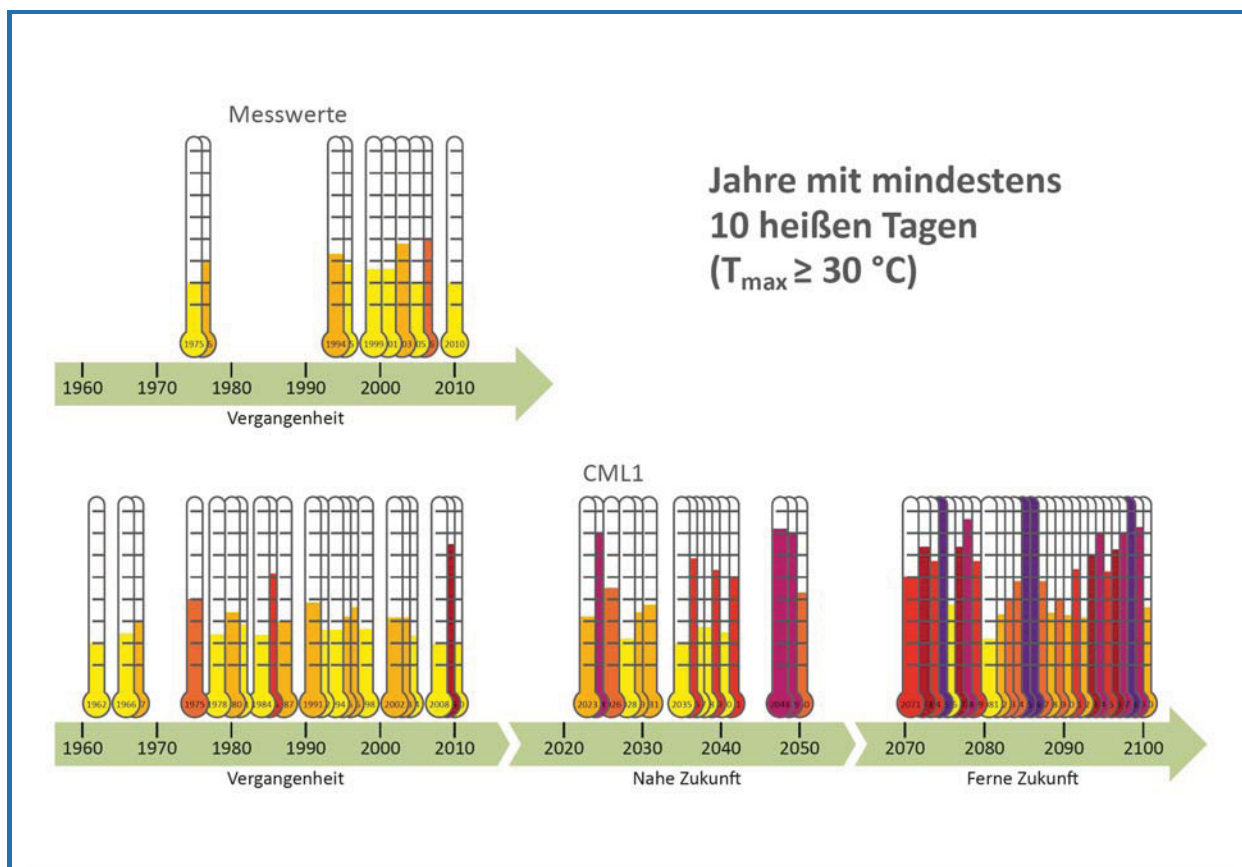


Abbildung 13: Jahre mit mindestens 10 Heißen Tagen pro Jahr in der ELR; oben: Messdaten im Zeitraum 1961 – 2010; unten: CLM1-Modelldaten im Zeitraum 1961 – 2010, in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100)

Tabelle 5: Mittlere Anzahl Heiße Tage und mittlere Anzahl an Jahren mit mindestens zehn Heißen Tagen für die ELR in den CLM-Modelldaten im Zeitraum 1961 – 2010, in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100)

Zeitraum	Anzahl der Jahre mit mindestens 10 Heißen Tagen CLM1	Anzahl der Jahre mit mindestens 10 Heißen Tagen CLM2	Mittlere Anzahl Heiße Tage im 30a-Zeitfenster CLM1	Mittlere Anzahl Heiße Tage im 30a-Zeitfenster CLM2
1961 – 1990	10	9	8	9
2021 – 2050	16	16	14	11
2071 – 2100	28	28	27	28

Die in Abbildung 13 und Tabelle 5 dargestellten Zunahmen der Heißen Tage beziehen sich theoretisch auf ganze Jahre, wobei lediglich im Zeitraum Mai – September Heiße Tage auftreten. Hier nicht aufgeführte Untersuchungen zum Sommerquartal (Juni – August) zeigen allerdings eine Konzentration insbesondere auf diese drei Monate. Auch die Zunahmen finden in erster Linie im Sommerquartal statt, was eine Zunahme der für den Menschen als unangenehm empfundenen Hitzeperioden erwarten lässt. Da mittlere Anzahl pro Jahr alleine kein geeigneter Indikator für die Bewertung von Hitzeperioden ist, wird auf diese Thematik in einem separaten Kapitel (Kapitel 3.4) eingegangen.

Bei den niedrigen Temperaturen ist, anders als bei den Messdaten der Vergangenheit ein stärkerer Rückgang der Frost- und Eistage festzustellen. Bereits in der Nahen Zukunft nehmen die Frosttage um ca. ein Drittel, in der Fernen Zukunft dann um ein weiteres Drittel gegenüber dem Referenzzeitraum ab. Die Eistage reduzieren sich je nach Realisierung zunächst ebenfalls um ein Drittel (CLM1) bzw. um mehr als die Hälfte (CLM2) und erreichen dann in der Fernen Zukunft mit im Mittel drei Eistagen pro Jahr einen sehr kleinen Wert.

Das Ensemble aus sieben Modellrechnungen (Abbildung 14) zeigt – wie bereits bei den mittleren Jahreslufttemperaturen – in allen Modellrechnungen eine qualitativ ähnliche Entwicklung der vier untersuchten Kennwerte. Auch wenn einzelne Kennwerte in einigen Modellläufen im Referenzzeitraum nicht adäquat abgebildet werden (insbesondere REMO bei den Frost- und Eistagen) und die Entwicklungen einzelner Modellläufe als Ausreißer erscheinen (insbesondere WETTREG bei den Sommertagen und Heißen Tagen), sind die generellen Entwicklungen in allen Modellläufen vergleichbar. Es ist daher zu vermuten, dass die anhand der CLM1- und CLM2-Daten beschriebenen Zunahmen der Sommertage und Heißen Tage sowie die Abnahmen der Frost- und Eistage in Zukunft zumindest in einer ähnlichen Größenordnung in der Emscher-Lippe-Region eintreten werden.

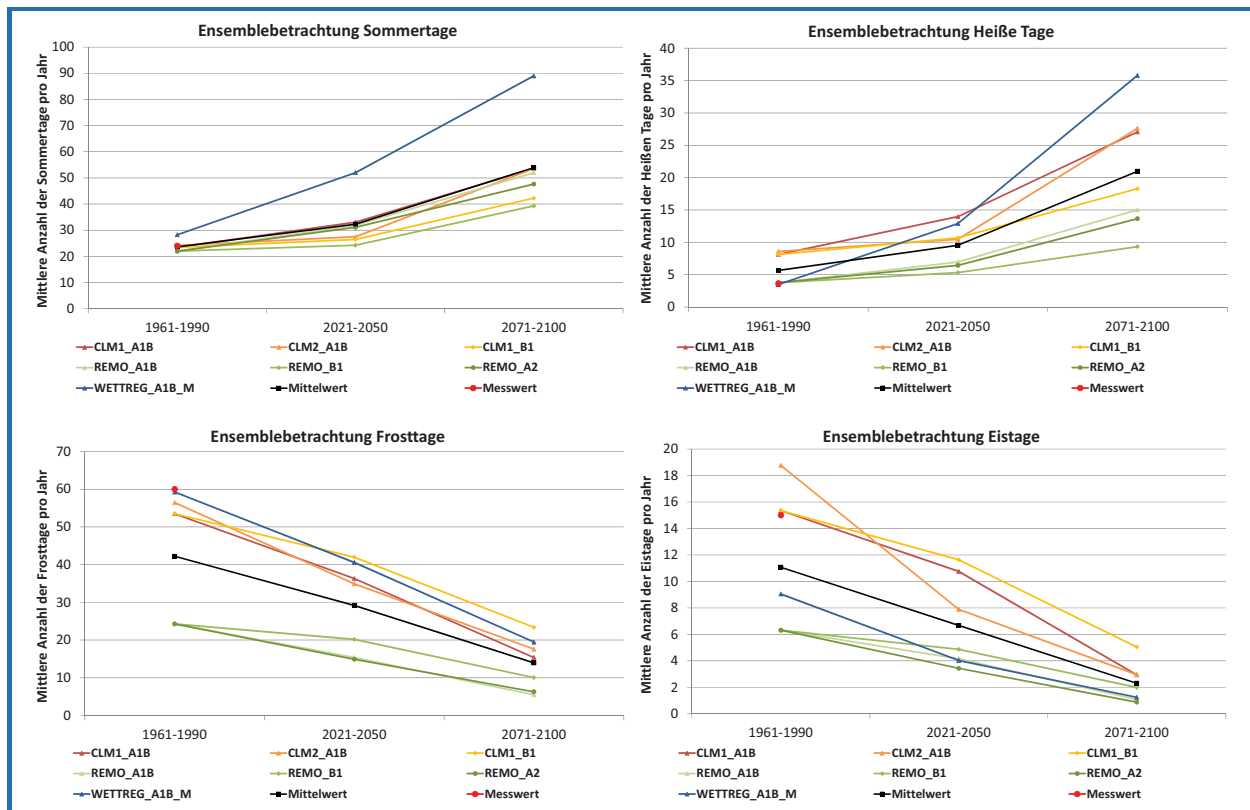


Abbildung 14: Entwicklung der Sommertage (links oben), Heißen Tage (rechts oben), Frosttage (links unten) und Eistage (rechts unten) in der ELR im begrenzten Ensemble für den Referenzzeitraum (1961 – 1990), die Nahe Zukunft (2021 – 2050) und die Ferne Zukunft (2071 – 2100)

3.4 Entwicklung von Hitzeperioden

3.4.1 Kriterien zur Beschreibung von Hitzeperioden

Eine Hitzeperiode, vielfach auch Hitzewelle genannt, bezeichnet einen längeren Zeitraum mit ungewöhnlich hohen Temperaturen. Eine einheitliche Definition für eine Hitzeperiode existiert allerdings nicht, da der Begriff vom Klima einer Region abhängig ist.

Menschen sind an das lokale Klima ihrer Region, d. h. auch an die durchschnittlichen Sommertemperaturen, angepasst. Temperaturen, die Menschen aus einem heißeren Klima als normal betrachten, können in kühleren Breiten bereits als Hitzewelle empfunden werden. Die wahrgenommene Hitze ist außerdem ein Ausdruck der sogenannten gefühlten Temperatur, die neben der gemessenen Lufttemperatur auch von den Windverhältnissen und der Luftfeuchtigkeit abhängt. So ist die gefühlte Temperatur bei Windstille und /oder feuchter Luft höher als bei trockener, bewegter Luft.

Trotz der Schwierigkeiten, eine Hitzeperiode genau zu definieren, werden im Folgenden Kriterien auf Basis von Lufttemperaturen abgeleitet, die geeignet erscheinen, Hitzeperioden und deren zukünftige Entwicklung in der ELR zu beschreiben. Zu diesem Zweck werden zunächst die beiden aus der jüngsten Vergangenheit bekannten extremen Sommer 2003 und 2006 analysiert.

Die Wahrnehmung des besonders heißen Sommers 2003 ist im Wesentlichen auf die lange und extreme Hitzeperiode der ersten Augushälfte zurückzuführen. Zwischen dem 01.08. – 13.08.2003 lagen die Tageshöchsttemperaturen an der Station Herten DWD täglich über 30 °C, während einiger Tage wurden sogar Höchsttemperaturen über 37 °C gemessen (Abbildung 15, links). In dieser Zeit sind die Temperaturen nachts nicht unter 15 °C gesunken. Verstärkend kommt hinzu, dass bereits im Juli eine einwöchige Hitzeperiode vorangegangen ist, in der die Tagesmaxima an 5 Tagen über 30 °C lagen. Außerdem war bereits der gesamte Juni sommerlich warm, und es gab nur eine einzige kühlere Erholungsphase Anfang Juli.

Der Sommer 2003 geht daher nicht nur wegen der extremen Hitzeperiode Anfang August als „Jahrhundertsommer“ in die Geschichte ein, sondern auch aufgrund der mittleren Sommertemperatur (Juni-August) mit $T = 20,7\text{ °C}$, die insgesamt die bislang höchst gemessene Sommertemperatur darstellt (Station Herten DWD). Dieser Wert liegt $3,6\text{ °C}$ über dem Sommermittel von $17,1\text{ °C}$ im Referenzzeitraum 1961 – 1990.

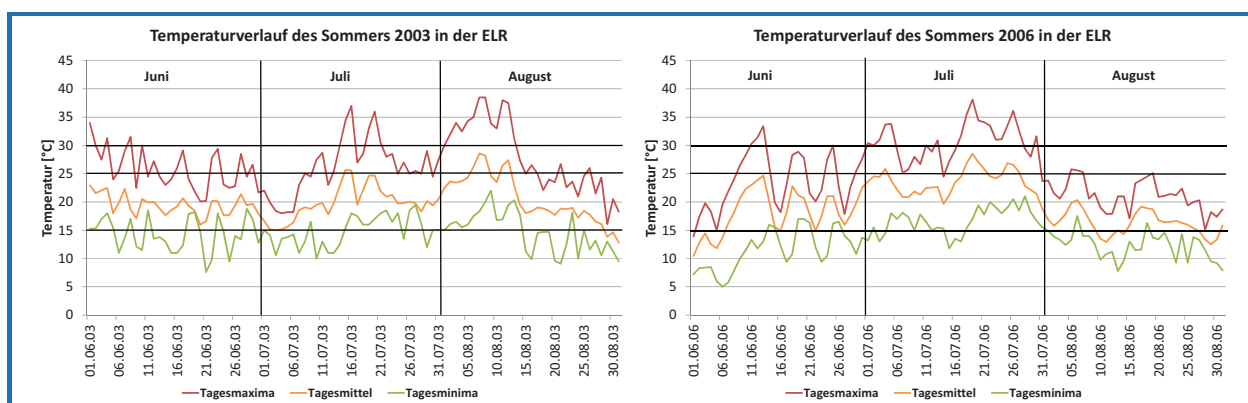


Abbildung 15: Mittlere, minimale und maximale Tagestemperaturen im Sommer 2003 (links) und im Sommer 2006 (rechts) an der Station Herten DWD

Betrachtet man den Temperaturverlauf des Sommers 2006 (Abbildung 15, rechts), lässt sich bereits ein recht warmer Juni 2006 erkennen, während im gesamten August kaum sommerliche Höchsttemperaturen von 25 °C erreicht wurden. Im Juli herrschten hingegen durchweg sehr hohe

Temperaturen vor. Bemerkenswert hier ist die Hitzeperiode in der zweiten Julihälfte, die von den Höchsttemperaturen her gesehen nicht ganz so stark ausgeprägt war wie die Hitzewelle im August 2003, aber trotzdem als extrem zu bezeichnen ist; denn auch die Tiefsttemperaturen lagen in dieser Zeit mit durchschnittlich etwa 18 °C sehr hoch, und die Hitzeperiode dauerte sehr lang an. Der Juli 2006 war in der Summe mit einer Durchschnittstemperatur von 23,9 °C (Station Herten DWD) der bislang heißeste Monat in der ELR.

Die Analyse der beiden Sommer 2003 und 2006 zeigt, dass insbesondere hohe Monatsmitteltemperaturen sowie eine hohe Anzahl an Heißen Tagen mit hohen Tagesmaxima innerhalb eines Monats geeignet sind, um die für den Menschen als unangenehm empfundenen Hitzeperioden zu beschreiben.

