



Hochschule RheinMain

University of Applied Sciences

Fachbereich Ingenieurwissenschaften

Studiengang Umwelttechnik

BACHELORARBEIT

Name: Caroline Solle
Referent: Prof. Dr. Matthias Götz
Korreferenten: Dr. Heike Hübener
Dr. Gerhard Brahmer

Thema:

Evaluierung von COSMO-CLM-Ergebnissen für das Lahneinzugsgebiet:
Voraussetzung zur Auswertung künftiger Hoch- und Niedrigwassergefahren

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

Rüsselsheim, den

.....

Unterschrift

Zusammenfassung

Im Zuge des Klimawandels verändern sich voraussichtlich die Intensität und die Häufigkeit von Hoch- und Niedrigwassersituationen. Um Hoch- und Niedrigwassergefahren rechtzeitig abschätzen zu können, dienen regionale Klimamodelldaten als Antrieb für Wasserhaushaltsmodelle.

Im Rahmen dieser Arbeit werden aus den Niederschlagsdaten des regionalen CCLM-Modells (Version 4.8) jährliche bzw. halbjährliche Mittelwerte sowie kleinste und größte Niederschlagssummen für unterschiedliche Ereignisdauern im Zeitraum 1971-2000 für ein Teilgebiet des Lahngiets gebildet. Anhand von Unterschreitungsdauerlinien der gebildeten Kennwerte wird überprüft, inwiefern die Nachvollziehbarkeit der beobachteten Niederschlagssummen durch das CCLM-Modell gegeben ist.

Die Evaluierung der CCLM4.8-Niederschlagsdaten zeigt, dass die Niederschlagssummen für die Hoch- und Niedrigwasser betreffenden Kennwerte insbesondere bei den Hochwasserkennwerten im hydrologischen Winterhalbjahr unterschätzt werden. Langjährige Mittelwerte werden hingegen vom CCLM-Modell nachvollzogen.

Abstract

In the course of climate change changes of the intensity and frequency of floods and low water situations are expected. To estimate future flood and low water hazards on time regional climate model data is used to drive water balance models.

In this work accumulated precipitation and long-term averages of the regional model CCLM are investigated for a part of the Lahn area for the period of 1971-2000. On the basis of „precipitation duration curves“ the representation of accumulated precipitation for hydrological events of the CCLM-model are compared with measurement data.

The result of evaluating the CCLM4.8 precipitation data shows underestimations for accumulated precipitation concerning flood relevant parameters. On the other hand, long-term average model results correspond well to measurement data.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	I
ABSTRACT	I
FORMELZEICHENVERZEICHNIS	IV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
TABELLENVERZEICHNIS	VI
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VII
1. EINFÜHRUNG	1
2. GRUNDLAGEN	3
2.1 HYDROMETEOROLOGISCHE GRUNDLAGEN.....	3
2.2 EINFLUSS DES KLIMAWANDELS AUF HOCH-UND NIEDRIGWASSERGEFAHREN	6
2.3 UNTERSUCHUNGSGEBIET LAHN.....	8
2.4 REGIONALE KLIMAMODELLIERUNG	10
2.4.1 CCLM4.8-Modell.....	11
2.4.2 Untersuchungsgebiet im CCLM4.8-Modell	12
3. DATEN UND METHODEN	13
3.1 VERWENDETE DATEN.....	13
3.1.1 Stationsdaten	13
3.1.2 REGNIE-Rasterdaten	14
3.1.3 CCLM4.8-Niederschlagsdaten	14
3.2 DATENAUFBEREITUNG	15
3.2.1 Ermittlung Gebietsniederschlag	18
3.2.2 Mittelwert, Median und Quartil	19
3.2.3 Variationsbreite, durchschnittliche Abweichung, Standardabweichung und Varianz.....	21
3.2.4 Definition und Ermittlung von hydrologisch relevanten Niederschlagskennwerten.....	22
3.2.5 Unterschreitungsdauerlinien	23
4. ERGEBNISSE	24
4.1 VERGLEICH VON STATIONSDATEN MIT REGNIE-RASTERDATEN.....	24
4.2 VERGLEICH MODELL-RASTERDATEN MIT REGNIE-RASTERDATEN.....	25
4.3 VERGLEICH STATIONSDATEN UND KLIMAMODELLDATEN	26
4.4 NIEDERSCHLAGSSUMMEN ÜBER BESTIMMTE ZEITRÄUME	28
4.5 BOXPLOTS FÜR HOCH- UND NIEDRIGWASSERKENNWERTE.....	31
4.6 UNTERSCHREITUNGSDAUERLINIEN ZU HYDROLOGISCH RELEVANTEN KENNWERTEN.....	37
5. DISKUSSION UND AUSBLICK	41
5.1 ZUSAMMENFASSUNG	41

5.2 PROBLEMFELDER.....	42
5.3 AUSBLICK	44
6. LITERATURVERZEICHNIS	IX
7. ANHANG	XI
7.1 Hoch- und Niedrigwasserkennwerte.....	XI
7.2 Unterschreitungsdauerlinien für Hoch-und Niedrigwasserkennwerte	XVII

Formelzeichenverzeichnis

\bar{a}arithmetisches Mittel

bSchwankungsbreite

ddurchschnittliche Abweichung

Med.....Median

σStandardabweichung

σ^2Varianz

Abkürzungsverzeichnis

BfG	<i>Bundesanstalt für Gewässerkunde</i>
CCLM	<i>COSMO-Climate Limited-area Model</i>
COSMO	<i>Consortium for Small-scale Modeling</i>
DWD	<i>Deutscher Wetterdienst</i>
HLUG	<i>Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie</i>
hydr. Jahr	<i>hydrologisches Jahr</i>
hydr. SH	<i>hydrologisches Sommerhalbjahr</i>
hydr. WH	<i>hydrologisches Winterhalbjahr</i>
KIT	<i>Karlsruher Institut für Technologie</i>
KLIWA	<i>Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft</i>
LARSIM	<i>Large Area Runoff Simulation Modell</i>
NN	<i>Normal Null</i>
REGNIE	<i>regionalisierte Niederschlagsverteilung</i>
RR	<i>Niederschlagsrate (engl.: rain rate)</i>
RR(1d)	<i>größte Niederschlagssumme von einem Tag</i>
RR(3d)	<i>größte Niederschlagssumme von drei aufeinanderfolgenden Tagen</i>
RR(6d)	<i>größte Niederschlagssumme von sechs aufeinanderfolgenden Tagen</i>
RR(10d)	<i>größte Niederschlagssumme von zehn aufeinanderfolgenden Tagen</i>
RR(14d)	<i>größte Niederschlagssumme von 14 aufeinanderfolgenden Tagen</i>
RR(21d)	<i>größte Niederschlagssumme von 21 aufeinanderfolgenden Tagen</i>
RR(30d)	<i>kleinste Niederschlagssumme von 30 aufeinanderfolgenden Tagen</i>
RR(60d)	<i>kleinste Niederschlagssumme von 60 aufeinanderfolgenden Tagen</i>
RR(90d)	<i>kleinste Niederschlagssumme von 90 aufeinanderfolgenden Tagen</i>
RR(120d)	<i>kleinste Niederschlagssumme von 120 aufeinanderfolgenden Tagen</i>

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Hochwasserstände der Lahn in Limburg an Tafel am Schlossberg	9
Tab. 2: Stationen mit Fehlwerten im Lahnggebiet	14
Tab. 3: 30-jähriges Mittel: Stationsdaten vs. REGNIE-Rasterdaten	24
Tab. 4: 30-jähriges Mittel: Modell-Rasterdaten vs. REGNIE-Rasterdaten	25
Tab. 5: Gebietsmittel der Stationen vs. CCLM4.8-Niederschlagsdaten hydr. Jahr	26
Tab. 6: Gebietsmittel der Stationen vs. CCLM4.8-Niederschlagsdaten hydr. WH	26
Tab. 7: Gebietsmittel der Stationen vs. CCLM4.8-Niederschlagsdaten hydr. SH	27
Tab. 8: Hochwasserkennwerte für das hydrologische Jahr	28
Tab. 9: Hochwasserkennwerte für das hydrologische Winterhalbjahr	28
Tab. 10: Hochwasserkennwerte für das hydrologische Sommerhalbjahr	29
Tab. 11: Niedrigwasserkennwerte für das hydrologische Jahr	29
Tab. 12: Niedrigwasserkennwerte für das hydrologische Winterhalbjahr	30
Tab. 13: Niedrigwasserkennwerte für das hydrologische Sommerhalbjahr	30
Tab. 14: Bewertung der Nachvollziehbarkeit der Hoch- und Niedrigwasserkennwerte durch das CCLM4.8-Modell	39
Tab. 15: Niederschlagssummen des Stationsgebietsmittels für das hydrologische Jahr	XI
Tab. 16: Niederschlagssummen der CCLM4.8-Daten für das hydrologische Jahr	XII
Tab. 17: Niederschlagssummen des Stationsgebietsmittels für das hydr. WH	XIII
Tab. 18: Niederschlagssummen der CCLM4.8-Daten für das hydr. WH	XIV
Tab. 19: Niederschlagssummen des Stationsgebietsmittels für das hydr. SH	XV
Tab. 20: Niederschlagssummen der CCLM4.8-Daten für das hydr. SH	XVI

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Hochwasserstände der Lahn bei Limburg von 1255 bis 1984	9
Abb. 2: Ausschnitt der Untersuchungsgebiete im CCLM4.8-Modell:	12
Abb. 3: Überlagerung des in ArcGIS9 erstellten CCLM-Rasters und des DWD-REGNIE-Rasters.....	16
Abb. 4: Verteilung der Stationen im Untersuchungsraum.....	17
Abb. 5: unterschiedliche Quantile einer Verteilungsfunktion.....	20
Abb. 6: Auszug Excel-Tabellenblatt Niederschlagssummenbildung	23
Abb. 7: Abweichungen der CCLM4.8-Daten von den unkorrigierten REGNIE-Daten pro Rasterzelle..	25
Abb. 8: Boxplots für Hochwasserkennwerte im hydr. Jahr.....	31
Abb. 9: Boxplots für Hochwasserkennwerte im hydr. WH.....	32
Abb. 10: Boxplots für Hochwasserkennwert im hydr. SH	33
Abb. 11: Boxplots für Niedrigwasserkennwerte im hydr. Jahr.....	34
Abb. 12: Boxplots für Niedrigwasserkennwerte im hydr. WH.....	35
Abb. 13: Boxplots für Niedrigwasserkennwerte im hydr. SH.....	36
Abb. 14: Bereich der 20% höchsten Niederschlagssummen	37
Abb. 15: Bereich der 20% kleinsten Niederschlagssummen	38
Abb. 16: RR(1d) für das hydrologische Jahr	XVII
Abb. 17: RR(1d) für das hydrologische Winterhalbjahr.....	XVII
Abb. 18: RR(1d) für das hydrologische Sommerhalbjahr	XVIII
Abb. 19: RR(3d) für das hydrologische Jahr	XVIII
Abb. 20: RR(3d) für das hydrologische Winterhalbjahr.....	XIX
Abb. 21: RR(3d) für das hydrologische Sommerhalbjahr	XIX
Abb. 22: RR(6d) für das hydrologische Jahr	XX
Abb. 23: RR(6d) für das hydrologische Winterhalbjahr.....	XX
Abb. 24: RR(6d) für das hydrologische Sommerhalbjahr	XXI
Abb. 25: RR(10d) für das hydrologische Jahr	XXI
Abb. 26: RR(10d) für das hydrologische Winterhalbjahr.....	XXII
Abb. 27: RR(10d) für das hydrologische Sommerhalbjahr.....	XXII
Abb. 28: RR(14d) für das hydrologische Jahr	XXIII
Abb. 29: RR(14d) für das hydrologische Winterhalbjahr.....	XXIII
Abb. 30: RR(14d) für das hydrologische Sommerhalbjahr.....	XXIV
Abb. 31: RR(21d) für das hydrologische Jahr	XXIV
Abb. 32: RR(21d) für das hydrologische Winterhalbjahr.....	XXV
Abb. 33: RR(21d) für das hydrologische Sommerhalbjahr.....	XXV
Abb. 34: RR(30d) für das hydrologische Jahr	XXVI
Abb. 35: RR(30d) für das hydrologische Winterhalbjahr.....	XXVI
Abb. 36: RR(30d) für das hydrologische Sommerhalbjahr.....	XXVII
Abb. 37: RR(60d) für das hydrologische Jahr	XXVII
Abb. 38: RR(60d) für das hydrologische Winterhalbjahr.....	XXVIII

Abb. 39: RR(60d) für das hydrologische Sommerhalbjahr.....	XXVIII
Abb. 40: RR(90d) für das hydrologische Jahr	XXIX
Abb. 41: RR(90d) für das hydrologische Winterhalbjahr.....	XXIX
Abb. 42: RR(90d) für das hydrologische Sommerhalbjahr.....	XXX
Abb. 43: RR(120d) für das hydrologische Jahr	XXX
Abb. 44: RR(120d) für das hydrologische Winterhalbjahr.....	XXXI
Abb. 45: RR(120d) für das hydrologische Sommerhalbjahr.....	XXXI

1. Einführung

Klimamodelle dienen zur Projektion des zukünftigen Klimas. Sie basieren auf thermodynamischen Gleichungen und weiteren physikalischen Gleichungen sowie auf Parametrisierungen von nicht direkt berechenbaren Prozessen, um das komplexe Klimasystem darstellen zu können. Parametrisierungen sind immer Vereinfachungen und beschreiben implizit die Wirkung bestimmter Prozesse, die zu kleinräumig oder zu komplex sind, um physikalisch explizit beschrieben werden zu können (DWD, 2010).

Obwohl Klimamodelle mit Unsicherheiten behaftet sind, werden sie in Wissenschaft und Politik als hilfreiches Instrument zur Klimafolgenabschätzung eingesetzt. In den Bereichen Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft, Biodiversität, Gesundheit, Verkehr und Tourismus wird mit weitreichenden zukünftigen Klimafolgen gerechnet, die sich regional unterschiedlich auswirken können. Mit dem Ziel, Planungssicherheit in Bezug auf Auswirkungen des Klimawandels zu gewährleisten, ermöglichen Klimamodelle sowohl die Entwicklung von Anpassungsstrategien als auch die Einleitung von Präventivmaßnahmen, die den Klimafolgen rechtzeitig entgegenwirken (KomPass, 2008 a).

Mit dem Klimawandel geht nach bisherigen Erkenntnissen nicht nur ein Temperaturanstieg einher, sondern auch Veränderungen des gesamten Klimas (DWD, 2010). Die klimatischen Veränderungen von hydrometeorologischen Größen, insbesondere des Niederschlags als wichtigste Größe des hydrologischen Zyklus, haben nicht nur Einfluss auf den mittleren Zustand, sondern besonders auf das Schwankungs- und Extremverhalten. Um das Risiko solcher Größen besser abschätzen zu können, ist es sinnvoll, Zeitreihenanalysen von klimatischen und hydrologischen Daten über einen längeren Zeitraum vorzunehmen. Auch intensive Szenario-Untersuchungen mittels regionaler Klimamodelle sind dabei zu betrachten (KLIWA, 2004).

Inwiefern sich Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt im regionalen Maßstab auswirken, ist bislang nur begrenzt analysiert (KLIWA, 2004). Um das Zusammenwirken von Klima und Wasserkreislauf besser zu verstehen, sind möglichst homogene und umfangreiche Daten zum Niederschlagsverhalten erforderlich (Hennegriff et al., 2011).

Aufgrund der Tatsache, dass in vielen Ländern der Weg von der Vorhersage eines extremen Niederschlagsereignisses bis zur Warnung der Bevölkerung nicht optimal geregelt ist, wird international an einer verbesserten Niederschlagsvorhersage sowie an der Optimierung der Vorhersage großer und extremer Ereignisse gearbeitet (DWD, 2010).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit findet ein Vergleich zwischen gemessenen Klimadaten und Modellergebnissen eines regionalen Klimamodells für das Lahneinzugsgebiet in Hessen für den Zeitraum 1971-2000 statt.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt darin, die Abbildungsgüte des regionalen Klimamodells COSMO-CLM Version 4.8 (im Folgenden kurz CCLM4.8) mittels einer Zeitreihenanalyse für das hydrologische Jahr und das hydrologische Sommer- bzw. Winterhalbjahr einzuschätzen. Insbesondere soll der Frage nachgegangen werden, ob neben der genügend genauen Abbildung von langjährigen jährlichen und halbjährlichen Niederschlagsmittelwerten auch das Ausmaß und Auftreten von maximalen und minimalen Niederschlagssummen an aufeinanderfolgenden Tagen durch das regionale Klimamodell nachvollzogen werden kann. Diese Evaluierung dient als Voraussetzung für künftige Modellierungen zu Hoch- und Niedrigwassergefahren mithilfe von CCLM4.8-Niederschlagsdaten für das 21. Jahrhundert als Antriebsdaten.

In Kapitel 1 erfolgt eine kurze Einführung in die Thematik. Des Weiteren wird in Kapitel 2 auf grundlegende Aspekte des Zusammenwirkens zwischen Klima und Wasserhaushalt eingegangen sowie das Untersuchungsgebiet und das CCLM-Modell vorgestellt. Kapitel 3 befasst sich mit Daten und Methoden und Kapitel 4 stellt die Ergebnisse dar. Zum Schluss folgen in Kapitel 5 eine Diskussion der Ergebnisse und ein Ausblick auf weitere mögliche Schritte.

2. Grundlagen

2.1 Hydrometeorologische Grundlagen

Die Hydrometeorologie befasst sich mit den Wechselwirkungen zwischen den atmosphärischen Vorgängen des Wasserkreislaufs und den hydrologischen Prozessen (DIN 4049-1, 1992). Hydrometeorologische Kenngrößen wie Niederschlag, Wasserdampftransport und Verdunstung sind für hydrologische Situationen ausschlaggebend.

Die Hauptbestandteile des hydrologischen Zyklus sind Niederschlag, Abfluss und Verdunstung (DIN 4049-1, 1992). Der Abfluss ist das Volumen des Niederschlags reduziert um den Verdunstungsanteil. Dieser fließt über die Vorfluter¹ oberirdisch ab oder verlässt über den Grundwasserabstrom das Einzugsgebiet unterirdisch. Der Abfluss eines Gewässers wird durch Regimefaktoren geprägt. Zu den Regimefaktoren gehören sowohl geogene, klimatische und geologische Faktoren, als auch geomorphologische, vegetationsbedingte und anthropogene Gegebenheiten (Hölting, et al., 2009).

Meteorologisch betrachtet ist Niederschlag ausgeschiedenes Wasser aus der Atmosphäre. Wasser liegt in der Atmosphäre in gasförmiger Phase als Wasserdampf vor. Dieser entsteht durch Verdunstung von flüssigem Wasser. Verdunstung findet an Seen, an Flüssen, an Ozeanen, über feuchtem Boden und an Pflanzen statt. Die Gesamtverdunstung wird als Evapotranspiration bezeichnet und setzt sich aus Evaporation und Transpiration zusammen. Evaporation ist die Bodenverdunstung bzw. die Verdunstung über freien Wasseroberflächen. Zur Evaporation wird die Interzeptionsverdunstung gezählt. Interzeption bedeutet, dass das Niederschlagswasser auf Pflanzenoberflächen kurzzeitig gespeichert wird und daraufhin entweder zum Boden durchtropft oder von den Pflanzenoberflächen direkt wieder verdunstet (GeoDZ, 2010).

Durch die genannten Verdunstungsprozesse wird ein ständiger Wasserdampfnachschub gewährleistet. Auf Verdunstungsprozesse wirken zusätzlich klimatische Faktoren wie Strahlung, Luft- und Bodentemperatur ein. Die Erde erwärmt sich durch die von der Sonne ausgehende Strahlung und nimmt somit Einfluss auf die vor Ort herrschende Temperatur. Je höher die Temperatur ist und je mehr Wasser zur Verfügung steht, desto höher ist die Verdunstung (DWD, 2010).

Die Luft kann nur eine bestimmte Menge Wasser aufnehmen und ist gesättigt bei einer relativen Luftfeuchte von 100%. Dann ist der Wasserdampf in der Atmosphäre maximal, d. h. es

¹Vorfluter sind Gerinne, in dem Wasser mit natürlichem oder künstlichem Gefälle abfließen kann (<http://www.wasserwissen.de/abwasserlexikon/v/vorfluter.htm>).

bilden sich Wassertropfen. Dieser Prozess wird als Kondensation bezeichnet. Meteorologisch gesehen ist es möglich, dass die Luft mehr Wasser aufnehmen kann und eine relative Luftfeuchte von mehr als 100% erreicht. In diesem Fall spricht man von Übersättigung der Luft.

Voraussetzung für die Kondensation ist das Vorhandensein von Kondensationskernen. Kondensationskerne sind hygroskopische² Aerosole³, die die Fähigkeit besitzen, Wasser anzulagern. Der wichtigste Kondensationsvorgang ist die Wolkenbildung (Häckel, 1999).

Für die Wolkenbildung müssen Wasserdampf und Kondensationskerne vorhanden sein bei gleichzeitiger Luftabkühlung. Dies erfolgt durch adiabatische⁴ Temperaturenniedrigung beim Aufsteigen von Luft. Die Temperatur sinkt entweder thermisch durch Konvektion⁵ oder durch das Zusammenströmen von Luft. Durch die Abkühlung der Luft sinkt zum einen der Sättigungsdampfdruck⁶ in der Luft, wodurch die relative Luftfeuchte ansteigt. Kondensation tritt ein und bei Erreichen einer bestimmten Tropfen- oder Kristallgröße fällt Niederschlag (Häckel, 1999). Niederschlag wird je nach Durchmesser der Tropfen oder Kristalle und Aggregatzustand unterschieden. Zu flüssigen Niederschlägen gehören Regen und Nieselregen. Regen besitzt eine durchschnittliche Tropfengröße über 0,5 mm. Die durchschnittliche Tropfengröße bei Nieselregen liegt unter 0,5 mm. Zu festen bzw. gefrorenen Niederschlägen zählen Schnee, Hagel, Graupel oder Eiskörner (HLUG, 2011).

Wind dient bei den Niederschlagsprozessen als Transportmittel. Erreicht das Niederschlagswasser den Erdboden, so kann es durch Infiltration⁷ in den Boden gelangen. Je nach Bodentyp bzw. Bodenart ist die Durchlässigkeit des Bodens bestimmt und damit auch die Wasseraufnahmekapazität. Diese ist zusätzlich abhängig von der vor Ort existierenden Vegetation (GeoDZ, 2010).

Ist die Niederschlagsintensität⁸ höher als die Infiltration, so kommt es zum Oberflächenabfluss. Das Niederschlagswasser fließt auf dem Boden ab und gelangt nach einer gewissen Zeit in den nächsten Bach oder Fluss. Die Stärke des Oberflächenabflusses wird durch die Niederschlagsintensität bestimmt. Der Oberflächenabfluss ist umso größer, je länger der Niederschlag dauert, je größer das Gefälle ist und je geringer die Infiltrationskapazität des Bodens am Einwirkungsort ist. Das Vermögen eines Bodens, das Wasser zu speichern, wird durch Bodenfrost stark herabgesetzt. Weniger Wasser kann aufgenommen werden und so-

² Hygroskopisch bedeutet Wasser anziehend.

³ Aerosole sind feste oder flüssige Schwebeteilchen in einem Gas.

⁴ Bei adiabatischer Zustandsänderung findet kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt.

⁵ Konvektion ist das Aufsteigen von warmer Luft bei gleichzeitiger Temperaturenniedrigung.

⁶ Sättigungsdampfdruck ist der Druck der dampfförmigen Phase, der bei Gleichgewicht von flüssigförmigen und dampfförmigen Phase entsteht.

⁷ Infiltration bezeichnet das Eindringen von Oberflächenwasser in den Boden.

⁸ Die Niederschlagsintensität ist Niederschlagshöhe, die in einem bestimmten Zeitraum fällt.

mit ist die Gefahr größer, dass der Oberflächenabfluss so stark ist, dass es in den naheliegenden Flüssen zu Hochwasser kommt (GeoDZ, 2010).

Die wichtigsten Größen, die das Abflussregime eines Flusses bestimmen, sind die Niederschlagsrate, ihre räumliche Verteilung und ihre Intensität. Die Niederschlagsrate (mm/Zeit) ist der Niederschlag an einem bestimmten Ort, definiert als Niederschlagsmenge über einer bestimmten Fläche und der betrachteten Zeitspanne. Besonders die Art des Niederschlags ist maßgeblich für die Abflussbildung. Kürzere intensivere Schauer haben einen anderen Einfluss, als langfristige weniger intensive Regenfälle. Zu weiteren Einflussfaktoren des Abflussgebietes gehören die Gewässerdichte und die Bodennutzung sowie die Form des Einzugsgebiets und dessen Relief (Hölting, et al., 2009).

Die Niederschlagsrate, die an einem bestimmten Ort gemessen wurde, gilt auch exakt nur dort. Für lokale Untersuchungen betrachtet man zusätzlich nächstgelegene Stationen. Für großräumigere Untersuchungen ist die Erfassung von Gebietsniederschlägen notwendig (Hölting, et al., 2009). Zur Ermittlung des Gebietsniederschlags gibt es verschiedene Methoden. Für größere Gebiete eignen sich z. B. das arithmetische Mittel, die Polygonmethode, das Isohyetenverfahren oder das Rasterverfahren, um das Gebietsmittel zu bestimmen. Es kommt auf die Einzugsgebietsgröße, die Orographie und die Verteilung der Stationen in dem zu untersuchenden Gebiet an, welche Methode angewendet wird. Das arithmetische Mittel bietet sich für ein ebenes Gelände und eine gleichförmige Verteilung der Stationen an. Dabei werden die Niederschlagshöhen der Stationen aufsummiert und durch die Anzahl der Stationen dividiert. Sind die Stationen jedoch nicht homogen verteilt, dann ist die Polygonmethode zur Ermittlung des Gebietsniederschlags vorteilhafter. Bei dieser Methode wird eine flächengewichtete Mittelbildung durchgeführt. Die Isohyetenmethode ist ein Verfahren, bei dem die Orographie berücksichtigt wird. Dabei werden die Linien gleicher Niederschlagshöhen (Isohyeten) mit Niederschlagshöhen benachbarter Stationen interpoliert und der Gebietsniederschlag durch flächengewichtete Mittelwertbildung erhalten. Das Isohyetenverfahren benötigt vor allem meteorologische Erfahrung. Die Rastermethode ist eine weitere mögliche Variante den Gebietsniederschlag zu ermitteln. Das Einzugsgebiet wird mit einem Gitternetz überzogen und die Niederschlagsstationen werden mit Hilfe geographischer Koordinaten den Gitterpunkten der Rasterzellen zugeordnet. Der Gebietsniederschlag wird als arithmetisches Mittel aller Gitterpunkte im Einzugsgebiet erhalten (Maniak, 1997).

Je nach Untersuchungsziel werden Niederschlagsraten als Tages-, Dekaden-, Monats-, Jahressummen oder Summenlinien dargestellt und ausgewertet (Hölting, et al., 2009). In dieser Arbeit werden maximale und minimale Niederschlagssummen über definierte Zeiträume gebildet.

2.2 Einfluss des Klimawandels auf Hoch- und Niedrigwassergefahren

Mit dem Klimawandel ändern sich sehr wahrscheinlich die Intensität und die Häufigkeit von Extremereignissen (Solomon et al., 2007). Für die Wasserwirtschaft in Deutschland bedeutet das voraussichtlich ein vermehrtes Auftreten von Starkniederschlägen, ein Ansteigen der Hochwassergefahr im Winter und Frühjahr und ein immer häufigeres Eintreten von Niedrigwasser im Sommer (Schuchardt et al., 2011).

Für die Abschätzung von Hoch- und Niedrigwassergefahren ist die Niederschlagsrate der entscheidende Faktor. Durch die Niederschlagsart, -dauer, -intensität und -verteilung wird das Abflussgeschehen beeinflusst. Der Abfluss ist statistisch in einen Hoch-, Mittel- und Niedrigwasserbereich eingeteilt. Hochwasser bedeutet eine zeitlich begrenzte Anschwellung in einem oberirdischen Gewässer, die einen vorgegebenen Schwellenwert überschreitet (DIN 4049-3, 1994). Dieser Schwellenwert muss abhängig vom Flussgebiet und den dort einwirkenden Niederschlagsverhältnissen definiert werden.

Damit Hochwasser im Binnenland entsteht, muss in einer bestimmten Zeit mehr Niederschlag fallen, als im Gewässernetz abfließen und im Boden versickern kann. Dabei können sehr unterschiedliche Niederschlagsverläufe zu Überschwemmungen führen (DWD, 2010). Natürliche Ursachen für Hochwasser sind Starkregen, Schneeschmelze und Eisversetzung⁹. Verschärft werden diese Faktoren durch anthropogene Einflüsse wie z.B. große Versiegelungsflächen (Maniak, 1997). Besonders in Deutschland ist die Versiegelung und die Eindämmung von Flussbetten ein großes Problem. Die Flüsse haben keinen ausreichenden Platz, um sich auszudehnen, da zu wenig Retentionsflächen¹⁰ vorhanden sind (Schuchardt et al., 2011).

Die meisten Niederschläge führen jedoch nicht zu Hochwasser. Um die Entstehungsursachen von Hochwasser zu untersuchen, muss der Zusammenhang mit Niederschlägen erfasst werden, bei denen der Gebietsniederschlag einen definierten Schwellenwert überschreitet und zu größeren effektiven Niederschlägen führt. Effektiver oder abflusswirksamer Niederschlag ist der Teil des Niederschlags, der unmittelbar als Hochwasser abfließt (Maniak, 1997).

Für statistische Auswertungen wird nach Jahreszeit oder nach Entstehungsursachen wie Schmelz- und Regenhochwasser unterschieden (Maniak, 1997). Entstehungsursache für Schmelzhochwasser ist Tauwetter in Verbindung mit Regen. Tauwetter herrscht, wenn Schneedecken bei Temperaturen über 0°C abschmelzen. Der zusätzlich fallende Regen

⁹Eishochwasser entsteht, wenn Treibeis den Abflussquerschnitt des Flusses einengt.

¹⁰Retentionsflächen werden, im Falle eines Hochwassers, als Überflutungsfläche verwendet.

beschleunigt das Abtauen der Schneedecken und trägt damit zusätzlich Wasser bei. Das abfließende Wasser kann nicht durch den Boden aufgenommen werden, da dieser entweder noch gefroren ist oder die Sättigung erreicht hat (DWD, 2011 a).

Für Regenhochwasser sind die Dauer und die Intensität des Niederschlags entscheidend. Werden bestimmte Schwellwerte bei Stark- und Dauerregen überschritten, führt das zu Überschwemmungen (DWD, 2011 b).

Hochwasserrisiko besteht dann, wenn die Landnutzung nicht an die Hochwassergefahr angepasst ist und Schäden entstehen können. Um die Hochwassergefahr abschätzen zu können, ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Hochwasser und das Ausmaß der Überschwemmung von Bedeutung. Auch die Vulnerabilität, also die Empfindlichkeit des betroffenen Gebiets gegenüber Überschwemmungen spielt dabei eine entscheidende Rolle. Daher ist jedes Hochwasser einzigartig (DWD, 2010).