Nutzt man die Monatsmitteltemperaturen, so scheinen Werte $T_{\text{Mittel}} \geq 20 \text{ °C}$ ein mögliches sinnvolles Indiz für Hitzeperioden zu sein. Dieses Kriterium ist dann zu wählen, wenn ausschließlich Tagesmittel- oder Monatsmitteltemperaturen zur Verfügung stehen. Die Monatsmitteltemperaturen der Sommermonate Juni, Juli und August in der ELR im Zeitraum 1961 – 2010 sind in Abbildung 16 (links) dargestellt. Hier zeigen sich bezüglich der mittleren Monatstemperaturen in den Monaten Juli 1982, Juli 1994 und vor allem im Juli 2006 die größten Werte.

Deutlicher noch zeigen sich die Hitzeperioden allerdings bei Betrachtung der Heißen Tage pro Monat. Die Anzahl der Heißen Tage pro Monat in der ELR im Zeitraum 1961 – 2010 ist für die Sommermonate Juni, Juli und August in Abbildung 16 (rechts) dargestellt. Hier stehen die beschriebenen Monate August 2003 sowie Juli 2006 ebenso wie der Juli 1994 mit mehr als 10 Heißen Tagen pro Monat deutlich hervor. Das Kriterium „mindestens 10 Heiße Tage pro Monat“ wird daher in dieser Publikation genutzt, um die zukünftige Entwicklung von Hitzeperioden zu beschreiben. Die Verwendung dieses Kriteriums setzt allerdings voraus, dass repräsentative Daten zu den Tagesmaxima der Lufttemperatur zur Verfügung stehen, was im Fall der Modelldaten gegeben ist.

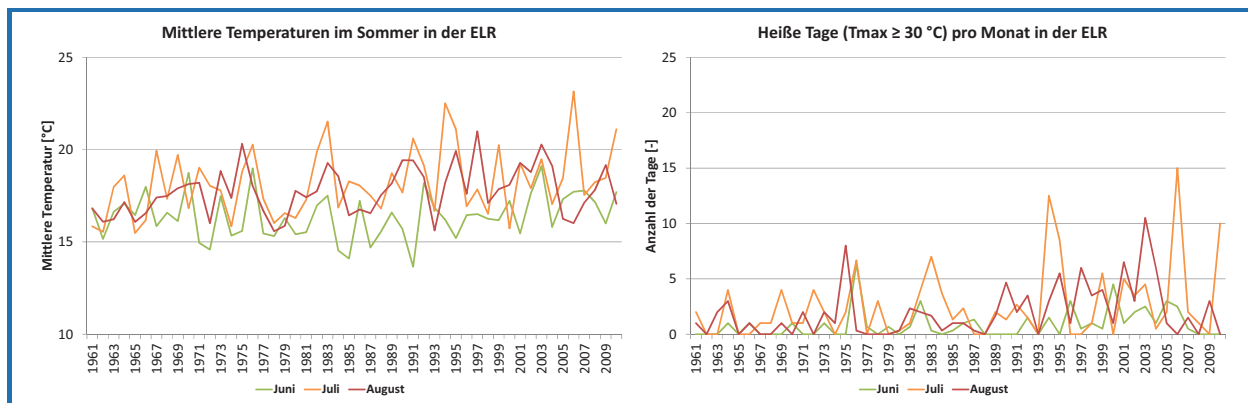


Abbildung 16: Monatsmitteltemperaturen der Sommermonate Juni, Juli und August und Anzahl der Heißen Tage pro Monat in den Messdaten der ELR im Zeitraum 1961 – 2010

3.4.2 Zukünftige Entwicklung der Hitzeperioden in den Modelldaten

In Abbildung 17 ist die Anzahl der Heißen Tage pro Monat für die beiden CLM-Läufe im Referenzzeitraum sowie in der Nahen und Fernen Zukunft dargestellt. Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, führt der Bias in den Temperaturdaten insgesamt zu Überschätzungen der maximalen Tagestemperaturen. Bei der quantitativen Bewertung der Entwicklung von Hitzeperioden sind daher aufgrund des Bias auch an dieser Stelle immer Modelldaten der Zukunft mit Modelldaten der Vergangenheit zu vergleichen.

Abbildung 17 zeigt anschaulich die Zunahme von Heißen Tage pro Monat und somit der Hitzeperioden in der Zukunft. Monate mit mehr als 10 Heißen Tagen, die im Referenzzeitraum gar

nicht (CLM1) oder nur vereinzelt (CLM2) auftreten, sind in der Nahen Zukunft bereits deutlich häufiger und in der Fernen Zukunft sogar eher die Regel als die Ausnahme. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Anzahl der Monate mit mindestens 10 heißen Tagen, die hier als Indiz für Hitzeperioden herangezogen werden.

Allerdings nimmt nicht nur die Anzahl der Monate mit mindestens 10 heißen Tagen zu, sondern auch die Anzahl der heißen Tage pro Monat über diesem Schwellenwert steigt an. So sind bereits in der Nahen Zukunft Monate mit mehr als 15 heißen Tagen, in der Fernen Zukunft sogar Monate mit 20 und mehr heißen Tagen zu erwarten. Dies sind deutliche Hinweise darauf, dass Hitzeperioden in Zukunft häufiger und gleichzeitig intensiver auftreten werden.

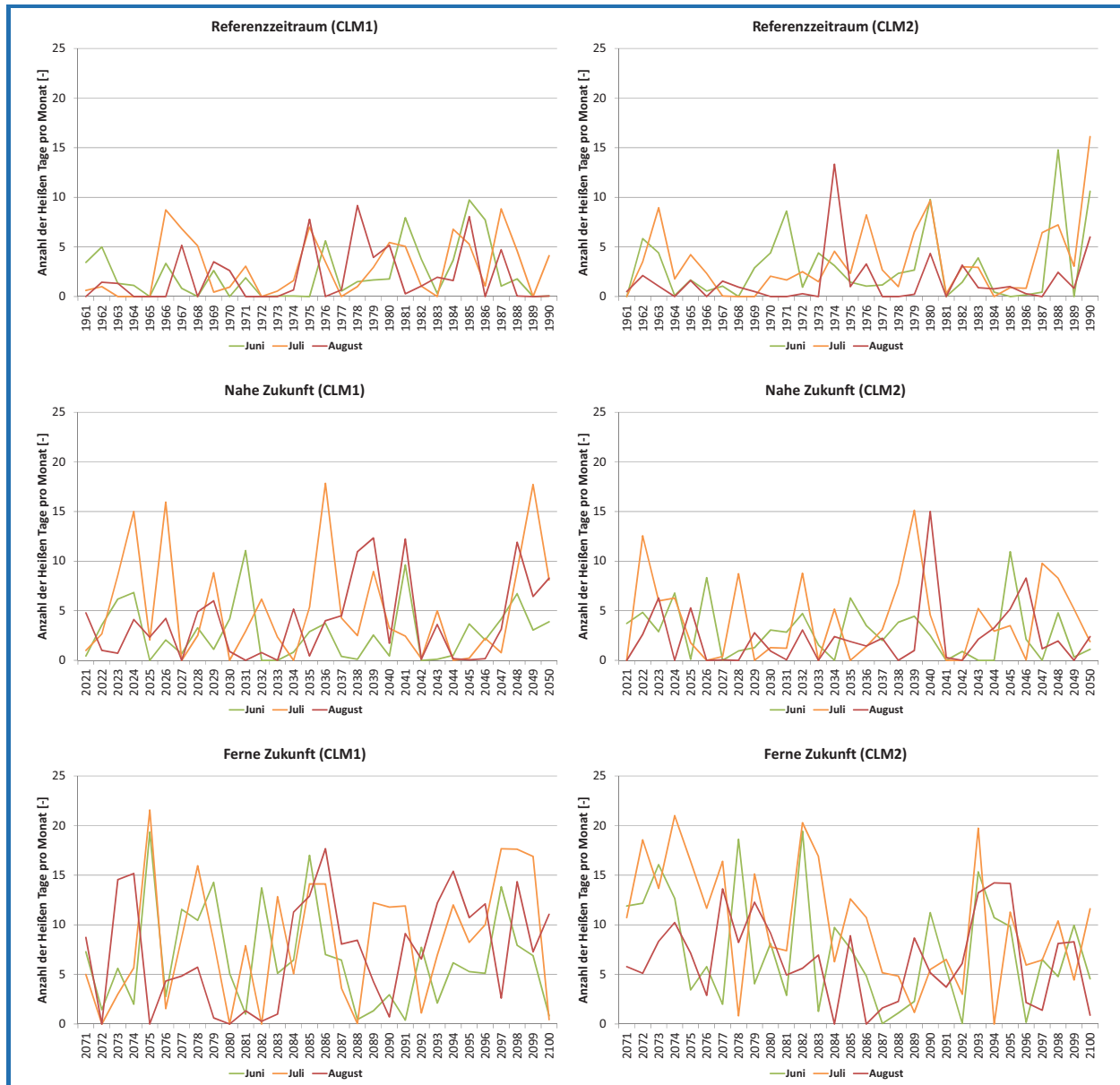


Abbildung 17: Vergleich der Heißen Tage pro Monat in den Sommermonaten Juni, Juli und August im Regionalen Klimamodell CLM (links: CLM1, rechts: CLM2) in der ELR für den Referenzzeitraum (1961 – 1990), die Nahe Zukunft (2021 – 2050) und die Ferne Zukunft (2071 – 2100)

Tabelle 6: Anzahl der Monate mit mindestens 10 heißen Tagen im Regionalen Klimamodell CLM für die ELR im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100)

Zeitraum	Anzahl der Monate mit mindestens 10 heißen Tagen CLM1	Anzahl der Monate mit mindestens 10 heißen Tagen CLM2
1961 – 1990	0	4
2021 – 2050	9	4
2071 – 2100	31	31

4 Parameter Niederschlag

4.1 Entwicklung der Hauptwerte (Jahres- und Monatssummen)

Die mittleren Jahresniederschlagssummen zeigen zunächst einmal an, wie sich das generelle Niederschlagsdargebot in der Vergangenheit entwickelt hat, bzw. in der Zukunft entwickeln wird. Dieser Parameter sagt noch nichts über unterschiedliche jahreszeitliche Ausprägungen oder die Entwicklung von Starkregen aus. Hierzu folgen im Anschluss gesonderte Untersuchungen.

Neben den Auswertungen für die 14 berücksichtigten Stationen der Emscher-Lippe-Region werden in Abbildung 18 (links) auch die Ergebnisse der ExUS-Studie (Auswertungen der letzten Dekade nur bis 2008) für ganz Nordrhein-Westfalen gegenübergestellt. Grundsätzlich ist die qualitative langjährige Entwicklung der Jahresniederschlagssummen in NRW und in der ELR über den gesamten Zeitraum vergleichbar. Lediglich die absoluten Werte unterscheiden sich, da die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme in der ELR kleiner als im Landesdurchschnitt ist. Sowohl in NRW, als auch in der ELR ist die Gesamtentwicklung grundsätzlich positiv, und in beiden Studien sticht die Dekade 1971 – 1980 als besonders trockene Dekade heraus. Die Steigungen der Trendgeraden liegen in der ELR nach dem Verfahren der Linearen Regression an 90 % der Stationen zwischen 0,4 – 2,6 mm/a, dies entspricht für den Zeitraum 1951 – 2010 einer Zunahme von 24 mm – 156 mm an den einzelnen Stationen.

Aufgrund der trockenen Dekade verbietet es sich, Trendanalysen über kürzere Zeiträume durchzuführen, die in den 1970er Jahren beginnen. Bei Trendanalysen, bei denen diese trockene Dekade zu Beginn der Zeitreihe liegt, ergeben sich sehr starke, signifikant positive Trends. Diese sind aber nicht alleine auf generelle Klimaveränderungen, sondern primär auf die Singularität dieser Dekade zurückzuführen.

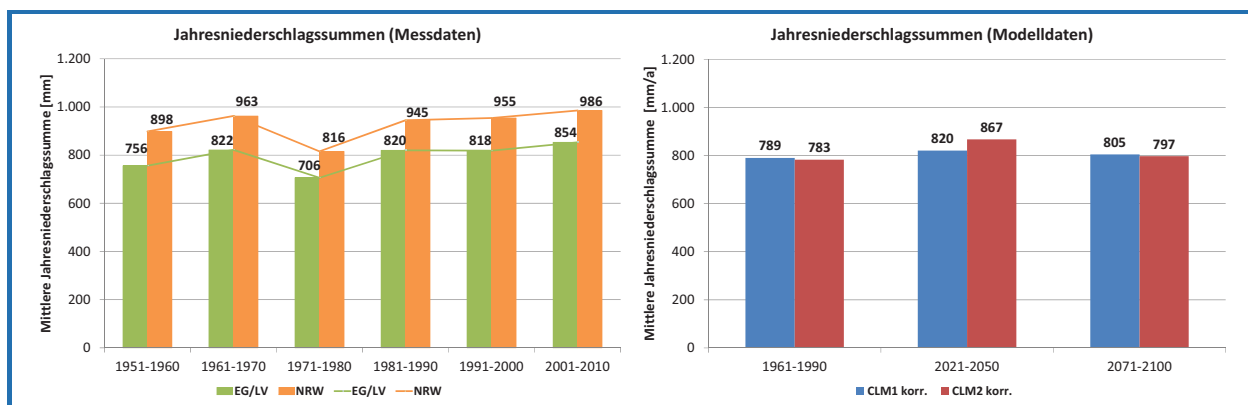


Abbildung 18: Entwicklung der Jahresniederschlagssummen; links: in den Messdaten (ELR und NRW) im Zeitraum 1951 – 2010, rechts: in den CLM-Modelldaten (nur ELR) im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100)

Die Auswertungen der CLM-Modelldaten (Abbildung 18, rechts) deuten aber darauf hin, dass sich der in den Messdaten aufgezeigte Trend in Zukunft nicht im gleichen Maße fortsetzen wird. Die Messdaten zeigen, dass die in den Modelldaten projizierte Zunahme in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990) bereits in der letzten Dekade (2001 – 2010) in etwa erreicht wurde. In der Fernen Zukunft wird sogar wieder ein Niveau erwartet, das in etwa den Jahresniederschlagssummen im Referenzzeitraum entspricht. Wie die Abbildung 19 zeigt, ist dieses Phänomen der nahezu gleichbleibenden Jahresniederschlagssummen eine Besonderheit der mittleren Breiten in Europa. Die gegenläufigen Entwicklungen in Skandinavien (Zunahmen) und dem Mittelmeerraum (Abnahmen) gleichen sich in unseren Breiten nahezu aus. Auch die Betrachtung des

begrenzten Ensembles aus sieben Modellläufen (Abbildung 20) zeigt, dass die Ergebnisse nahezu unabhängig vom verwendeten Regionalen Klimamodell und Szenario sind.

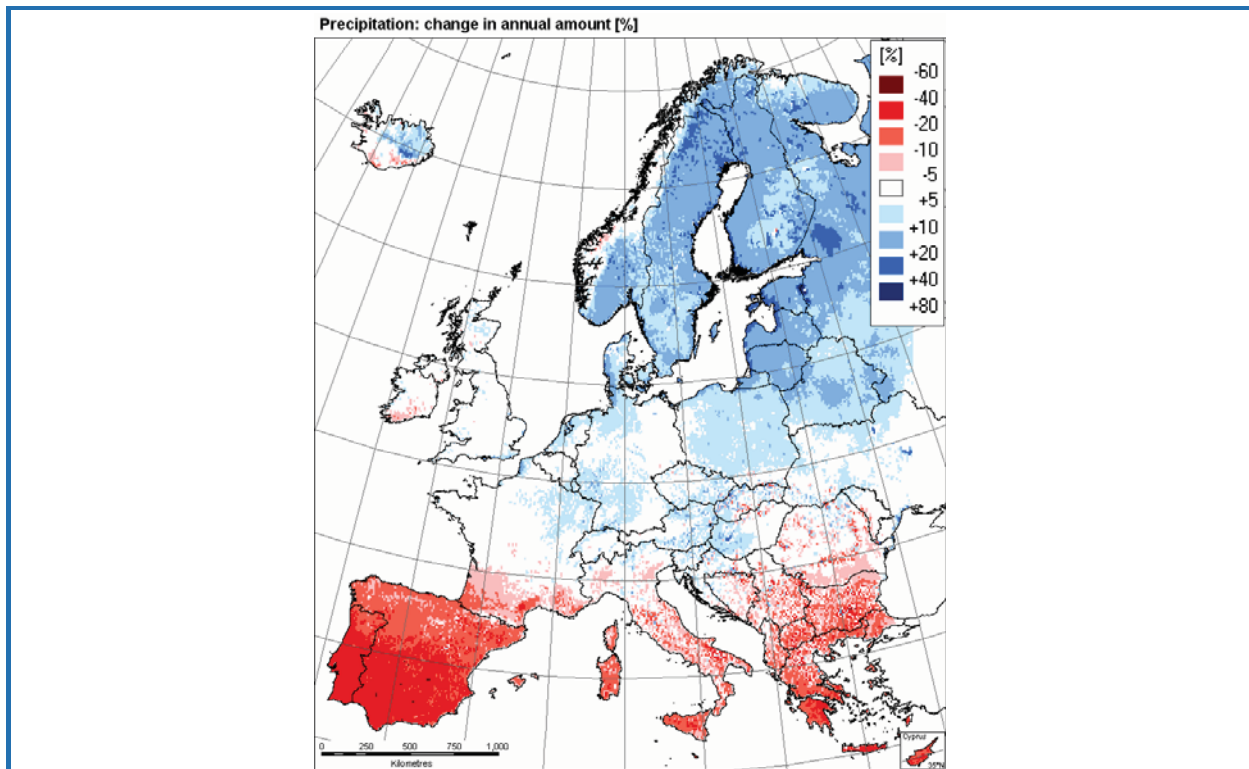


Abbildung 19: Änderungen der durchschnittlichen Jahresniederschlagssummen in Europa bis 2100 für das SRES-Szenario A2 (KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN, 2007)

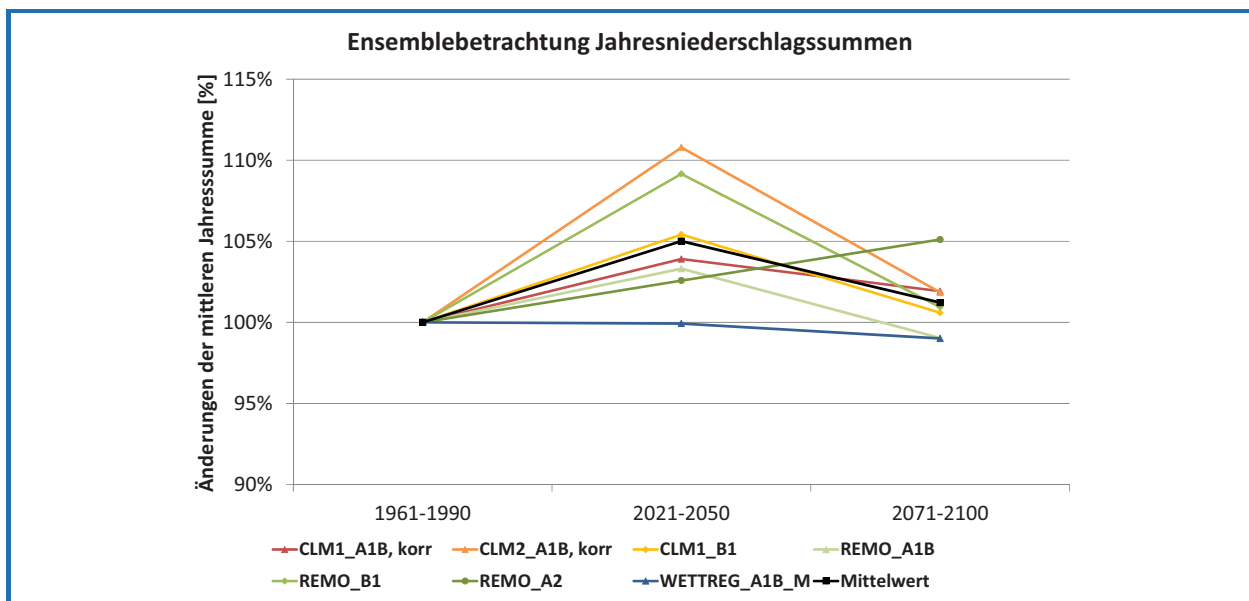


Abbildung 20: Entwicklung der mittleren Jahresniederschlagssummen im begrenzten Ensemble für die Nahe Zukunft (2021 – 2050) und für die Ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990)

Betrachtet man die Veränderungen der gemessenen Niederschlagssummen in den einzelnen Kalendermonaten (Abbildung 21, links) so zeigt sich, dass die Zunahmen der Jahresniederschlagssummen in der Vergangenheit im Wesentlichen auf die Zunahmen der Niederschläge im hydrologischen Winterhalbjahr (November – April) zurückzuführen sind. In Abbildung 21 (links)

werden die Veränderungen je Kalendermonat im Zeitraum 1981 – 2010 vs. 1951 – 1980 gegenübergestellt. Im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) gleichen sich dagegen die Rückgänge in den Monaten Juli und August und die Zunahmen in den Monaten September und Oktober nahezu aus, sodass im Sommerhalbjahr nur eine sehr geringe Zunahme der Niederschläge festzustellen ist. Trotz der Rückgänge in den Monaten Juli und August handelt es sich im langjährigen statistischen Mittel beim Sommerquartal (Juni – August) immer noch um das niederschlagreichste Quartal des Jahres. Die Mittelwerte sagen allerdings nichts über einzelne trockene Perioden und deren Veränderungen aus. Auf die Entwicklung von Trockentagen und Trockenperioden wird im Kapitel 4.3 gesondert eingegangen.

In den Klimamolldaten zeigen sich in der Nahen Zukunft in beiden Läufen CLM1 und CLM2 keine wesentlichen Veränderungen. In Abbildung 21 (rechts) werden exemplarisch die Veränderungen im CLM1-Datensatz dargestellt. Erst in der Fernen Zukunft ist in beiden Läufen ein signifikanter Rückgang der Monatsniederschlagssummen im hydrologischen Sommerhalbjahr, insbesondere in den drei Sommermonaten Juni – August festzustellen.

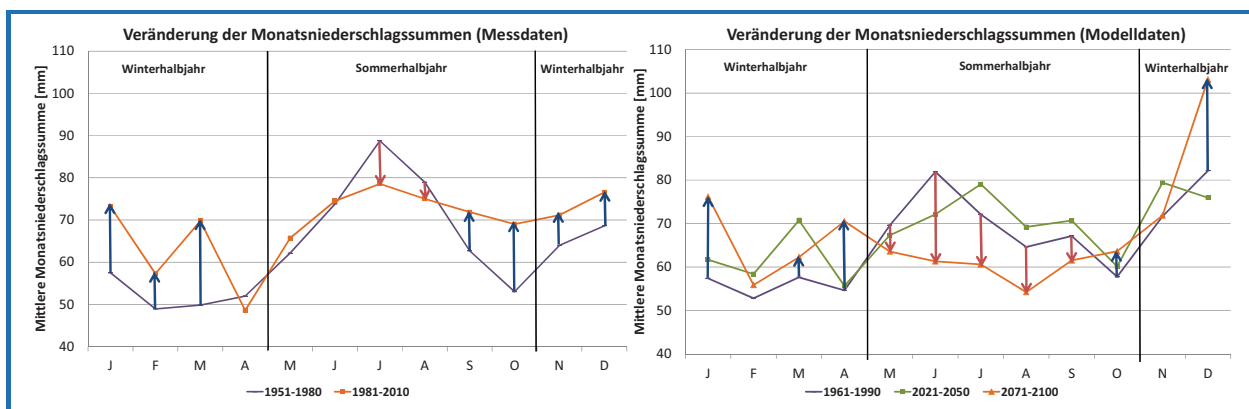


Abbildung 21: Änderungen der mittleren Monatsniederschlagssummen in der ELR, links: in Messdaten 1981 – 2010 vs. 1951 – 1980, rechts: in CLM1-Molldaten 2021 – 2050 vs. 1961 – 1990 (ohne Pfeile) sowie 2071 – 2100 vs. 1961 – 1990 (mit Pfeilen)

Auch die Auswertungen für das begrenzte Ensemble aus sieben Molldrechnungen zeigen grundsätzlich ähnliche Entwicklungen in der Nahen und Fernen Zukunft (Abbildung 22) in allen Modellen, auch wenn die Bandbreite der sieben Molldrechnungen in den einzelnen Kalendermonaten zum Teil sehr groß ist.

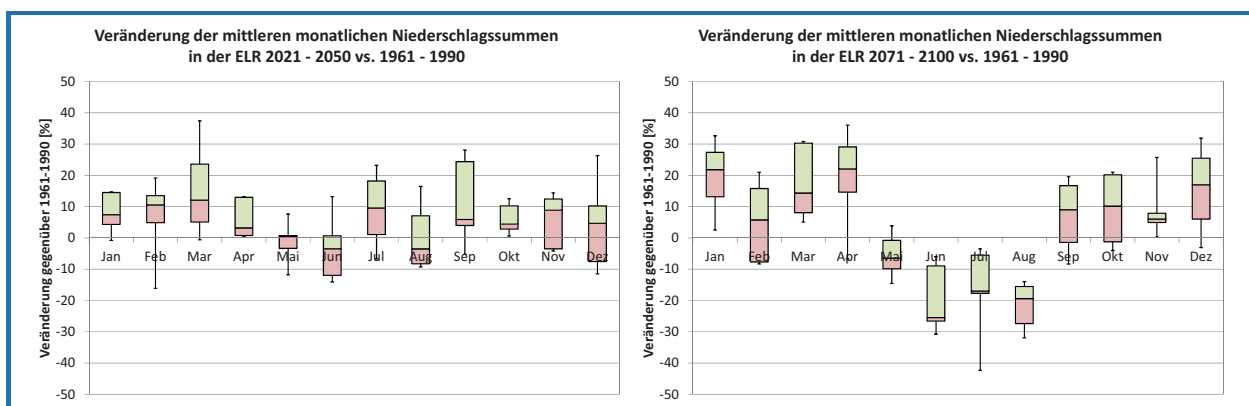


Abbildung 22: Veränderung der mittleren Monatsniederschlagssummen in der ELR im begrenzten Ensemble aus sieben Molldrechnungen; links: 2021 – 2050 vs. 1961 – 1990; rechts: 2071 – 2100 vs. 1961 – 1990; die Boxen geben die Bandbreite an, in der fünf der sieben Molldrechnungen liegen; die Grenze zwischen den grünen und roten Boxen entspricht dem Median; die „Antennen“ spiegeln das Maximum und das Minimum des Ensembles wider

4.2 Entwicklung von Tagessummen und Starkregen kurzer Dauerstufen

Bei den Untersuchungen zur Entwicklung von Tagesniederschlagssummen und Starkregen kurzer Dauerstufen wurden verschiedene, möglichst anschauliche Analysemethoden gewählt. Bei keinem anderen Parameter werden in den Medien und in Publikationen die möglichen Veränderungen aufgrund des Klimawandels so drastisch und oft leider auch verzerrt dargestellt wie bei den Starkregen. Dies mag einerseits auf die direkte Betroffenheit (überflutete Keller, Hochwasserschäden) zurückzuführen sein, andererseits erschwert oftmals die Komplexität der Starkregenanalysen eine einfache und dennoch richtige Darstellung. Hinzu kommt, dass unter Starkregen je nach Anwendungsfall unterschiedliche Vorstellungen hinsichtlich der Intensität bzw. Wiederkehrzeit eines Starkregens bestehen.

In der Meteorologie versteht man unter Starkniederschlägen Regenmengen, die im Mittel vor Ort nur etwa an jedem 100. Tag überschritten werden (DWD, 2011), d. h. 3 – 4 mal pro Jahr an einem Ort auftreten. In der Siedlungswasserwirtschaft werden dagegen z. B. beim Überstaunachweis und beim Überflutungsnachweis eines Kanalnetzes Bemessungsregen maßgebend, die eine Wiederkehrzeit von $T = 1 \text{ a} - 10 \text{ a}$ (Überstaunachweis) bzw. $T = 10 \text{ a} - 50 \text{ a}$ (Überflutungsnachweis) besitzen (DWA, 2006). Es wurde daher ein besonderer Wert darauf gelegt, die generelle Aussage „Starkregen nehmen zu!“ differenziert zu betrachten und auf eine breite Datenbasis zu stellen.

Anders als der zuvor betrachtete Parameter Lufttemperatur (Kapitel 3) und die längeren Bilanzierungszeiträume beim Niederschlag (Kapitel 4.1) verhalten und entwickeln sich Starkregen sowohl im Raum als auch über die Zeit wesentlich heterogener. Gerade bei den kleinräumigen konvektiven Starkregenereignissen im hydrologischen Sommerhalbjahr spielt die Zufallskomponente, ob ein Starkregen über das Messgerät hinwegzieht (oder nicht) eine wesentliche Rolle. Trendentwicklungen aufgrund dieser Zufallskomponente bzw. der natürlichen Variabilität überlagern somit die Entwicklungen aufgrund des Klimawandels und sind nur schwer voneinander zu trennen. In den nachfolgenden Unterkapiteln wird daher differenziert und aus verschiedenen Blickwinkeln auf Methoden und Ergebnisse der Starkregenanalysen eingegangen.

Sämtliche Untersuchungen bei den Messdaten basieren auf hoch aufgelösten kontinuierlichen Niederschlagszeitreihen mit zeitlichen Auflösungen zwischen $\Delta t = 1 - 5$ Minuten. Um Effekte aufgrund der sich geänderten Messtechnik in den letzten 60 Jahren auf das Trendverhalten kurzer Dauerstufen ($D < 60$ Minuten) auszuschließen (VUERICH et al., 2009; VUERICH et al., 2009a; QUIRMBACH et al., 2013), werden im Wesentlichen die Ergebnisse für die Dauerstufe $D = 60$ Minuten dargestellt. Die Dauerstufe $D = 60$ Minuten ist repräsentativ für kleinräumige konvektive Starkregenereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten. Darüber hinaus werden die Ergebnisse für die Dauerstufe $D = 24$ Stunden (Tagesniederschlagssummen) intensiver beschrieben. Die Dauerstufe $D = 24$ Stunden ist repräsentativ für großräumig auftretende advective, aber auch für seltene konvektive Niederschlagsereignisse mit hohen Niederschlagssummen. Außerdem lässt die Betrachtung der Dauerstufe $D = 24$ Stunden einen Vergleich mit anderen Regionen zu, in denen oft keine so hohe räumliche Dichte an kontinuierlich aufzeichnenden Messgeräten vorliegt, sondern primär nur Tagesniederschlagssummen gemessen werden.

Bei den CLM-Modelldaten werden dagegen nur Tagesniederschlagssummen ($D = 24$ Stunden) betrachtet, da die Stundensummen des Regionalen Klimamodells CLM das natürliche Niederschlagsverhalten nicht realitätsnah abbilden und das Downscaling (TESSENDORF et al., 2012) nur für drei kleine Einzugsgebiete durchgeführt wurde. Die Analysen der Messdaten zeigen aber, dass die Tagesniederschlagssummen bis auf wenige Ausnahmen eine grundsätzlich ähnliche Trendentwicklung wie die kleineren Dauerstufen ($D < 1 \text{ d}$) besitzen. Es wird daher bei den Modelldaten die Annahme getroffen, dass dies auch in Zukunft gilt. Streng mathematisch gesehen ist dies natürlich nicht korrekt, da instationären Prozessen ein stationäres Verhältnis untereinander unterstellt wird. Rückschlüsse auf kleinere Dauerstufen in der Zukunft können daher nur eine

Abschätzung darstellen. Die Alternative wäre aber keine Betrachtung der Zukunft, was aus Sicht der Autoren als fahrlässig angesehen wird.

In einigen Abbildungen werden Trendgeraden, die nach dem Verfahren der Linearen Regression ermittelt wurden, dargestellt. Sie sollen eine anschauliche Darstellung des Trends ermöglichen. Die Bestimmung der Signifikanz des Trends über den t-Test ist aufgrund der nicht vorhandenen Normalverteilung der Stichproben aber nicht möglich. Daher wird darauf verzichtet, diskrete Werte zur Steigung der Geraden anzugeben.