Für Niedrigwasser existiert keine allumfassende Definition. Es wird lediglich zwischen Niedrigwasser, Dürre und Trockenheit unterschieden. Trockenheit ist gebietsabhängig und ist meteorologisch gegeben, wenn der Niederschlag unterhalb des mittleren Niederschlages bleibt. Für Niedrigwasseruntersuchungen sollte daher das gesamte Ausmaß des Wassermangels erfasst werden. Dabei sind Merkmale für Niedrigwasser zu berücksichtigen, wie das Eintrittsdatum, die Größe des Abflusses und die Abflussdauer, aber ebenso wird eine Folge von trockenen bzw. niederschlagsarmen Tagen betrachtet, an denen ein bestimmter mittlerer Niedrigwasserabfluss unterschritten wird. Der Grenzwert ist abhängig von der Gewässernutzung (Maniak, 1997).

Ändert sich in Zukunft die Intensität und Häufigkeit von Hoch- und Niedrigwasser durch ein verändertes Niederschlagsverhalten bedingt durch den Klimawandel, ist es erforderlich, rechtzeitig zukunftsorientiert Maßnahmen zu treffen, die sowohl die Natur als auch den Menschen vor den negativen Auswirkungen der Klimaveränderungen nachhaltig schützen werden (KomPass, 2008 a).

2.3 Untersuchungsgebiet Lahn

Die Lahn entspringt im Rothaargebirge in ca. 600 m über NN und mündet bei Niederlahnstein in den Rhein. Das Einzugsgebiet der Lahn mit insgesamt 5930 km² erstreckt sich über die drei Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Hessen und Rheinland-Pfalz. Das Lahneinzugsgebiet ist weitgehend von Berg- und Hügelland umgeben, d.h. etwa 20% der Flächen liegen in Höhen über 400 m über NN. Die Lahntalaue liegt mit 12% des Einzugsgebiets unterhalb von 200 m über NN (HLUG, 2003).

Das Einzugsgebiet der oberen Lahn bis zum Pegel Leun nimmt eine Fläche von 3571 km² ein. Die Lahn fließt ausgehend vom oberen Lahntal von West nach Ost bis zur Wetschaftsenke. Dabei durchquert sie das dicht bewaldete Gladenbacher Bergland und das Marburg-Gießener Lahntal. In der Wetschaftsenke knickt die Lahn ab. Die Lahn fließt von dort weiter in Südrichtung, vorbei an steil ansteigenden und dichtbewaldeten Gebieten, dem westlich gelegenen Lahnbergen und dem östlich gelegenen Marburger Rücken. Zu den bedeutendsten Nebenflüssen der Lahn gehören die Perf, die Dautphe, die Wetschaft, die Ohm und die Dill (HLUG, 2003).

Die Lahn ist nur teilweise beschiffbar. Von Gießen bis zur Mündung in den Rhein zählt sie zu den Bundeswasserstraßen. Zwischen Limburg und der Mündung in den Rhein ist sie schiffbar für Freizeitaktivitäten wie z.B. Rudern oder Paddeln. Wegen Stauhaltung zwischen Gießen und Limburg ist die Lahn dort nur bedingt schiffbar. In Limburg befindet sich eine Schleuse (Michel et al., 2001).

Im Untersuchungszeitraum 1971-2000 ist in den Höhenlagen des Lahneinzugsgebiets ein mittlerer Jahresniederschlag von etwa 1100 bis ca. 1300 mm gefallen (HLUG, 2011). Die Höhenlagen sind sehr niederschlagsreich. Dort befinden sich relativ undurchlässige Böden. Die Lahntalaue besteht teils aus lehmigen, teils aus sandigen Böden und das Landschaftsbild wird durch Wiesenflächen bestimmt (HLUG, 2003).

Die Lahnregion wird aufgrund der Höhenlage kaum als landwirtschaftliche Ackerfläche genutzt (HLUG, 2011). Die Landschaft des Lahntals ist hauptsächlich durch Wald- und Wiesenflächen geprägt und bietet zahlreiche Kultur- und Freizeitangebote. Das Lahneinzugsgebiet gilt als Naherholungsgebiet und Tourismusregion (dasLahntal, 2006-2010).

Hochwasserprobleme entstehen seit Menschen sich an dem Flusslauf der Lahn ansiedelten. Das Hochwasserereignis vom 09./10.1.1552 zerstörte Brücken in Marburg, Gießen, Wetzlar, Diez und Weilburg und stellte die angesiedelte Bevölkerung vor große Herausforderungen.

Seit 1880 gibt es Wasserstands- und Abflussmessungen an der Lahn. Ein Hochwassermelddienst existiert seit dem letzten Jahrhunderthochwasser am 08.02.1984 (ZMW, 2010).

Eine Betontafel in Limburg am Schlossberg erinnert an historische Hochwasserereignisse. Unterstrichen sind die Hochwasser des 20. Jahrhunderts (s. Tab. 1). In Abbildung 1 sind Hochwasserstände der Lahn bei Limburg im Zeitraum 1258-1984 zu erkennen. Es wird deutlich, dass in den Jahrhunderten vor 1800 die Hochwasserstände deutlich höher ausfielen als im Zeitraum 1800-1984 (Schmidt, 2000).

Tab. 1: Hochwasserstände der Lahn in Limburg an Tafel am Schlossberg
(Schmidt, 2000)

Tag	Jahr	NN + [m]	Tag	Jahr	NN + [m]	Tag	Jahr	NN + [m]
25.07.	1342	113,95	--02.	1396	112,55	29.02.	1784	111,78
05.01.	1643	113,88	15.01.	1763	112,52	12.12.	1688	111,76
---	1610	113,76	16.02.	1397	112,24	<u>13.01.</u>	<u>1929</u>	<u>111,50</u>
---	1721	113,66	07.12.	1678	112,17	<u>05.02.</u>	<u>1909</u>	<u>111,48</u>
---	1552	113,30	<u>02.02.</u>	<u>1984</u>	<u>112,14</u>	06.01.	1373	111,42
24.02.	1374	113,12	15.11.	1753	112,10	<u>31.05.</u>	<u>1984</u>	<u>111,36</u>
12.01.	1255	112,98	<u>12.02.</u>	<u>1946</u>	<u>111,96</u>	19.01.	1841	111,19
18.01.	1739	112,83	04.08.	1776	111,92	---	1614	111,16

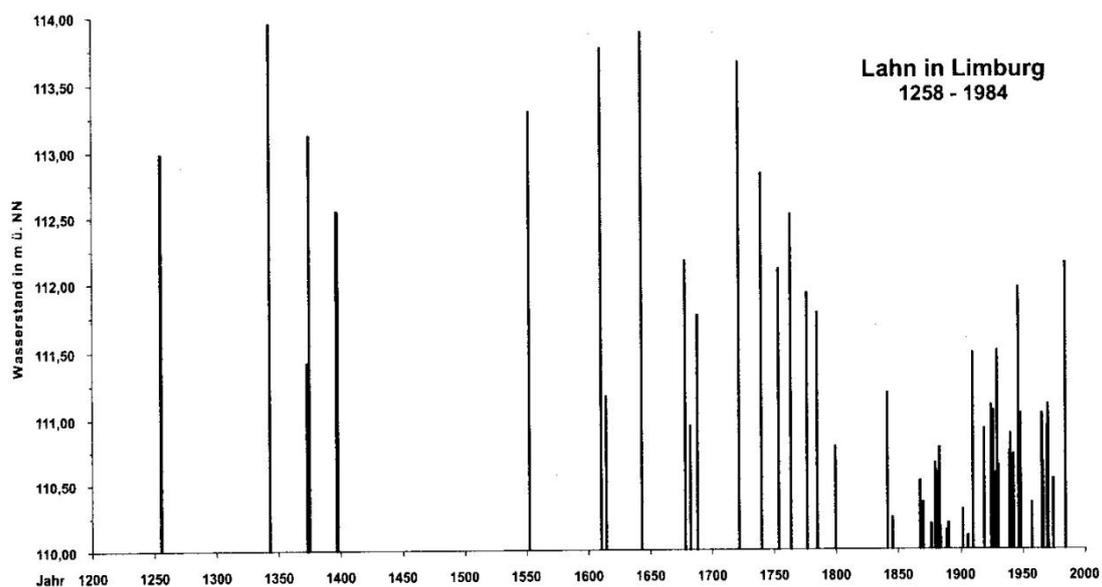


Abb. 1: Hochwasserstände der Lahn bei Limburg von 1255 bis 1984
(Schmidt, 2000)

2.4 Regionale Klimamodellierung

Regionale Klimamodelle werden von den globalen Klimamodellen unterschieden. Globale Modelle sind der Antrieb für regionale Modelle und regionale Modelle werden als Input für verschiedene Wirkmodelle genutzt, z.B. für das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Hennegriff et al., 2011). LARSIM ist ein deterministisches Wasserhaushaltsmodell, das ermöglicht, Teilprozesse des Wasserhaushalts, z.B. Interzeption, Evatranspiration, etc. darzustellen und räumlich zuzuordnen. Außerdem kann es als Flussgebietsmodell zur Simulation und Vorhersage von Hoch- und Niedrigwasser eingesetzt werden (Bremicker, 2000). Im HLUG kommt es in der Hochwasservorhersagezentrale zur Abflussvorhersage zum Einsatz.

Bei regionalen Klimamodellen unterscheidet man zwischen statistischen und dynamischen Modellen. Die statistischen Modelle basieren auf statistischen Zusammenhängen zwischen Klimaparametern und gemessenen Werten verschiedener Messstationen. Dabei wird angenommen, dass „der statistische Zusammenhang auch in der Zukunft bestehen bleibt“. Statistische Verfahren sind besonders gut geeignet, Situationen darzustellen, die so oder ähnlich bereits beobachtet wurden (Umweltatlas Hessen, 2006).

Im Gegensatz zur statistischen Regionalisierungsmethode baut die dynamische Regionalisierungsmethode auf physikalischen Zusammenhängen für einen Ausschnitt des Globus mit einer höheren Auflösung als das globale Modell auf. Der Vorteil gegenüber den statistischen Modellen liegt darin, dass auch Änderungen außerhalb des Simulationsgebietes berücksichtigt werden und auch Situationen physikalisch beschrieben werden können, die noch nicht beobachtet wurden (Umweltatlas Hessen, 2006).

Die globalen Klimamodelle, ebenso die regionalen Modelle, sind mit Fehlern behaftet, da sie die Natur nicht exakt abbilden können. Fehler, die im globalen Modell vorkommen, können sich in das regionale Modell übertragen. Um den Fehler für die Hoch- und Niedrigwassergefahrenabschätzung möglichst gering zu halten ist es unabdingbar, möglichst homogene Daten zu erfassen und auf systematische Fehler hinzuweisen. Je kleiner der Fehler, desto besser die Güte des Modells, desto verlässlicher die resultierende Abschätzung (Hennegriff et al., 2011).

Klimamodelle sollten möglichst genau mit der Beobachtung übereinstimmen. Aufgrund der Komplexität des Klimasystems und dessen Umsetzung im Modell tritt eine völlige Übereinstimmung nicht ein. Anhand der Differenz zwischen Modell- und Beobachtungsdaten kann auf die Unsicherheit der Modellprojektion geschlossen werden. Für die Abweichung sind

neben den stochastischen Schwankungen systematische Abweichungen verantwortlich. Die systematischen Abweichungen bezeichnet man als Bias (Mudelsee et.al., 2010).

Um zu realistischen Niederschlagsmengen zu kommen, sind demzufolge nachgeschaltete Korrekturverfahren (Bias-Korrektur¹¹) anzuwenden. Durch diese Korrekturverfahren werden zunächst die Niederschlagsmengen an Beobachtungswerte angepasst. Offen bleibt zunächst, ob auch ereignisbezogene Niederschlagsmengen genügend genau nachgebildet werden. In den Modellen ist es zudem wichtig, auch Rückkopplungen zwischen Hydrologie, Vegetation und Klima zu berücksichtigen, da diese Faktoren bestimmte Prozesse verstärken oder abschwächen können. Auch Wassernutzungsprozesse sollten berücksichtigt werden (GeoDZ, 2010).

Die Überprüfung der Vergleichbarkeit der COSMO-CLM-Ergebnisse für historische Zeiträume mit den gemessenen Daten ist somit grundlegend für nachfolgende Untersuchungen.

2.4.1 CCLM4.8-Modell

Das COSMO-CLM-Modell (COSMO- Climate Limited-area Model) ist ein dynamisches Regionalisierungsverfahren und ist abgeleitet aus dem lokalen Wettervorhersagemodell (Lokal-Modell, LM) des DWD. Zum Klimamodell weiterentwickelt wurde es durch eine Kooperation von Forschungsinstituten und Universitäten. Das Modell kann die räumliche Struktur nur mit der Modellgitter-Auflösung der jeweiligen Simulation darstellen (HLUG, 2010).

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Niederschlagsdaten für den Zeitraum 1971-2000, stammen aus der Version 4.8 des CCLM-Modells. Diese Version besitzt eine Auflösung von 7*7km² und deckt alle Gewässereinzugsgebiete in Deutschland ab (Kottmeier, 2010).

¹¹ Durch Bias-Korrektur werden modellierte Daten an beobachtete Daten angepasst und so der systematische Fehler verkleinert.

2.4.2 Untersuchungsgebiet im CCLM4.8-Modell

Für einzelne Teilräume in Hessen (s. e) in Abb. 2) wurden rechteckige Untersuchungsräume anhand von shapefiles¹² von der Abteilung Wasser des HLUg vorgegeben. Die ausgewählten Untersuchungsräume entsprechen in etwa den Flussgebieten a) der Lahn bis zum Pegel Leun, b) der Diemel bis zum Pegel Helmarshausen, c) der Fulda bis zum Pegel Bad Hersfeld und d) den Gewässern Gersprenz und Mümling. In der vorliegenden Arbeit wird das Lahngebiet evaluiert.

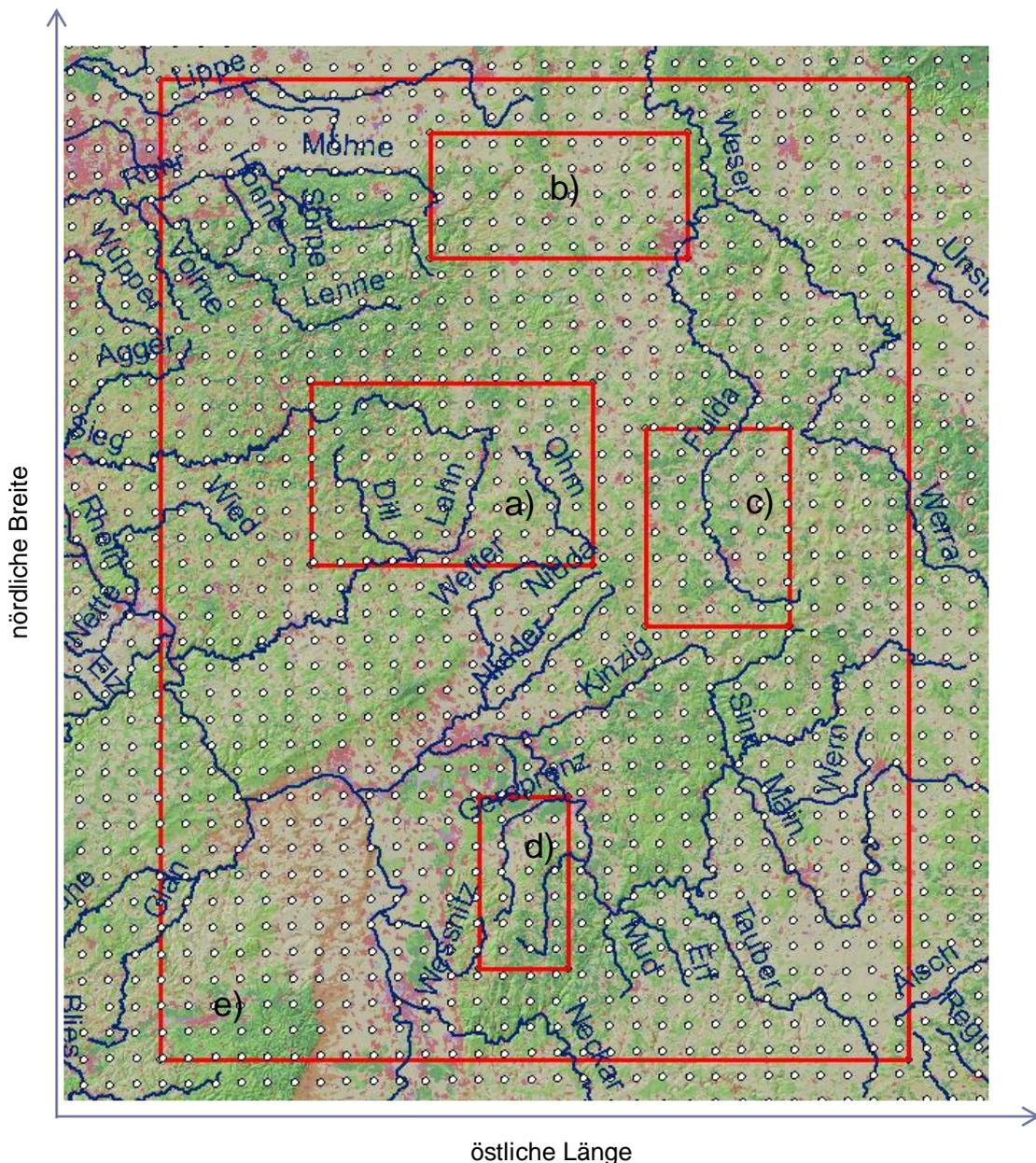


Abb. 2: Ausschnitt der Untersuchungsgebiete im CCLM4.8-Modell:

a) Lahngebiet bis zum Pegel Leun, b) Diemelgebiet, c) Fuldagebiet, d) Gersprenz und Mümling und e) Hessen

¹² Ein Shapefile (.shp) ist ein Dateiformat, das von der Firma ESRI zur Speicherung von Geometriedaten entwickelt wurde (ESRI, 1998).

3. Daten und Methoden

3.1 Verwendete Daten

Für die Auswertung der hydrometeorologisch relevanten Kennwerte, d.h. der maximalen und minimalen Niederschlagssummen werden zum einem Tagesdaten der Stationen sowie Tagesdaten der CCLM4.8-Niederschlagsdaten über den Zeitraum 1971-2000 verwendet. Für denselben Zeitraum liegen Rasterdaten mit der Auflösung von 1*1 km vom DWD vor. Diese stehen jedoch nur als langjährige Monatsmittelwerte bereit.

3.1.1 Stationsdaten

Bei der Niederschlagsmessung treten in Bezug auf das Messgerät Benetzungs- bzw. Verdunstungsverluste sowie systematische Fehler auf. Die Stationsdaten sind demzufolge reine Messdaten ohne Niederschlagskorrektur. Niederschlagskorrekturen werden durchgeführt, um den systematischen Fehler zu korrigieren (DWD, 2011 d).

Aus der Stationsliste der in IDP verfügbaren DWD-Stationen werden die vorliegenden Niederschlags- und Klimastationen in Lahneinzugsgebiet herausgesucht und auf Fehlwerte¹³ untersucht. Mithilfe des interaktiven Diagnose- und Präsentationstools (IDP) des HLUG werden die Tagesdaten des Niederschlags für den Zeitraum 1971-2000 exportiert.

Insgesamt befinden sich 61 Messstationen im Lahnggebiet, davon besitzen 27 Stationen Fehlwerte. Die Fehlwerte der Stationen beziehen sich auf den Zeitraum von 1971–2000 und treten von 0,01% bis 100% auf (s. Tab. 2). Es werden folgend nur Stationen im Gebietsmittel berücksichtigt, die keine Fehlwerte aufweisen. Demnach werden 34 Stationen im Gebietsmittel berücksichtigt (s. Abb. 4).

Die Bestimmung des Gebietsmittels anhand der Stationen im Lahnggebiet im Zeitraum 1971-2000 wird im Kapitel 3.2.1 näher erläutert.

¹³ Fehlwerte sind Werte, die im Datensatz nicht vorhanden sind bzw. nicht registriert wurden.

Tab. 2: Stationen mit Fehlwerten im Lahnggebiet

Anzahl der Stationen	Stationen mit Fehlwerten	Fehlwerte im Zeitraum 1971-2000
1	ASSLAR-KL.ALTENSTAED	35,55%
2	BIEDENKOPF (SACKPFEI	41,68%
3	BURBACH-WUERGENDORF	2,21%
4	BUSECK-GROSSEN-BUSEC	4,17%
5	COELBE, KR. MARBURG-	8,89%
6	DILLENBURG	0,81%
7	EHRINGSHAUSEN-KOELSC	32,52%
8	ENDBACH,BAD-WOMMELSH	16,13%
9	FRONHAUSEN	13,05%
10	FUCHSKAUTEN (WST)	100,00%
11	GIESSEN (LAHNTAL)	55,57%
12	GREIFENSTEIN-ALLEND	1,68%
13	HAIGER	25,01%
14	HAIGER-LANGENAUACH	76,11%
15	HERBORN	0,28%
16	HOMBERG (OHM)	1,68%
17	LAASPHE,BAD	58,07%
18	LAASPHE,BAD-HESELBA	41,93%
19	LAUBACH-FREIENSEEN	36,38%
20	LOEHNBERG-OBERSHAUSE	74,99%
21	MARBURG-DILSCHHAUSEN	1,12%
22	MITTENAAR-BICKEN	4,74%
23	NETPHEN-HAINCHEN	3,34%
24	NEUSTADT,KR.MARBURG-	4,44%
25	RABENAU-GEILSHAUSEN	44,16%
26	RAUSCHENBERG_HESSEN	0,01%
27	WAHLEN (AWST)	91,82%

3.1.2 REGNIE-Rasterdaten

Die Rasterdaten der regionalisierten Niederschlagsverteilungen (REGNIE) mit einer Auflösung von 1*1 km² sind regionalisierte Punktmessungen, die auf ein Gitter übertragen wurden. Die Basis dieser Daten sind Stationsdaten, die über die Fläche und die Höhe interpoliert wurden. Die Rasterdaten wurden als langjährige Monatsmittelwerte vom DWD über den Zeitraum 1971-2000 mit und ohne Niederschlagskorrektur bereitgestellt. Die Niederschlagskorrektur wurde nach dem Verfahren nach Richter vom DWD durchgeführt: Der Korrekturwert ist stationsspezifisch und richtet sich nach der Exposition der Station und der Form des Niederschlags (Richter, 1995).

3.1.3 CCLM4.8-Niederschlagsdaten

Die Nutzung der Klimamodelldaten sind im Rahmen eines (BfG)-KLIWAS-Projektes durch das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) freigegeben. Die Daten liegen als einzelne Rasterpunkte in Matrixform vor und werden zudem aggregiert für die einzelnen Teilflächen als Gebietsmittelwerte für jeden Tag im Zeitraum 1971–2000 ausgegeben.

Simulationsdaten sind keine Messdaten und besitzen demnach auch keine Messfehler. Daher benötigen die CCLM-Daten keine Korrektur nach Richter. Allerdings besitzen Klimamodelldaten systematische Fehler, bedingt durch den Aufbau auf physikalischen und thermodynamischen Gleichungen sowie Parametrisierungen. Die bereitgestellten CCLM4.8-Niederschlagsdaten sind bereits durch das KIT mittels linearer Skalierung um den systematischen Fehler korrigiert worden (Bias-Korrektur).

Die lineare Skalierung ist ein Verfahren, bei dem beobachtete Daten gegen modellierte Daten aufgetragen werden. Damit wird die systematische Abweichung an eine Ausgleichsgerade angepasst, so dass für die korrigierten Daten eine Glättung des systematischen Fehlers erfolgt.

Aufgrund der Tatsache, dass nur korrigierte CCLM4.8-Niederschlagsdaten vorliegen und nicht die unkorrigierten Originaldaten, ist der eigentliche Modellfehler nicht bekannt.

3.2 Datenaufbereitung

Um die verwendeten Daten miteinander vergleichen zu können müssen sie aufbereitet werden. Voraussetzung für den Vergleich der Daten ist, dass Flächenrepräsentanz gegeben ist. Dazu müssen gleiche Randbedingungen gegeben sein. Das vorgegebene shapefile, nach dem das Lahnggebiet ausgewählt wurde, passt nicht exakt auf die Rastermittelpunkte im CCLM-Model (s. Abb. 3) und ist nicht geeignet als Untersuchungsrahmen. Sowohl die CCLM4.8-Niederschlagsdaten als auch die REGNIE-Daten sind Rasterdaten, allerdings in unterschiedlicher Auflösung. Die REGNIE-Rasterdaten haben eine Auflösung von 1*1 km und die CCLM4.8-Niederschlagsdaten eine Auflösung von 7*7km.

Um dennoch einen Vergleich zwischen den Modell-Rasterdaten und den REGNIE-Rasterdaten anzustellen, wurde durch freundliche Unterstützung von Herrn Bastian (HLUG, Abteilung Wasser) ein Raster mithilfe der CCLM4.8-Rastermittelpunkte und ArcGIS9¹⁴ erstellt (s. Abb. 3).

¹⁴ ArcGIS9 ist ein Programm der Firma ESRI und dient der Aufbereitung und Analyse von Daten mit Raumbezug

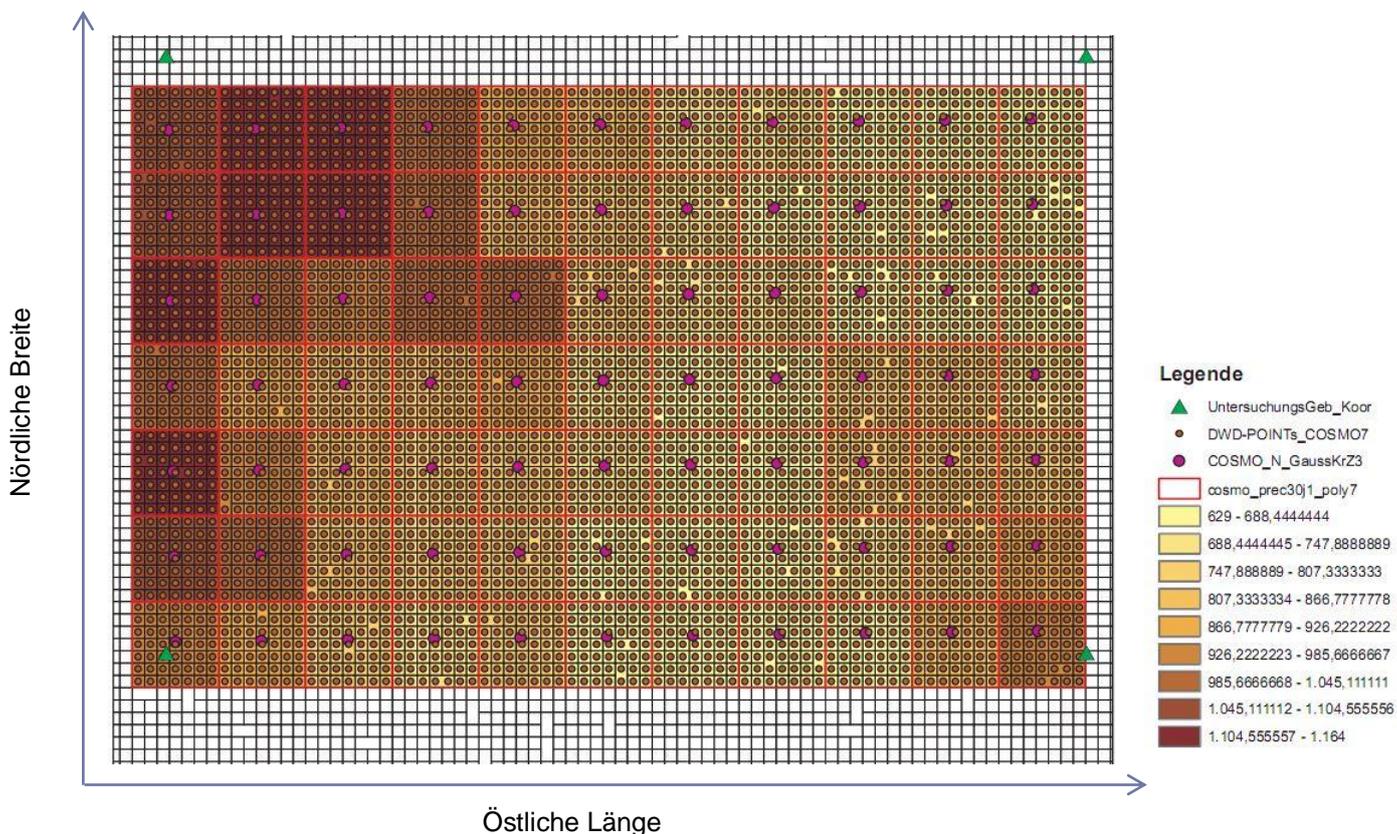


Abb. 3: Überlagerung des in ArcGIS9 erstellten CCLM-Rasters und des DWD-REGNIE-Rasters

Das schwarze Gitternetz stellt das 1*1 km DWD-Raster und das rote Gitternetz das 7*7 km CCLM-Raster dar. Die Farben stellen den 30-jährigen Mittelwert des Niederschlags der CCLM-Simulation dar (siehe Farblegende). Die grünen Dreiecke stellen die Eckkoordinaten des shapefiles dar, nach denen die CCLM-Daten ausgewählt wurden (siehe UntersuchungsGeb_Koor). Die violetten Punkte kennzeichnen die Rastermittelpunkt des CCLM-Rasters (siehe COSMO_N_GaussKrZ3). Die Rastermittelpunkte des DWD-Rasters sind mit einem braunen Punkt dargestellt (siehe DWD-POINTS_COSMO7). Die im DWD 1*1 km Raster zusammengefassten Rasterzellen, haben den gleichen Wert.

Für die Erstellung des Rasters wurde zunächst die Zellgröße des Rasters und die untere linke Ecke (8,082° östliche Länge, 50,514° nördliche Breite) sowie die obere rechte Ecke (9,168° östliche Länge, 50,517° nördliche Breite) definiert. Aufgrund der Auflösung des CCLM4.8-Modells wurde für die Zellgröße des Rasters 49 km² festgelegt. Um das Raster auf die Fläche aufzuspannen wurde zusätzlich die Spalten- und Zeilenzahl festgelegt. Insgesamt besteht das neu definierte Raster aus 77 Zellen, d. h. aus sieben Zeilen und elf Spalten (siehe Abbildung 2). Das CCLM-Raster erstreckt sich über eine Fläche von 3773 km².

Die Farben von gelb bis dunkelbraun in Abbildung 2 kennzeichnen das 30-jährige-Niederschlags-Mittel der CCLM-Daten im Zeitraum 1971-2000 pro CCLM-Rastermittelpunkt bezogen auf die dem Rastermittelpunkt zugeordnete Zelle. Das erstellte CCLM-Raster kann nun auf das REGNIE-Raster mit der Zellgröße von 1 km² in ArcGIS9 gelegt werden. Durch die Überlagerung der beiden Raster können die DWD-REGNIE-Rasterdaten den CCLM-

Rasterdaten zugeordnet werden, d.h. es findet eine Zuordnung des feineren Rasters zu dem größeren Raster statt. Nach der Festlegung dieser Randbedingungen passen jeweils 49 DWD-Rasterwerte in eine Zelle des definierten CCLM-Rasters. Mittelt man die in eine Rasterzelle passenden DWD-Werte, so erhält man das 30-jährige Mittel der DWD-Daten im Zeitraum 1971-2000 und kann dieses mit dem 30-jährigen Mittel der Rasterwerte des CCLM4.8-Modells vergleichen und die Abweichungen pro Rasterzelle des CCLM Rasters abschätzen.