Stattdessen wurde die Signifikanz der Veränderungen anhand des Mann-Kendall-Tests (HIPEL et al., 1994; DOUGLAS et al., 2000) untersucht. Der Mann-Kendall-Test ist verteilungsunabhängig, er macht jedoch keine Aussage über die Linearität und die Größe des Trends. Als Ergebnis erhält man eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Trend in den Daten enthalten ist (Signifikanzmaß). Der Mann-Kendall-Test reagiert allerdings recht empfindlich insbesondere auf besonders hohe bzw. niedrige Jahre zu Beginn oder am Ende einer Zeitreihe. In den dargestellten Ergebnissen dieser Publikation (1951 – 2010) und in der ExUS-Studie für NRW (1951 – 2008) steht zu Beginn der Zeitreihe ein Zeitraum mit relativ vielen Niederschlagsereignissen und relativ hohen Niederschlagssummen im Vergleich zum Zeitraum 1971 – 1990 in der Mitte der Zeitreihe. Die Änderungen / Zunahmen der letzten 20 Jahre führen daher insgesamt nur zu mittleren bis hohen Signifikanzmaßen.

In weitergehenden Untersuchungen an Zeitreihen in der ELR, die zum Teil bis ins Jahr 1931 zurückgehen, wurden dagegen überwiegend hohe bis sehr hohe Signifikanzmaße festgestellt. Im Zeitraum 1931 – 1950, also zu Beginn der Zeitreihe, treten ähnlich wie im Zeitraum 1971 – 1990 unterdurchschnittlich viele Starkregen auf. Dies führt zu einer Verstärkung der Trends und zu den höheren Signifikanzmaßen. Aufgrund des 2. Weltkrieges und der Nachkriegszeit sind Messdaten aus der Dekade 1941 – 1950 aber grundsätzlich mit Vorsicht zu betrachten. Außerdem stehen nicht an allen 14 Stationen die langen Zeitreihen ab 1931 zur Verfügung. Es werden daher in dieser Publikation keine Details zu den Auswertungen ab 1931 dargestellt.

4.2.1 Entwicklung der Auftretenshäufigkeit von Starkregen auf Basis der partiellen Niederschlagsserien

Bei der „Entwicklung der Auftretenshäufigkeit von Starkregen auf Basis der partiellen Niederschlagsserien“ wird untersucht, ob die **Anzahl an Starkregen** im Zeitraum 1951 – 2010 zugenommen hat. Hierzu werden für jede Dauerstufe partielle Serien analysiert, wie sie auch bei der Niederschlagsstatistik nach dem DWA-Arbeitsblatt DWA-A 531 (DWA, 2012) verwendet werden. Im Durchschnitt treten in den partiellen Serien pro Jahr und Station 2,7 Starkregenereignisse auf. Bei einer Zunahme von Starkregen müssten in den frühen Jahren der Zeitreihe unterdurchschnittlich viele Ereignisse und in den späten Jahren überdurchschnittlich viele Starkregen aufgetreten sein. Bei einer Abnahme entsprechend umgekehrt. Es werden daher nach Dauerstufen getrennt die Starkregenereignisse der partiellen Serien der 14 Stationen eines jedes Kalenderjahres gezählt und anschließend durch die Anzahl der Stationen (14) geteilt. In Abbildung 23 werden exemplarisch die Ergebnisse für die Dauerstufen $D = 60$ Minuten und $D = 24$ Stunden graphisch dargestellt.

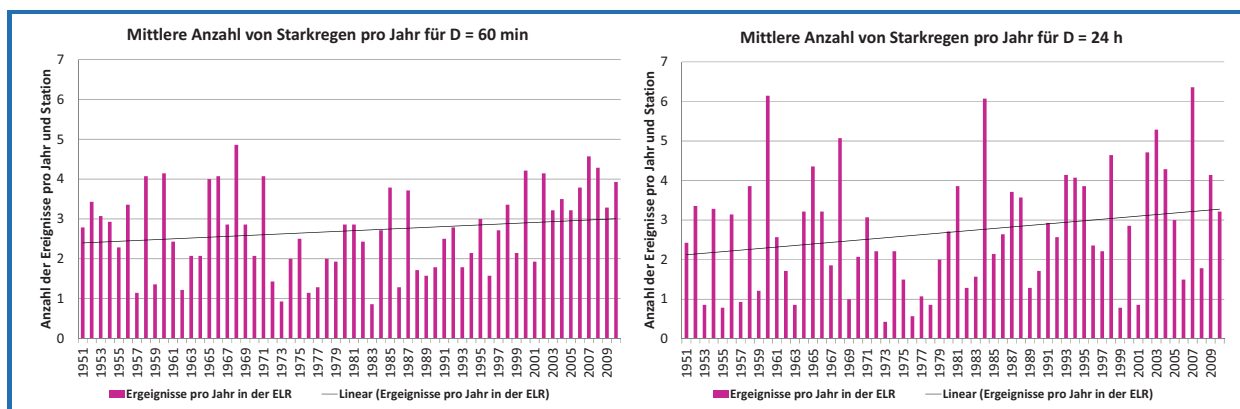


Abbildung 23: Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr in der ELR im Zeitraum 1951 – 2010, Messdaten; links: D = 60 min (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von N = 9,5 – 10,9 mm in Abhängigkeit von der Station); rechts: D = 24 h (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von N = 21,4 – 23,7 mm in Abhängigkeit von der Station)

Im Gesamtzeitraum 1951 – 2010 nimmt die Anzahl der Starkregenereignisse mit Niederschlagshöhen über dem Schwellenwert der partiellen Serie zu (positives Trendverhalten). Dieser Effekt wird insbesondere dadurch hervorgerufen, dass in den späten Jahren (seit 1997) eine lange Periode mit überdurchschnittlich vielen Starkregen einer zuvor langen Periode (1971 – 1990) mit unterdurchschnittlich vielen Starkregen folgt. Dies spiegeln auch die Werte der Tabelle 7 wider. In den ersten 20 Jahren wird in etwa der Mittelwert von 2,7 Ereignissen pro Jahr getroffen, in den Jahren 1971 – 1990 liegt dann zunächst die mittlere Starkregenanzahl weit unter dem Mittelwert, bis dann in den letzten beiden Dekaden der Mittelwert in fast dem gleichen Maße überschritten wird. Entsprechend ist das Signifikanzmaß nach dem Mann-Kendall-Test für die Zunahmen mit 75 % – 95 % (je nach Dauerstufe) relativ hoch. In den Auswertungen für den Zeitraum 1931 – 2010 lag das Signifikanzmaß sogar zwischen 85 % – 99,5 %.

Tabelle 7: Auftretenshäufigkeit der Starkregenereignisse pro Jahr in der ELR, gemittelt über die Zeiträume 1951 – 1970, 1971 – 1990 und 1991 – 2010, Messdaten

Dauerstufe	I: 1951-1970 [Anz./a]	II: 1971-1990 [Anz./a]	III: 1991-2010 [Anz./a]	Δ (II – I) [%]	Δ (III – I) [%]
60 min	2,85	2,14	3,10	-25%	9%
2 h	2,86	2,15	3,09	-25%	8%
4 h	2,87	2,10	3,13	-27%	9%
6 h	2,88	2,04	3,18	-29%	10%
12 h	2,59	2,25	3,26	-13%	26%
24 h	2,60	2,23	3,28	-14%	26%

4.2.2 Entwicklung der Niederschlagshöhen von Starkregen auf Basis der jährlichen Niederschlagsserien

Bei der „Entwicklung der Niederschlagshöhen von Starkregen auf Basis der jährlichen Niederschlagsserien“ wird untersucht, ob die **Niederschlagshöhe von Starkregen** im Zeitraum 1951 –

2010 zugenommen hat. Hierzu werden nur die Jahreshöchstwerte (jährliche Serie) betrachtet. Es werden getrennt für jede Dauerstufe die Jahreshöchstwerte der jährlichen Serien aller untersuchten Stationen eines jedes Kalenderjahres gezählt und durch die Anzahl der Stationen (14) geteilt. In Abbildung 24 werden exemplarisch die Ergebnisse für die Dauerstufen D = 60 Minuten und D = 24 Stunden graphisch dargestellt.

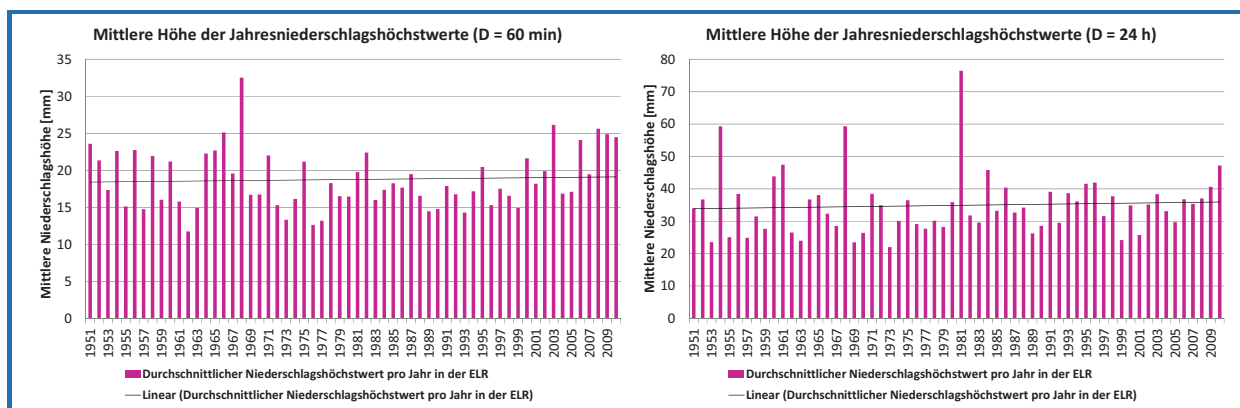


Abbildung 24: Mittlere Höhe der Jahresniederschlagshöchstwerte pro Jahr in der ELR im Zeitraum 1951 – 2010, Messdaten; links: D = 60 min; rechts: D = 24 h

Im Gesamtzeitraum 1951 – 2010 nehmen die Niederschlagshöhen von Starkregen auf Basis der jährlichen Niederschlagsserien nur geringfügig zu (leicht positives Trendverhalten, Abbildung 24). Die mittleren Jahresniederschlagshöchstwerte über die drei 20 a - Zeiträume (Tabelle 8) zeigen quasi keine Veränderungen auf. Das Signifikanzmaß nach dem Mann-Kendall-Test variiert relativ stark in Abhängigkeit von der jeweiligen Dauerstufe. Während bei der Dauerstufe D = 60 Minuten nur ein Signifikanzmaß von ca. 50 % vorliegt, steigt dieses mit größer werdender Dauerstufe stetig auf 90 % für die Dauerstufe D = 24 Stunden an. Die Untersuchungen der ExUS-Studie, die mit einer ähnlichen, etwas abgewandelten Methodik durchgeführt wurden, zeigen für NRW ähnliche Ergebnisse. Lediglich die Untersuchungen in der ELR mit Zeitreihen, die bis ins Jahr 1931 zurückreichen, zeigen ein stark positives Trendverhalten mit einem Signifikanzmaß über 85 %.

Tabelle 8: Entwicklung der mittleren Jahresniederschlagshöchstwerte in der ELR; Vergleich der Zeiträume 1951 – 1970, 1971 – 1990 und 1991 – 2010, Messdaten

Dauerstufe	I: 1951-1970 [mm]	II: 1971-1990 [mm]	III: 1991-2010 [mm]	II / I [%]	III / I [%]
60 min	19,7	17,1	19,5	-13%	-1%
2 h	23,2	19,5	22,9	-16%	-1%
4 h	26,4	22,9	26,8	-13%	2%
6 h	28,7	26,1	29,1	-9%	1%
12 h	33,8	32,1	34,7	-5%	3%
24 h	34,4	34,6	35,7	1%	4%

4.2.3 Schwellenwertbetrachtungen von Tagesniederschlagssummen

Bei dieser Analyse wird zunächst anhand der Messdaten untersucht, wie oft eine Tagesniederschlagssumme über verschiedenen Schwellenwerten an einer der 14 untersuchten Stationen aufgetreten ist. Die Schwellenwerte und die Wiederkehrzeiten entsprechend der durchgeführten Niederschlagstatistiken an diesen Stationen werden in Tabelle 9 zusammengefasst. Bei den Wiederkehrzeiten wird dabei zusätzlich zwischen den zehn Emscher- und westlichen Lippestationen (ohne Klammern) und den vier östlichen Lippestationen (in Klammern) unterschieden, da an den östlichen Stationen die Starkregen etwas geringer ausfallen und so zu größeren Wiederkehrzeiten führen. Zudem sind bei den angegebenen Werten Ausreißer an einzelnen Stationen nicht berücksichtigt worden (die Wiederkehrzeiten gelten für ca. 80 % der Stationen).

Tabelle 9: Untersuchte Schwellenwerte und ihre Wiederkehrzeiten in der ELR

Schwellenwert	Wiederkehrzeit
$N \geq 20 \text{ mm/d}$	$T < 0,5 \text{ a}$ (ca. 3-4 mal pro Jahr)
$N \geq 30 \text{ mm/d}$	(0,5 a) $0,5 \text{ a} \leq T \leq 1 \text{ a}$ (1 a)
$N \geq 40 \text{ mm/d}$	(1 a) $1 \text{ a} \leq T \leq 2 \text{ a}$ (3 a)
$N \geq 50 \text{ mm/d}$	(5 a) $3 \text{ a} \leq T \leq 5 \text{ a}$ (10 a)
$N \geq 60 \text{ mm/d}$	(20 a) $5 \text{ a} \leq T \leq 15 \text{ a}$ (30 a)
$N \geq 70 \text{ mm/d}$	(50 a) $20 \text{ a} \leq T \leq 30 \text{ a}$ (100 a)

Da Starkregen über hohen Schwellenwerten nur sehr selten auftreten, erfolgt keine Auswertung einzelner Jahre, sondern von Dekaden. In Tabelle 10 wird die mittlere Anzahl der Starkregentage in den einzelnen Dekaden pro Station dargestellt, d. h. die absolute Anzahl der Starkregentage an allen Stationen wird jeweils durch die Anzahl der Stationen (14) geteilt. In Abbildung 25 werden jeweils zwei Dekaden zusammengefasst und die Entwicklung im Zeitraum 1951 – 2010 graphisch dargestellt.

Tabelle 10: Anzahl von Starkregentagen über Schwellenwerten in den Messdaten der ELR je Dekade und Station im Zeitraum 1951 – 2010

Dekade	$N \geq 20 \text{ mm/d}$	$N \geq 30 \text{ mm/d}$	$N \geq 40 \text{ mm/d}$	$N \geq 50 \text{ mm/d}$	$N \geq 60 \text{ mm/d}$	$N \geq 70 \text{ mm/d}$
1951 – 1960	39	9	3,0	1,1	0,6	0,4
1961 – 1970	38	9	2,8	1,4	0,6	0,3
1971 – 1980	27	6	2,1	0,5	0,1	0,0
1981 – 1990	35	8	2,4	1,4	1,2	1,0
1991 – 2000	46	13	3,6	0,9	0,2	0,0
2001 – 2010	49	13	3,1	1,2	0,3	0,2

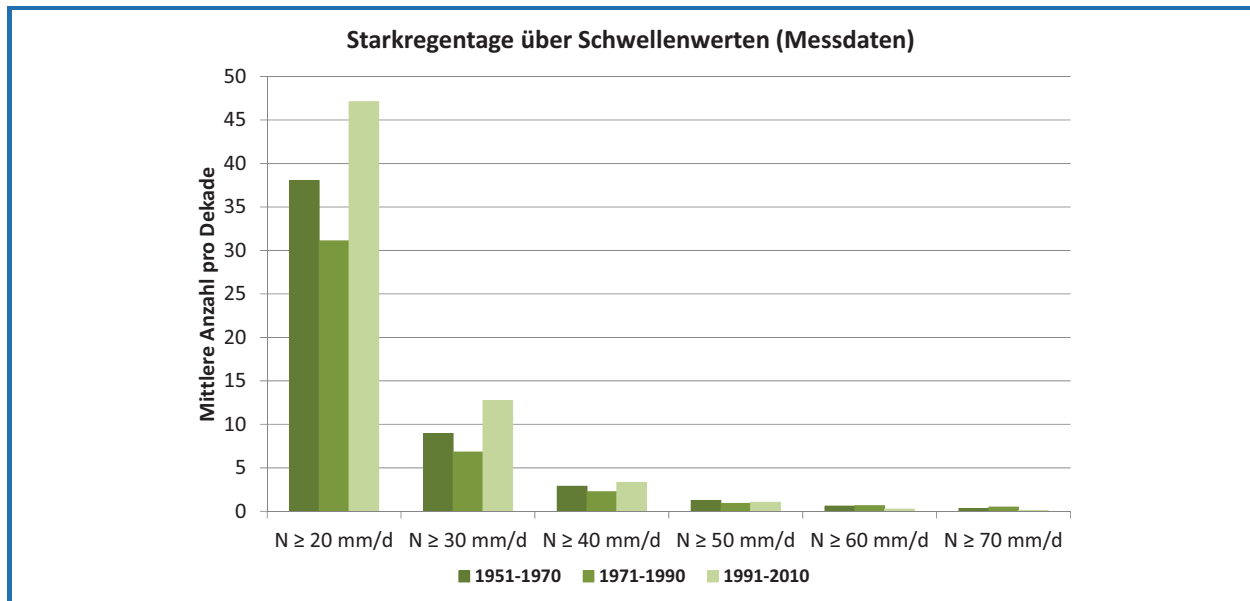


Abbildung 25: Anzahl von Starkregentagen über Schwellenwerten in den Messdaten der ELR je Station und Dekade in den Zeiträumen 1951 – 1970, 1971 – 1990 und 1991 – 2010

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass bei den niedrigen Schwellenwerten $N \geq 20$ mm/d und $N \geq 30$ mm/d, dies entspricht in etwa Starkregentagen mit Wiederkehrzeiten $T \leq 1$ a, die Anzahl der Starkregentage in den beiden letzten Dekaden überdurchschnittlich hoch war. Auch bei $N \geq 40$ mm/d ($T \approx 2$ a) ist noch eine Zunahme zu erkennen. Bei selteneren Starkregenereignissen (höheren Schwellenwerten) ist dagegen keine Zunahme nachweisbar.

Die Zunahme von Starkregen, die bereits in den Messdaten erkennbar ist, findet sich auch in den Klimamodelldaten und setzt sich in der Zukunft fort. Anders als in den Messdaten, in denen nur die Starkregen in den kleinen Klassen (Klassen bis zu $N \geq 40$ mm/d) mit den kleinen Wiederkehrzeiten bis zu $T \approx 2$ a zugenommen haben, nehmen in den Modelldaten auch die mittleren Starkregen zu (Abbildung 26, Tabelle 11). In der Nahen Zukunft (2021 – 2050) steigt die Anzahl der Ereignisse in der Klasse $N \geq 50$ mm/d auf 2,4 (CLM1) bzw. 1,9 (CLM2) Ereignisse pro Dekade und in der Klasse $N \geq 60$ mm/d auf 1,0 (CLM1 und CLM2) Ereignisse pro Dekade an. Es nehmen somit auch Starkregen zu, die nach der aktuell gültigen Niederschlagsstatistik auf Basis der Messdaten Wiederkehrzeiten zwischen $T = 5$ a – 20 a besitzen. Eine weitere Zunahme der Starkregen in der Fernen Zukunft (2071 – 2100) ist dagegen nicht zu erkennen. In der Fernen Zukunft bleibt die Anzahl der Starkregen gegenüber der Nahen Zukunft nahezu konstant (CLM1) oder geht sogar leicht wieder etwas zurück (CLM2).

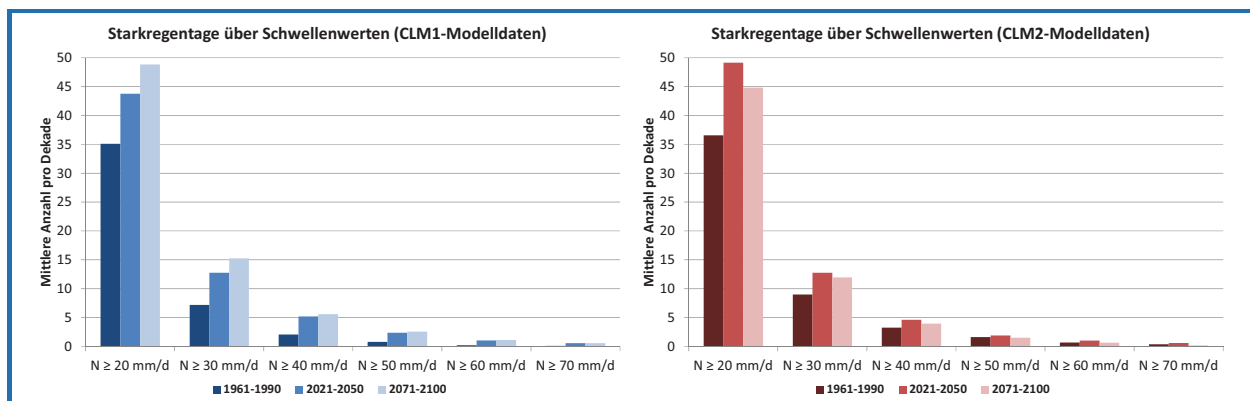


Abbildung 26: Anzahl von Starkregentagen über Schwellenwerten in den CLM-Modelldaten je Dekade und Rasterfeld im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100); links: CLM1, rechts: CLM2

Tabelle 11: Anzahl von Starkregentagen über Schwellenwerten in den in den CLM-Modelldaten je Dekade und Rasterfeld im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100)

Dekade	N ≥ 20 mm/d	N ≥ 30 mm/d	N ≥ 40 mm/d	N ≥ 50 mm/d	N ≥ 60 mm/d	N ≥ 70 mm/d
CLM1						
1961 – 1990	35	7,2	2,1	0,8	0,2	0,1
2021 – 2050	44	12,8	5,2	2,4	1,0	0,6
2071 – 2100	49	15,3	5,6	2,6	1,1	0,6
CLM2						
1961 – 1990	37	9,0	3,2	1,6	0,7	0,4
2021 – 2050	49	12,8	4,6	1,9	1,0	0,6
2071 – 2100	45	11,9	3,9	1,5	0,6	0,2

Das Ensemble aus sieben Modellrechnungen (Abbildung 27) zeigt in allen Modellrechnungen in der Nahen Zukunft eine Zunahme der Starkregentage mit N ≥ 20 mm/d an. In keinem anderen Modelllauf sind die Zunahmen in der Nahen Zukunft so stark ausgeprägt wie in den beiden betrachteten CLM-Läufen. Eine Zunahme von mehr als 10 Starkregentagen, wie sie in den beiden CLM-Läufen in der Nahen Zukunft zu verzeichnen ist, wird in den anderen Modellrechnungen erst in der Fernen Zukunft erreicht. Anders als in den beiden CLM-Läufen nehmen die Starkregen in den meisten anderen Modellrechnungen (außer REMO_B1) stetig über die Nahe Zukunft zur Fernen Zukunft zu.

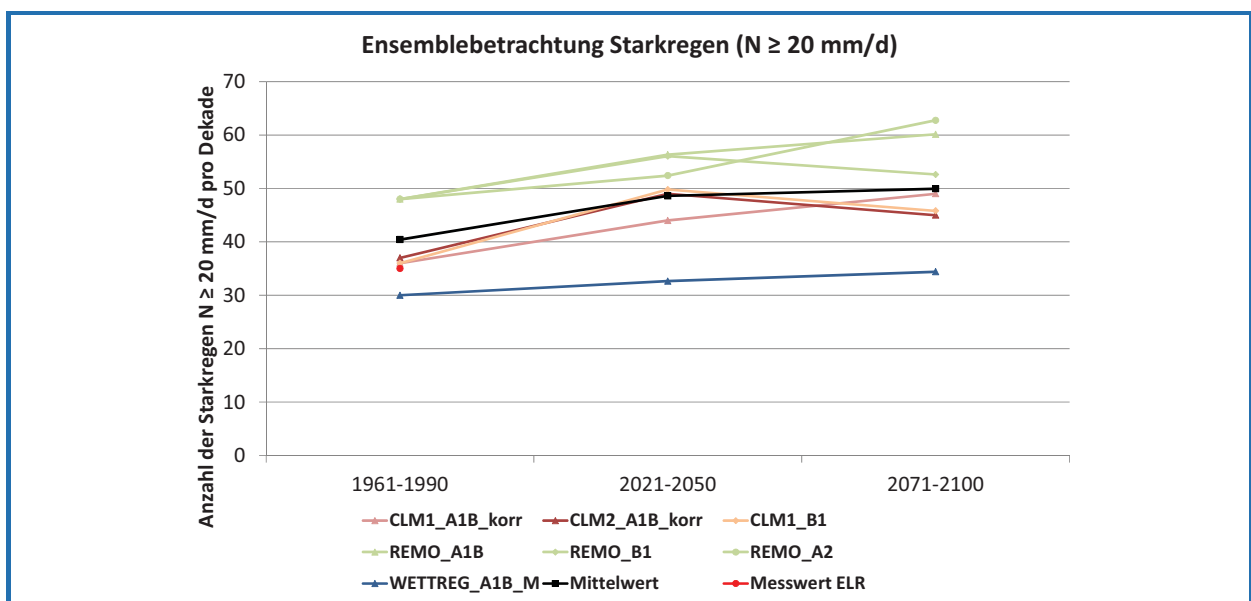


Abbildung 27: Änderungen der Starkregentage mit N ≥ 20 mm/d im begrenzten Ensemble in der ELR für die Nahe Zukunft (2021 – 2050) und für die Ferne Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990)

4.2.4 Einfluss möglicher Änderungen von Starkregen aufgrund ihrer Auftretenshäufigkeit und ihrer Niederschlagshöhen auf die Niederschlagsstatistik

Die bisherigen Untersuchungen betrachten auf drei unterschiedliche Art und Weisen, inwieweit sich Starkregen in ihrer Häufigkeit und Intensität verändert haben. Für Bemessungszwecke ist es aber interessant, wie sich diese Veränderungen auf die statistisch ermittelten Niederschlagshöhen auswirken. In diesem Kapitel wird daher untersucht, welchen Einfluss die zuvor beschriebenen Änderungen auf die resultierende Niederschlagsstatistik nach dem DWA-A 531 (DWA, 2012) haben. Hierzu wurden Statistiken über vier gleitende 30-Jahre Zeitfenster (1951 – 1980, 1961 – 1990, 1971 – 2000 und 1981 – 2010) sowie über den Gesamtzeitraum (1951 – 2010) durchgeführt. Auch hier erfolgt eine regionale Analyse und keine Bewertung jeder einzelnen Station. Für jede Niederschlagshöhe in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauerstufe werden die statistischen Ergebnisse der 14 Stationen gemittelt. Da für jede Kombination aus Wiederkehrzeit und Dauerstufe nur vier Werte vorliegen, die zudem nicht statistisch unabhängig sind, ist keine sinnvolle Trendanalyse durchführbar. Es ist lediglich eine qualitative Bewertung möglich. In Abbildung 28 werden exemplarisch die Ergebnisse für die Dauerstufen $D = 60$ Minuten und $D = 24$ Stunden graphisch dargestellt.

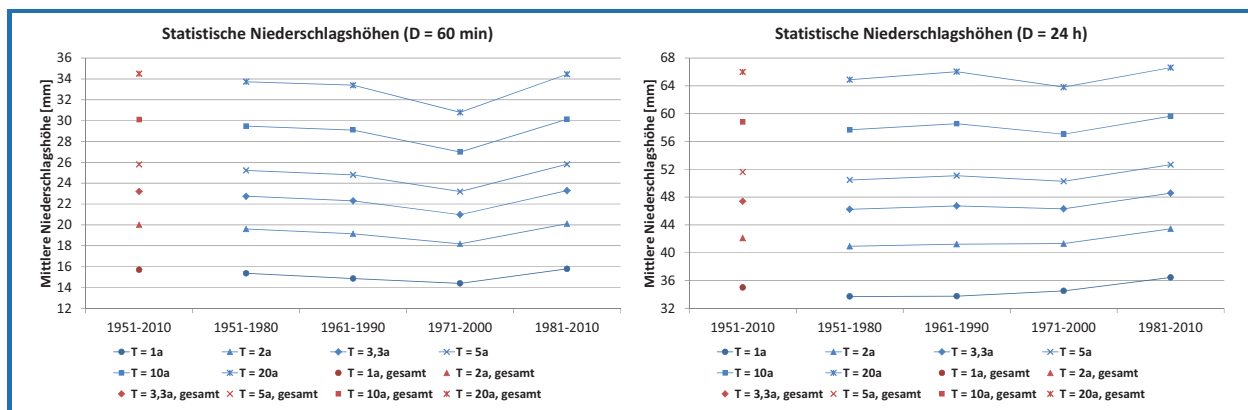


Abbildung 28: Entwicklung der statistischen Niederschlagshöhen für unterschiedliche Wiederkehrzeiten T in der ELR im Zeitraum 1951 – 2010, Messdaten; links: $D = 60$ min; rechts: $D = 24$ h

Die bisherigen Auswertungen haben gezeigt, dass im Wesentlichen nur die Starkregenereignisse mit kleinen Wiederkehrzeiten zugenommen haben. Die Niederschlagsstatistik nach dem DWA-A 531 wird aber insbesondere durch die seltenen Starkregenereignisse der Stichprobe beeinflusst. Dementsprechend sind in den statistischen Auswertungen der Messdaten auch nur geringfügige Zunahmen der Niederschlagshöhen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer im letzten 30-Jahre-Zeitfenster zu erkennen. Die natürliche Schwankungsbreite von statistischen Auswertungen über 30-Jahre-Zeitfenster wird deutlich, wenn man die Auswertungen für die Dauerstufe $D = 60$ Minuten in den beiden Zeiträumen 1971 – 2000 und 1981 – 2010 vergleicht. Beide Stichproben unterscheiden sich nur in einer Dekade (ein Drittel der Stichprobe). Die Unterschiede zwischen diesen beiden Auswertungen sind wesentlich größer, als die Zunahmen gegenüber dem ersten Zeitraum 1951 – 1980 bzw. gegenüber den ermittelten Niederschlagshöhen aus der Stichprobe des Gesamtzeitraums 1951 – 2010.

In den Modelldaten wurde zunächst untersucht, inwieweit die statistischen Auswertungen der Modelldaten im Referenzzeitraum 1961 – 1990 mit denen der Messdaten übereinstimmen. Da die Stundendaten in den CLM-Datensätzen das natürliche Niederschlagsverhalten nicht hinreichend repräsentieren, werden die statistische Auswertungen mit den Modelldaten nur mit Tageswerten durchgeführt und nur für die Dauerstufe $D = 24$ Stunden dargestellt.

Abbildung 29 (links oben) zeigt, dass die statistischen Auswertungen der Messdaten und der CLM1-Modelldaten für den Zeitraum 1961 – 1990 nahezu identisch sind. In dieser Abbildung wird die Wiederkehrhäufigkeit n ($n = 1/T$) statt der Wiederkehrzeit T dargestellt. Die statistischen ermittelten Niederschlagshöhen der CLM2-Modelldaten liegen dagegen um 10 % – 20 % darüber (Abbildung 29, rechts oben). Sie liegen damit am oberen Rand des Toleranzbereiches, wie er auch bei den statistischen Auswertungen des KOSTRA-DWD-2000 (DWD, 2005) angegeben wird. Dieser Toleranzbereich ist in Abbildung 29 grau dargestellt. Somit liefert auch die Starkregenauswertung für den CLM2-Datensatz im Zeitraum 1961 – 1990 mögliche, im Toleranzbereich liegende Ergebnisse.