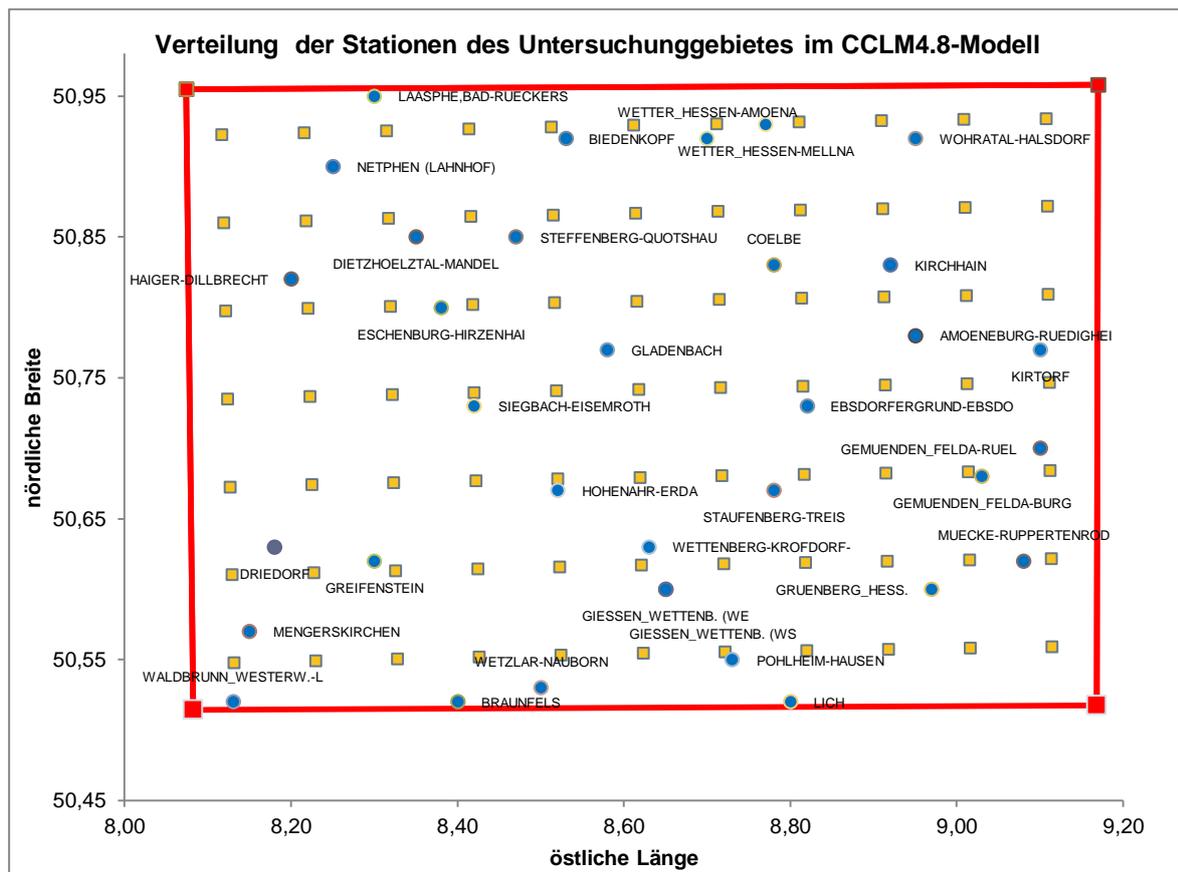


Abb. 4: Verteilung der Stationen im Untersuchungsraum

Die gelben Quadrate kennzeichnen die Rastermittelpunkte der CCLM-Daten. Die blauen Kreise stellen die Niederschlags-Messstationen dar. Das rote Rechteck bildet den Untersuchungsrahmen aus den Eckpunkten des CCLM-Rasters.

Die Stationen wurden mittels der Eckkoordinaten des CCLM-Rasters aus der Stationsliste des DWD ausgewählt. Für den Vergleich von Stationsdaten und Klimamodell Daten wird zunächst ein arithmetisches Gebietsmittel der im Lahnggebiet relevanten Stationen gebildet. Das 30-jährige Mittel dient dabei als Vergleichsmaßstab. Aus dem Gebietsmittel und den CCLM Daten im Zeitraum 1971-2000 werden nun über definierte Zeiträume Niederschlagssummen gebildet, die für Hochwasser und Niedrigwasser kennzeichnend sind. Für Hoch-

wasser sind Niederschlagssummen von 1, 3, 6, 10, 14 und 21 aufeinanderfolgenden Tagen relevant und für Niedrigwasser Niederschlagssummen von 30, 60, 90 und 120 aufeinanderfolgenden Tagen.

Um die Niederschlagssummen zu bilden, werden Tageswerte benötigt. Da die Rasterdaten des DWD lediglich als Monats- und Jahreswerte vorliegen, werden Stationen im Lahnggebiet herausgesucht und ein Gebietsmittel aus den Tageswerten der Stationen gebildet. Der Vergleich der Stationsdaten des DWD mit den DWD-Raster-Daten dient zur Flächenkorrektur der Stationsdaten. Um die Punktdaten der Stationen mit den flächenhaften Rasterdaten zu vergleichen, wird ein 30-jähriges-Mittel aus dem Gebietsmittel der Stationen gebildet mit dem Ziel, einen Faktor abzuleiten, der die Stationsdaten flächenkorrigiert. Zum Zusammenfassen der Daten werden charakteristische Maßzahlen wie Mittelungsmaße, Variationsmaße und Quantile¹⁵ gebildet.

3.2.1 Ermittlung Gebietsniederschlag

Der Gebietsniederschlag wird benötigt bei der Analyse von einzugsgebietsbezogenen hydrologischen Untersuchungen. Dazu werden punktförmige Messungen verwendet, die aus den Stationen innerhalb des Untersuchungsgebietes ausgewählt werden. Ab einer Einzugsgebietsgröße von 10 km² müssen mehr als drei Messstationen im Gebietsmittel berücksichtigt werden (Maniak, 1997).

In dieser Arbeit wird das arithmetische Mittel der Niederschlagshöhen aus den 34 Stationen gebildet, da kein Rasterdatensatz mit Tageswerten für das Untersuchungsgebiet vorliegt. Die CCLM-Rasterdaten werden bereits durch das KIT an regionalisierten Messdaten des DWD, die noch nicht um den systematischen Niederschlagsmessfehler korrigiert sind, Bias korrigiert. Der systematische Fehler wird somit auf die CCLM4.8-Niederschlagsdaten übertragen. Die CCLM4.8-Niederschlagsdaten müssten demnach zu gering sein und eher mit den Messdaten übereinstimmen.

¹⁵ Häufigkeitsanteile

3.2.2 Mittelwert, Median und Quartil

Um den arithmetischen Mittelwert (Schönwiese, 2006) einer Stichprobe zu bestimmen, gilt folgende Formel:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{1}{n} (a_1 + a_2 + \dots + a_n) \quad [1]$$

n = Stichprobenumfang

\bar{a} = arithmetisches Mittel

i = Nummerierungsindex

Ein weiterer wichtiger Wert zur Beschreibung eines Datenkollektivs ist der Median. Der Median beschreibt den Zentralwert. Der Median liegt dort, wo die prozentuale kumulative Verteilung den Wert 50% erreicht. Zunächst muss eine Rangfolge erstellt werden, um den Median rechnerisch bestimmen zu können (Schönwiese, 2006).

Wenn der Stichprobenumfang ungerade ist, dann gilt:

$$Med = \frac{a_{n+1}}{2} \quad [2]$$

Ansonsten muss der Median wie folgt berechnet werden:

$$Med \approx \frac{(a_{n/2-1} + a_{n/2+1})}{2} \quad [3]$$

Quartile dienen zur Abgrenzung von Merkmalen eines Datenkollektivs, z.B. ein Viertel, ein Zehntel usw. (s. Abb. 5).

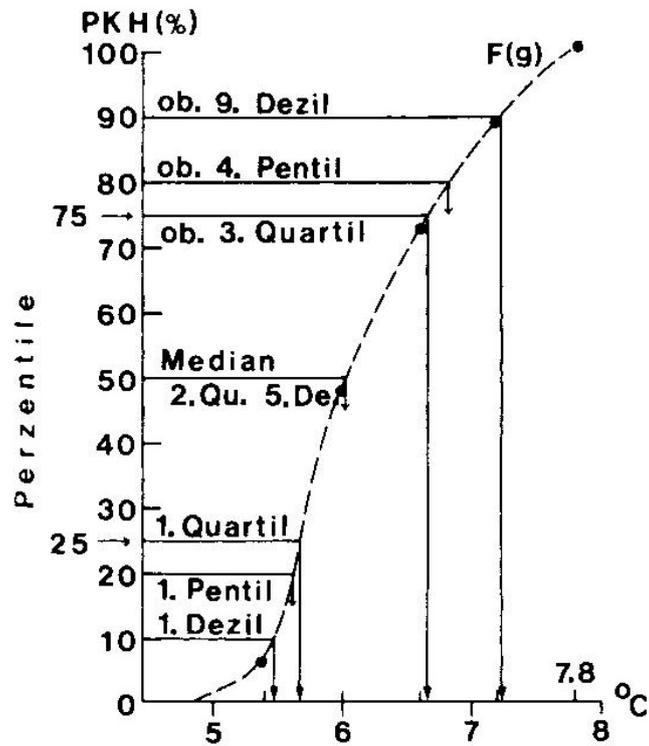


Abb. 5: unterschiedliche Quantile einer Verteilungsfunktion

(Schönwiese, 2006)

Mithilfe von Boxplots können unterschiedliche Quantile graphisch dargestellt werden, um einen Überblick über das Datenspektrum zu erhalten. Der Abstand zwischen dem Maximum und Minimum der Daten wird als Spannweite bezeichnet. Der Abstand zwischen dem 1. Quartil und dem 3. Quartil bezeichnet man als Interquartilsabstand. In dem Bereich liegen 50% der Daten.

3.2.3 Variationsbreite, durchschnittliche Abweichung, Standardabweichung und Varianz

Durch die Variationsbreite wird die Schwankungsbreite des Datenbereichs festgestellt (Schönwiese, 2006):

$$b = a_{max} - a_{min} \quad [4]$$

Diese beinhaltet allerdings nur das Maximum und das Minimum des Bereichs. Um eine bessere Abschätzung zu erreichen und die Daten nicht falsch zu charakterisieren, erhält man ein besseres Variationsmaß mit der durchschnittlichen Abweichung (Schönwiese, 2006):

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |a_i - \bar{a}| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |a_i'| \quad [5]$$

$$a_i' = \text{Abweichung vom arithmetischen Mittelwert} = a_i - \bar{a}$$

Die vorherige Gleichung beschreibt den arithmetischen Mittelwert der absoluten Beträge der Datenabweichungen vom arithmetischen Mittelwert. Das meist verwendete Variationsmaß ist die Standardabweichung (Schönwiese, 2006) Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streuung um den Mittelwert:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n a_i'^2} \quad [6]$$

Das Quadrat der Standardabweichung wird als Varianz bezeichnet:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n a_i'^2 \quad [7]$$

3.2.4 Definition und Ermittlung von hydrologisch relevanten Niederschlagskennwerten

Für Hochwasser sind die größten Niederschlagssummen von 1, 3, 6, 10, 14 und 21 aufeinanderfolgenden Tagen und für die Niedrigwasser sind die kleinsten Niederschlagssummen von 30, 60, 90 und 120 aufeinanderfolgenden Tagen kennzeichnend. Um diese Kennwerte auf Nachvollziehbarkeit durch das CCLM4.8-Modell zu überprüfen werden die Stationsdaten mittels IDP, wie bereits in Kap. 3.2 erwähnt, exportiert. Diese werden im ascii-Format¹⁶ ausgegeben und müssen zunächst in ein Excel-Format übertragen werden.

Nachdem Import der Jahresreihen der Stationsdaten in Excel¹⁷ wird mithilfe der Excel-Funktion „=MITTELWERT()“ das arithmetische Gebietsmittel der Stationen für den kompletten Zeitraum 1971-2000 gebildet. Da nicht die komplette Jahresreihe, sondern das hydrologische Jahr und das hydrologische Winter- und Sommerhalbjahr untersucht wird, müssen diese Zeitspannen aus dem Zeitraum 1971-2000 gefiltert werden. Das hydrologische Jahr beginnt am 1.11 und endet am 31.10 eines Jahres und wird unterteilt in das hydrologische Winterhalbjahr (November-April) und das hydrologische Sommerhalbjahr (Mai-Oktober). Ist beispielsweise vom hydrologischen Jahr 1972 die Rede, so beginnt dieses am 1.11.1971 und endet am 31.10.1972.

Die Niederschlagskennwerte können nun für die jeweiligen Zeitspannen gebildet (siehe Abb. 6) und die größten bzw. kleinsten Niederschlagssummen können mit Hilfe der Excel-Funktionen „=MAX()“ und „=MIN()“ extrahiert werden. Diese Prozedur wird mit den bereitgestellten CCLM4.8-Daten wiederholt.

¹⁶ Das ascii-Format ist eine amerikanische Zeichenkodierung.

¹⁷ Excel ist das am weitesten verbreitete Tabellenkalkulationsprogramm von Microsoft.

		SUMMEWENN									
		=SUMME(B9:B18)									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	hydr. Winterhalbjahr 1981	1	3	6	10	14	21	30	60	90	120
2	01.11.1980	4,8									
3	02.11.1980	3,9	20,8								
4	03.11.1980	12,1	16,0								
5	04.11.1980	0,0	14,1	27,1							
6	05.11.1980	2,0	6,3	40,2							
7	06.11.1980	4,3	24,2	60,8	70,2						
8	07.11.1980	17,9	46,7	49,4	68,0						
9	08.11.1980	24,6	43,1	49,4	64,8	73,5					
10	09.11.1980	0,6	25,2	50,0	52,7	68,7					
11	10.11.1980	0,0	3,2	46,4	52,7	65,3					
12	11.11.1980	2,6	3,3	28,5	50,7	65,2	98,2				
13	12.11.1980	0,7	3,3	4,0	47,0	66,2	93,9				
14	13.11.1980	0,0	0,7		=SUMME(B9:B18)		90,7				
15	14.11.1980	0,0	0,0	3,9	SUMME(Zahl1; [Zahl2]; ...)						
16	15.11.1980	0,0	0,6	13,2	24,2	33,2	64,2				
17	16.11.1980	0,6	12,5	13,5	24,2	29,2	90,9	122,6			
18	17.11.1980	11,9	13,5	20,9	25,4	29,3	94,2	137,0			
19	18.11.1980	1,0	20,3	20,9	25,2	33,7	76,7	139,6			
20	19.11.1980	7,4	8,4	24,7	25,9	32,2	52,1	135,5			
21	20.11.1980	0,0	11,2	24,6	30,4	40,2	52,5	135,5			
22	21.11.1980	3,8	4,3	13,4	31,5	47,8	71,7	133,5			
23	22.11.1980	0,5	5,0	16,9	39,7	48,2	75,5	129,2			
24	23.11.1980	0,7	5,7	10,6	35,3	48,2	82,8	111,3			
25	24.11.1980	4,5	6,3	19,3	34,6	48,6	82,8	86,7			
26	25.11.1980	1,1	14,3	23,1	27,3	55,8	82,8	86,1			
27	26.11.1980	8,7	17,4	23,0	28,2	61,3	82,8	86,3			
28	27.11.1980	7,5	16,6	22,2	43,6	61,9	82,2	84,3			

Abb. 6: Auszug Excel-Tabellenblatt Niederschlagssummenbildung

3.2.5 Unterschreitungsdauerlinien

Eine integrative Darstellung der Verteilung der jeweiligen Kenngrößen in den 30 Jahren des Untersuchungszeitraumes stellen sogenannte Dauerlinien dar. Ein Jahr-zu-Jahr-Vergleich der CCLM4.8-Niederschlagsdaten mit den Messdaten ist nicht möglich, daher werden die größten bzw. kleinsten Niederschlagssummen der Größe nach als Unterschreitungsdauerlinie von Niederschlagssummen an n Jahren in der Untersuchungsperiode dargestellt. Die Auftragung der Anzahl der Jahre geben an, dass in n Jahren eine bestimmte Niederschlagssumme unterschritten wurde.

Durch den Vergleich der Dauerkurven aus den Messwerten und den CCLM-Daten kann eine entsprechende Übereinstimmung oder Abweichung über das gesamte Datenspektrum geprüft werden.

4. Ergebnisse

4.1 Vergleich von Stationsdaten mit REGNIE-Rasterdaten

Tab. 3: 30-jähriges Mittel: Stationsdaten vs. REGNIE-Rasterdaten

Daten	30-jähriges-Mittel [mm]
Gebietsmittel der Stationen	806,63
REGNIE unkorrigiert	834,36
REGNIE korrigiert nach Richter	909,02

Das 30-jährige Mittel bezieht sich bei dem Vergleich von Stationsdaten mit REGNIE-Rasterdaten auf die komplette Zeitreihe 1971-2000. Das Gebietsmittel der Stationen beträgt im 30-jährigen Mittel 806,63 mm und liegt damit 27,73 mm unterhalb des 30-jährigen Mittels des unkorrigierten REGNIE Gebietsmittels (s. Tab. 3). Das 30-jährige Mittel für den korrigierten REGNIE-Rasterwert beträgt 909,02 mm. Durch die Korrektur nach Richter erfolgt zwischen dem unkorrigierten und korrigierten REGNIE 30-jährigen Mittel eine Korrektur um 9%.

Um eine Flächenkorrektur für das Gebietsmittel der Stationen vorzunehmen, berechnet man das korrigierte Gebietsmittel für die Stationen wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Stationsmittel (korrigiert)} &= \text{Stationsmittel} * (\text{REGNIE korrigiert} / \text{REGNIE unkorrigiert}) = \\ &\text{Stationsmittel} * 1,09 \end{aligned} \quad [8]$$

Nach Anwendung der obigen Formel ergibt sich für das korrigierte Gebietsmittel der Stationen ein 30-jähriges Mittel von 878,81 mm. Durch das vereinfachte Verfahren zur Ermittlung des Gebietsniederschlags ergibt sich im Vergleich zu den korrigierten REGNIE-Daten eine Unterschätzung in Höhe von 3,3%.

4.2 Vergleich Modell-Rasterdaten mit REGNIE-Rasterdaten

Tab. 4: 30-jähriges Mittel: Modell-Rasterdaten vs. REGNIE-Rasterdaten

Daten	30-jähriges-Mittel [mm]
CCLM4.8	821,47
REGNIE unkorrigiert	834,36
REGNIE korrigiert nach Richter	909,02

Die CCLM4.8-Niederschlagsdaten besitzen ein 30-jähriges-Mittel, bezogen auf das komplette Untersuchungsgebiet, von 821,47 mm und unterschätzen die unkorrigierten REGNIE-Daten um etwa 1,5% (s. Tab. 4). Die korrigierten REGNIE-Daten liegen etwa 9,6% im 30-jährigen Mittel, über den CCLM4.8-Daten.



Abb. 7: Abweichungen der CCLM4.8-Daten von den unkorrigierten REGNIE-Daten pro Rasterzelle

Im Folgenden werden nun die CCLM4.8-Daten mit den unkorrigierten REGNIE-Daten gegenübergestellt. Die Abweichungen des 30-jährigen Mittels pro Rasterzelle liegen im Bereich von -9,3% bis +4,4% (s. Abb. 7). Die Abweichungen variieren räumlich je nach geographischer Höhenlage.

4.3 Vergleich Stationsdaten und Klimamodelldaten

Der mittlere Jahresniederschlag aus 29 hydrologischen Jahren wird, verglichen mit den Stationsdaten vom CCLM4.8-Modell, 1,1% überschätzt. Die Jahresniederschläge der Modelldaten streuen um den Mittelwert gegenüber den Messdaten weniger stark (vgl. Standardabweichungen in Tab. 5).

Tab. 5: Gebietsmittel der Stationen vs. CCLM4.8-Niederschlagsdaten hydr. Jahr

	Gebietsmittel (Stationsdaten)	CCLM4.8
hydr. Jahr	812,7	822
σ	173,4	115,1
Minimum	490,3	566,7
Maximum	1156,6	1109,5
<i>b</i>	666,3	542,8

Das gilt auch für die Halbjahresniederschläge für das hydrologische Winterhalbjahr (vgl. Standardabweichungen in Tab. 6). Die Standardabweichung des mittleren Halbjahresniederschlags der Modelldaten liegt, bezogen auf das hydrologische Winterhalbjahr, unter der Standardabweichung der Stationsdaten. Das CCLM4.8-Modell überschätzt den mittleren Niederschlag aus 29 hydrologischen Winterhalbjahren 8,9% (siehe Tab. 6).

Tab. 6: Gebietsmittel der Stationen vs. CCLM4.8-Niederschlagsdaten hydr. WH

	Gebietsmittel (Stationsdaten)	CCLM4.8
hydr. WH	383	417,1
σ	92,2	75,8
Minimum	219,6	282,1
Maximum	604,5	638,4
<i>b</i>	385,0	356,3

Im hydrologischen Sommerhalbjahr unterschätzt hingegen das CCLM4.8-Modell den mittleren Halbjahresniederschlag. Der mittlere Halbjahresniederschlag des Sommerhalbjahrs der CCLM4.8-Daten liegt 5,5% unter dem des Gebietsmittels der Stationen (siehe Tab. 7). Außerdem wird anhand Tabelle 7 deutlich, dass die Streuung der Modelldaten um den Mittelwert deutlich geringer ist als die Streuung der Stationsdaten um den Mittelwert (vgl. Standardabweichungen).

Tab. 7: Gebietsmittel der Stationen vs. CCLM4.8-Niederschlagsdaten hydr. SH

	Gebietsmittel (Stationsdaten)	CCLM4.8
hydr. SH	428	404,5
σ	123,4	81,9
Minimum	224,3	247,7
Maxium	722,3	562,8
b	498,0	315,1

Die Streuung der Daten um ihren Mittelwert ist bei den Modelldaten sowohl im hydrologischen Jahr als auch im hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahr geringer als bei den Messdaten (vgl. Tabellen 5 bis 7).

Der Vergleich der jährlichen und halbjährlichen Mittelwerte der Stationsdaten mit denen der Klimamodelldaten zeigt, dass das CCLM4.8-Modell den mittleren Jahresniederschlag mit einer leichten Überschätzung von 1,1% nachvollziehen kann. Die Abweichungen im hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahr sind größer. Im hydrologischen Winterhalbjahr wird der mittlere Halbjahresniederschlag vom CCLM4.8-Modell 8,9% überschätzt um im hydrologischen Sommerhalbjahr 5,5% unterschätzt.

4.4 Niederschlagssummen über bestimmte Zeiträume

Für Hochwasser sind die größten Niederschlagssummen von 1, 3, 6, 10, 14 und 21-Tagen relevant. Die Extrema der größten Niederschlagssummen aus 30 Jahren zeigen die Tabellen 8-10 jeweils für das hydrologische Jahr und das hydrologische Winter- und Sommerhalbjahr.

Im hydrologischen Jahr liegen die Abweichungen der Hochwasserkennwerte des CCLM4.8-Modells gegenüber dem Gebietsmittel der Stationen im Bereich von -7,2% bis +18,3%. Die geringste Abweichung der CCLM4.8-Daten zeigt sich anhand der Tabelle 8 für den Hochwasserkennwert RR(14d) mit 3,6%.

Tab. 8: Hochwasserkennwerte für das hydrologische Jahr

größte Niederschlagssumme von <i>n</i> aufeinanderfolgenden Tagen:						
Hochwasserkennwerte	RR(1d)	RR(3d)	RR(6d)	RR(10d)	RR(14d)	RR(21d)
Gebietsmittel Stationen [mm/ <i>n</i> Tage]	62,3	87,3	88,7	131,1	151,7	180,4
CCLM4.8 [mm/ <i>n</i> Tage]	57,8	95,6	99,1	124,6	157,1	213,5
Differenz [mm/ <i>n</i> Tage]	-4,5	8,3	10,4	-6,5	5,4	33,1
Prozentuale Abweichung	-7,2%	9,5%	11,7%	-5,0%	3,6%	18,3%

Die CCLM4.8-Daten weichen im hydrologischen Winterhalbjahr im Bereich von -30% bis +1,8% von dem Gebietsmittel der Stationen ab. Die beste Übereinstimmung ergibt sich für den Hochwasserkennwert RR(3d) mit einer Überschätzung durch das CCLM-Modell von 1,8% (siehe Tab.9).

Tab. 9: Hochwasserkennwerte für das hydrologische Winterhalbjahr

größte Niederschlagssumme von <i>n</i> aufeinanderfolgenden Tagen:						
Hochwasserkennwerte	RR(1d)	RR(3d)	RR(6d)	RR(10d)	RR(14d)	RR(21d)
Gebietsmittel Stationen [mm/ <i>n</i> Tage]	49,0	66,0	86,1	116,4	133,4	175,5
CCLM4.8 [mm/ <i>n</i> Tage]	34,5	67,2	79,1	97,4	111,1	149,8
Differenz [mm/ <i>n</i> Tage]	-14,5	1,2	-7,0	-19,0	-22,3	-25,7
Prozentuale Abweichung	-30,0%	1,8%	-8,1%	-16,3%	-16,7%	-14,6%

Auffällig bei den Hochwasserkennwerten ist, dass die größten Niederschlagssummen des hydrologischen Jahrs mit den größten Niederschlagssummen des hydrologischen Sommerhalbjahrs aus 30-Jahren identisch sind (vgl. Tabellen 8 und 10). Das bedeutet, hinsichtlich der Extrema der Hochwasserkennwerte, dass die größten Niederschlagssummen im Sommerhalbjahr liegen.

Tab. 10: Hochwasserkennwerte für das hydrologische Sommerhalbjahr

größte Niederschlagssumme von n aufeinanderfolgenden Tagen:						
Hochwasserkennwerte	RR(1d)	RR(3d)	RR(6d)	RR(10d)	RR(14d)	RR(21d)
Gebietsmittel Stationen [mm/n Tage]	62,3	87,3	88,7	131,1	151,7	180,4
CCLM4.8 [mm/n Tage]	57,8	95,6	99,1	124,6	157,1	213,5
Differenz [mm/n Tage]	-4,5	8,3	10,4	-6,5	5,4	33,1
Prozentuale Abweichung	-7,2%	9,5%	11,7%	-5,0%	3,6%	18,3%

Die größten Abweichungen für die Hochwasserkennwerte sind für die Niederschlagsraten von RR(1d) zu erkennen. Die Unterschätzungen betragen im hydrologischen Jahr und hydrologischen Sommerhalbjahr 7,2% und im hydrologischen Winterhalbjahr 30%.

Für Niedrigwasser werden die kleinsten Niederschlagssummen von 30, 60, 90 und 120 Tagen untersucht. Die Extrema der kleinsten Niederschlagssummen aus 30 Jahren sind in den Tabellen 11 bis 13 dargestellt.

Im hydrologischen Jahr und hydrologischen Sommerhalbjahr liegen die CCLM4.8-Daten der Kennwerte RR(30d) und RR(120d) über dem Gebietsmittel der Stationen. Der Niedrigwasserkennwert RR(120d) wird bis zu 29,3% überschätzt (s. Tab. 11). Die Niedrigwasserkennwerte von RR(60d) und RR(90) werden dagegen bis zu 70% unterschätzt (s. Tabellen 11 und 13).

Tab. 11: Niedrigwasserkennwerte für das hydrologische Jahr

kleinste Niederschlagssumme von n aufeinanderfolgenden Tagen:				
Niedrigwasserkennwerte	RR(30d)	RR(60d)	RR(90d)	RR(120d)
Gebietsmittel Stationen [mm/n Tage]	0,0	20,7	51,4	83,0
CCLM4.8 [mm/n Tage]	1,6	12,8	50,0	107,3
Differenz [mm/n Tage]	1,60	-7,9	-1,4	24,3
Prozentuale Abweichung	-	-38,2%	-2,7%	29,3%

In den Tabellen 11 und 13 lässt sich ein Hinweis auf einen vom Klimamodell erzeugten dauerhaften Nieselregen (engl.: „permanent drizzle“) vermuten. Für den Niedrigwasserkennwert RR(30d) ergibt sich im hydrologischen Jahr eine Tagesniederschlagsrate von 0,05mm/d und für das hydrologische Sommerhalbjahr eine Tagesniederschlagsrate von etwas über 0,1mm/d. Das bedeutet, dass der Niederschlag im Modell zu leicht bzw. schnell ausfällt und damit höher ist als der gemessene Wert. Die kleinste Niederschlagssumme des Niedrigwasserkennwerts RR(30d) erreicht somit keine Niederschlagsrate um 0mm/d.

Tab. 12: Niedrigwasserkennwerte für das hydrologische Winterhalbjahr

kleinste Niederschlagssumme von n aufeinanderfolgenden Tagen:				
Niedrigwasserkennwerte	RR(30d)	RR(60d)	RR(90d)	RR(120d)
Gebietsmittel Stationen [mm/n Tage]	2,2	20,7	52,4	93,8
CCLM4.8 [mm/n Tage]	1,6	21,3	55,4	131,2
Differenz [mm/n Tage]	-0,6	0,6	3,0	37,3
Prozentuale Abweichung	-27%	2,9%	5,7%	39,8%

Im hydrologischen Winterhalbjahr überschätzt das CCLM4.8-Modell die Niedrigwasserkennwerte RR(30d), RR(60d) und RR(90). Die Abweichungen liegen im Bereich von +2,9% bis +39,8%. Der Niedrigwasserkennwert RR(120d) wird hingegen durch das CCLM4.8-Modell bis 27% unterschätzt (siehe Tab.12).

Tab. 13: Niedrigwasserkennwerte für das hydrologische Sommerhalbjahr

kleinste Niederschlagssumme von n aufeinanderfolgenden Tagen:				
Niedrigwasserkennwerte	RR(30d)	RR(60d)	RR(90d)	RR(120d)
Gebietsmittel Stationen [mm/n Tage]	0,0	42,5	82,1	128,3
CCLM4.8 [mm/n Tage]	4	12,8	61,9	135,0
Differenz [mm/n Tage]	4	-29,7	-20,2	6,7
Prozentuale Abweichung		-69,9%	-24,6%	5,2%

Sowohl die extremen Hochwasserkennwerte als auch die extremen Niedrigwasserkennwerte werden vom CCLM4.8-Modell unter- bzw. überschätzt. Es lässt sich keine durchgehende Systematik der Über- und Unterschätzung erkennen. Die CCLM4.8-Daten liegen teilweise über dem Gebietsmittel der Stationen des jeweiligen Kennwerts und teilweise darunter. Die Abweichungen der Niedrigwasserkennwerte liegen im Bereich -69,9% bis +39,8% und die Abweichungen der Hochwasserkennwerte im Bereich -30,0% bis +18,3%.