Betrachtet man dagegen die statistisch ermittelten Niederschlagshöhen für die Nahe Zukunft, so liegen diese sowohl beim CLM1-Datensatz (Abbildung 29, links unten), als auch beim CLM2-Datensatz (Abbildung 29, rechts unten) über diesem Toleranzbereich. Durch die Zunahme der mittleren Starkregen sind auch die Veränderungen in der Niederschlagsstatistik deutlicher. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich wie bei den Messdaten die natürliche Niederschlagsvariabilität und das mögliche Klimaänderungssignal überlagern. Eine eindeutige Zuordnung, inwieweit die Veränderungen der Niederschlagshöhen auf die natürliche Variabilität oder auf das Klimaänderungssignal zurückzuführen sind, ist nicht möglich. Änderungen der Niederschlagshöhen innerhalb des Toleranzbereiches zwischen $\pm 10\%$ und $\pm 20\%$ (in Abhängigkeit von der Wiederkehrzeit) werden daher der natürlichen Niederschlagsvariabilität zugeschrieben. Nur Änderungen oberhalb dieses Toleranzbereiches werden als Klimaänderungssignal interpretiert (hellblaue Fläche in Abbildung 29 links unten und hellrote Fläche in Abbildung 29 rechts unten).

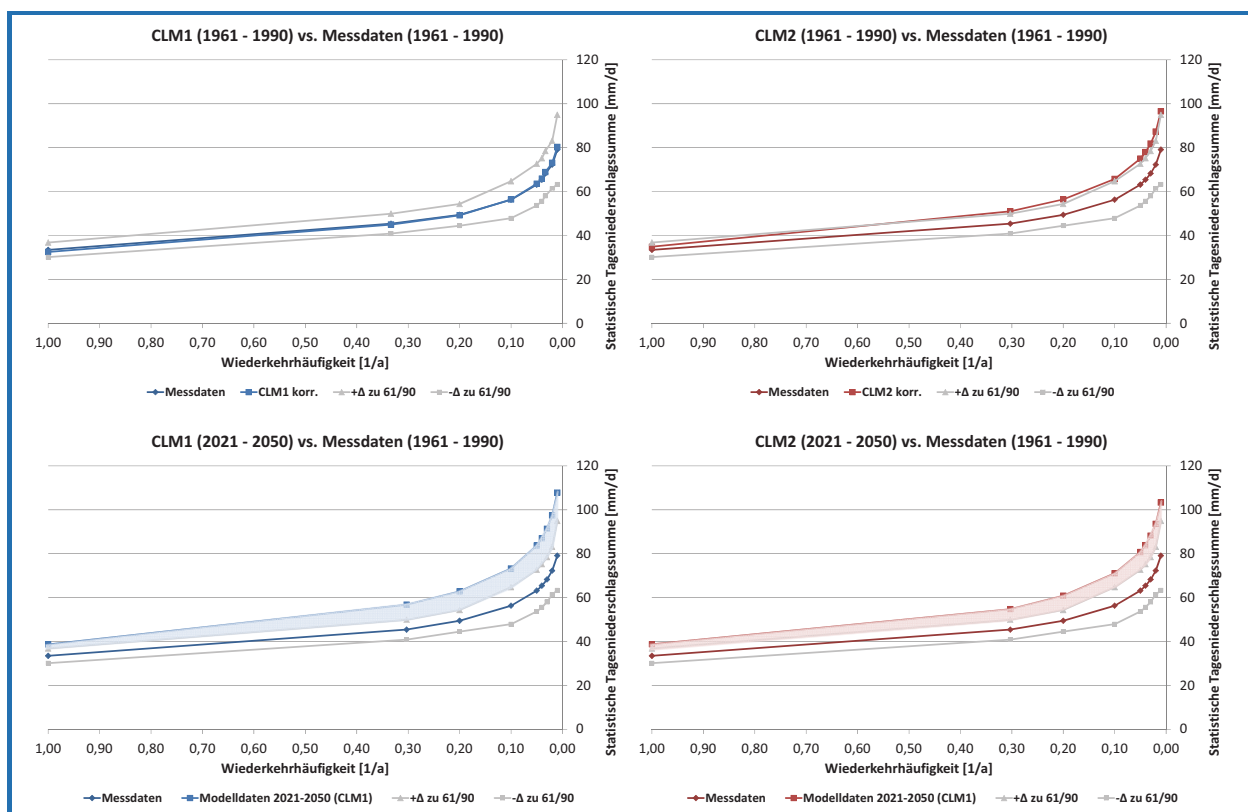


Abbildung 29: Vergleich der statistisch ermittelten Niederschlagshöhen für verschiedene Wiederkehrhäufigkeiten unter Berücksichtigung eines Toleranzbereichs für die natürliche Klimavariabilität; links oben: CLM1 (1961 – 1990) vs. Messdaten (1961 – 1990); rechts oben: CLM2 (1961 – 1990) vs. Messdaten (1961 – 1990); links unten: CLM1 (2021 – 2050) vs. Messdaten (1961 – 1990); rechts unten: CLM2 (2021 – 2050) vs. Messdaten (1961 – 1990)

In der Fernen Zukunft zeigen die CLM-Daten keine weitere Zunahme der statistischen Niederschlagshöhen. Ähnlich wie bei der Schwellenwertbetrachtung (Kapitel 4.2.3) bleiben die statistisch ermittelten Niederschlagshöhen nahezu konstant (CLM1) oder geht sogar leicht wieder etwas zurück (CLM2).

In den Messdaten konnte bisher noch kein signifikanter Einfluss der zunehmenden Starkregen auf die Niederschlagsstatistik festgestellt werden, da bisher nur die kleinen und nicht die mittleren oder gar extremen Starkregen zugenommen haben. Die Entwicklungen in den Klimamodelldaten zeigen aber, dass in der Zukunft eine Zunahme der mittleren Starkregen mit Wiederkehrzeiten $T = 5 \text{ a} - 20 \text{ a}$ möglich ist. Die Zunahmen dieser selteneren Starkregen beeinflussen dann auch die Niederschlagsstatistik.

Die dem Klimaänderungssignal zugeschriebenen Zunahmen der Niederschlagshöhen (prozentualer Anteil oberhalb des Toleranzbereiches) liegen in einer Größenordnung von bis zu +10 %. Solch eine Zunahme um +10 % führt aber bereits zu einer beträchtlichen Verschiebung der Wiederkehrhäufigkeiten bzw. Wiederkehrzeiten bei der Niederschlagsstatistik. Niederschlagshöhen, die in der Vergangenheit eine Wiederkehrzeit von $T = 100 \text{ a}$ besaßen, werden in Zukunft alle 50 Jahre auftreten. Auch bei den kleineren Wiederkehrzeiten setzt sich diese Verschiebung fort (z. B. von $T = 5 \text{ a}$ nach $T = 3 \text{ a}$).

Bei der Dimensionierung wasserwirtschaftlicher Systeme ist daher die Zunahme der Starkregen zu berücksichtigen, da ansonsten in Zukunft mit einem häufigeren Systemversagen zu rechnen ist. Auf der anderen Seite dürfen Zunahmen der statistischen Niederschlagshöhen, die auf eine natürliche Variabilität zurückzuführen sind, nicht berücksichtigt bzw. überinterpretiert werden. Dies würde zu einer unwirtschaftlichen Überdimensionierung führen. Es ist ein für die alltägliche Bemessungspraxis pragmatischer Ansatz zu wählen. Es wird daher empfohlen, zunächst weiterhin Dimensionierungen auf Basis der statistischen Auswertungen mit historischen Messdaten durchzuführen. Im Anschluss sind aus Klimamodelldaten die möglichen zukünftigen Niederschlagshöhen zu bestimmen. Diese sind dann um einen Toleranzbetrag, der einer natürlichen Variabilität zugeschrieben wird, zu reduzieren. Soweit möglich, sind dabei mehrere Läufe oder gar Klimamodelle zu berücksichtigen, um eine Bandbreite möglicher Entwicklungen zu erhalten. Abschließend sind für die wasserwirtschaftlichen Systeme mit den neu gewonnenen zukünftigen Niederschlagshöhen Sensitivitätsuntersuchungen durchzuführen, um ein mögliches Systemversagen quantifizieren zu können. Im Rahmen einer nachhaltigen wassersensiblen Stadtentwicklung sind Lösungsansätze für die ermittelten Schwachpunkte zu entwickeln.

4.3 Entwicklung von Trockentagen und Trockenperioden

4.3.1 Entwicklung von Trockentagen

In den durchgeführten Untersuchungen wurden Trockentage als Tage mit einer Tagesniederschlagssumme von $N \leq 0,1$ mm definiert, also als Tage, an denen es nicht oder nur minimal regnet. Im Zeitraum 1961 – 1990 gab es in der ELR durchschnittlich 185 Trockentage pro Jahr, d. h. in etwa jeder 2. Tag war ein Trockentag. Die Anzahl der Trockentage ist in den letzten Jahren nahezu unverändert geblieben; im Zeitraum 1991 – 2010 traten durchschnittlich 187 Trockentage pro Jahr auf.

Es lässt sich allerdings eine Verschiebung in den Jahreszeiten feststellen. Insbesondere im Sommer ist die Anzahl der Trockentage in den letzten 20 Jahren gestiegen, während im Winter und Frühling die durchschnittliche Anzahl der Trockentage abgenommen hat (Abbildung 30).

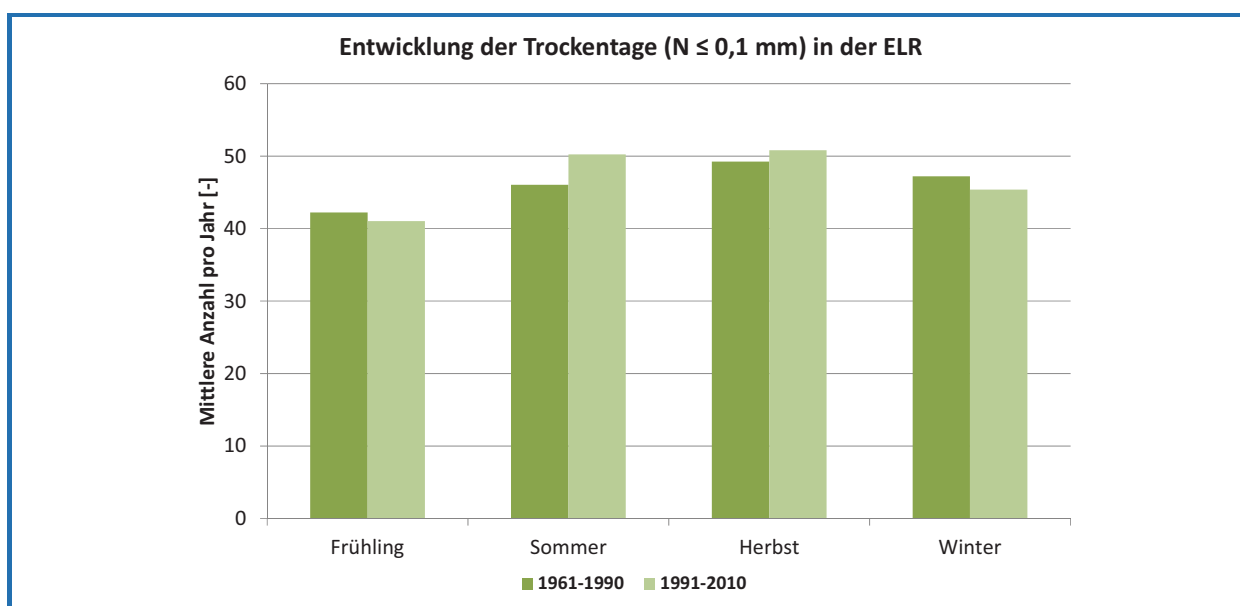


Abbildung 30: Vergleich der jahreszeitlichen Verteilung von Trockentagen ($N \leq 0,1$ mm/d) in den Messdaten der ELR für die Zeiträume 1961 – 1990 und 1991 – 2010

Der Trend, der sich in den Messdaten der Vergangenheit zeigt, setzt sich in den CLM-Daten in der Zukunft fort. Tabelle 12 gibt zunächst einen Überblick über die durchschnittliche Anzahl der Trockentage pro Jahr im Referenzzeitraum und in der Nahen und Fernen Zukunft. Ähnlich wie bei den Messdaten bleibt die Gesamtzahl der Trockentage pro Jahr in Zukunft auf einem ähnlichen Niveau wie in der Vergangenheit.

Tabelle 12: Entwicklung der Trockentage im Regionalen Klimamodell CLM für die ELR im Referenzzeitraum (1961 – 1990), der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und der Fernen Zukunft (2071 – 2100)

Zeitraum	Mittlerer Anzahl der Trockentage pro Jahr CLM1	Mittlerer Anzahl der Trockentage pro Jahr CLM2
1961 – 1990	177	180
2021 – 2050	178	173
2071 – 2100	188	185

Eine Verschiebung von Trockentagen in den Jahreszeiten findet sich ebenfalls in den Klimamodelldaten der Zukunft (Abbildung 31). Allerdings zeigen die beiden CLM-Datensätze für die Nahe Zukunft auch Unterschiede. Während im CLM1-Lauf im Sommer bereits in der Nahen Zukunft ein deutlicher Anstieg von Trockentagen zu erwarten ist, zeigt CLM2 dies erst in der Fernen Zukunft. Andererseits nehmen im CLM2-Lauf die Trockentage in der Nahen Zukunft im Winter stark ab, während dies im CLM1 Datensatz erst für die Ferne Zukunft projiziert wird. Die Anzahl der Trockentage im Frühling und im Herbst schwanken in beiden CLM-Läufen in Zukunft um die Werte des Referenzzeitraums.

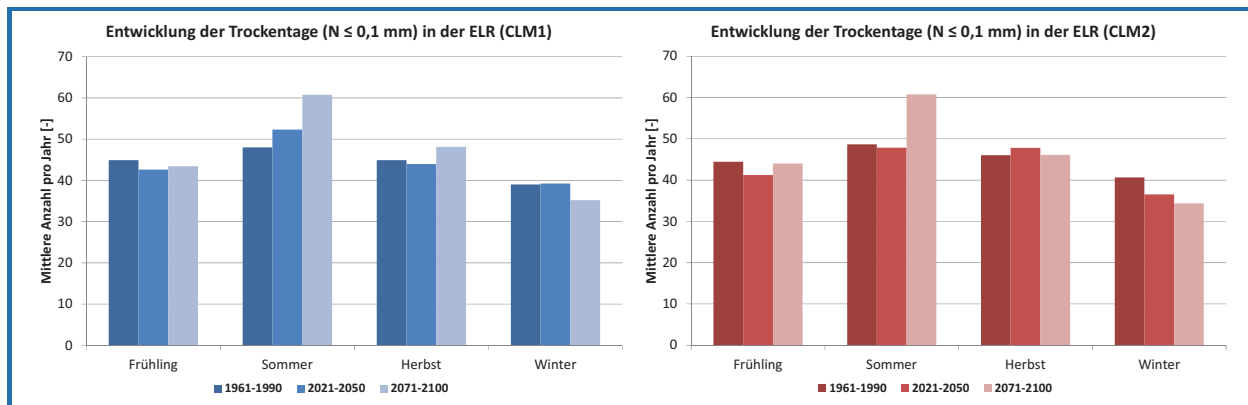


Abbildung 31: Vergleich der jahreszeitlichen Verteilung der Trockentage im Regionalen Klimamodell CLM (links: CLM1, rechts: CLM2) für die ELR im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100)

Die Entwicklung von Trockentagen, auch nach Jahreszeiten differenziert, lässt allerdings noch keine eindeutige Aussage darüber zu, ob oder in wie weit (sommerliche) Trockenperioden, also aufeinander folgende Tage mit anhaltender Trockenheit, zunehmen. Dies wird im folgenden Kapitel gesondert untersucht.

4.3.2 Entwicklung von Trockenperioden

Eine Trockenperiode ist ebenso wie eine Hitzeperiode ein Begriff, der schwer zu definieren und anwendungsbezogen sehr unterschiedlich zu interpretieren ist. Der Deutsche Wetterdienst schreibt in seinem Wetterlexikon (DWD, 2012) dazu folgendes:

„Eine „Trockenperiode“ ist ein mehr oder weniger langer Zeitraum mit ausgeprägter trockener Witterung. Es existieren keine einheitlichen Festlegungen, ab wie viel Tagen ohne (oder mit nur geringen) Niederschlägen von einer „Trockenperiode“ die Rede sein kann. Sie hängt vom Wasserbedarf der einzelnen Bereiche ab und kann demzufolge in der warmen Jahreszeit schon nach einigen trockenen Tagen beginnen. Im Winter sorgt die wegen der niedrigen Luft- und Bodentemperaturen gegenüber dem Sommer stark verminderte Verdunstung dafür, dass trotz minimaler Niederschläge eines Monats eine echte „Trockenperiode“ nur schwer erreicht werden kann. ...“

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (BLU, 2012) hingegen definiert eine meteorologische Trockenperiode folgendermaßen:

„Eine meteorologische Trockenperiode ist die Aufeinanderfolge von mindestens 11 Tagen mit Tagesniederschlagshöhen kleiner oder gleich 1,0 mm.“

In dieser Definition bleiben Parameter wie Lufttemperatur oder die damit verbundene potentielle Verdunstung unberücksichtigt. Auch hier soll zunächst das reine Niederschlagsdefizit ohne Berücksichtigung anderer Parameter untersucht werden. Dabei werden einerseits in Anlehnung an die Definition des Bayerischen Landesamtes für Umwelt aufeinanderfolgende Tage mit

Tagesniederschlägen $N \leq 1\text{mm/d}$ betrachtet. Zusätzlich werden aber auch aufeinanderfolgende Trockentage mit $N \leq 0,1\text{mm/d}$ zur Untersuchung von Trockenperioden herangezogen, um mögliche Extreme noch besser zu erfassen.

Betrachtet man zunächst die Messdaten der Vergangenheit, ist noch kein Trend zu häufigeren oder selteneren Trockenperioden festzustellen. Abbildung 32 zeigt die prozentuellen Veränderungen der Auftretenshäufigkeit von aufeinanderfolgenden Tagen mit $N \leq 1\text{mm}$ bzw. $N \leq 0,1\text{mm}$ in den Jahren 1991 – 2010 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 – 1990. Bei aufeinanderfolgenden Tagen mit $N \leq 1\text{mm}$ ist bei Trockenperioden bis zu 18 Tagen kein und von mehr als 18 Tagen ein leichter prozentualer Rückgang in den letzten 20 Jahren zu verzeichnen (Abbildung 32, links). Trockenperioden definiert als die Aufeinanderfolge von Trockentagen mit $N \leq 0,1\text{mm}$ zeigen hingegen bei Perioden mittlerer Dauern von 11 – 16 Tagen eine leichte Zunahme und bei Trockenperioden längerer Dauer teilweise rückläufige Häufigkeiten (Abbildung 32, rechts). Die Veränderungen liegen allerdings im Rahmen natürlicher Schwankungen und statistischer Unsicherheiten.

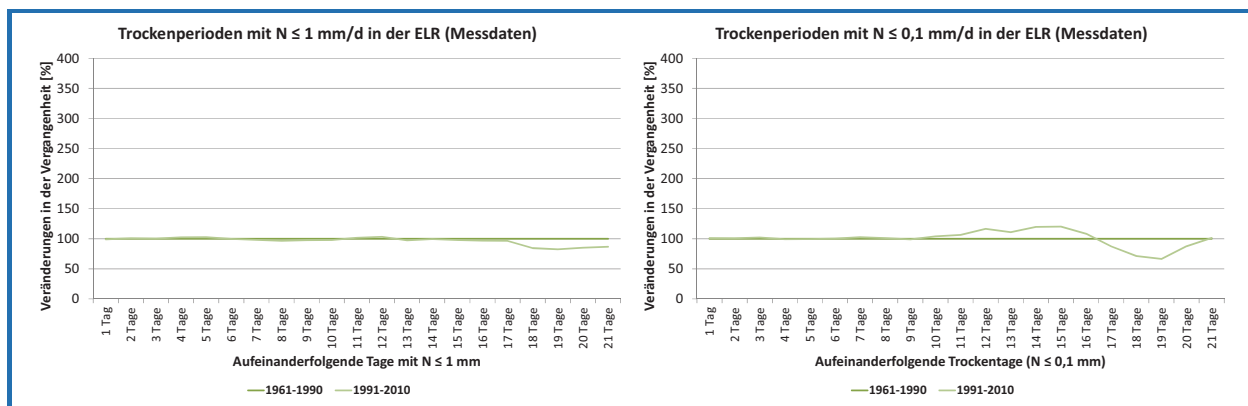


Abbildung 32: Bisherige Entwicklung von Trockenperioden in den Messdaten der ELR – Prozentuale Veränderungen der Auftretenshäufigkeit aufeinanderfolgender Tage mit $N \leq 1\text{ mm}$ (links) bzw. $N \leq 0,1\text{ mm}$ (rechts) im Zeitraum 1991 – 2010 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 – 1990

Im Gegensatz zu den Messdaten zeigen die Auswertungen der CLM-Modelldaten zukünftig insgesamt eine Zunahme von Trockenperioden, wenngleich in unterschiedlicher Ausprägung (Abbildung 33). Die prozentualen Veränderungen der Abbildung 33 sagen allerdings noch nichts über die absoluten Auftretenshäufigkeiten der Trockenperioden aus. Daher ist in Abbildung 34 beispielhaft für Trockenperioden ausgewählter Dauern (7, 11, 14 und 21 Tage) die mittlere Anzahl pro Jahr im Referenzzeitraum sowie der Nahen und Fernen Zukunft dargestellt. Die Abbildung 34 beschränkt sich auf Trockenperioden, die als Aufeinanderfolge von Trockentagen ($N \leq 0,1\text{ mm/d}$) definiert werden.

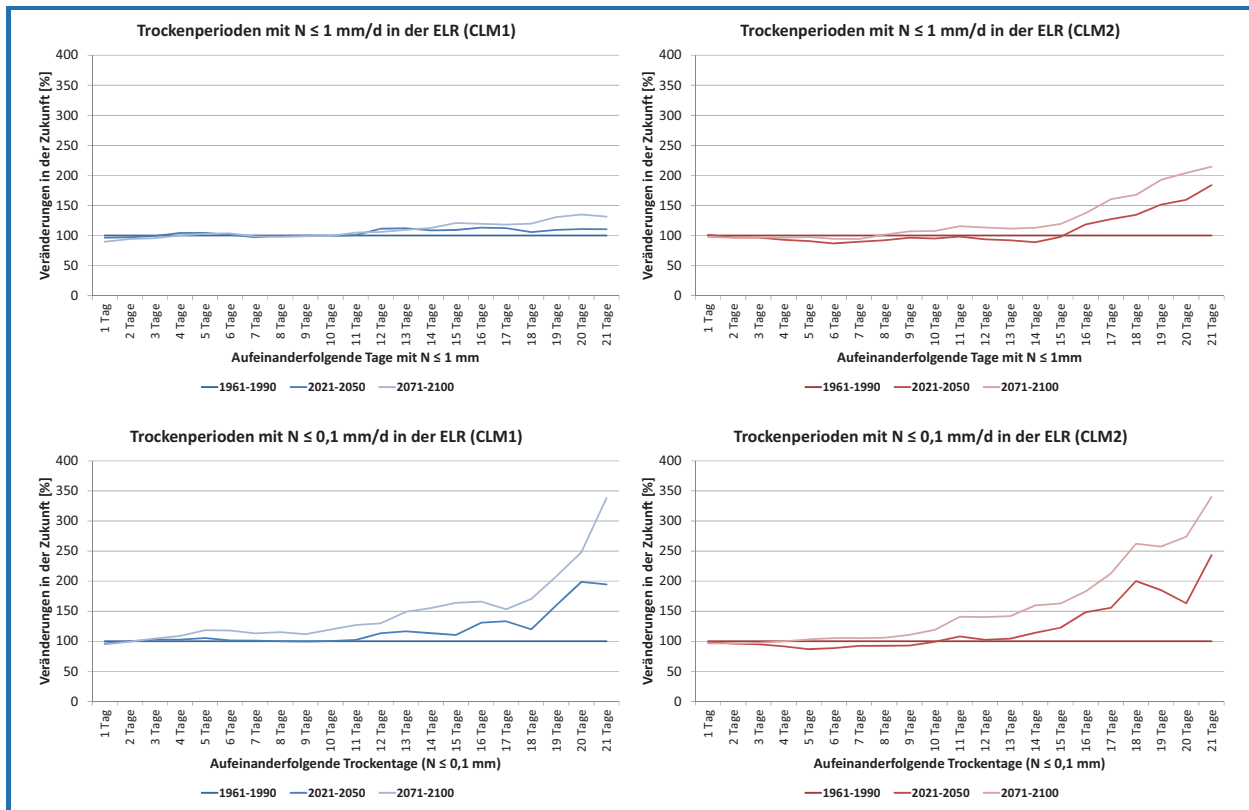


Abbildung 33: Zukünftige Entwicklung von Trockenperioden in der ELR – Prozentuale Veränderungen der Auftretenshäufigkeit aufeinanderfolgender Tage mit $N \leq 1$ mm (oben) bzw. $N \leq 0,1$ mm (unten) in der Nahen und Fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum im Regionalen Klimamodell CLM; links: CLM1, rechts: CLM2

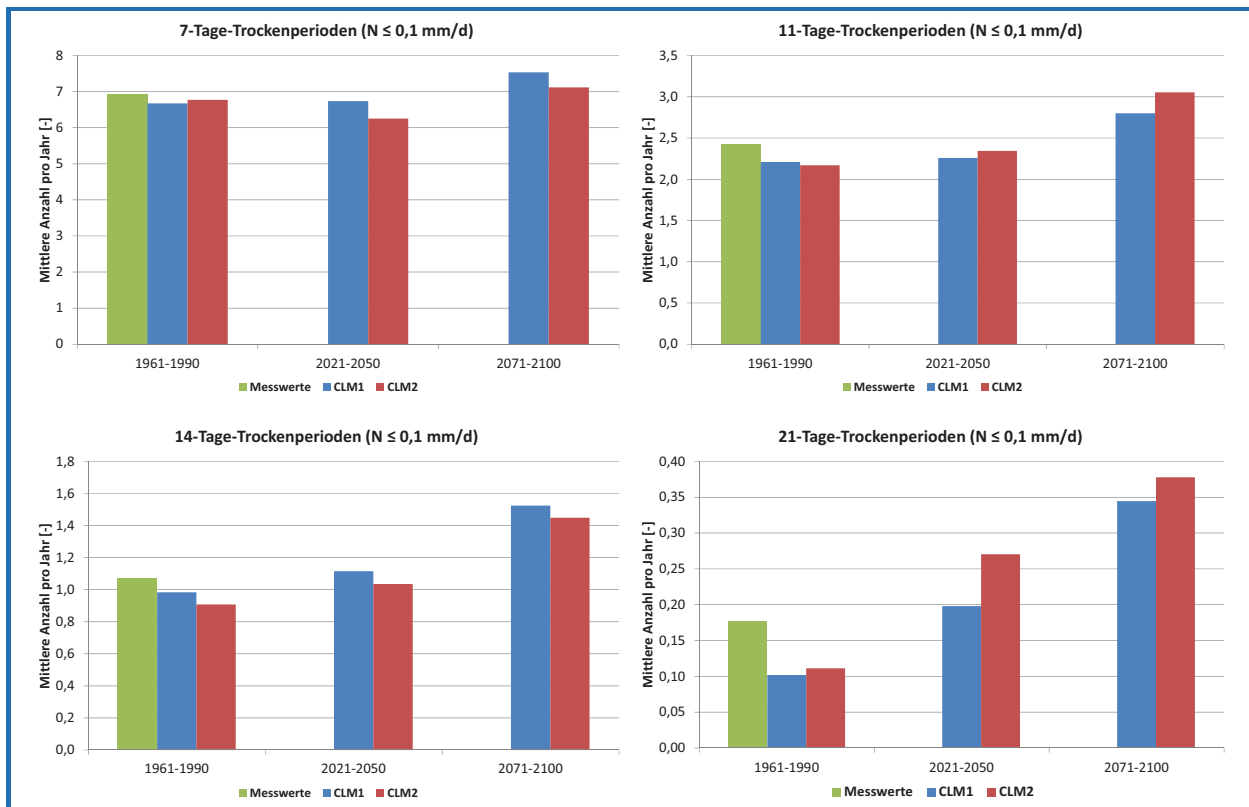


Abbildung 34: Zukünftige Entwicklung von Trockenperioden ausgewählter Dauern in der ELR; Veränderungen der Auftretenshäufigkeit aufeinanderfolgender Tage mit $N \leq 0,1$ mm in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und Fernen Zukunft (2071 – 2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961 – 1990) im Regionalen Klimamodell CLM

Abbildung 33 zeigt zunächst, dass die Zunahmen bei Trockenperioden definiert als Aufeinanderfolge von Trockentagen mit $N \leq 0,1$ mm größer sind als bei Trockenperioden definiert als Aufeinanderfolge von Tagen mit $N \leq 1$ mm. Nach beiden Definitionen nehmen aber insbesondere Trockenperioden von längeren Dauern prozentual am stärksten zu, d. h. gerade die Extreme – lange, sehr trockene Phasen – sind zukünftig häufiger zu erwarten.

Abbildung 34 zeigt aber auch, dass die hohen prozentualen Zunahmen bei den langen Trockenperioden neben der tatsächlichen Zunahme auch auf einen sehr kleinen Basiswert im Referenzzeitraum (21-Tage: 1 mal in 10 Jahren) zurückzuführen sind. Kleinere absolute Änderungen führen hier also zu großen relativen (prozentualen) Änderungen. Die Zufälligkeit, ob eine seltene Trockenperiode in den betrachteten Stichproben enthalten ist, überlagert ähnlich wie bei den Starkregen die Veränderungen aufgrund des Klimaänderungssignals. Dies zeigen auch die relativ großen Unterschiede zwischen den Messwerten und den Modelldaten im Zeitraum 1961 – 1990 bei der 21-Tage-Trockenperiode.

4.3.3 Entwicklung des Trockenheitsindex dMI

Trockenheit zeigt sich allerdings nicht zwingend nur allein durch ein Niederschlagsdefizit. Für die klimatische Wasserbilanz ist die potentielle Verdunstung vom Niederschlag abzuziehen. Bei einer weiteren Analyse von Trockenperioden wird daher auch die Lufttemperatur als wesentlicher Einflussfaktor für die potentielle Verdunstung mit einbezogen. Es wird der einfach zu bestimmende Trockenheitsindex dMI nach DE MARTONNE (1926) auf Monatsbasis berechnet. Es wurde exemplarisch der Trockenheitsindex dMI gewählt, da dieser ausschließlich die beiden in dieser Publikation untersuchten Parameter Niederschlag und Lufttemperatur benötigt und nicht auf weitere Größen wie z. B. die eigentlich relevante Verdunstung zurückgreift. Möglich sind dafür auch andere Zeitskalen, wie beispielsweise Jahreszeiten oder ganze Jahre. Der Trockenheitsindex wird aus dem Verhältnis von Niederschlag N und Lufttemperatur T gebildet:

$$dMI = \frac{N}{T + 10}$$

Die Konstante 10 im Nenner dient dazu, negative Werte zu vermeiden. Es gilt: Je kleiner der dMI, desto größer ist die Trockenheit. Abbildung 35 (links) zeigt den monatlichen Trockenheitsindex dMI in der ELR in den Messdaten von 1961 – 2010. Die Werte schwanken von fast 0 bis über 12, im Mittel liegt der monatliche Trockenheitsindex in der ELR bei $dMI = 3,6$. In Abbildung 35 (rechts) sind nur die Werte kleiner 2, also überdurchschnittlich trockene Monate, im Referenzzeitraum dargestellt. Während noch relativ viele Monate einen dMI zwischen 1 und 2 aufweisen, treten Werte kleiner 1 nur 20-mal in den betrachteten 30 Jahren auf, also durchschnittlich weniger als einmal pro Jahr. Dieses Kriterium wird gewählt, um die zukünftige Entwicklung von trockenen Monaten auf Basis des dMI zu beschreiben.