Anhand der hier untersuchten Extrema der Kennwerte aus 30 Untersuchungsjahren kann keine repräsentative Aussage getroffen werden. Um das komplette Spektrum der Kennwerte zu untersuchen, werden in Kap. 4.5 und 4.6 Vergleiche aller jährlichen Kennwerte über Boxplots und den Verlauf der Unterschreitungsdauerlinien durchgeführt.

4.5 Boxplots für Hoch- und Niedrigwasserkennwerte

Anhand von Boxplots werden die Niederschlagssummen der jeweiligen Hoch- und Niedrigwasserkennwerte graphisch dargestellt und ein Überblick über das gesamte Datenspektrum gegeben. Die „Box“ besteht aus dem Bereich zwischen dem 1. und 3. Quartil. Darin sind für den jeweiligen Kennwert 50% der Daten enthalten. Die Größe der Box bzw. die Spannweite beschreibt die Streuung der Werte des jeweiligen Kennwerts. Eine kleine Box steht für viele nahe beieinanderliegende Werte.

Die Boxplots der Hochwasserkennwerte RR(3d), RR(6d), RR(14d) und RR(21d) weisen im hydrologischen Jahr auf eine stärkere Streuung der Niederschlagsraten der CCLM4.8-Daten hin. Die Spannweiten dieser Kennwerte sind im Vergleich zum Stationsmittel etwas größer. Die Niederschlagsraten der CCLM4.8-Daten streuen verglichen mit den Messwerten innerhalb der jeweiligen Box der Hochwasserkennwerte RR(3d), RR(6d), RR(10d) weniger, also liegen die Werte näher beieinander. Besonders hervorzuheben ist das Maximum des Hochwasserkennwerts RR(21d), da dieses deutlich höher ist als das Maximum des Stationsmittels bezüglich dieses Kennwerts (s. Abb. 8). Auch die Maxima der Kennwerte RR(3d) und RR(14d) werden vom CCLM4.8-Modell überschätzt. Die Minima der Hochwasserkennwerte der CCLM4.8-Daten liegen, mit Ausnahme des Kennwerts RR(3d), unter den Minima der Hochwasserkennwerte des Stationsmittels. Bei den Hochwasserkennwerten RR(14d) und RR(21d)

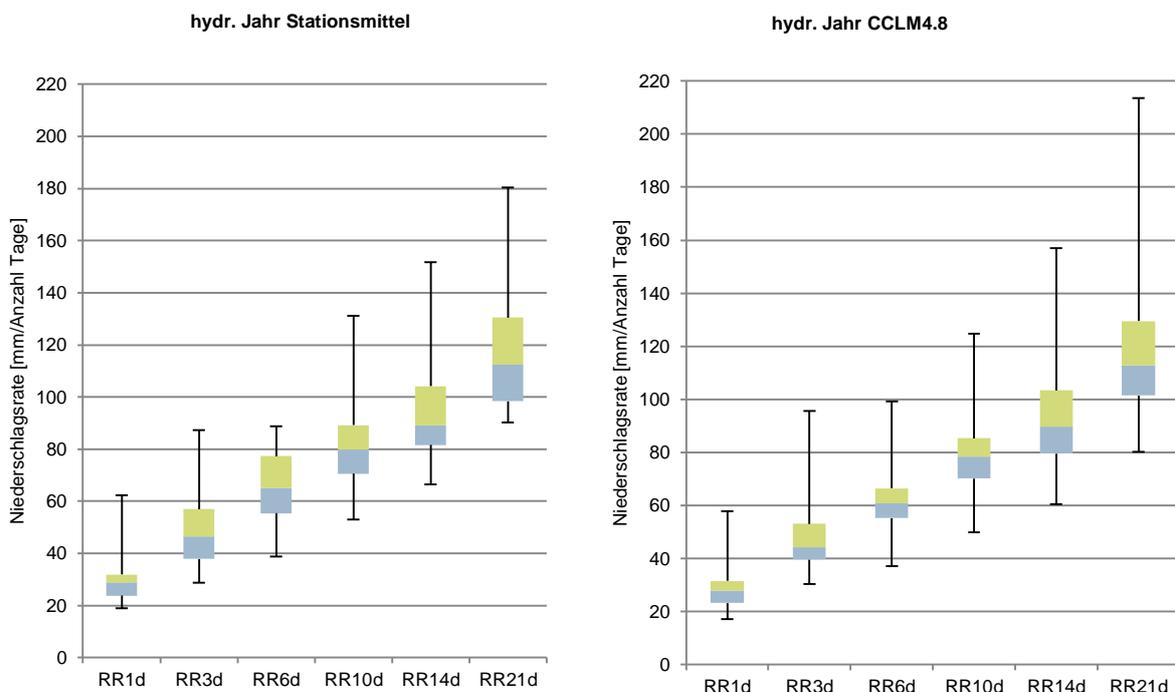


Abb. 8: Boxplots für Hochwasserkennwerte im hydr. Jahr

stimmen die Lagen der Mediane ungefähr mit denen des Stationsmittels überein, wohingegen die Lage der Mediane der übrigen Kennwerte etwas vom CCLM4.8-Modell unterschätzt wird (s. Abb. 8).

Im hydrologischen Winterhalbjahr streuen die Niederschlagsraten der Hochwasserkennwerte RR(1d), RR(6d), RR(10d), RR(14d) und RR(21) des Stationsmittels stärker gegenüber den CCLM4.8-Daten. Ebenso in dem Bereich, in dem 50% der Daten liegen, bezogen auf die Hochwasserkennwerte RR(1d), RR(3d), RR(6d) und RR(10d). Die Extrema der Messdaten bezüglich der Hochwasserkennwerte sind weitaus ausgeprägter mit Ausnahme des Kennwerts RR(3d). Hier ist die Spannweite des Hochwasserkennwerts RR(3d) im Vergleich zu den CCLM4.8-Daten etwas kleiner. Der Median des Hochwasserkennwerts RR(1d) der CCLM4.8-Daten ist verglichen mit den Messdaten etwas kleiner. Bei allen anderen Hochwasserkennwerte liegen die Mediane im hydrologischen Winterhalbjahr oberhalb der Mediane der Kennwerte des Stationsmittels (s. Abb. 9).

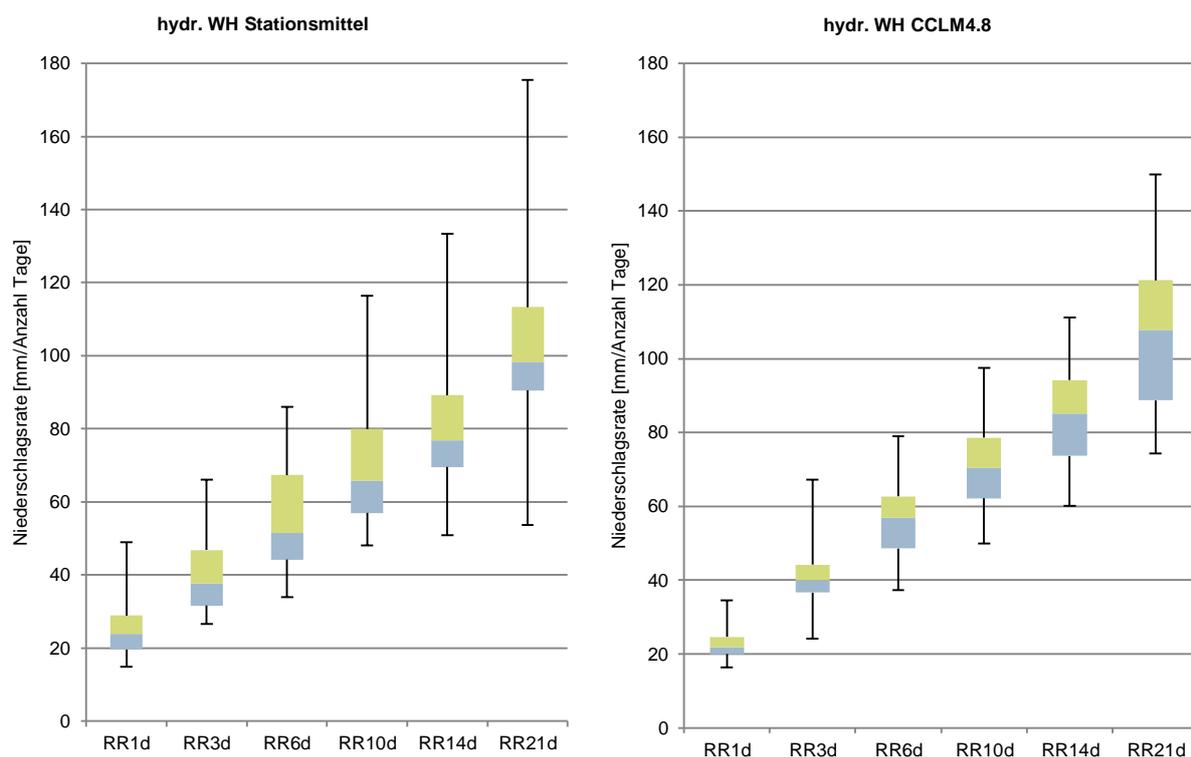


Abb. 9: Boxplots für Hochwasserkennwerte im hydr. WH

Wie bereits in Kap. 4.4 erwähnt liegen die Extrema der größten Niederschlagssummen im hydrologischen Sommerhalbjahr. Die Maxima der CCLM4.8-Daten und des Stationsmittels entsprechen somit den Maxima im hydrologischen Jahr (vgl. Abb. 8 und 10). Die Minima der Hochwasserkennwerte der CCLM4.8-Daten sind im Vergleich zu den Minima des Stationsmittels geringer. Der Vergleich der Spannweiten der Hochwasserkennwerte zeigt, dass die CCLM4.8-Daten im hydrologischen Sommerhalbjahr mit Ausnahme des Kennwerts RR(1d) mehr streuen als die Messdaten. Dies wird auch anhand der Boxen der Hochwasserkennwerte deutlich. Der Bereich, in dem 50% der CCLM4.8-Daten des jeweiligen Kennwerts liegen, streuen mehr im Vergleich zu den Boxen der Hochwasserkennwerte des Stationsmittels, mit Ausnahme des Hochwasserkennwerts RR(6d). Die Mediane der Hochwasserkennwerte RR(3d), RR(6d) und RR(10d) stimmen im hydrologischen Sommerhalbjahr in etwa überein. Der Median für den Kennwert RR(14d) wird vom CCLM-Modell unterschätzt und die Mediane der Kennwerte RR(1d) und RR(21d) liegen oberhalb der Mediane des jeweiligen Hochwasserkennwerts des Stationsmittels (s. Abb. 10).

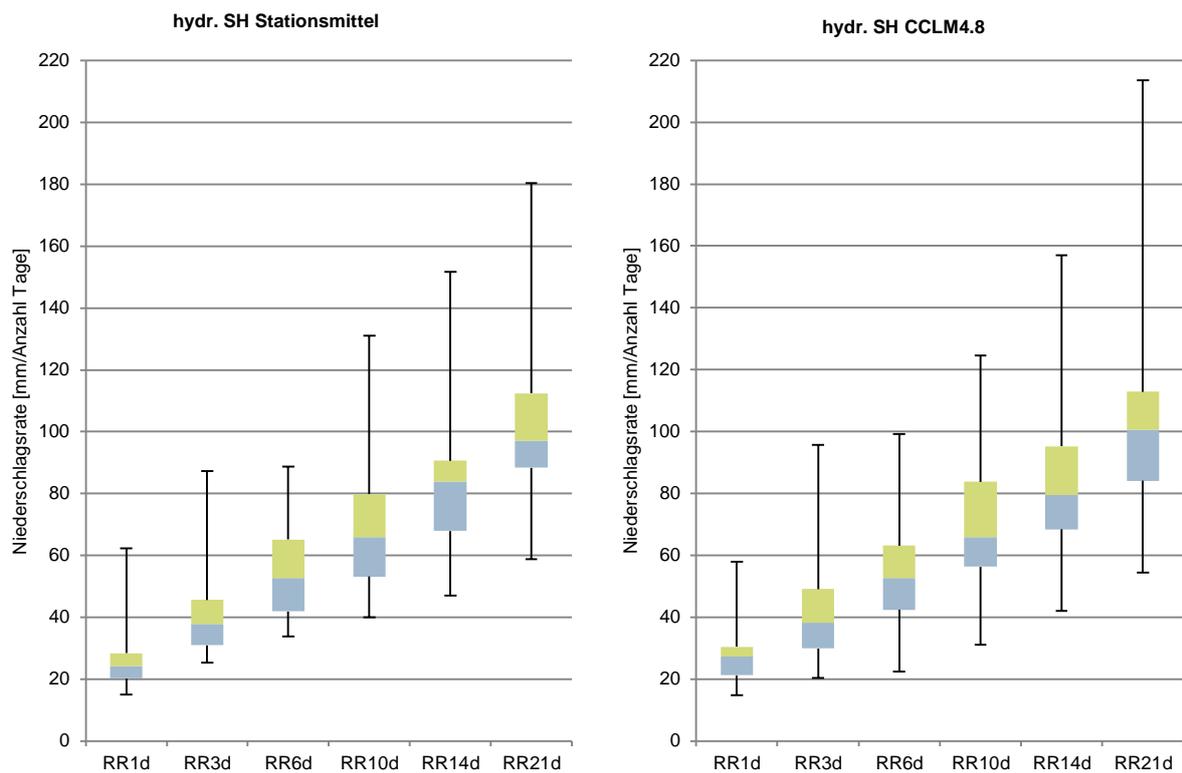


Abb. 10: Boxplots für Hochwasserkennwert im hydr. SH

Betrachtet werden nun die Boxplots der Niedrigwasserkennwerte. Der Vergleich der Spannweiten der CCLM4.8-Daten mit den Spannweiten der Messdaten für das hydrologische Jahr macht deutlich, dass die CCLM4.8-Daten wesentlich weniger streuen. Das gilt auch für die Box des Niedrigwasserkennwerts RR(30d). Die Boxen der Kennwerte RR(60d), RR(90d) und RR(120) sind etwas größer als die Boxen der jeweiligen Kennwerte des Stationsmittels. Das bedeutet, dass die CCLM4.8-Daten innerhalb der Boxen mehr streuen als die Messdaten (s. Abb. 11). Die Lage des Median wird vom CCLM4.8-Modell im hydrologischen Jahr für die Niedrigwasserkennwerte etwas überschätzt, wobei der Median für den Kennwert RR(30d) ungefähr übereinstimmt. Die Maxima der Niedrigwasserkennwerte der CCLM4.8-Daten im hydrologischen Jahr fallen im Vergleich zu den Messdaten zu gering aus. Auch die Minima der Kennwerte RR(60d) und RR(90d) sind kleiner als bei den Kennwerten des Stationsmittels (s. Abb. 11).

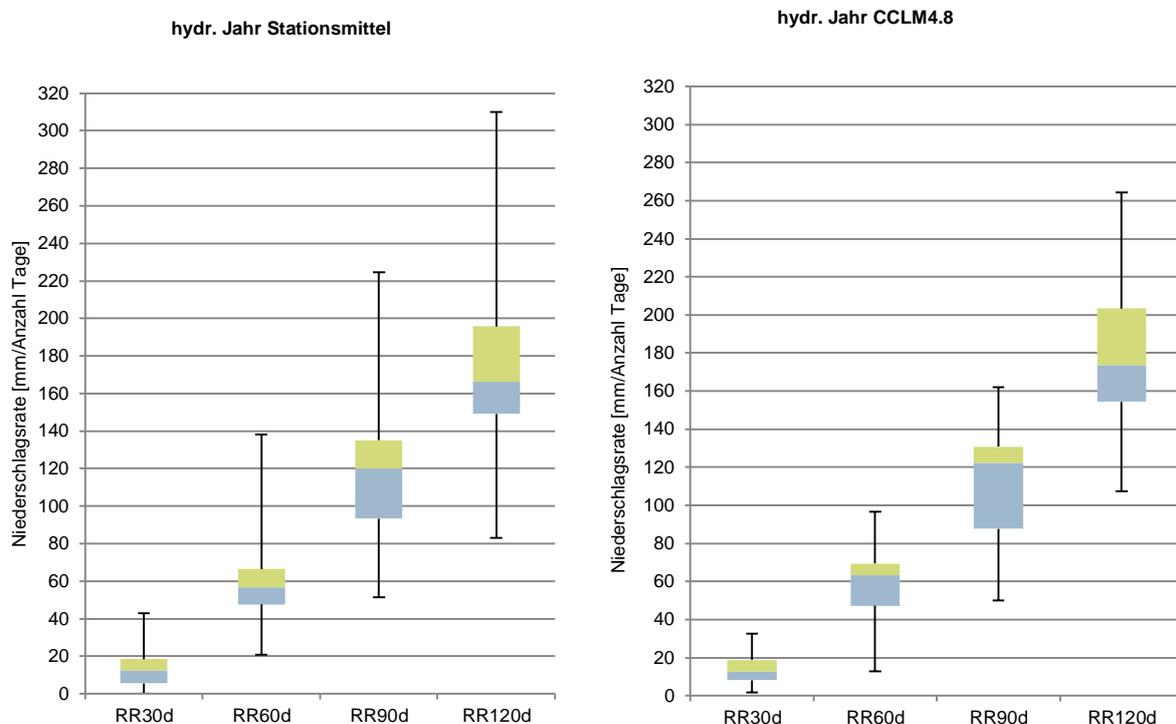


Abb. 11: Boxplots für Niedrigwasserkennwerte im hydr. Jahr

Verglichen mit den Medianen der Niedrigwasserkennwerte der CCLM4.8-Daten im hydrologischen Jahr liegen die Mediane im hydrologischen Winterhalbjahr über den Medianen der jeweiligen Kennwerte des Stationsmittels. Obwohl die CCLM4.8-Daten im hydrologischen Winterhalbjahr, mit Ausnahme des Niedrigwasserkennwerts RR(90d), insgesamt weniger streuen als die Messdaten, ist die Streuung, ausgenommen des Kennwerts (RR(30d)), innerhalb der Boxen größer. Die Maxima der CCLM4.8-Daten liegen, bis auf den Kennwert

(RR90d), weit unterhalb der Maxima des Stationsmittels. Auch das Minimum des Niedrigwassererkennungswerts RR(30d) wird vom CCLM4.8-Modell unterschätzt. Alle anderen Minima der jeweiligen Kennwerte der CCLM4.8-Daten liegen etwas über den Minima des Stationsmittels (s. Abb. 12).

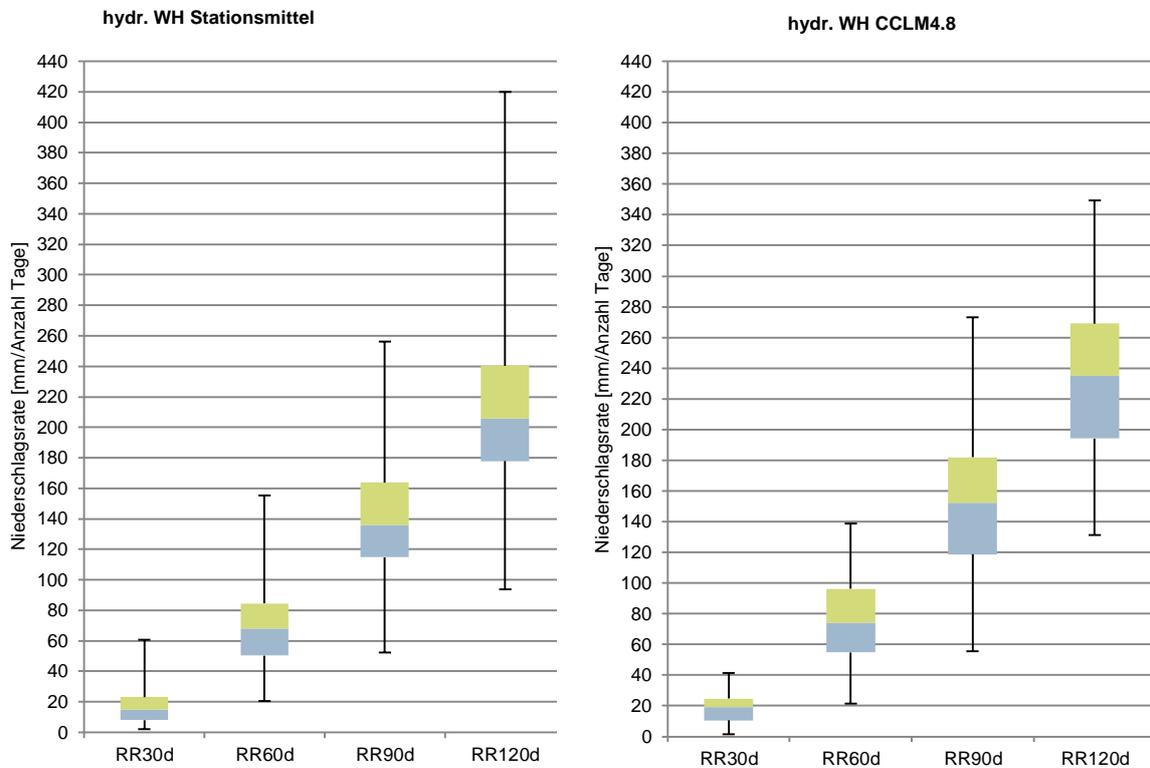


Abb. 12: Boxplots für Niedrigwassererkennungswerte im hydr. WH

Die Boxplots der Niedrigwassererkennungswerte des Stationsmittels im hydrologischen Sommerhalbjahr sind besonders auffällig (s. Abb. 13). Die Boxen sind im Vergleich zu den CCLM4.8-Daten deutlich größer. Das bedeutet, dass die Stationsdaten in diesem Bereich deutlich mehr streuen. Auch die Spannweiten der Niedrigwassererkennungswerte des Stationsmittels sind, mit Ausnahme des Kennwerts RR(60d), größer. Sowohl die Maxima als auch die Mediane der Niedrigwassererkennungswerte werden durch das CCLM4.8-Modell im hydrologischen Sommerhalbjahr unterschätzt. Auch die Minima der Kennwerte RR(60d) und RR(90d) fallen im CCLM4.8-Modell im Vergleich zu den Kennwerten RR(30d) und RR(120d) niedriger aus.

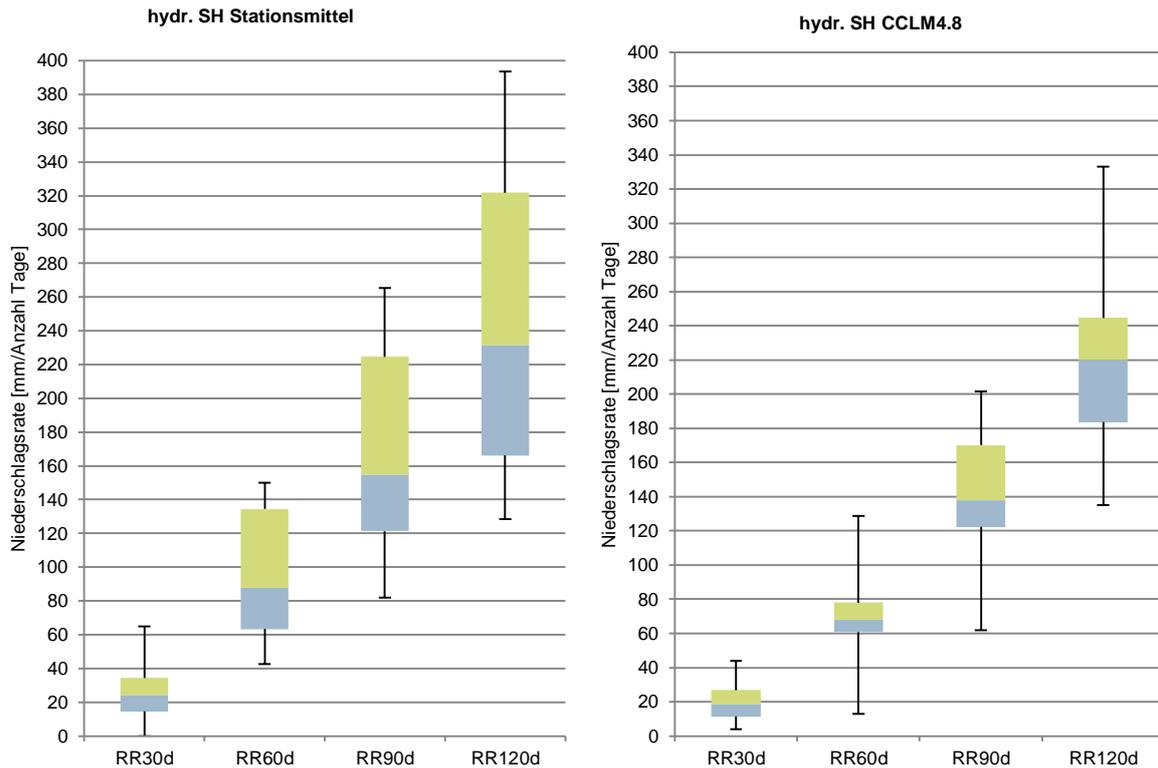


Abb. 13: Boxplots für Niedrigwasserkennwerte im hydr. SH

Die Boxplots der Hochwasserkennwerte veranschaulichen, dass die CCLM4.8-Daten mit ein paar Ausnahmen im hydrologischen Jahr und Sommerhalbjahr stärker streuen als die Messdaten. Das gilt auch für die Boxen der Hochwasserkennwerte im hydrologischen Sommerhalbjahr. Im hydrologischen Winterhalbjahr streuen die Messdaten stärker und die Extrema der Hochwasserkennwerte werden durch das CCLM4.8-Modell zu schwach dargestellt. Anhand der Boxplots der Niedrigwasserkennwerte wird deutlich, dass mit wenigen Ausnahmen im hydrologischen Jahr und Winterhalbjahr die Messdaten stärker streuen als die CCLM4.8-Daten und in Bezug auf die Boxen die CCLM4.8-Daten. Insbesondere im hydrologischen Sommerhalbjahr der Niedrigwasserkennwerte ist erkennbar, dass die CCLM4.8-Daten verglichen mit den Messdaten weniger stark streuen. Die Extrema der Niedrigwasserkennwerte werden sowohl im hydrologischen Jahr, Winter- und Sommerhalbjahr zu schwach dargestellt.

Die Boxplots sollen lediglich einen Gesamtüberblick der Niederschlagssummen der Hoch- und Niedrigwasserkennwerte im hydrologischen Jahr, Winter- und Sommerhalbjahr geben. Diese Ergebnisse reichen jedoch nicht aus, um die Nachvollziehbarkeit der größten und kleinsten Niederschlagssummen durch das CCLM4.8-Modell vollständig zu beurteilen. Daher werden im nächsten Schritt die Unterschreitungsdauerlinien der Hoch- und Niedrigwasserkennwerte analysiert.

4.6 Unterschreitungsdauerlinien zu hydrologisch relevanten Kennwerten

Anhand der Unterschreitungsdauerlinien sollen die größten bzw. kleinsten Niederschlagssummen über den gesamten Zeitraum von 1971–2000 auf Übereinstimmung bzw. Abweichung geprüft werden. Die zu den Ergebnissen der Unterschreitungsdauerlinien zugehörigen Diagramme der Hoch- und Niedrigwasserkennwerte sind im Anhang aufgelistet (siehe Kap. 7.2). In den Diagrammen befinden sich jeweils das Stationsmittel der Messwerte, das mit Hilfe der REGNIE-Daten korrigierte Stationsmittel der Messwerte und die CCLM4.8-Daten.

Liegen die CCLM4.8-Daten im Bereich des korrigierten und unkorrigierten Stationsmittels, so werden die jeweiligen Niederschlagssummen vom CCLM4.8-Modell nachvollzogen. Für die Hochwasserkennwerte sind vor allem die größten 10-20% der Werte, also der Bereich des 24-29 größten Werts innerhalb von 29 hydrologischen Jahren, relevant (s. Abb. 14). In Abbildung 14 wird anhand des Hochwasserkennwerts RR(1d) im hydrologischen veranschaulicht, dass die größten Niederschlagssummen durch das CCLM4.8-Modell sowohl im Bereich der 20% höchsten Niederschlagssummen als auch im gesamten Verlauf nachvollzogen werden. Die sechs höchsten Niederschlagssummen der CCLM4.8-Daten weichen im Mittel 6% vom Stationsmittel ab.

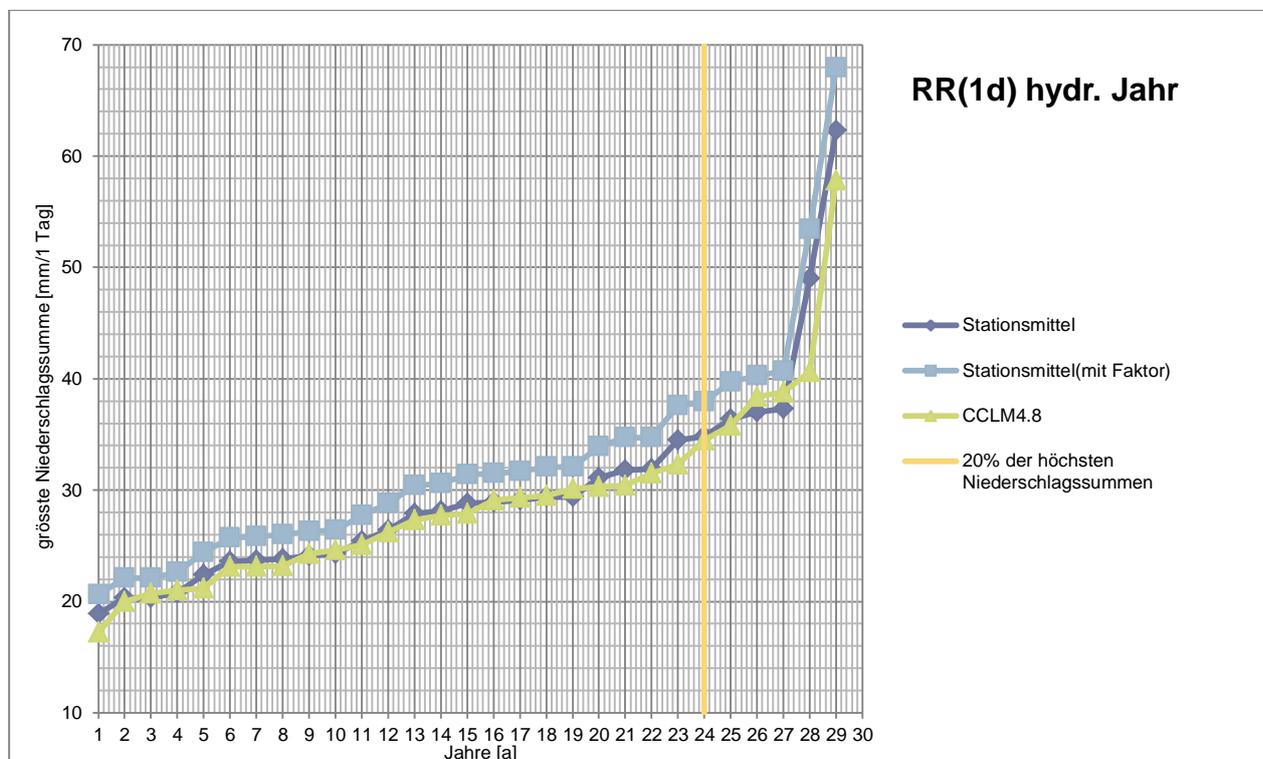


Abb. 14: Bereich der 20% höchsten Niederschlagssummen

Bei den Niedrigwasserkennwerten interessieren insbesondere die 5-6 kleinsten Werte innerhalb desselbigen Zeitraums, die für das Auftreten von ausgeprägten Niedrigwassersituationen relevant sind (s. Abb. 15). Abbildung 15 zeigt, dass die kleinsten Niederschlagssummen des Niedrigwasserkennwerts RR(90d) sowohl im Bereich der 20% der kleinsten Niederschlagssummen als auch über das gesamte Datenspektrum durch das CCLM4.8-Modell nachvollzogen werden. Die sechs kleinsten Niederschlagssummen der CCLM4.8 weichen im Mittel 4,5% vom Stationsmittel ab.