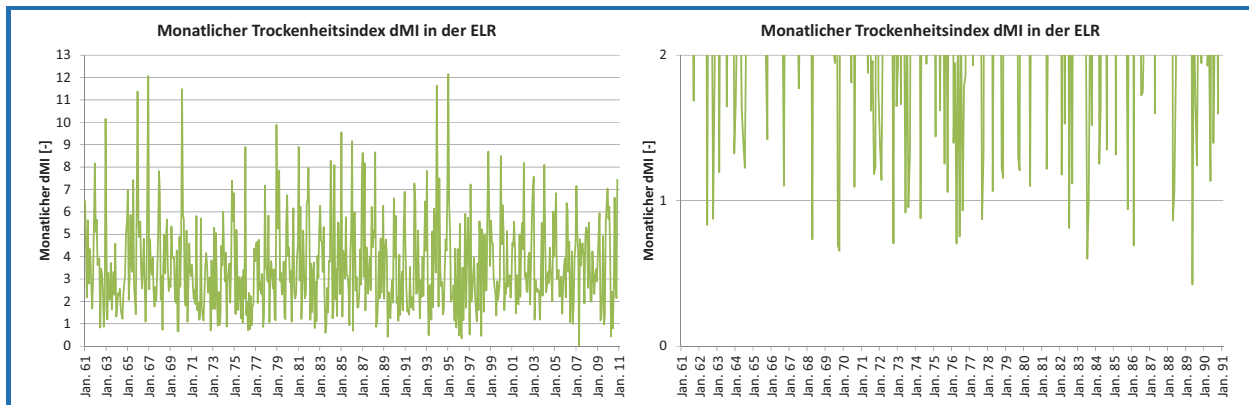


Abbildung 35: links: Monatlicher Trockenheitsindex dMI in den Messdaten der ELR von 1961 – 2010; rechts: Ausschnitt für den Zeitraum 1961 – 1990 für sehr kleine dMI ($\text{DMI} \leq 2$)

Tabelle 13 gibt einen Überblick über die Anzahl von Monaten mit einem Trockenheitsindex $\text{DMI} \leq 1$ im Referenzzeitraum sowie der Nahen und Fernen Zukunft für die CLM-Modelldaten in der ELR. Im Referenzzeitraum liegt die Anzahl der trockenen Monate mit einem $\text{DMI} \leq 1$ mit 14 deutlich unter dem Niveau der Messdaten. Dies liegt in dem Temperatur-Bias der CLM-Daten begründet, aufgrund dessen die Lufttemperaturen im Modell durchschnittlich $1\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ unterhalb der Messdaten liegen (Kapitel 3.1), sodass der dMI in den Modelldaten entsprechend größer ist. Tabelle 13 zeigt aber, dass die trockenen Monate bereits in der Nahen Zukunft stark zunehmen und in der Fernen Zukunft sogar mehr als doppelt so häufig wie im Referenzzeitraum auftreten. Durch den bewusst einfach gewählten Trockenheitsindex dMI, der nur von den beiden Parametern Niederschlag und Lufttemperatur abhängt, ist somit leicht nachvollziehbar, wie sich die zunehmenden Temperaturen und rückläufigen Niederschlagssummen im Sommerhalbjahr überlagern. Die so ausgedrückten Trockenperioden und ihre Zunahmen können insbesondere für die Wachstumsperiode der Pflanzen in der Landwirtschaft eine wesentliche Rolle spielen.

Tabelle 13: Vergleich der Anzahl der Monate mit einem Trockenheitsindex $\text{DMI} \leq 1$ für die ELR im Regionalen Klimamodell CLM im Referenzzeitraum (1961 – 1990), in der Nahen Zukunft (2021 – 2050) und in der Fernen Zukunft (2071 – 2100)

Zeitraum	Anzahl der Monate mit $\text{DMI} \leq 1$ CLM1	Anzahl der Monate mit $\text{DMI} \leq 1$ CLM2
1961 – 1990	14	14
2021 – 2050	20	19
2071 – 2100	31	35

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens *dynaklim* wurden umfangreiche Analysen zu Veränderungen der beiden Parameter Lufttemperatur und Niederschlag in der Emscher-Lippe-Region (ELR) durchgeführt. Dabei wurden die beiden Parameter hinsichtlich verschiedenster Kenngrößen und Untersuchungszeiträume untersucht. Die Untersuchungen umfassen sowohl Messdaten aus der Vergangenheit im Zeitraum 1951 – 2010 (Niederschlag) bzw. 1961 – 2010 (Lufttemperatur) als auch Klimamodelldaten des Regionalen Klimamodells CLM im Zeitraum 1961 – 2100.

Beim Parameter Lufttemperatur lassen sich eindeutige Entwicklungen über alle Kenngrößen und Bilanzierungszeiträume sowohl in den Mess- als auch in den Modelldaten feststellen. In der letzten Dekade (2001 – 2010) haben die gemessenen mittleren Jahreslufttemperaturen gegenüber der Referenzperiode (1961 – 1990) bereits um +0,8 °C zugenommen. Damit wird bereits heute die aus den Modelldaten erwartete Zunahme für die Nahe Zukunft (2021 – 2050) von etwa +1 °C fast erreicht. Bis in die Ferne Zukunft (2071 – 2100) wird sogar eine Zunahme um mehr als +3 °C gegenüber 1961 – 1990 erwartet. In den Messdaten sind diese Temperaturzunahmen insbesondere in den Quartalen Sommer und Frühling überdurchschnittlich. In den Modelldaten sticht ebenfalls der Sommer mit überdurchschnittlichen Temperaturzunahmen heraus. Hier sind in den Quartalen Herbst und Winter die durchschnittlichen bis leicht überdurchschnittlichen Zunahmen allerdings größer als in den Messdaten.

Während die Monats- und Jahresmitteltemperaturen eine durchschnittliche Entwicklung der Lufttemperaturen beschreiben, lassen sich Entwicklungen in den Extremen über Veränderungen von Kenntagen gut ausdrücken. Sowohl in den Mess- als auch in den Modelldaten nehmen die „heißen“ Kenntage, Sommertage und Heiße Tage, kontinuierlich zu, während die „kalten“ Kenntage, Frost- und Eistage, zurückgehen. Dies führt dazu, dass sommerliche Hitzeperioden sowohl in ihrer Häufigkeit, als auch in ihrer Intensität zunehmen.

Die Veränderungen beim Parameter Niederschlag stellen sich gegenüber den Entwicklungen bei der Lufttemperatur differenzierter dar. Dies ist dadurch begründet, dass sich unterschiedliche Entwicklungen in Nord- und Südeuropa in der ELR zumindest bei den langen Bilanzierungszeiträumen ausgleichen. Während in Skandinavien in Zukunft mit einer weiteren Zunahme der Jahresniederschlagssummen zu rechnen ist, nimmt diese im Mittelmeerraum drastisch ab. Entsprechend setzen sich die in den Messdaten festgestellten Zunahmen der Jahresniederschlagssummen aus der Vergangenheit in Zukunft nicht weiter fort. Es ist vielmehr damit zu rechnen, dass sich die Jahresniederschlagssummen in Zukunft auf dem heutigen Niveau einpendeln werden. Auch die in der Vergangenheit festgestellten Verschiebungen der Monatsniederschlagssummen aus dem Sommerquartal in die anderen Jahreszeiten sind zunächst in der Nahen Zukunft nicht weiter zu erwarten. In der Fernen Zukunft gehen die Niederschläge dagegen im gesamten Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) stark zurück. Beim Klima in der ELR handelt es sich allerdings um ein gemäßigttes Klima mit einer relativ ausgeglichenen Niederschlagsverteilung über das ganze Jahr. So gehörten in der Vergangenheit zu den „nassesten“ drei Monaten neben dem Wintermonat Dezember auch die beiden Sommermonate Juli und August. Trotz der starken Rückgänge im Sommerhalbjahr in der Fernen Zukunft werden auch dann noch in jedem Monat durchschnittlich mehr als 50 mm Niederschlag pro Monat fallen.

Da die mittleren Entwicklungen keine Aussagen über Trockenzeiten und Starkregen zulassen, wurden diese separat untersucht. Bei den Trockentagen sind über das gesamte Jahr in den Mess- und Modelldaten keine größeren Veränderungen zu erkennen. Analog zu den Temperaturdaten und zu den Monatsniederschlagssummen verschiebt sich die Anzahl der Trockentage aber innerhalb der Jahreszeiten, was insbesondere im Sommerquartal zu mehr Trockentagen führt. In der Zukunft ist zu erwarten, dass Trockenperioden längerer Dauern häufiger auftreten werden.

Bei den Starkregen ist in der Vergangenheit eine Zunahme von Starkregen mit kleineren Wiederkehrzeiten ($T \leq 2$ a) nachweisbar, die sich bisher aber noch nicht auf die statistisch ermittelten

Bemessungsregen auswirkt. In Zukunft werden aber auch die mittleren Starkregen mit Wiederkehrzeiten zwischen $T = 5 \text{ a} - 20 \text{ a}$ zunehmen, was sich dann auch in der Niederschlagsstatistik bemerkbar macht. Bei den Veränderungen der statistisch ermittelten Niederschlagshöhen ist aber zu berücksichtigen, dass diese auf eine natürliche Variabilität und ein Klimaänderungssignal zurückzuführen sind. Es wird daher ein pragmatischer Ansatz vorgestellt, wie der Anteil des Klimaänderungssignals abgeschätzt werden kann. Die dem Klimaänderungssignal zugeschriebenen Zunahmen der statistisch ermittelten Niederschlagshöhen von etwa +10 % führen allerdings bereits zu starken Reduzierungen der Wiederkehrzeiten von Bemessungsregen.

Die durchgeführten Untersuchungen zu den beiden Parametern Lufttemperatur und Niederschlag zeigen für die Emscher-Lippe-Region spürbare Veränderungen, die zum Teil schon heute anhand der Messdaten in der Vergangenheit nachweisbar sind. Es ist aber zu berücksichtigen, dass diese Veränderungen auf einem insgesamt gemäßigten Klima in dieser Region aufsetzen, während z. B. im Mittelmeerraum noch größere Zunahmen der sommerlichen Lufttemperaturen zu einem bereits schon hohen Istwert hinzukommen. Die Veränderungen in der ELR sind hinsichtlich zunehmender Hitzeperioden, Trockenzeiten und Starkregen aber als so relevant anzusehen, dass eine Entwicklung von Gegenmaßnahmen, wie sie im *dynaklim*-Projekt entwickelt werden, geboten ist. Ein „Business as usual“ lässt dagegen eine Beeinträchtigung des heutigen Lebensstandards und Entwässerungskomforts erwarten. Dennoch geben die im europäischen und weltweiten Vergleich gemäßigten Veränderungen allen Grund zur Hoffnung, dass die erforderlichen Maßnahmen sowohl finanziell als auch technisch handhabbar sind. Die Durchführung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel insbesondere im Bereich des Wassersektors kann sich somit in Zukunft als Standortvorteil für die Region darstellen.

LITERATURVERZEICHNIS

CEC (2006): IDP (Interaktives Diagnose- und Präsentationstool), Programmversion 3.3.3.8, Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH.

DE MARTONNE, E. (1926): Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité. La Meteorologie 2, 449-458.

DOUGLAS, E.M., VOGEL, R.M., KROLL, C.N. (2000): Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation, Journal of Hydrology, 240, 90-105.

DWA (2006): Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen, Arbeitsblatt DWA-A 118, ISBN 978-3-939057-15-4.

DWA (2012): Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer, Arbeitsblatt DWA-A 531, ISBN 978-3-942964-28-9.

DWD (2005): KOSTRA-DWD-2000, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951 – 2000), Grundlagenbericht, Offenbach am Main.

DWD (2011): Gefahren durch extreme Niederschläge werden ab 2040 deutlich zunehmen, Pressemitteilung des DWD vom 15.02.2011, Berlin.

DWD (2012): Online-Wetterlexikon des DWD, www.dwd.de, zuletzt aufgerufen am 02.11.2012.

EEA (2008): Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment, EEA Report No 4/2008, European Environment Agency, ISSN 1725-9177.

HENNEMUTH, B., KEUP-THIEL, E., WUNRAM, C., MÄCHEL, H. (2009): Einführung in die Klimamodellierung, Vortrag beim internen *dynaklim*-Workshop am 07.10.2009 in Hattingen (unveröffentlicht).

HIPEL, K.W., MCLOAD, I. (1994): Time series modelling of water resources and environmental systems, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

HOLLWEG, H.-D., BÖHM, U., FAST I., HENNEMUTH, B., KEULER, K., KEUP-THIEL, E., LAUTENSCHLAGER, M., LEGUTKE, S., RADTKE, K., ROCKEL, B., SCHUBERT, M., WILL, A., WOLDT, M., WUNRAM, C. (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. Gruppe Modelle & Daten, Support for Climate- and Earth System Research at the Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Technical Report No. 3, ISSN 1619-2249 (in web form ISSN 1619-2257).

KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (2007): Grünbuch der Kommission an den Rat, das europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU, KOM(2007) 354 vom 29.06.2007.

LANUV NRW (2010): Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS) – Veränderungen in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit, Abschlussbericht erstellt für das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) durch die Arbeitsgemeinschaft aqua_plan GmbH, hydro meteo GmbH & Co. KG und dr. papadakis GmbH, 2010:

http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/bericht_exus_teil1.pdf,

http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/klimawandel/bericht_exus_teil2.pdf.

LAUTENSCHLAGER, M.; KEULER, K.; WUNRAM, C.; KEUP-THIEL, E.; SCHUBERT, M.; WILL, A.; ROCKEL, B.; BOEHM, U. (2009): Climate Simulation with CLM, Climate of the 20th Century run no.1 / no.2, Scenario A1B run no.1 / no.2, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate.

QUIRMBACH, M., EINFALT, T., LANGSTÄDTLER, G., MEHLIG, B. (2010): Trenduntersuchungen in Niederschlagsmessdaten, Aachener Schriftenreihe zur Stadtentwässerung, Band 14: 11. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium 2010, S. 17/1 – 17/13, ISBN 978-3-938996-07-2.

QUIRMBACH, M., FREISTÜHLER, E., PAPADAKIS, I. (2012): Bias-Korrektur der Niederschlagsdaten aus dem Regionalen Klimamodell CLM in der Emscher-Lippe-Region, *dynaklim*-Publikation, No. 21, März 2012.

QUIRMBACH, M., FREISTÜHLER, E., PAPADAKIS, I., PFISTER, A. (2012): Analyse und Korrektur des systematischen Fehlers (Bias) in den Niederschlagsdaten des Regionalen Klimamodells CLM in der Emscher-Lippe-Region, KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, Jahrgang 5 (2012), Nr. 10, S. 544-555.

QUIRMBACH, M., EINFALT, T., LANGSTÄDTLER, G., JANßEN, C., RHEINHARDT, C., MEHLIG, B. (2013): Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS), KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, Jahrgang 60 (2013), Beitrag für Veröffentlichung im 1. Quartal 2013 angenommen.

TESSENDORF, A.; EINFALT, T., QUIRMBACH, M., JESSEN, M. (2012): Statistical downscaling of CLM precipitation using adjusted radar data and objective weather types, Proceedings of the 9th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, 6.-9. December 2012, St. Moritz, Switzerland (Beitrag angenommen).

VUERICH, E., MONESI, C., LANZA, L.G., STAGI, L., LANZINGER, E. (2009): WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges, World Meteorological Organization – Instruments and Observing Methods Rep. No. 99, WMO/TD No. 1504, http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-99_FI-RI.pdf.

VUERICH, E., MONESI, C., LANZA, L.G., STAGI, L. (2009a): Results of the WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges (Italy, 2007-2009). Proceedings of the 8th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, 10-13 December, 2009, St. Moritz, Switzerland, ISBN 978-3-909386-27-7.

WMO (2009): WMO statement on the status of the global climate in 2008, WMO-No. 1039, World Meteorological Organization, ISBN 978-92-63-11039-8.

WMO (2012): WMO statement on the status of the global climate in 2011, WMO-No. 1085, World Meteorological Organization, ISBN 978-92-63-11085-5.

Ansprechpartner

Jens Hasse
hasse@fiw.rwth-aachen.de

Birgit Wienert
wienert@fiw.rwth-aachen.de

Projektbüro *dynaklim*

Mozartstraße 4
45128 Essen

Tel.: +49 (0)201 104-33 38

www.dynaklim.de