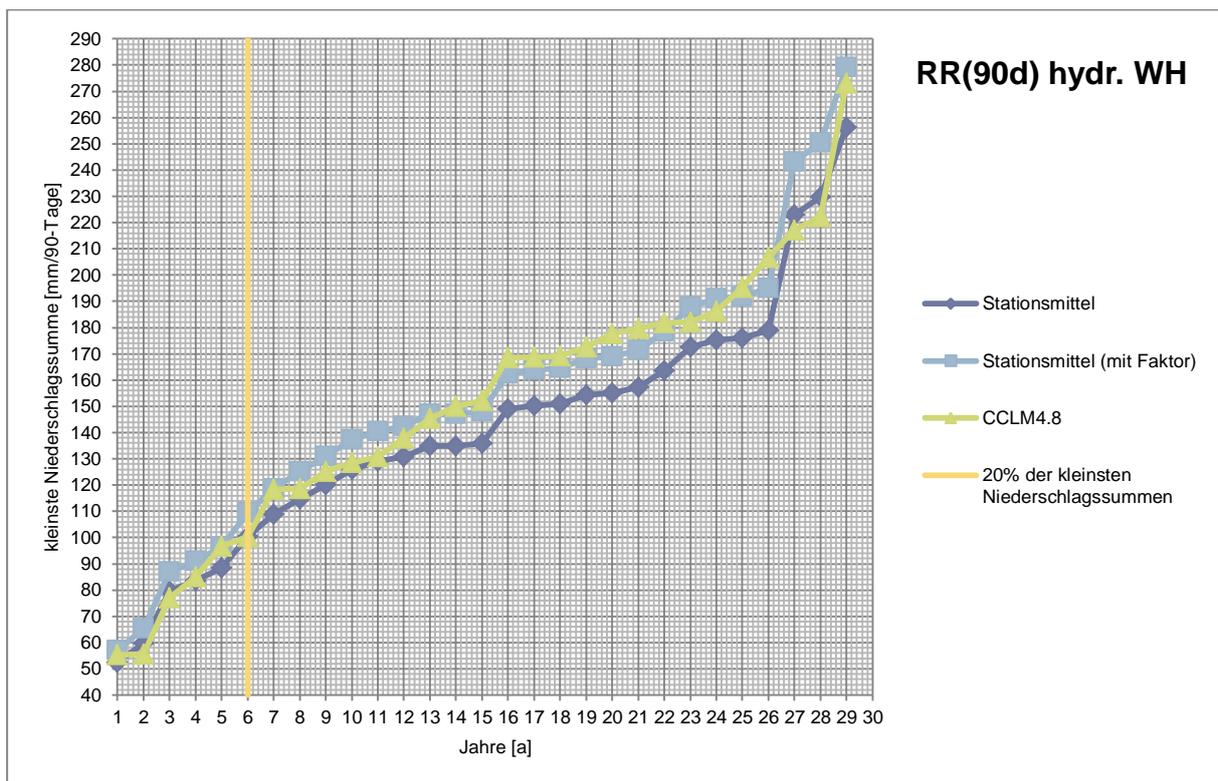


Abb. 15: Bereich der 20% kleinsten Niederschlagssummen

Die Beurteilung auf Nachvollziehbarkeit der größten und kleinsten Niederschlagssummen der gesamten Hoch- und Niedrigwasserkennwerte durch das CCLM4.8-Modell erfolgt wie bei den Abbildungen 14 und 15. Die Ergebnisse der Evaluierung der Unterschreitungsdauerlinien sind in Tabelle 14 aufgelistet.

Tab. 14: Bewertung der Nachvollziehbarkeit der Hoch- und Niedrigwasserkennwerte durch das CCLM4.8-Modell

Hochwasserkennwerte	hydr. Jahr	hydr. WH	hydr. SH
RR(1d)	0	-	0
RR(3d)	0	-	0
RR(6d)	-	-	(-)
RR(10d)	-	-	0
RR(14d)	(-)	-	0
RR(21d)	0	0	0
Niedrigwasserkennwerte	hydr. Jahr	hydr. WH	hydr. SH
RR(30d)	0	0	(0), - bei feuchteren Jahren
RR(60d)	-	0	-
RR(90d)	0	0	(0), - bei feuchteren Jahren
RR(120d)	0	0	(0), - bei feuchteren Jahren

Legende:	Übereinstimmung CCLM4.8	0
	Unterschätzung CCLM4.8	-
	Überschätzung CCLM4.8	+

Die Hochwasserkennwerte RR(1d), R(3d) und RR(21d) werden im hydrologischen Jahr im Bereich der 20% höchsten Niederschlagssummen nachvollzogen (s. Abbildungen 16, 19 und 31). Die mittlere Abweichung in diesem Bereich liegt zwischen 6% und 9%. Die Kennwerte R(6d), RR(10d) und RR(14d) werden hingegen vom CCLM4.8-Modell im Mittel 9% bis 11% unterschätzt (s. Abbildungen 22, 25 und 28). Im hydrologischen Winterhalbjahr weichen die größten Niederschlagssummen des Hochwasserkennwerts RR(21d) im Mittel 5% vom Stationsmittel ab (s. Abb. 32). Alle übrigen Hochwasserkennwerte unterschätzt das CCLM4.8-Modell im Bereich der 20% höchsten Niederschlagssummen. Die mittleren Abweichungen betragen 7% bis etwa 20%. Die CCLM4.8-Daten der Hochwasserkennwerte im hydrologischen Sommerhalbjahr stimmen relativ überein, mit Ausnahme des Kennwerts RR(6d) (s. Abb. 24).

Das CCLM4.8-Modell kann den Bereich der 20% kleinsten Niederschlagssummen im hydrologischen Jahr und Winterhalbjahr recht gut nachvollziehen, mit Ausnahme des Kennwerts RR(60d) im hydrologischen Jahr (s. Abb. 37). Hier weichen die 20% der kleinsten Niederschlagssummen des CCLM4.8-Modells im Mittel 25 % vom Stationsmittel ab. Im hydrologischen Sommerhalbjahr kann das CCLM4.8-Modell den Bereich der 20% kleinsten Niederschlagssummen sehr gut nachvollziehen. Allerdings werden in Bereichen außerhalb der 20% kleinsten Niederschlagssummen, den feuchteren Jahren, die Niedrigwasserkennwerte deutlich unterschätzt (s. Abbildungen 36, 39, 42 und 45). Die Daten weichen hier im Mittel 14%

voneinander ab. Für den Niedrigwasserkennwert RR(60d) ergibt sich auch im hydrologischen Sommerhalbjahr eine Unterschätzung im Bereich der 20% kleinsten Niederschlagssummen (s. Abb. 39).

Obwohl die CCLM4.8-Daten bezogen auf Jahresmittel 1,1% höher ausfallen, werden die größten bzw. kleinsten Niederschlagssummen aus 29 hydrologischen Jahren größtenteils unterschätzt. Im hydrologischen Winterhalbjahr ergibt sich anhand der Unterschreitungsdauerlinien eine deutliche Unterschätzung der Hochwasserkennwerte, obwohl das Halbjahresmittel des hydrologischen Winterhalbjahres durch das CCLM4.8-Modell 8,9% überschätzt wird. Die mittleren Abweichungen der CCLM4.8-Daten liegen hier bei bis zu 20%.

Für die Niedrigwasserkennwerte RR(30d), RR(90) und RR(120d) zeigen deutliche Unterschätzung im Bereich der feuchteren Jahre oberhalb der 20% kleinsten Niederschlagssummen. Eine weitere Unterschätzung ergibt sich für den Niedrigwasserkennwert RR(60d) im hydrologischen Jahr und Winterhalbjahr. In diesem Bereich weichen die CCLM4.8-Daten im Mittel mehr als 15% von den Messdaten ab.

Diese Kenntnis über die größten und kleinsten Niederschlagssummen des CCLM4.8-Modells in Bezug auf die Messdaten ist bei der Interpretation von CCLM4.8-Daten und auch bei weiteren Untersuchungen hinsichtlich Zunkunftsprojektionen zu beachten.

5. Diskussion und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Die Überprüfung der Nachvollziehbarkeit der langjährigen Mittelwerte und der kleinsten und größten Niederschlagssummen durch das CCLM4.8-Modell im Zeitraum 1971-2000 dient als Voraussetzung für die zukünftige Abschätzung von Hoch- und Niedrigwassergefahren im Lahnggebiet.

Dazu wurde zunächst ein Untersuchungsrahmen gewählt, der das Lahnggebiet umschließt. Die vorliegenden Daten sind so miteinander vergleichbar. Der Vergleich des 30-jährigen-Mittels der bereits vom KIT Bias-korrigierten CCLM4.8-Daten zeigt, dass das regionale Klimamodell sowohl das Gebietsmittel der Stationen, als auch die unkorrigierten REGNIE-Daten sehr gut nachvollzieht. Die projizierten CCLM4.8-Niederschlagsdaten sind im Vergleich mit dem Gebietsmittel der Stationen im 30-jährigen-Mittel 1,1% höher und im Vergleich mit dem 30-jährigen-Mittel der unkorrigierten REGNIE-Daten 1,5% niedriger. Die Abweichung der CCLM4.8-Daten zu den korrigierten REGNIE-Daten beträgt 9,6% und ist damit größer, da die Bias-Korrektur an unkorrigierten Messdaten durchgeführt wurde. Im hydrologischen Winterhalbjahr werden die Niederschläge durch das CCLM4.8-Modell 8,9% überschätzt und im hydrologischen Sommerhalbjahr 5,5% unterschätzt. Die Untersuchung der gebildeten Niederschlagssummen für die Hoch- und Niedrigwasserkennwerte für das hydrologische Jahr im Zeitraum 1971-2000 zeigt anhand der Unterschreitungsdauerlinien unterschiedlich starke Abweichungen. Die CCLM4.8-Niederschlagssummen weisen für die Hochwasserkennwerte insbesondere auf Unterschätzungen bis zu 20% im hydrologischen Winterhalbjahr hin, obwohl die Niederschläge im Halbjahresmittel überschätzt werden. Bei den Niedrigwasserkennwerten sind überwiegend Unterschätzungen im hydrologischen Sommerhalbjahr im Bereich der feuchteren Jahre zu beobachten. Im Halbjahresmittel werden die Niederschläge durch das CCLM4.8-Modell ebenfalls unterschätzt. Die Extrema der Verteilung werden also im Modell etwas zu schwach dargestellt, indem sie die 20% höchsten bzw. 20% niedrigsten Niederschlagsraten der jeweiligen Kennwerte unterschätzen. Dies wird bereits an den Boxplots der Hoch- und Niedrigwasserkennwerte deutlich. Die Extrema der Hochwasserkennwerte werden vom CCLM4.8-Modell im hydrologischen Winterhalbjahr deutlich zu gering dargestellt. Das gilt auch für die Niedrigwasserkennwerte im Bereich der 50% feuchtesten Jahre. Besonders signifikant ist die Unterschätzung der Niedrigwasserkennwerte in diesem Bereich im hydrologischen Sommerhalbjahr. Der besonders relevante Bereich mit den niedrigsten Niedrigwasserkennwerten wird jedoch in der Regel gut abgebildet.

5.2 Problemfelder

Die Datenaufbereitung brachte im Rahmen der Untersuchungen einige Herausforderungen mit sich. Die erste Fragestellung lag in der Wahl des Untersuchungsraumes, um das Lahngebiet eingrenzen zu können. Das shapefile, das zur Auswahl der CCLM4.8-Niederschlagsdaten diente, erwies sich nicht als geeigneter Ausschnitt. Das für die bereitgestellten CCLM4.8-Rastermittelpunkte erstellte Raster diente daher als Untersuchungsrahmen. Der ausgewählte Untersuchungsrahmen umfasst eine Fläche von 3773km². Die Größe des Einzugsgebietes der Lahn bis zum Pegel Leun beträgt 3571km². Das Untersuchungsgebiet ist damit 202km² größer und ist damit nicht deckungsgleich.

Die Auswahl der Stationen erfolgt nach dem Untersuchungsrahmen. Hier besteht die Schwierigkeit, nach welchem Verfahren das Gebietsmittel der Stationen gebildet wird und welche Stationen im Gebietsmittel berücksichtigt werden. Zu beachten ist, dass das Untersuchungsgebiet in Form eines Rechtecks ausgewählt wurde. Die Form des Einzugsgebietes ist jedoch nicht rechteckig. Es sind also Niederschlagsdaten im Gebietsmittel berücksichtigt, die im Lahngebiet nicht abflusswirksam sind. Für den Vergleich von zwei rechteckigen Ausschnitten aus dem Modell und dem entsprechenden Stationsmittel für diesen Ausschnitt hat dies jedoch keine Auswirkung. Das Gebietsmittel aus dem arithmetischen Mittel zu bilden, ist sicherlich nicht die optimale Methode. Die Stationen sind nicht gleichmäßig verteilt und das Untersuchungsgebiet ist nicht eben. Die Niederschlagsmenge ist abhängig von der geographischen Höhe. Deshalb wäre eine Methode, die die geographische Höhe mit einbezieht, für das Lahngebiet geeigneter, da hier hauptsächlich Berg- und Hügelland im Zuflussgebiet des Flusses vorzufinden sind. Eine solche Methode war jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht umsetzbar und hat für den Vergleich der abgeleiteten Kennwerte keine Auswirkungen.

Die Auflösung der Rasterdatensätze ist unterschiedlich und daher nicht direkt vergleichbar. Durch die Zuordnung des feineren DWD-1*1 km-Raster zu dem gröberen CCLM4.8-7*7 km-Raster konnte man einen Vergleich des 30-jährigen Mittels anstellen. Um diese Problematik zu lösen fand eine Zuordnung über die Rasterzellen statt.

Die vom KIT freigegebenen korrigierten CCLM4.8-Daten aus dem KLIWA-Projekt beinhalten einen durch die Bias-Korrektur an einem niederschlagsunkorrigierten regionalisierten Datensatz vom DWD einen systematischen Niederschlagsmessfehler, der regional variiert. Dieser systematische Messfehler ist in den korrigierten CCLM4.8-Daten enthalten und überträgt sich somit auf die Niederschlagssummen des Lahngebiets. Der eigentliche Modellfehler des CCLM4.8-Modells ist nicht bekannt und so kann keine Aussage über die Größe des Gesamt-

fehlers getroffen werden, lediglich über die verbleibenden Fehler in den bereits Bias-korrigierten Klimamodelldaten.

Für die Anwendung der größten und kleinsten Niederschlagssummen in Wasserhaushaltsmodellen bedeutet dies, dass infolge von systematischen Schwachstellen, Fehlinterpretationen bei der Prognose von Hoch- und Niedrigwasserereignissen zu erwarten sind. Hochwasser entsteht vor allem im hydrologischen Winterhalbjahr und infolge von Stark- und Dauerregenereignissen. Starkregen, also kurze lokale heftige Schauer treten vorwiegend im Sommer auf. Diese sind in Klimamodellen schwieriger darzustellen und problematisch für kleine Flussgebiete. Niedrigwasser entsteht in den Sommerhalbjahren in Verbindung mit Trockenperioden.

Im Lahngbiet ist vorwiegend mit Winterhochwässern zu rechnen. Zu dieser Jahreszeit sind die meist wassergesättigten Böden sehr abflussbereit. Werden im hydrologischen Winterhalbjahr zu geringe Niederschläge projiziert, kann es sein, dass Hochwasserereignisse unterschätzt werden. Daher muss bei der Interpretation die Überschätzung des Jahresmittels aus 30 Jahren sowie die Unterschätzung im Bereich der 20% höchsten Niederschlagssummen durch CCLM4.8-Modell im hydrologischen Winterhalbjahr unmittelbar berücksichtigt werden. Fallen Niederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr zu gering aus, werden Niedrigwasserereignisse im Modell länger andauern bzw. extremer ausfallen.

5.3 Ausblick

ArcGIS9 ist ein hilfreiches Instrument zur Rasterdatenverarbeitung. Es erleichtert den Vergleich von unterschiedlichen Rasterauflösungen durch die Zuordnung der Rasterdaten durch geographischen Bezug. Um ein besseres Ergebnis für das Gebietsmittel der Stationen zu erzielen, ist die Empfehlung, das Gebietsmittel mit ArcGIS aus den Stationen erneut unter Einbeziehung der geographischen Höhe zu berechnen und gegebenenfalls ein Raster für die CCLM4.8-Daten mit feineren Übergängen zu erstellen. Ein weiterer Vorschlag ist, Stationen mit Fehlwerten bis etwa 2% in das Gebietsmittel einzubeziehen. Vorzuziehen ist, bei Verfügbarkeit, regionalisierte Tagesdaten vom DWD. Diese sind bereits höhen- und flächenkorrigiert und besser geeignet für eine Evaluierung. Falls das nicht möglich sein sollte, ist der Versuch, die Originaldaten von CCLM4.8-Daten zu erhalten, eine Alternative, um aus dem Gebietsmittel und den unkorrigierten CCLM4.8-Daten eine für das Lahnggebiet konzipierte Bias-Korrektur durchzuführen. Die Kenntnis über die Höhe des korrigierten Bias würde jedoch schon ausreichen, um feststellen zu können, ob sich der Bias vergrößert oder reduziert.

Zur vollständigen Analyse von Hoch- und Niedrigwasser sollten auch klimatologische Trocken- und Nassperioden im Zeitraum 1971-2000 analysiert und dahingehend überprüft werden, ob das regionale Klimamodell CCLM4.8 deren Ausmaß und Häufigkeit nachvollziehen kann.

Um eine Zukunftsprognose der CCLM-4.8-Daten bezüglich der Hoch- und Niedrigwasser relevanten Kennwerte zu erstellen bietet sich der Zeitraum 2021–2050 an. Dieser Zeitraum wird auch in relevanten hydrologischen Untersuchungen gewählt und so ist ein Vergleich zu anderen Studien in Bezug auf die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt ermöglicht. Allerdings ist aus Sicht der Klimamodellierer noch nicht ersichtlich, ob dieser Zeitraum als alleiniger Vergleichszeitraum geeignet ist.

Um regionale Unterschiede der größten und kleinsten Niederschlagssummen festzustellen, ist das Heranziehen weiterer Gebiete erforderlich, wie z.B das Diemelgebiet, das Fuldagebiet oder das Odenwaldgebiet in Hessen.

6. Literaturverzeichnis

- Bachner et al. 2008.** ingenta connect. *Metereologische Zeitschrift*. [Online] 2008. [Zitat vom: 7. Mai 2011.] <http://docsserver.ingentaconnect.com/deliver/connect/schweiz/09412948/v17n4/s6.pdf?expires=1304771189&id=62630450&titleid=1292&acname=Guest+User&checksum=5A098FF64B6BDAC177BABFD508EC2E72>.
- Bremicker. 2000.** IHF-Institut für Hydrologie. *Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*. [Online] 2000. [Zitat vom: 2011. Mai 7.] <http://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/FSH-Bd11-Bremicker.pdf>.
- dasLahntal. 2006-2010.** dasLahntal. [Online] 2006-2010. [Zitat vom: 8. Mai 2011.] <http://de-de.daslahntal.de/public/aktiv-im-lahntal/>.
- DIN 4049-1. 1992.** Hydrologie; Grundbegriffe: Beuth Verlag GmbH, 1992.
- DIN 4049-3. 1994.** Hydrologie; Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Beuth Verlag GmbH, 1994.
- DWD. 2002.** Deutscher Wetterdienst. [Online] 2002. [Zitat vom: 1. Juni 2011.] <http://www.ksb.dwd.de>.
- DWD. 2010.** Deutscher Wetterdienst. [Online] 2010. [Zitat vom: 24. März 2011.] http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/KU4/KU42/Publikationen/Niederschlag__Starkregen__Hochwasser,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Niederschlag__Starkregen__Hochwasser.pdf.
- DWD. 2011 a.** Deutscher Wetterdienst. [Online] 2011 a. [Zitat vom: 2011. März 24.] http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&portletMasterPortlet_i1gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FAufgabenspektrum%2FNumerische__Modellierung%2FVorhersagedienst%2FTauwetter__node.html%3F__n.
- DWD 2011 b.** Deutscher Wetterdienst. [Online] 2011 b. [Zitat vom: 2011. März 24.] http://www.dwd.de/sid_4Q4fNvfc8rrlVgzMpvtkD9JxNr39G0SxyTG1FsMqd3N6LNQ3KJYq!201527216!-1973741969!1302470460176/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&portletMasterPortlet_i1gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%.
- DWD. 2011 c.** Deutscher Wetterdienst. [Online] 2011 c. [Zitat vom: 2011. März 24.] <http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=Niederschlag>.
- DWD. 2011 d.** Deutscher Wetterdienst. [Online] 2011 d. [Zitat vom: 7. Mai 2011.] http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop;jsessionid=153jNFqQD3NFBwMK08T9nHp4tWK9Ytpg1JtyvhRC2y7QmLj7r4f5!1827763248!-976327713?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&gsbSearchDocId=992148.
- ESRI. 1998.** ESRI. [Online] 1998. [Zitat vom: 7. Mai 2011.] <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>.
- GeoDZ. 2010.** GeoDZ. [Online] 2010. [Zitat vom: 24. April 2011.] <http://www.geodz.com/deu/d/Wasserkreislauf>.
- Häckel, Hans. 1999.** *Metereologie*. Stuttgart (Hohenheim) : UTB für Wissenschaft, 1999.
- Hattermann et al. 2010.** Simulation der Wirkung von Klimaänderungen und Klimamodellunsicherheit auf den Wasserhaushalt für deutsche Flusseinzugsgebiet. *Scientific Technical Report*. 2010, S. 49-59.
- Hennegriff et al. 2011.** KLIWA. *Klimaveränderung und Wasserwirtschaft*. [Online] 24. Februar 2011. [Zitat vom: 30. März 2011.] http://kliwa.de/download/klimawandel_hochwasser.pdf.
- HLUG. 2011.** *Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie*. [Online] 7. Februar 2011. [Zitat vom: 4. Mai 2011.] http://www.hlug.de/medien/wasser/niederschlag/ns_index.htm.
- HLUG. 2003.** [Online] Juni 2003. [Zitat vom: 8. Mai 2011.] http://www.hlug.de/medien/wasser/rkh/berichte/258_Lahn_km174.099_bis_km222.549.pdf.
- HLUG. 2011.** HLUG. *Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie*. [Online] 7. Februar 2011. [Zitat vom: 4. Mai 2011.] http://www.hlug.de/medien/wasser/niederschlag/ns_index.htm.
- Höltling, Bernward und Coldewey, Wilhelm G. 2009.** *Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- Hornemann & Rechenberg. 2008.** *Was sie über vorsorgenden Hochwasserschutz wissen sollten*. Dessau : Umweltbundesamt, 2008.
- KLIWA. 2004.** KLIWA. [Online] 2004. [Zitat vom: 2011. März 24.] http://www.kliwa.de/download/symp2004/07_guenther.pdf.

- KomPass. 2008 b.** KomPass. [Online] 2008 b). [Zitat vom: 2011. März 24.]
http://www.anpassung.net/nn_701166/DE/Fachinformationen/KlimaFolgenAnpassung/Wasserwirtschaft/wasserwirtschaft__node.html?__nnn=true.
- KomPass. 2008 a.** KomPass. [Online] 2008 a. [Zitat vom: 2011. März 24.]
http://www.anpassung.net/nn_701050/DE/Klimaprojektionen/klimaprojektionen__node.html?__nnn=true.
- Kottmeier. 2010.** Anpassung. [Online] 2. September 2010. [Zitat vom: 5. Juni 2011.]
http://www.anpassung.net/DE/Anpassungsstrategie/Veranstaltungen/100902-03_20Forschungskonferenz__UBA__DWD/5__Kottmeier__KIT__Extremwetter__S_C3_BCdeutschland,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/5_Kottmeier_KIT_Extremwetter_S&.
- Maniak. 1997.** *Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1997.
- MZ 2008.** Meteorologische Zeitschrift. [Online] 2008. [Zitat vom: 24. März 2011.]
http://www.schweizerbart.de/resources/downloads/paper_free/56726.pdf.
- Michel et al. 2001.** Cooperative. [Online] 2001. [Zitat vom: 8. Mai 2011.] <http://www.cooperative.de/pdf/WRRL-Wirtschaftliche%20Analyse-Hessen-2001.pdf>.
- Mudelsee et.al. 2010.** bgt-hannover. [Online] März 2010. [Zitat vom: 2011. Mai 7.] http://www.bgt-hannover.de/hoffmann/Mudelsee_et_al.pdf.
- Richter. 1995.** *Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194: S. 93*. Offenbach : s.n., 1995.
- Schmidt. 2000.** *Hochwasser und Hochwasserschutz vor 1850*. Oldenburg : Industrieverlag München, 2000.
- Schönwiese. 2006.** *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Berlin, Stuttgart : Gebrüder Borntraeger, 2006.
- Schuchardt et al. 2011.** Umweltbundesamt. [Online] 2011. [Zitat vom: 2011. März 24.]
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3468.pdf>.
- Solomon et al. 2007.** IPCC 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. [Übers.] österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle ProCLim-. *Klimmänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen*. Bern, Wien, Berlin : s.n., 2007.
- Umweltatlas Hessen. 2006.** [Online] 24. Januar 2006. [Zitat vom: 24. Februar 2011.] siehe unter Klimawandel - Einleitung regionale Klimaprojektionen. <http://atlas.umwelt.hessen.de/atlas>.
- ZMW. 2010.** zmw. *Zweckverband Mittelhessische Wasserwerke*. [Online] März 2010. [Zitat vom: 8. Mai 2011.]
http://www.zmw.de/Gewaesser/WLO%20Broschuere%20int%2010-03-24_klein.pdf.

7. Anhang

7.1 Hoch- und Niedrigwasserkennwerte

Tab. 15: Niederschlagssummen des Stationsgebietsmittels für das hydrologische Jahr

hydr. Jahr	größte Niederschlagssumme:						kleinste Niederschlagssumme:				Jahresniederschlag
	1,0	3,0	6,0	10,0	14,0	21,0	30,0	60,0	90,0	120,0	
1972	34,5	44,9	68,6	85,4	89,8	96,4	2,4	33,3	52,4	93,8	687,2
1973	22,4	38,3	64,3	79,8	89,2	96,0	2,2	20,7	79,7	114,3	572,8
1974	20,8	37,4	57,8	74,8	83,8	102,0	7,5	58,1	115,2	171,7	841,0
1975	20,3	40,1	55,5	75,1	94,4	130,5	17,8	54,7	123,0	163,2	785,7
1976	18,9	29,5	44,7	54,5	69,3	97,0	2,3	30,8	51,4	83,0	490,3
1977	24,3	41,9	66,1	76,6	91,2	104,9	8,2	57,8	127,3	195,7	750,7
1978	36,4	66,0	66,2	79,9	120,5	136,3	18,6	63,3	113,5	160,4	744,8
1979	23,7	46,8	61,0	72,7	73,5	100,3	8,0	45,5	123,2	181,4	750,5
1980	31,9	65,0	86,1	111,0	121,6	131,5	23,8	87,7	141,0	186,6	929,5
1981	62,3	87,3	88,7	94,7	104,1	115,2	15,0	70,4	125,8	193,4	889,7
1982	37,3	47,3	62,1	100,1	103,2	126,1	12,5	64,4	108,9	145,4	669,9
1983	28,9	37,8	48,0	63,8	77,9	112,4	13,4	63,0	95,0	152,6	699,3
1984	49,0	65,5	86,2	131,1	151,7	180,4	9,8	55,9	93,4	221,2	909,3
1985	37,0	57,5	67,4	76,5	85,2	111,2	11,4	52,4	88,5	130,9	671,2
1986	25,4	66,2	79,1	82,9	88,9	95,0	0,0	56,8	123,8	166,3	714,9
1987	28,8	41,3	52,7	65,3	81,7	97,2	14,5	66,5	129,0	161,3	708,1
1988	20,3	28,8	38,9	56,2	69,5	101,1	13,9	49,5	76,3	155,3	652,6
1989	27,9	37,4	58,8	63,7	69,7	91,1	3,7	35,0	114,8	166,0	636,2
1990	29,1	59,9	67,8	85,6	92,5	119,5	2,5	50,3	74,1	145,8	679,2
1991	23,6	31,6	45,0	70,6	89,1	114,1	16,3	47,5	100,4	149,1	760,0
1992	31,1	56,6	77,3	86,8	90,6	141,3	19,8	59,3	157,3	205,8	1071,8
1993	34,8	57,0	67,5	80,6	89,2	119,9	19,4	47,3	120,1	185,4	965,0
1994	31,8	56,0	79,0	99,4	133,4	175,5	26,9	134,9	224,6	309,9	1141,3
1995	29,4	42,5	77,8	116,4	124,5	149,1	32,5	138,2	210,5	298,4	1097,9
1996	29,4	34,1	44,6	53,1	66,6	103,4	5,5	50,3	83,6	112,8	776,8
1997	24,1	50,9	65,2	71,9	83,4	98,3	5,5	38,1	135,0	188,9	828,3
1998	26,4	49,8	86,2	121,5	128,9	162,9	11,1	80,3	155,0	243,0	1156,6
1999	28,1	35,9	45,2	61,4	75,5	90,2	42,9	116,7	178,9	266,9	940,9
2000	23,8	46,4	56,4	89,2	105,7	118,1	29,6	106,7	187,6	266,6	1047,8

Tab. 16: Niederschlagssummen der CCLM4.8-Daten für das hydrologische Jahr

hydr. Jahr	größte Niederschlagssumme:						kleinste Niederschlagssumme :				Jahresniederschlag
	1	3	6	10	14	21	30	60	90	120	
1972	23,1	40,2	59,4	78,1	91,4	122,6	14,1	48,2	85,0	131,1	810,2
1973	29,5	67,2	76,3	78,5	103,4	122,3	32,0	96,6	150,0	244,4	1012,5
1974	29,3	45,6	65,8	84,7	102,3	142,9	19,0	67,5	104,0	164,1	846,2
1975	30,1	38,1	52,6	80,6	86,6	106,1	8,9	84,7	137,9	120,0	822,6
1976	25,1	45,0	65,3	85,3	110,6	132,1	20,0	73,6	161,4	235,6	984,6
1977	23,2	38,2	43,9	62,2	70,4	88,7	4,0	51,9	91,7	168,3	688,3
1978	32,3	56,8	72,5	74,6	90,2	101,4	22,5	67,4	122,2	220,1	851,1
1979	27,7	53,1	79,1	105,6	110,7	144,7	13,5	47,3	87,4	180,9	901,6
1980	20,0	30,3	37,2	49,8	60,6	95,6	2,3	19,2	64,7	121,9	566,7
1981	24,6	46,7	60,8	70,2	73,5	98,2	14,8	62,9	87,6	157,1	677,7
1982	38,8	68,2	82,4	97,8	119,0	137,8	12,6	59,7	130,7	183,6	850,0
1983	35,8	49,1	66,7	91,9	111,1	149,8	11,8	94,5	162,2	264,2	1109,5
1984	38,4	57,6	61,1	84,3	95,2	109,3	13,6	60,7	113,0	162,7	705,1
1985	31,5	41,4	43,4	59,4	76,9	98,7	1,6	25,6	55,4	131,2	799,2
1986	26,2	51,8	55,3	65,7	77,2	88,7	7,6	21,3	50,0	107,3	658,0
1987	21,0	44,3	58,7	79,1	89,6	103,9	24,7	70,7	151,8	219,5	803,7
1988	21,2	45,9	53,4	63,7	89,6	110,9	3,8	78,0	125,4	179,6	828,0
1989	27,9	38,3	63,1	83,8	100,4	116,9	9,9	68,5	128,6	203,4	869,7
1990	34,5	41,7	62,7	97,4	104,6	115,9	18,8	63,2	122,3	173,7	848,2
1991	30,4	41,3	55,0	68,0	89,8	113,5	9,0	39,2	103,1	152,8	768,0
1992	17,2	39,8	57,7	77,1	102,2	121,2	16,7	63,2	125,2	191,7	778,5
1993	40,6	56,8	70,8	88,9	111,7	129,4	18,0	41,0	100,3	154,4	907,4
1994	23,1	39,6	59,4	74,7	77,6	111,3	26,9	67,9	126,0	204,6	853,3
1995	24,3	56,7	66,4	73,5	79,5	99,7	10,5	57,6	130,4	166,5	698,3
1996	57,8	95,6	99,1	124,6	157,1	213,5	5,7	12,8	61,9	136,7	957,3
1997	30,3	40,8	55,3	73,8	84,3	112,9	8,2	66,4	145,8	195,4	821,0
1998	29,1	37,3	59,3	78,6	84,0	137,6	6,9	38,1	77,1	180,7	766,2
1999	27,3	35,6	42,4	56,7	67,9	80,3	32,6	69,4	122,8	167,0	730,1
2000	20,7	38,7	64,6	86,0	87,8	111,7	11,3	77,5	136,7	244,2	924,0

Tab. 17: Niederschlagssummen des Stationsgebietsmittels für das hydr. WH

hydr. WH	grösste Niederschlagssumme:						kleinste Niederschlagssumme:				Halbjahresniederschlag
	1	3	6	10	14	21	30	60	90	120	
1972	27,3	37,8	49,2	56,8	73,6	90,5	11,9	33,3	52,4	93,8	262,8
1973	22,4	29,6	45,9	65,9	76,8	79,6	2,2	20,7	79,7	114,3	267,2
1974	20,8	34,4	48,1	59,4	72,1	89,6	7,5	67,9	134,9	183,4	369,2
1975	20,2	40,1	55,5	75,1	94,4	130,5	23,1	82,7	151,0	222,9	485,6
1976	17,4	29,5	44,7	54,5	69,3	97,0	4,7	34,3	59,8	164,4	266,0
1977	20,2	41,9	53,0	65,9	86,5	104,9	28,8	84,5	175,9	252,3	394,9
1978	36,4	66,0	66,2	79,9	120,5	136,3	20,7	73,3	135,9	196,5	431,5
1979	23,0	46,8	61,0	72,7	73,5	100,3	8,0	103,3	175,2	234,4	415,0
1980	31,9	65,0	86,1	111,0	121,6	129,5	23,8	87,7	163,7	226,0	478,4
1981	25,2	31,8	41,3	48,4	57,4	78,7	15,0	70,4	125,8	193,4	356,5
1982	15,0	27,1	41,9	57,0	71,2	93,2	18,9	64,4	108,9	157,3	309,5
1983	28,9	36,8	48,0	57,6	65,1	98,4	15,8	83,2	148,9	229,3	389,9
1984	49,0	56,4	75,2	86,2	91,8	108,9	9,8	55,9	150,3	257,6	360,6
1985	37,0	57,5	67,4	72,1	72,3	72,5	11,4	52,4	88,5	130,9	265,3
1986	24,8	37,9	44,2	75,9	88,9	95,0	9,0	56,8	130,7	177,9	333,4
1987	15,2	29,1	44,2	59,1	69,5	95,2	14,5	75,0	129,0	179,6	290,8
1988	17,7	26,6	38,9	56,2	69,5	101,1	23,1	90,0	172,5	240,3	385,7
1989	27,9	37,4	58,8	63,7	69,7	91,1	3,7	35,0	114,8	171,6	341,1
1990	24,8	59,9	67,8	85,6	92,5	119,5	5,1	50,8	154,4	224,5	361,0
1991	21,2	31,6	43,7	70,6	89,1	114,1	16,3	47,5	100,4	195,7	366,4
1992	24,9	43,6	70,1	82,4	85,8	102,0	19,8	59,3	157,3	205,8	427,3
1993	34,8	57,0	67,5	80,6	89,2	113,3	19,4	47,3	120,1	214,0	419,2
1994	31,8	56,0	79,0	99,4	133,4	175,5	26,9	134,9	229,8	369,9	604,5
1995	29,4	42,5	77,8	116,4	124,5	149,1	60,6	155,2	256,2	419,8	598,0
1996	14,8	32,2	44,4	48,0	50,9	53,8	5,5	50,3	83,6	112,8	219,6
1997	19,7	31,2	38,1	57,0	76,9	98,3	5,5	38,1	135,0	188,9	360,2
1998	15,4	33,2	51,6	64,5	68,6	81,3	11,1	80,3	155,0	243,0	434,3
1999	15,9	30,1	34,0	51,2	66,0	80,9	42,9	116,7	178,9	266,9	447,0
2000	23,8	46,4	55,2	68,2	80,0	109,7	29,6	129,9	223,0	277,2	465,2

Tab. 18: Niederschlagssummen der CCLM4.8-Daten für das hydr. WH

hydr.WH	größte Niederschlagssumme:						kleinste Niederschlagssumme :				Halbjahresniederschlag
	1	3	6	10	14	21	30	60	90	120	
1972	18,6	40,2	59,4	78,1	91,4	122,6	14,1	48,2	85,0	150,2	353,7
1973	29,5	67,2	76,3	78,5	103,4	122,3	32,0	96,6	150,0	257,5	501,1
1974	29,3	45,6	64,9	84,7	102,3	142,9	19,0	96,2	169,1	290,4	453,1
1975	16,9	32,1	39,5	50,0	60,2	86,4	21,9	90,7	137,9	218,8	368,9
1976	18,2	31,1	51,7	82,4	101,2	107,8	20,0	73,6	182,1	253,7	428,7
1977	20,2	38,2	43,9	62,2	70,4	88,7	8,2	51,9	96,6	197,8	328,5
1978	32,3	56,8	72,5	74,6	90,2	101,4	31,2	138,7	195,3	317,7	510,1
1979	24,2	50,9	79,1	94,0	97,1	138,4	19,7	61,2	206,6	256,7	495,7
1980	20,0	30,3	37,2	49,8	60,6	95,6	2,3	30,4	118,4	172,8	319,0
1981	24,6	46,7	60,8	70,2	73,5	98,2	27,0	74,0	118,7	178,8	423,1
1982	23,5	38,4	53,0	61,6	78,6	101,2	12,6	59,7	130,7	183,6	350,4
1983	26,7	44,2	66,7	91,9	111,1	149,8	41,5	134,5	273,0	349,3	638,4
1984	24,6	40,3	53,9	70,5	83,7	86,2	22,5	89,0	145,3	194,2	372,5
1985	16,9	28,4	41,5	59,4	76,9	98,7	1,6	25,6	55,4	131,2	362,3
1986	26,2	43,0	48,6	60,3	77,2	86,7	7,6	21,3	55,7	151,8	282,1
1987	21,0	44,3	58,7	79,1	89,6	103,9	24,7	70,7	181,9	266,1	453,7
1988	20,0	45,9	53,4	63,7	89,6	110,9	21,3	107,8	217,1	286,4	490,1
1989	16,3	35,1	46,1	63,6	73,6	86,3	13,9	68,5	128,6	203,4	403,8
1990	34,5	41,7	62,7	97,4	104,6	115,9	18,8	117,8	168,4	276,8	487,2
1991	25,2	41,3	55,0	68,0	89,8	113,5	9,0	84,9	177,7	260,4	393,1
1992	17,2	39,8	57,7	77,1	102,2	121,2	19,9	118,9	179,6	278,3	443,4
1993	22,9	38,2	50,1	68,3	85,1	113,8	18,0	41,0	100,3	157,4	344,6
1994	23,1	39,6	59,4	74,7	77,6	111,3	33,0	82,8	186,3	269,2	480,3
1995	20,6	42,9	56,8	64,1	70,3	88,5	10,5	71,5	168,6	201,6	379,4
1996	22,4	39,9	64,6	77,8	94,2	130,5	16,1	54,9	125,2	249,0	438,6
1997	20,2	36,7	44,4	61,4	66,2	74,3	8,2	81,8	152,2	195,4	346,2
1998	21,9	37,3	59,3	78,6	84,0	137,6	6,9	38,1	77,1	212,9	378,2
1999	17,8	24,2	39,6	54,8	67,9	80,3	38,5	89,2	172,7	235,1	382,0
2000	20,7	35,6	64,6	86,0	87,8	111,7	28,3	117,7	222,2	345,5	488,1

Tab. 19: Niederschlagssummen des Stationsgebietsmittels für das hydr. SH

hydr. SH	größte Niederschlagssumme:						kleinste Niederschlagssumme:				Halbjahresniederschlag
	1	3	6	10	14	21	30	60	90	120	
1972	34,5	44,9	68,6	85,4	89,8	96,4	2,4	49,8	159,0	216,7	424,4
1973	22,4	38,3	64,3	79,8	89,2	96,0	16,2	44,4	104,3	139,0	305,6
1974	20,2	37,4	57,8	74,8	83,8	102,0	34,3	107,7	194,2	273,6	470,4
1975	20,3	26,9	37,1	52,7	52,8	59,5	17,8	82,9	125,4	179,4	300,1
1976	18,9	27,0	36,3	43,2	48,7	58,7	2,3	42,5	82,1	128,3	224,3
1977	24,3	39,3	66,1	76,6	91,2	100,5	8,2	57,8	158,7	231,6	355,8
1978	17,5	25,3	33,7	44,1	52,4	71,7	18,6	63,3	113,5	160,4	313,3
1979	23,7	30,5	37,1	45,3	67,9	82,6	12,7	45,5	123,2	181,4	335,5
1980	20,6	35,8	44,8	65,9	92,5	131,5	33,0	94,9	148,7	271,5	451,1
1981	62,3	87,3	88,7	94,7	104,1	115,2	16,7	106,0	208,1	301,6	533,2
1982	15,0	27,1	41,9	57,0	71,2	93,2	18,9	64,4	108,9	157,3	309,5
1983	19,8	37,8	47,3	63,8	77,9	112,4	13,4	63,0	95,0	152,6	309,4
1984	37,1	65,5	86,2	131,1	151,7	180,4	24,2	89,0	152,1	284,2	548,7
1985	24,5	45,6	53,5	76,5	85,2	111,2	22,0	68,1	123,1	215,3	405,9
1986	25,4	66,2	79,1	82,9	88,4	88,4	0,0	68,9	123,8	166,3	381,5
1987	28,8	41,3	52,7	65,3	81,7	97,2	32,6	87,8	154,9	225,4	417,3
1988	20,3	28,8	38,0	47,5	66,3	68,1	14,5	53,2	117,5	155,5	266,9
1989	18,5	35,1	35,5	39,9	47,1	61,8	28,9	73,1	121,4	166,0	295,1
1990	29,1	40,2	41,0	49,4	55,8	77,6	2,5	82,1	121,1	172,3	318,2
1991	23,6	28,6	45,0	63,6	69,1	96,6	31,5	93,3	166,4	247,2	393,6
1992	31,1	56,6	77,3	86,8	90,6	141,3	42,1	142,3	258,4	366,4	644,5
1993	28,4	46,1	55,0	67,5	86,5	119,9	56,4	139,4	237,8	325,5	545,7
1994	18,6	41,1	61,7	78,6	91,3	105,6	32,7	144,8	224,6	321,8	536,7
1995	24,8	31,0	50,1	65,4	84,0	104,4	32,5	141,2	225,0	325,6	499,9
1996	29,4	34,1	44,6	53,1	66,6	103,4	50,2	145,5	232,1	329,8	557,2
1997	24,1	50,9	65,2	71,9	83,4	95,5	40,1	102,7	188,9	278,6	468,1
1998	26,4	49,8	86,2	121,5	128,9	162,9	56,7	150,1	247,3	324,8	722,3
1999	28,1	35,9	45,2	61,4	75,5	90,2	49,8	134,3	233,7	329,4	493,9
2000	17,6	36,6	56,4	89,2	105,7	118,1	64,9	139,2	265,5	393,4	582,6

Tab. 20: Niederschlagssummen der CCLM4.8-Daten für das hydr. SH

hydr. SH	größte Niederschlagssumme:						kleinste Niederschlagssumme :				Halbjahresniederschlag
	1	3	6	10	14	21	30	60	90	120	
1972	23,1	27,7	51,6	60,6	79,5	97,3	42,4	42,4	180,7	269,1	456,5
1973	28,4	47,1	59,3	76,2	94,4	112,5	43,8	99,4	170,0	273,7	511,5
1974	26,0	33,3	65,8	72,3	75,1	103,0	28,6	67,5	160,1	230,7	387,8
1975	30,1	38,1	52,6	80,6	86,6	106,1	8,9	84,7	169,4	244,7	449,9
1976	25,1	45,0	65,3	85,3	110,6	132,1	42,6	108,2	192,9	276,0	555,9
1977	23,2	30,2	36,2	56,6	68,4	77,5	4,0	54,6	103,6	168,7	359,9
1978	17,0	29,9	43,6	59,7	73,4	100,7	22,5	67,4	122,2	220,1	341,0
1979	27,7	53,1	70,7	105,6	110,7	144,7	13,5	47,3	87,4	180,9	405,9
1980	14,7	20,3	22,4	31,0	41,9	54,5	6,8	49,9	101,5	135,0	247,7
1981	16,4	27,3	31,2	50,0	53,7	66,1	14,8	62,9	87,6	157,1	253,7
1982	38,8	68,2	82,4	97,8	109,9	127,2	24,9	68,6	171,7	238,3	499,6
1983	35,8	49,1	60,6	85,8	100,9	123,0	11,8	94,5	181,7	275,5	471,1
1984	38,4	57,6	61,1	84,3	95,2	109,3	13,6	60,7	124,8	193,4	332,6
1985	31,5	41,4	43,4	51,5	63,5	91,7	26,0	76,3	154,5	215,6	436,8
1986	25,0	51,8	55,3	65,7	75,4	88,7	8,9	75,9	163,9	221,6	375,9
1987	17,2	28,2	42,4	51,4	68,9	77,0	33,5	90,5	170,2	225,7	350,0
1988	21,2	25,8	39,5	46,3	63,6	78,7	4,3	78,0	125,4	179,6	337,9
1989	27,9	38,3	63,1	83,8	100,4	116,9	9,9	116,7	201,6	313,5	465,9
1990	30,4	31,2	36,9	56,4	69,6	84,1	22,1	63,2	122,3	190,3	361,1
1991	30,4	39,0	51,6	66,0	80,7	101,1	23,0	61,2	122,9	183,5	374,9
1992	16,4	25,7	42,1	47,6	59,0	75,4	18,9	71,7	135,8	211,1	335,0
1993	40,6	56,8	70,8	88,9	111,7	129,4	41,7	128,6	198,3	333,1	562,8
1994	18,2	25,3	40,6	48,2	66,5	87,8	26,9	67,9	126,0	204,6	373,0
1995	24,3	56,7	66,4	73,5	79,5	99,7	15,7	57,6	138,0	166,5	318,9
1996	57,8	95,6	99,1	124,6	157,1	213,5	5,7	12,8	61,9	136,7	518,7
1997	30,3	40,8	55,3	73,8	84,3	112,9	23,6	66,4	145,9	258,5	474,8
1998	29,1	36,9	54,4	66,3	72,6	90,5	11,8	51,9	111,8	185,6	388,0
1999	27,3	35,6	42,4	56,7	66,3	76,5	32,6	69,4	150,3	226,0	348,1
2000	19,7	38,7	51,7	57,3	86,4	100,6	11,3	77,5	136,7	244,2	436,0

7.2 Unterschreitungsdauerlinien für Hoch- und Niedrigwasserkennwerte

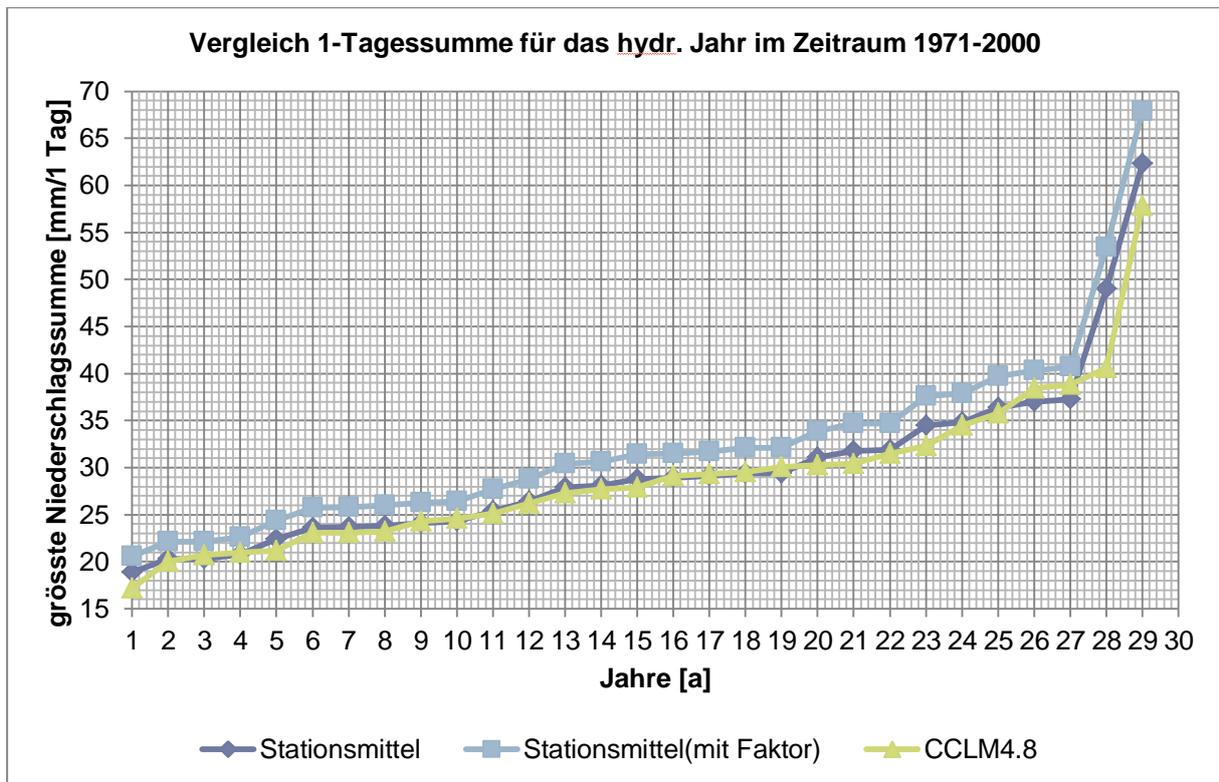


Abb. 16: RR(1d) für das hydrologische Jahr

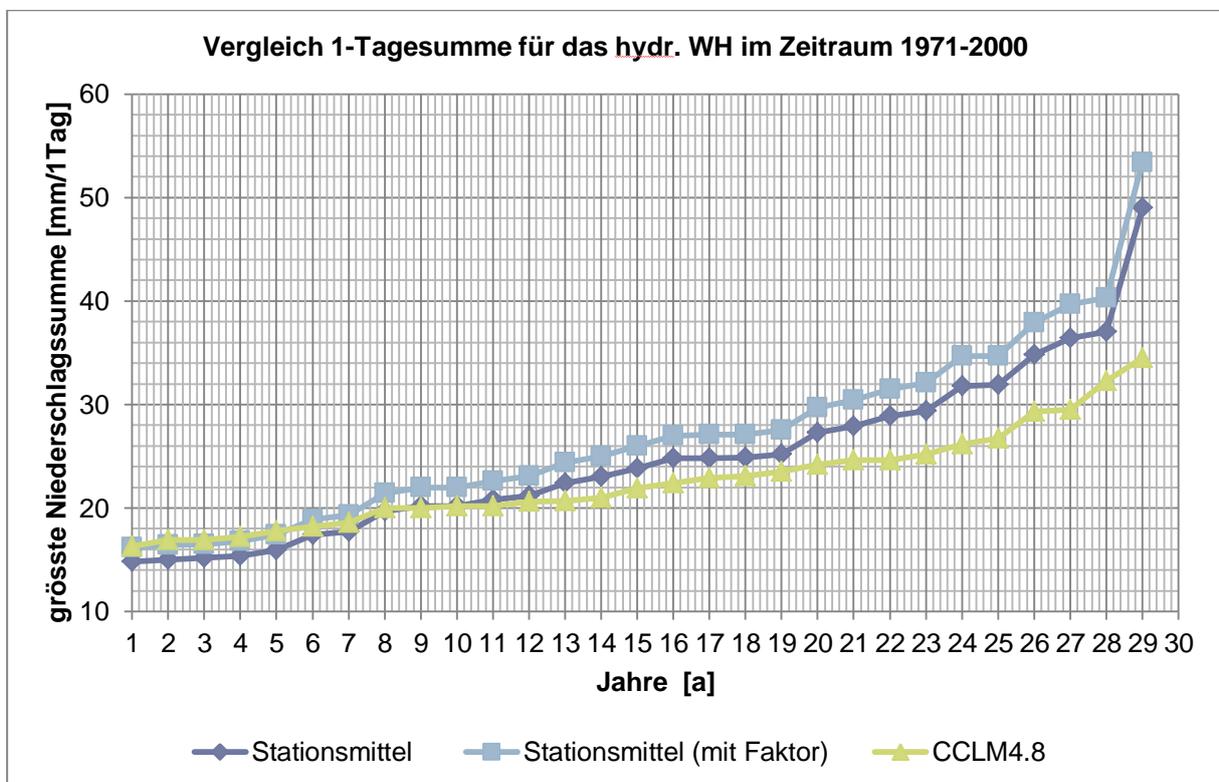


Abb. 17: RR(1d) für das hydrologische Winterhalbjahr

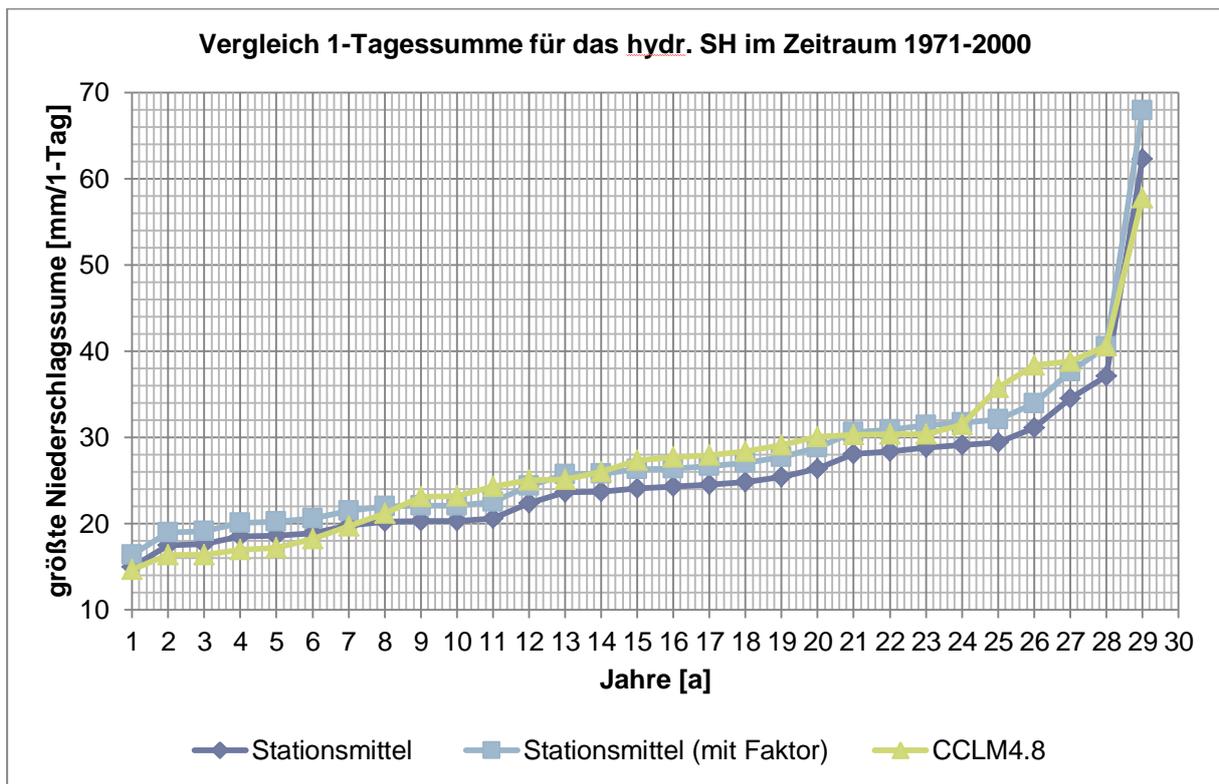


Abb. 18: RR(1d) für das hydrologische Sommerhalbjahr

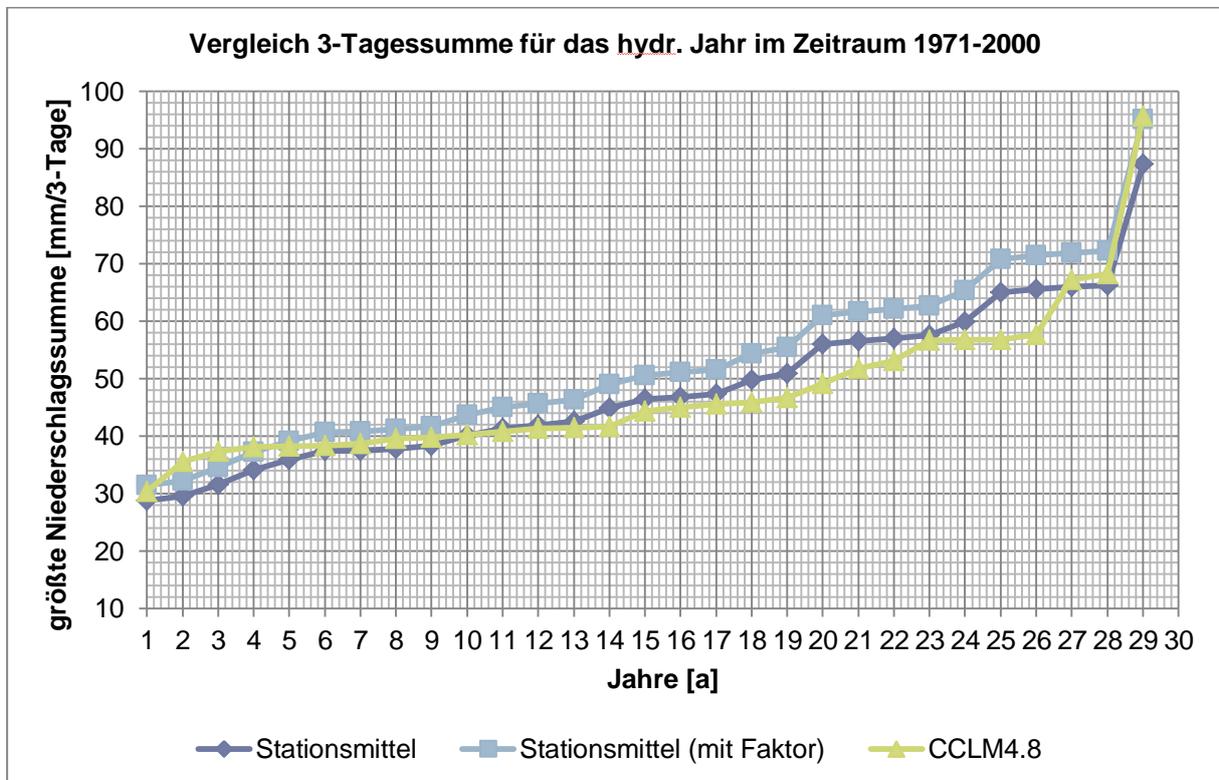


Abb. 19: RR(3d) für das hydrologische Jahr

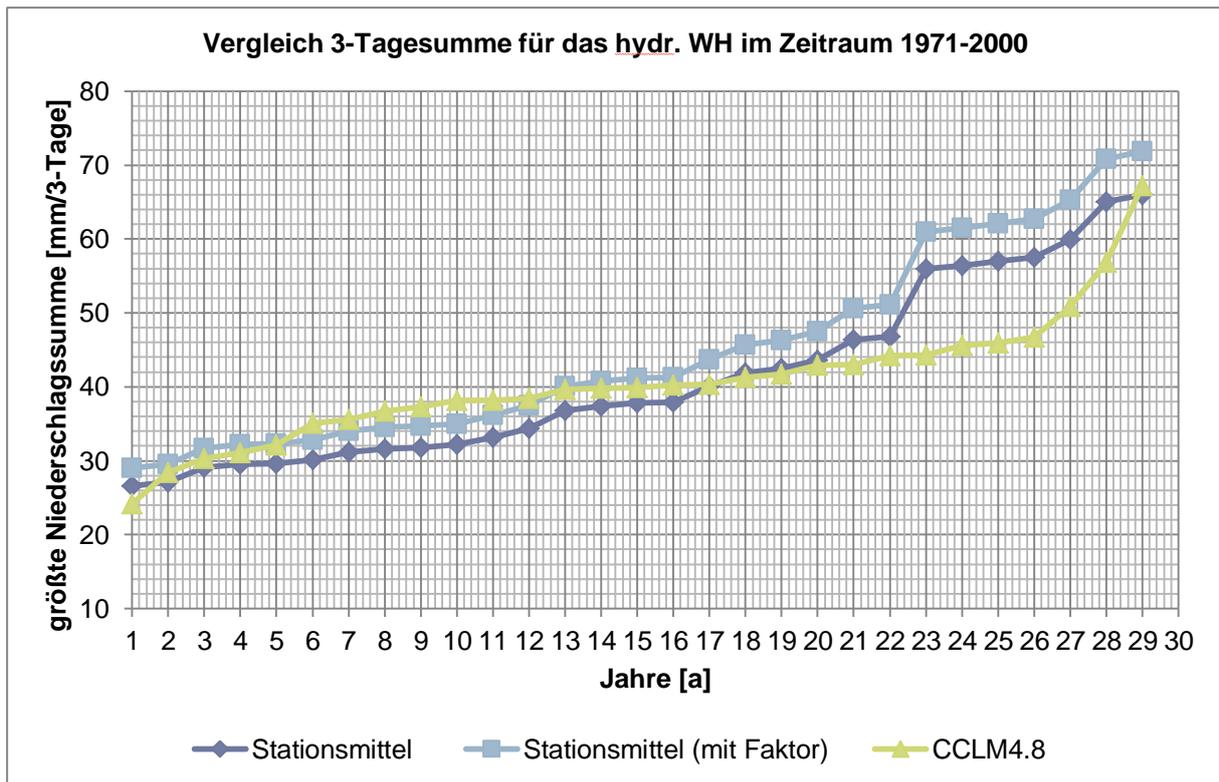


Abb. 20: RR(3d) für das hydrologische Winterhalbjahr

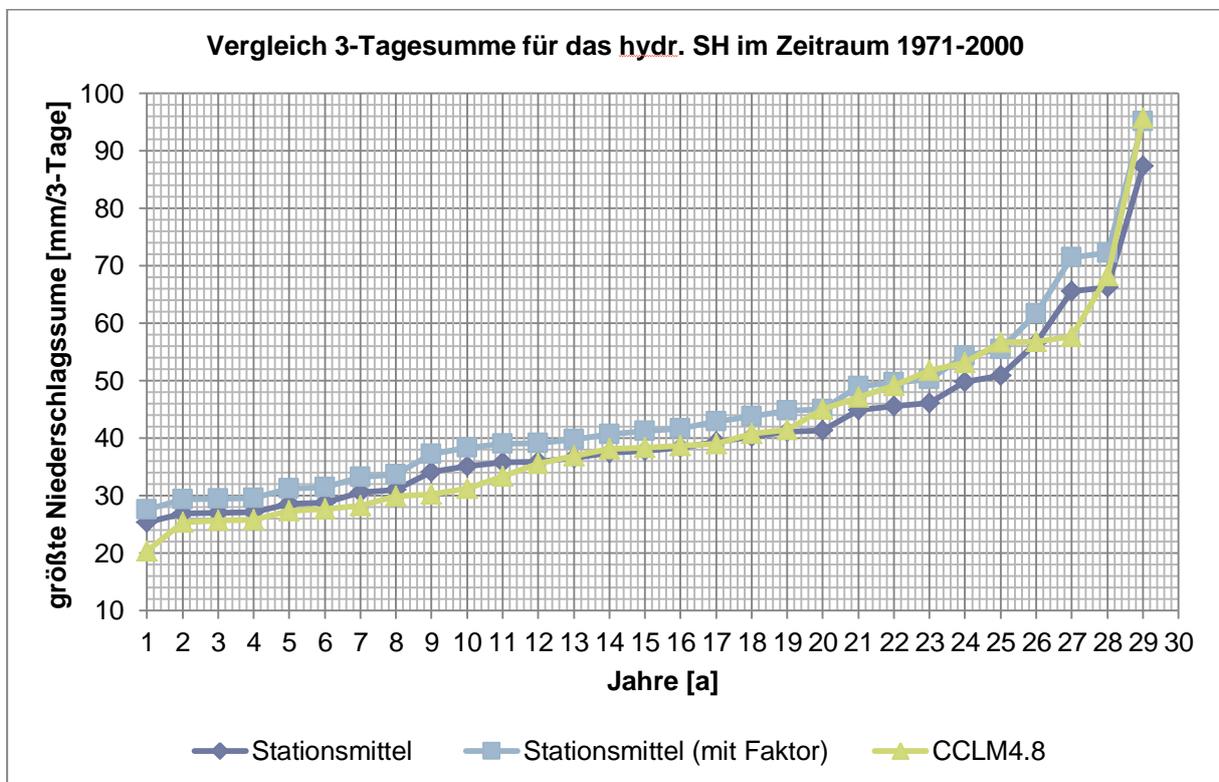


Abb. 21: RR(3d) für das hydrologische Sommerhalbjahr

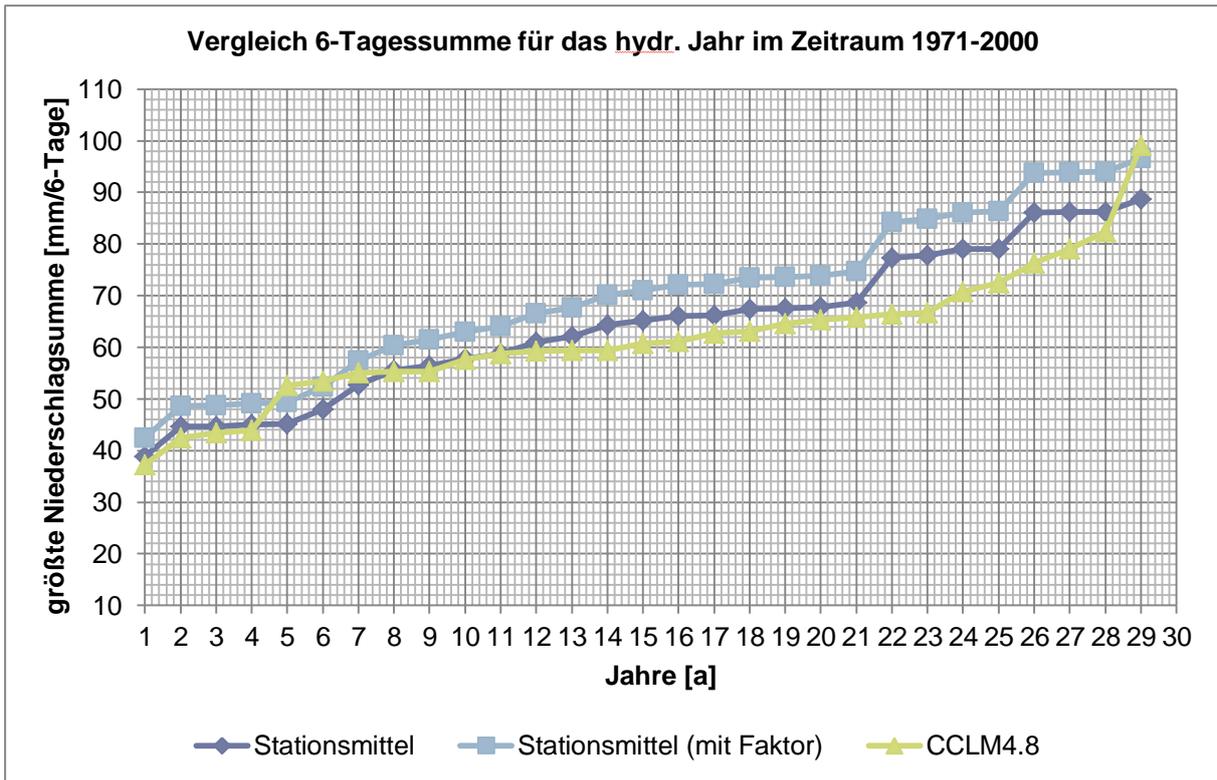


Abb. 22: RR(6d) für das hydrologische Jahr

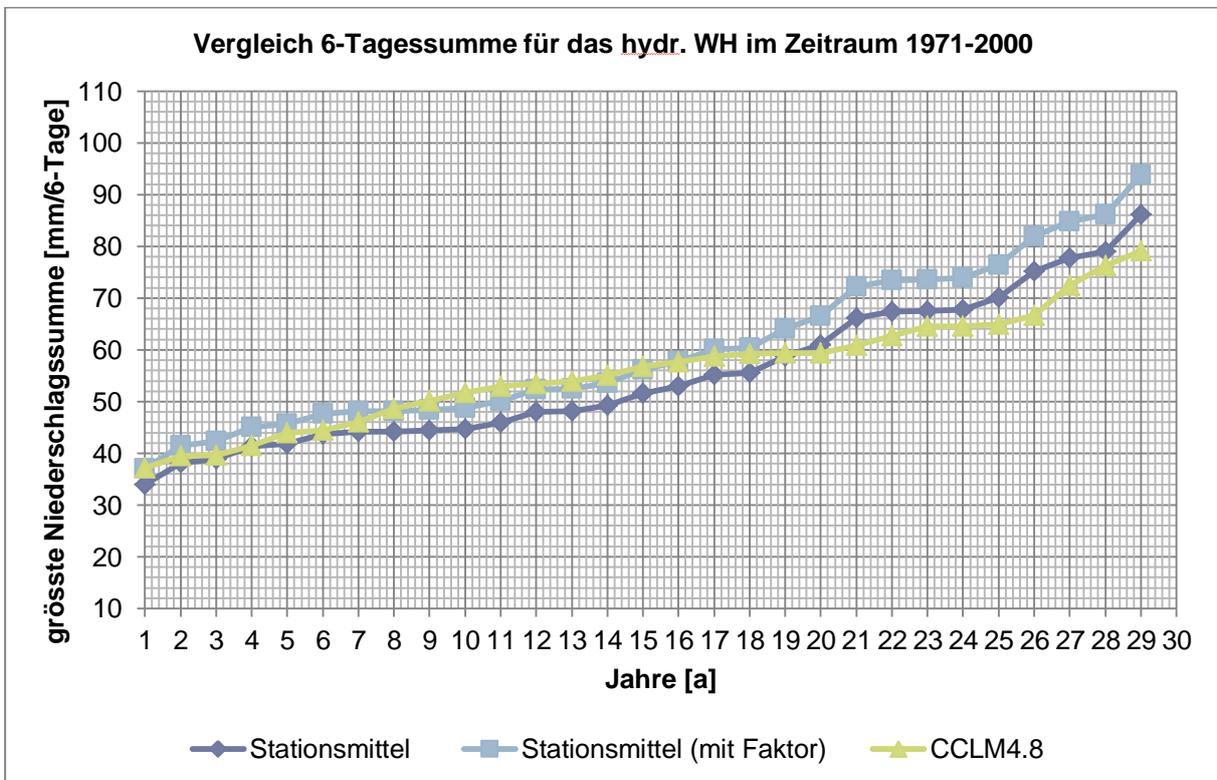


Abb. 23: RR(6d) für das hydrologische Winterhalbjahr

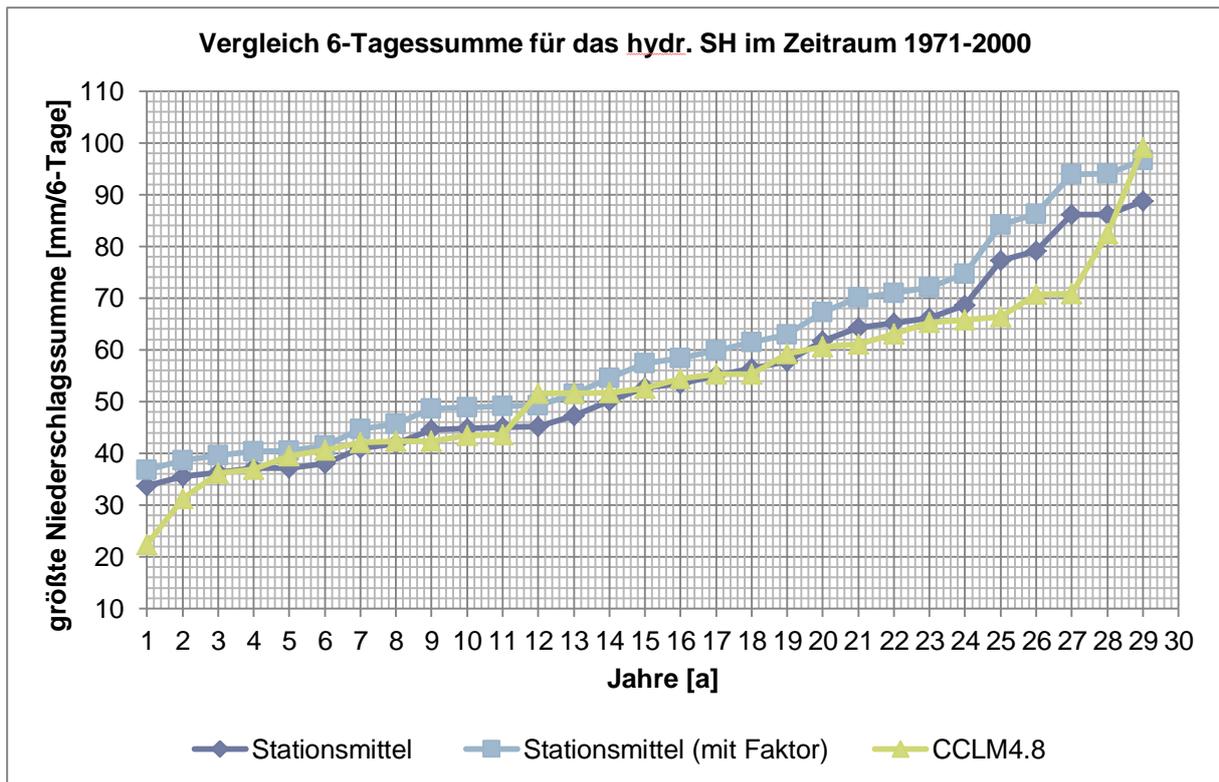


Abb. 24: RR(6d) für das hydrologische Sommerhalbjahr

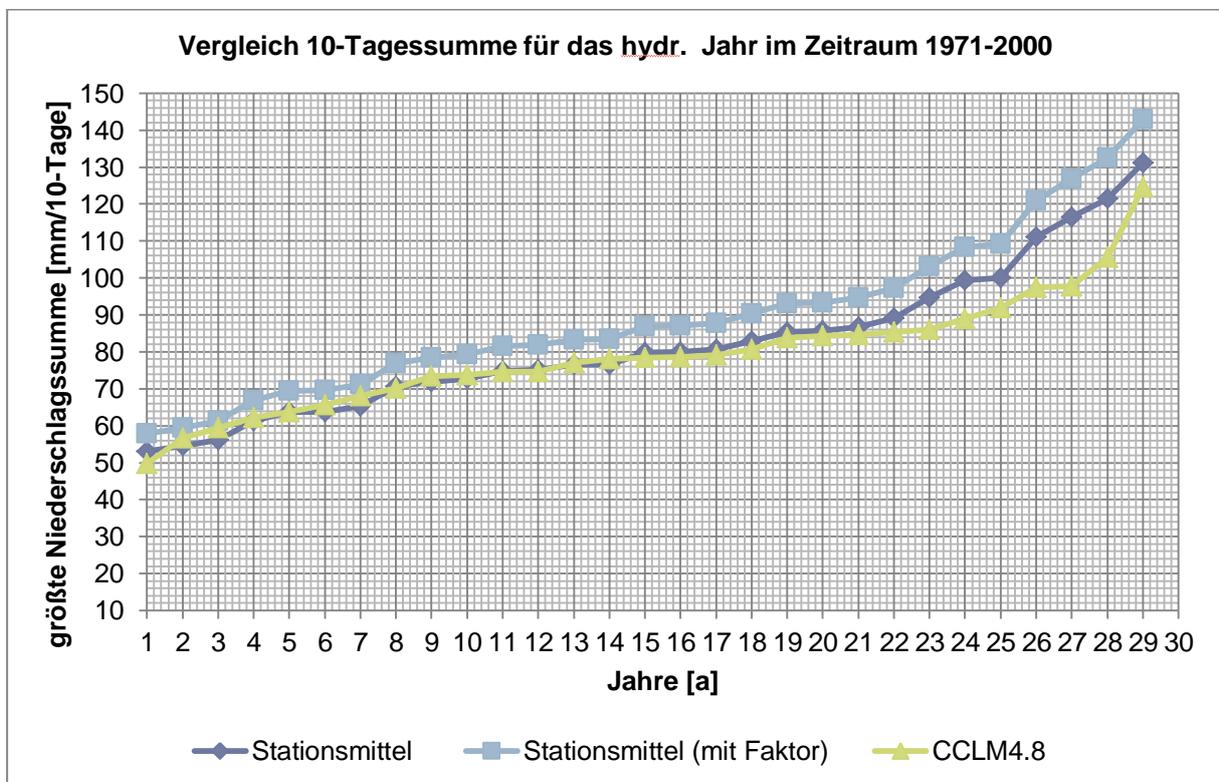


Abb. 25: RR(10d) für das hydrologische Jahr

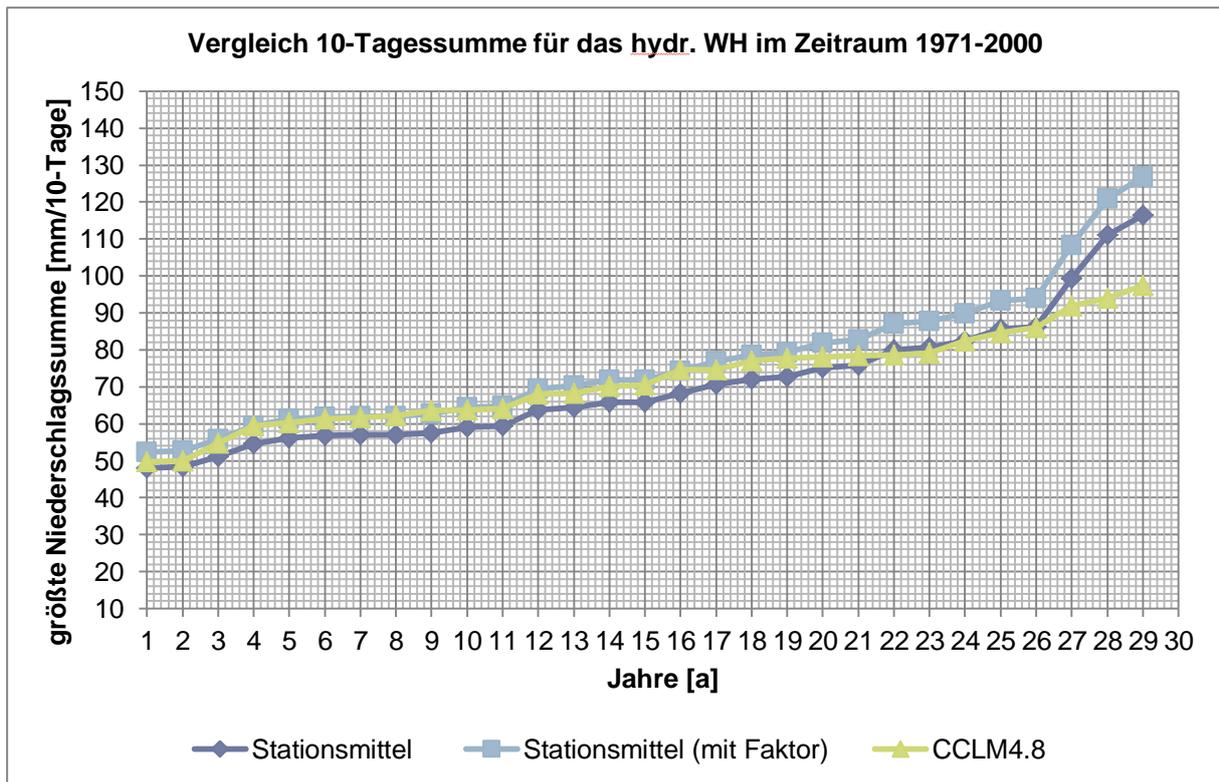


Abb. 26: RR(10d) für das hydrologische Winterhalbjahr

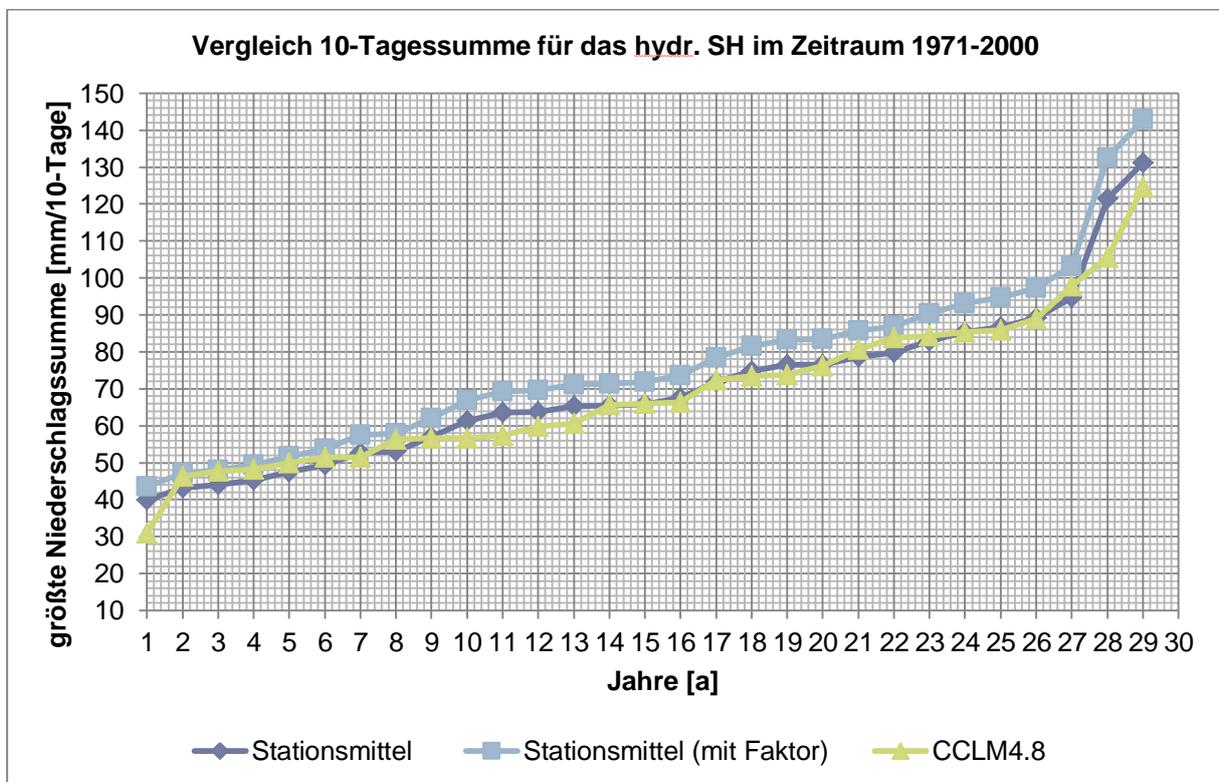


Abb. 27: RR(10d) für das hydrologische Sommerhalbjahr

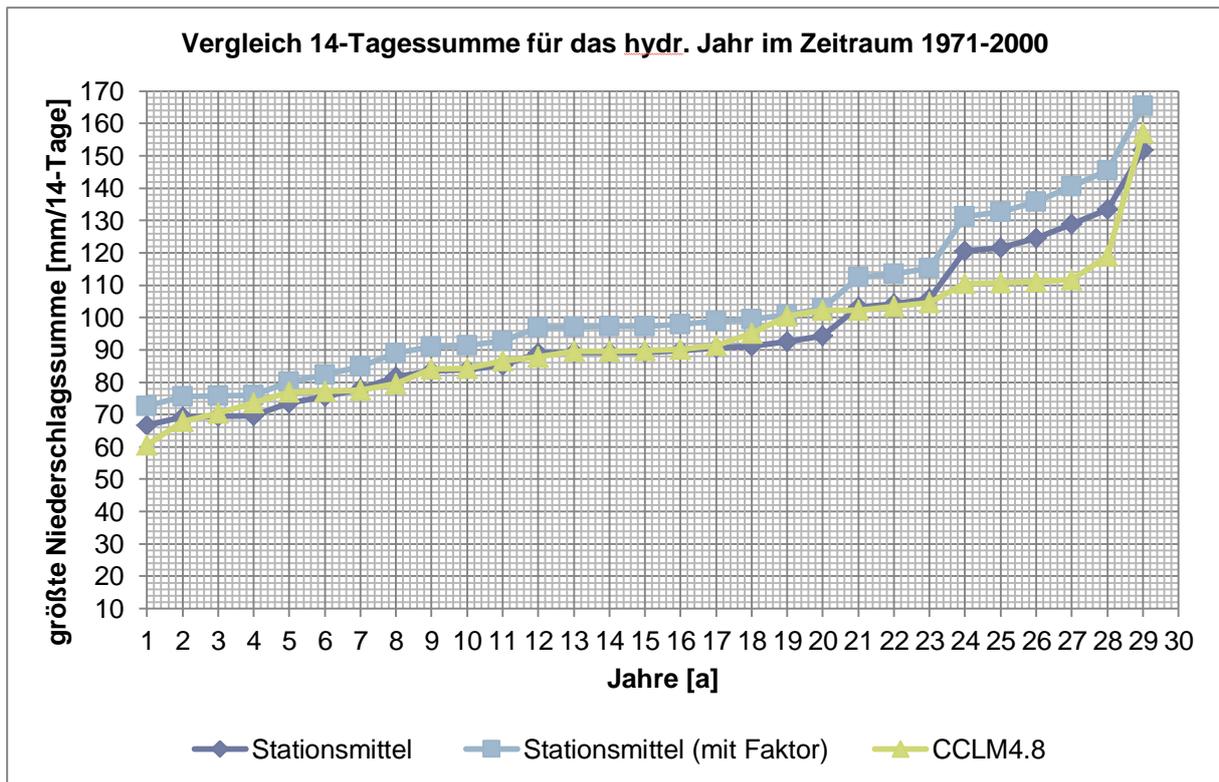


Abb. 28: RR(14d) für das hydrologische Jahr

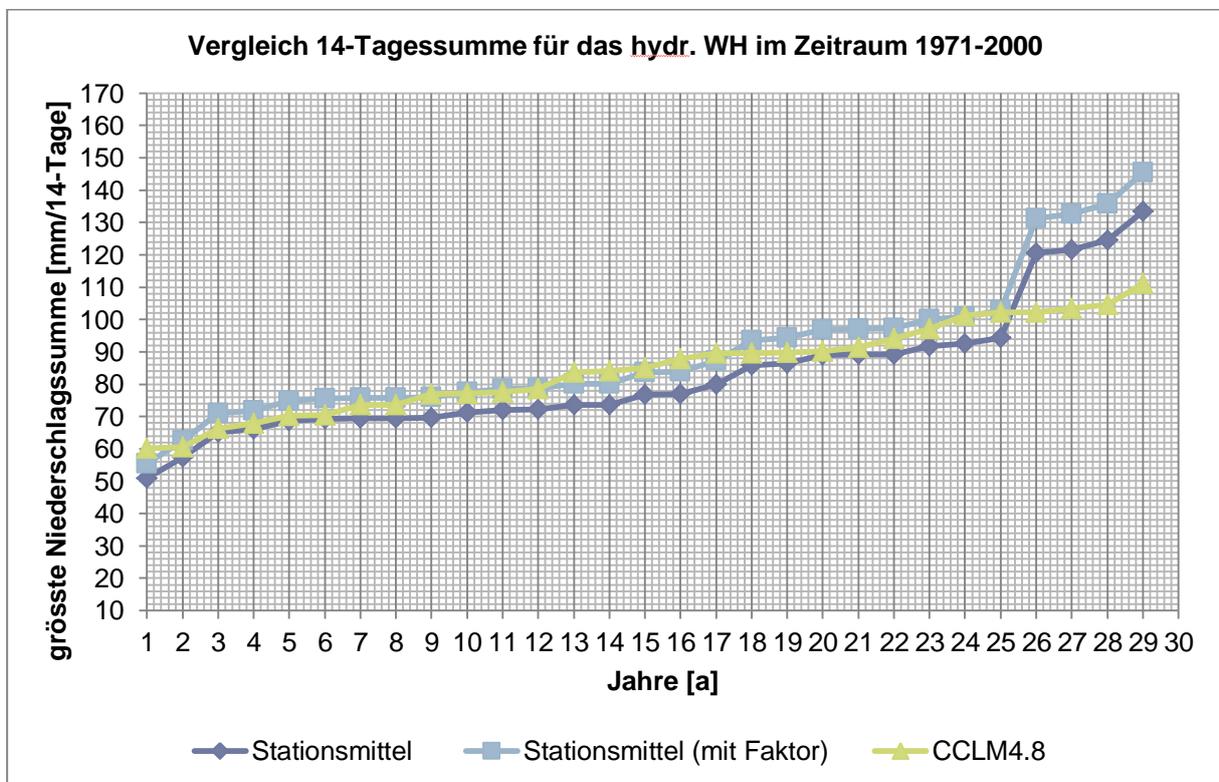


Abb. 29: RR(14d) für das hydrologische Winterhalbjahr

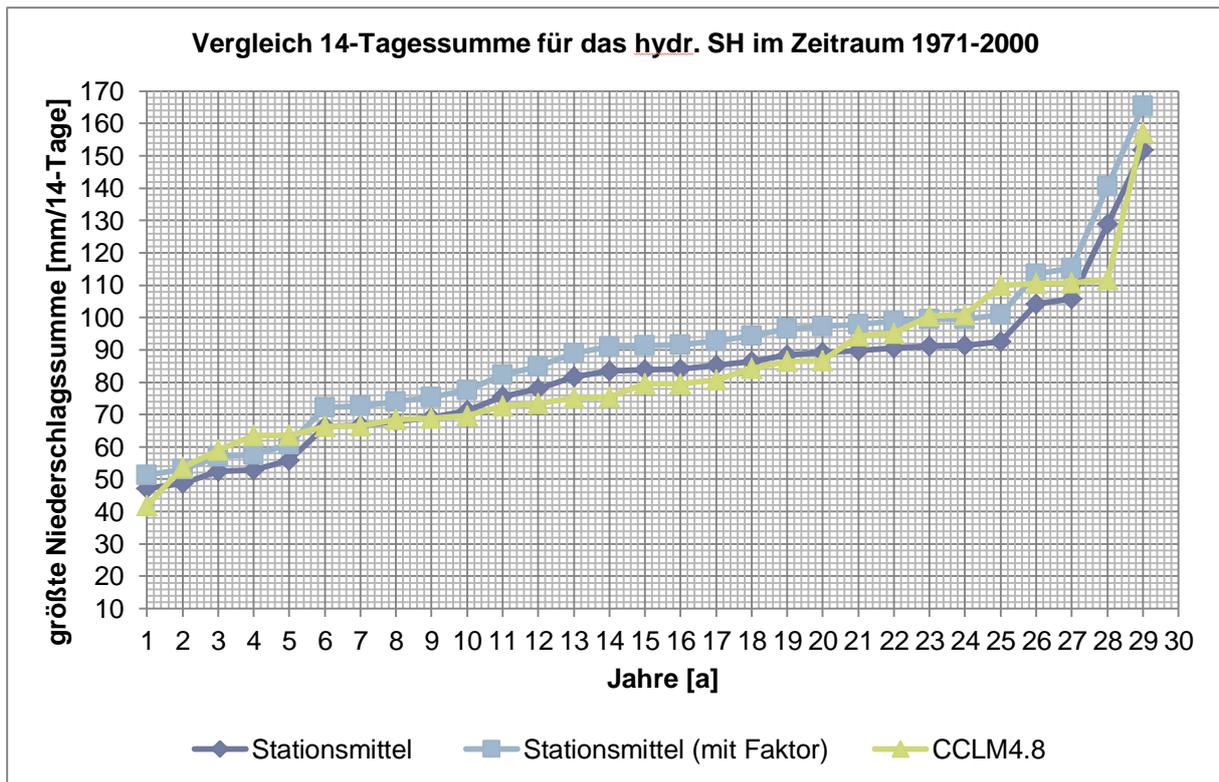


Abb. 30: RR(14d) für das hydrologische Sommerhalbjahr

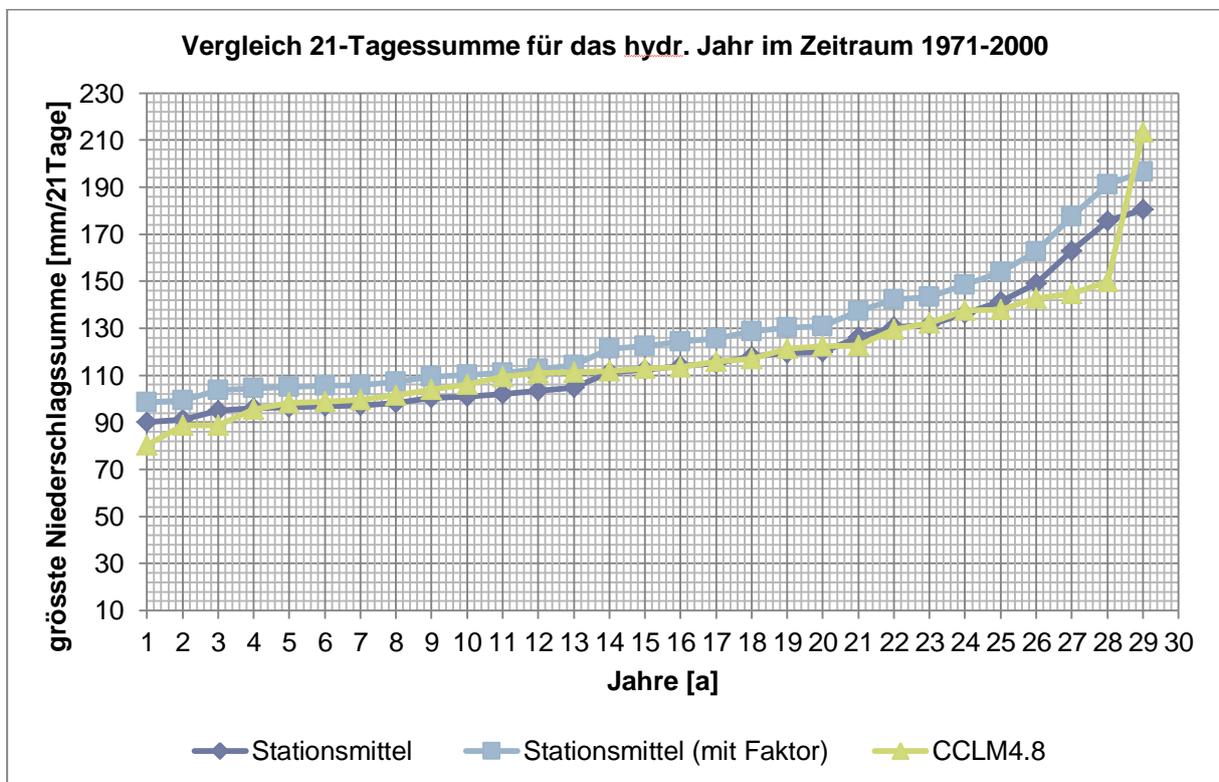


Abb. 31: RR(21d) für das hydrologische Jahr

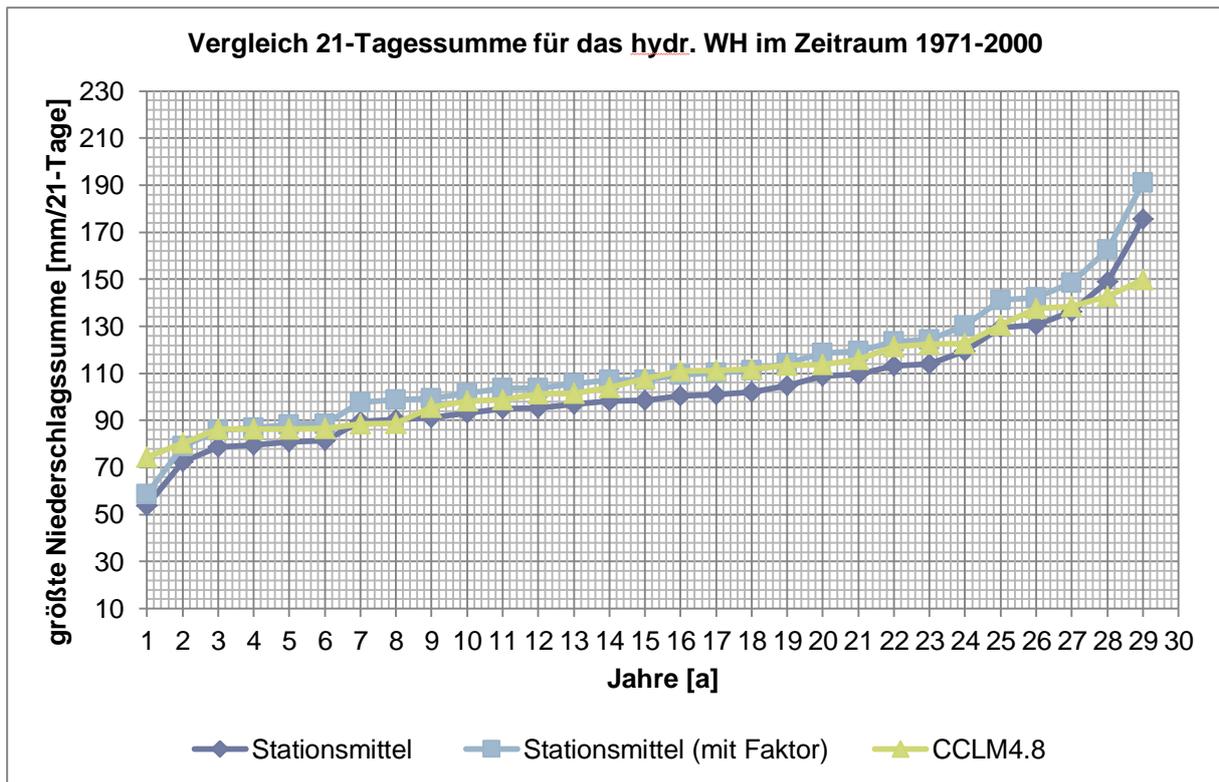


Abb. 32: RR(21d) für das hydrologische Winterhalbjahr

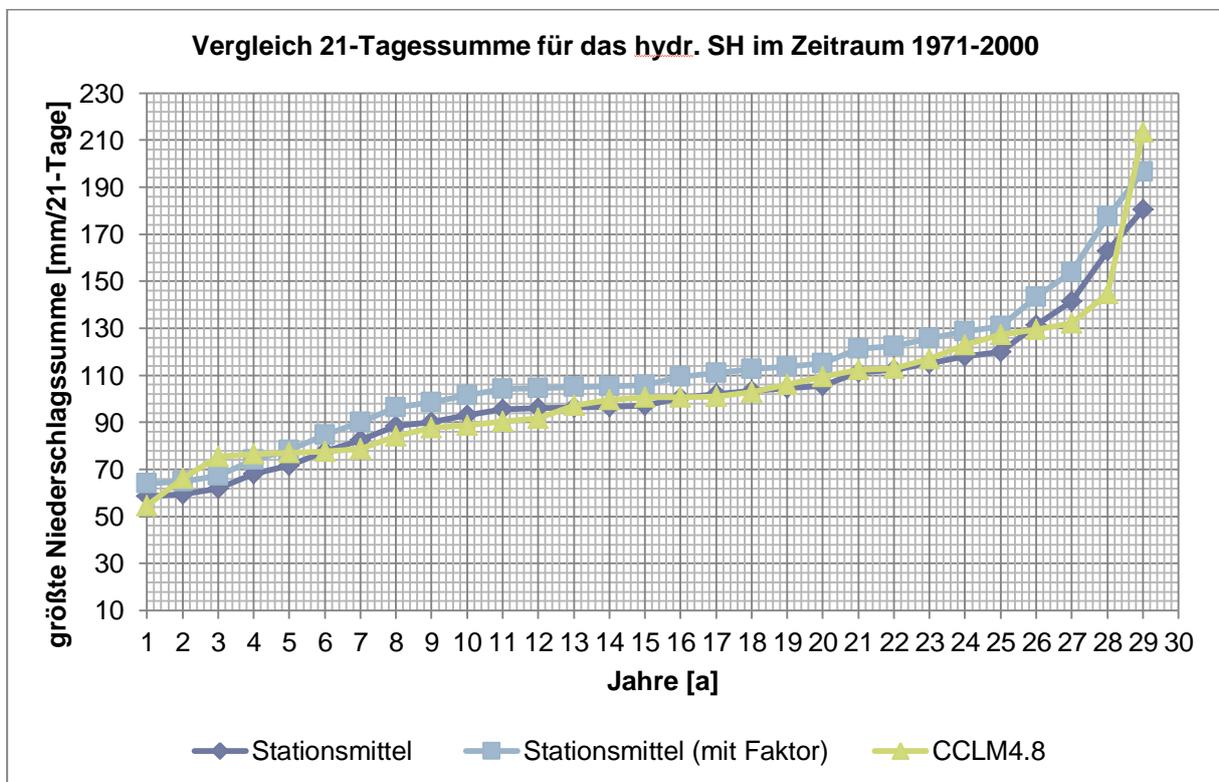


Abb. 33: RR(21d) für das hydrologische Sommerhalbjahr

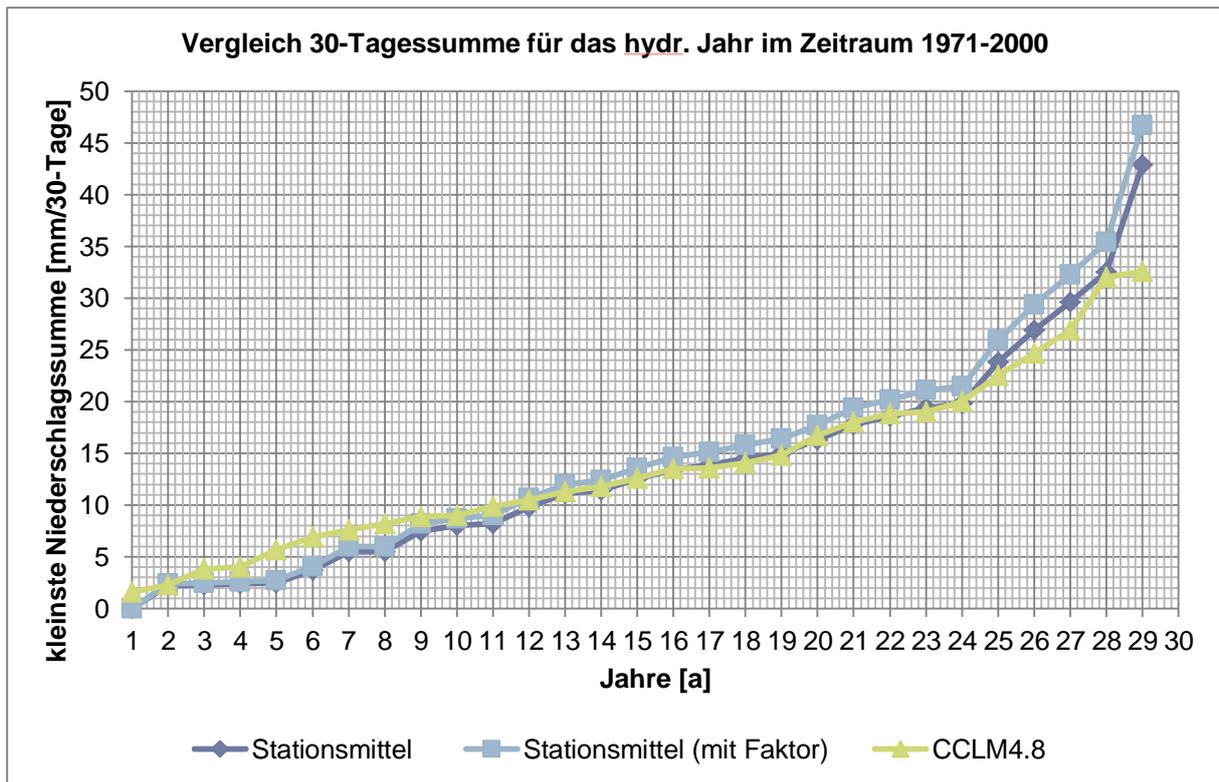


Abb. 34: RR(30d) für das hydrologische Jahr

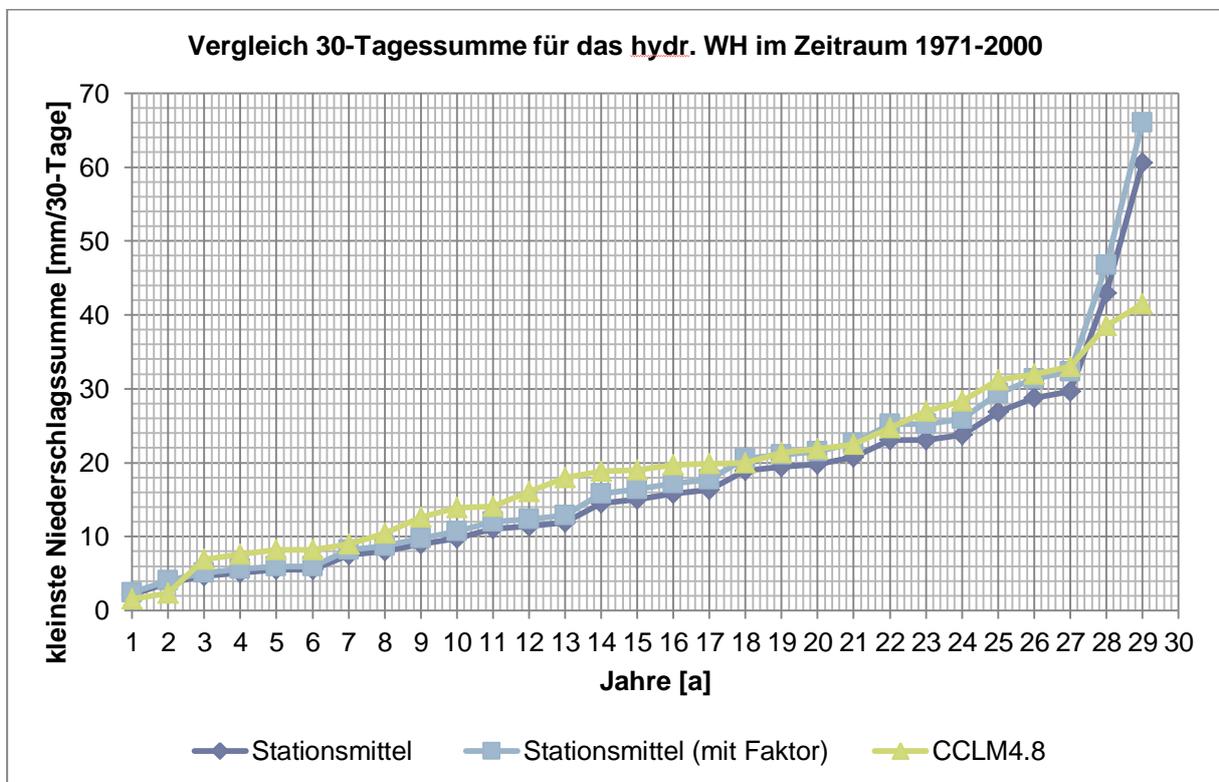


Abb. 35: RR(30d) für das hydrologische Winterhalbjahr

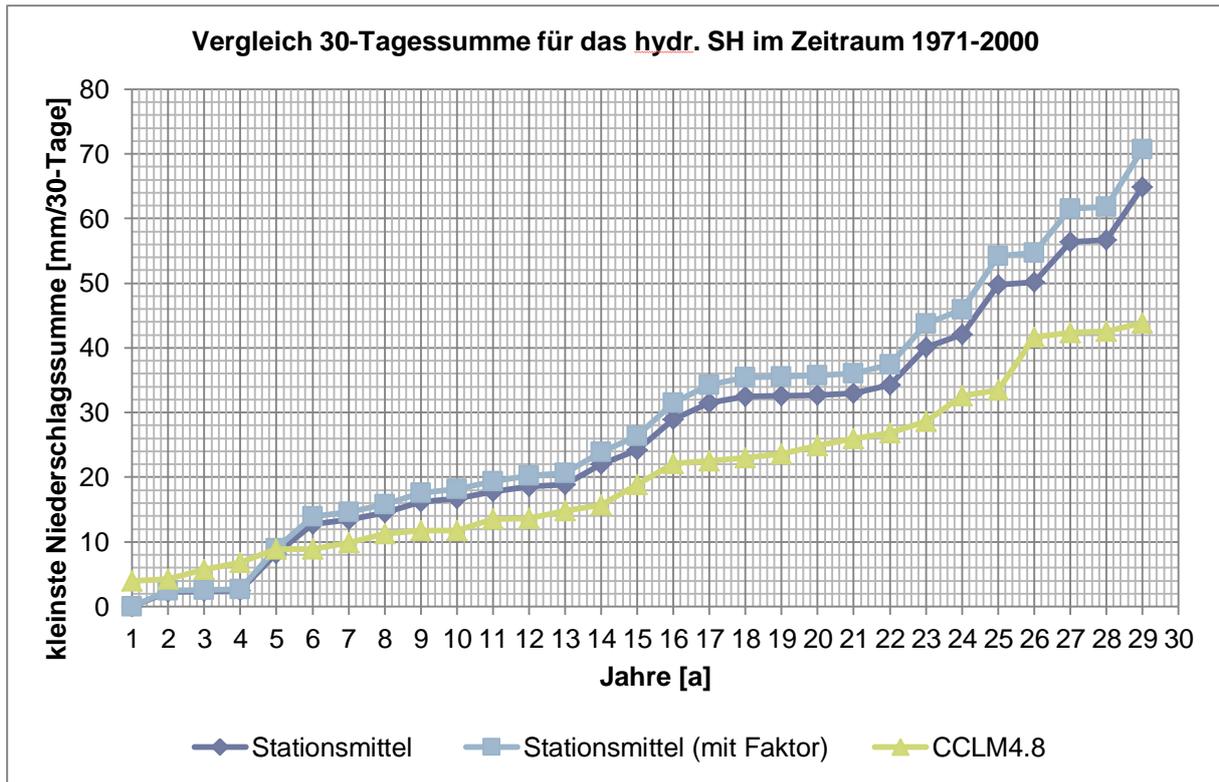


Abb. 36: RR(30d) für das hydrologische Sommerhalbjahr

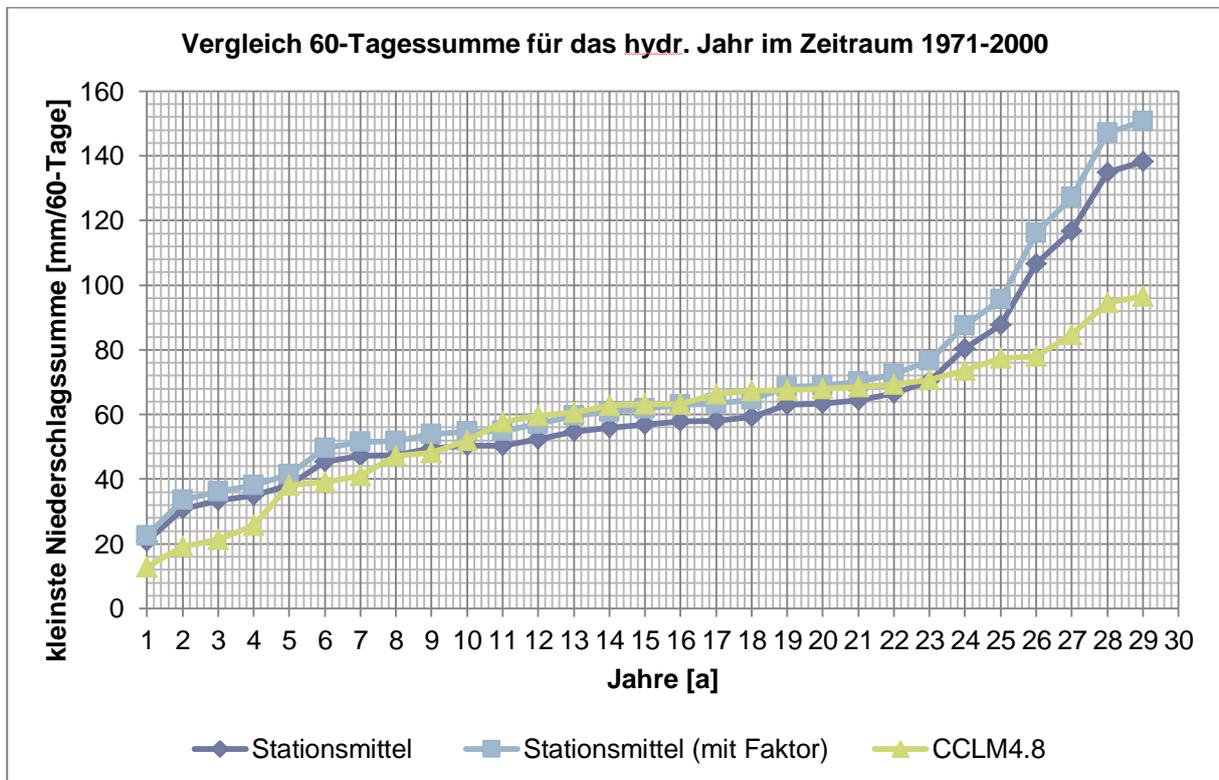


Abb. 37: RR(60d) für das hydrologische Jahr

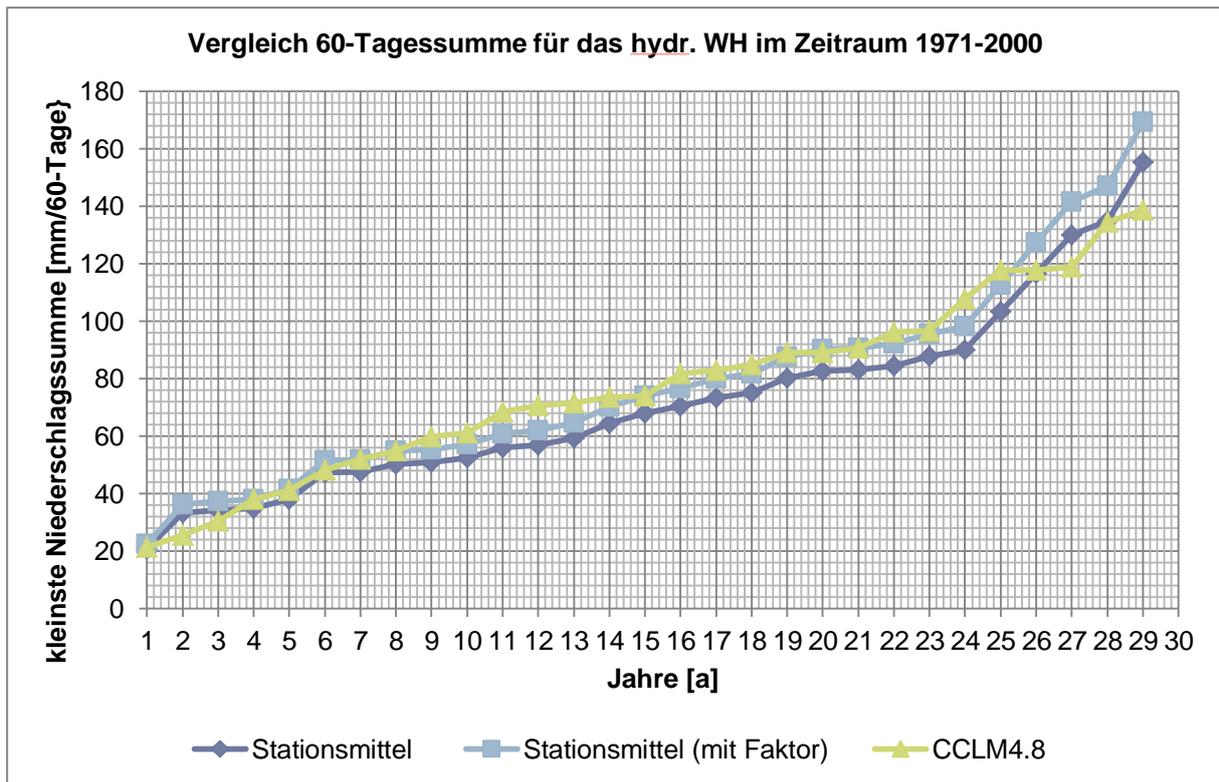


Abb. 38: RR(60d) für das hydrologische Winterhalbjahr

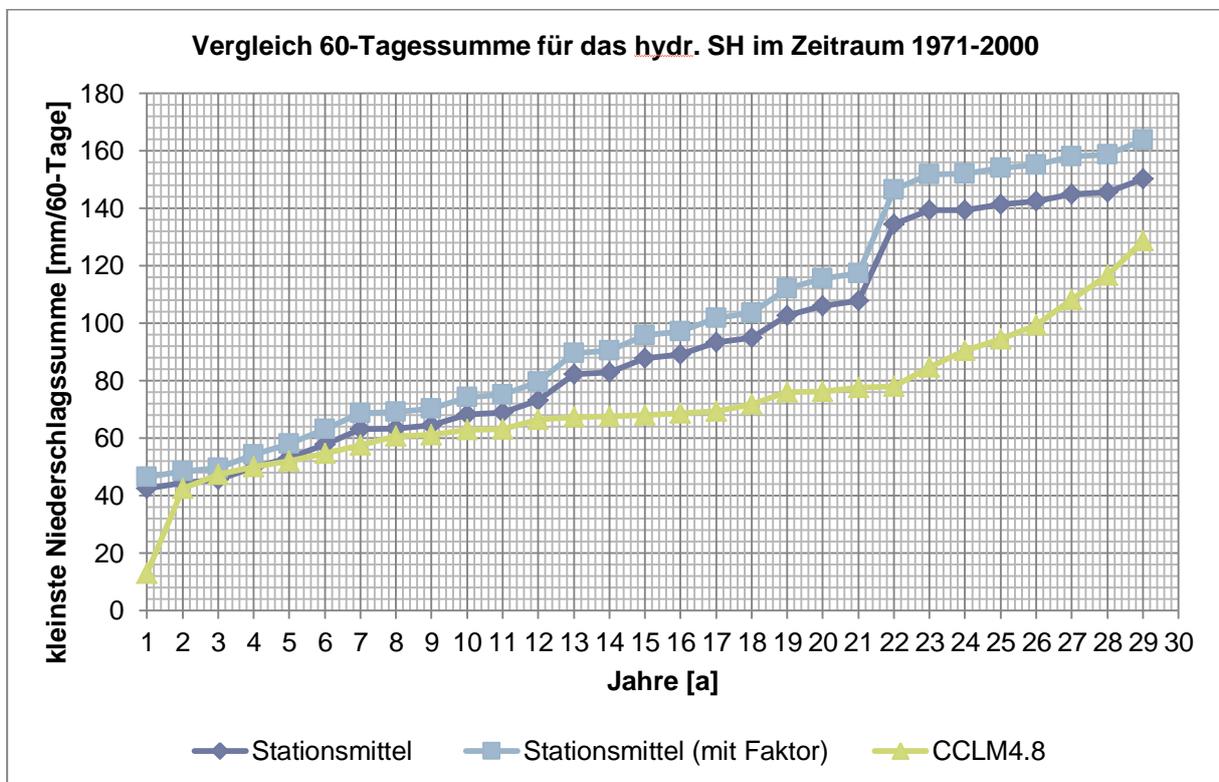


Abb. 39: RR(60d) für das hydrologische Sommerhalbjahr

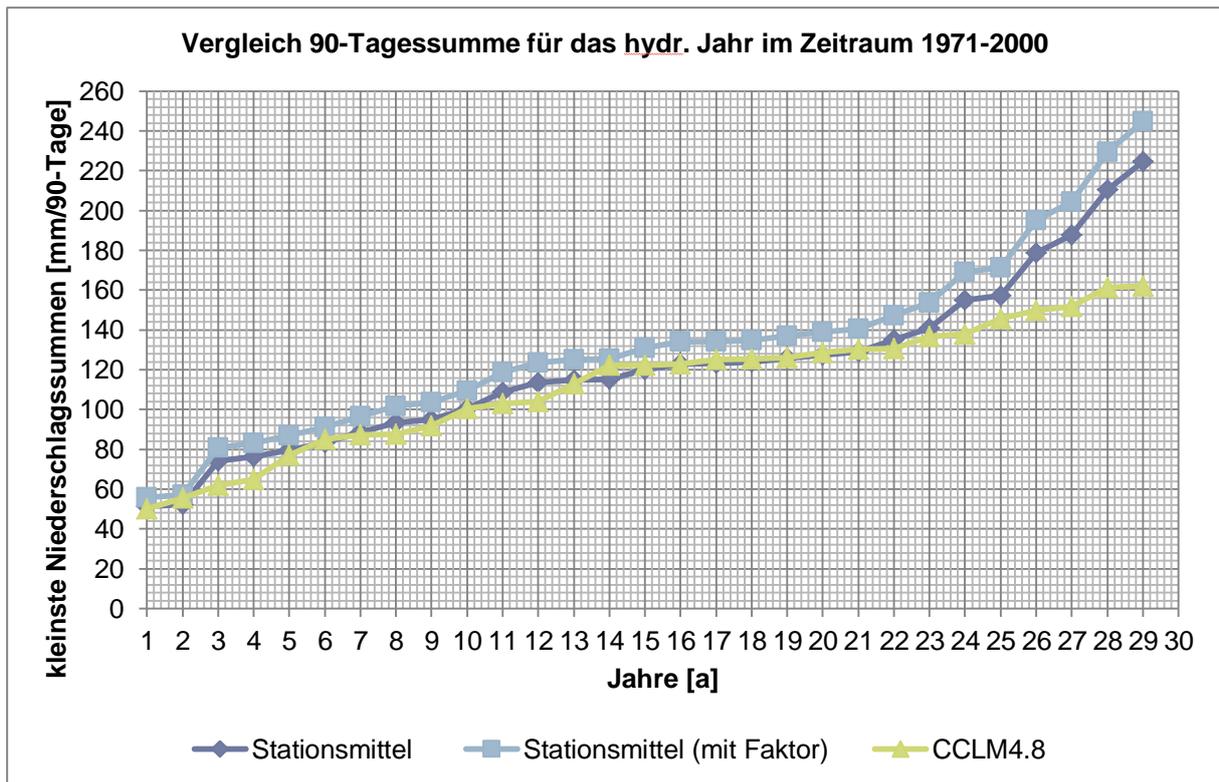


Abb. 40: RR(90d) für das hydrologische Jahr

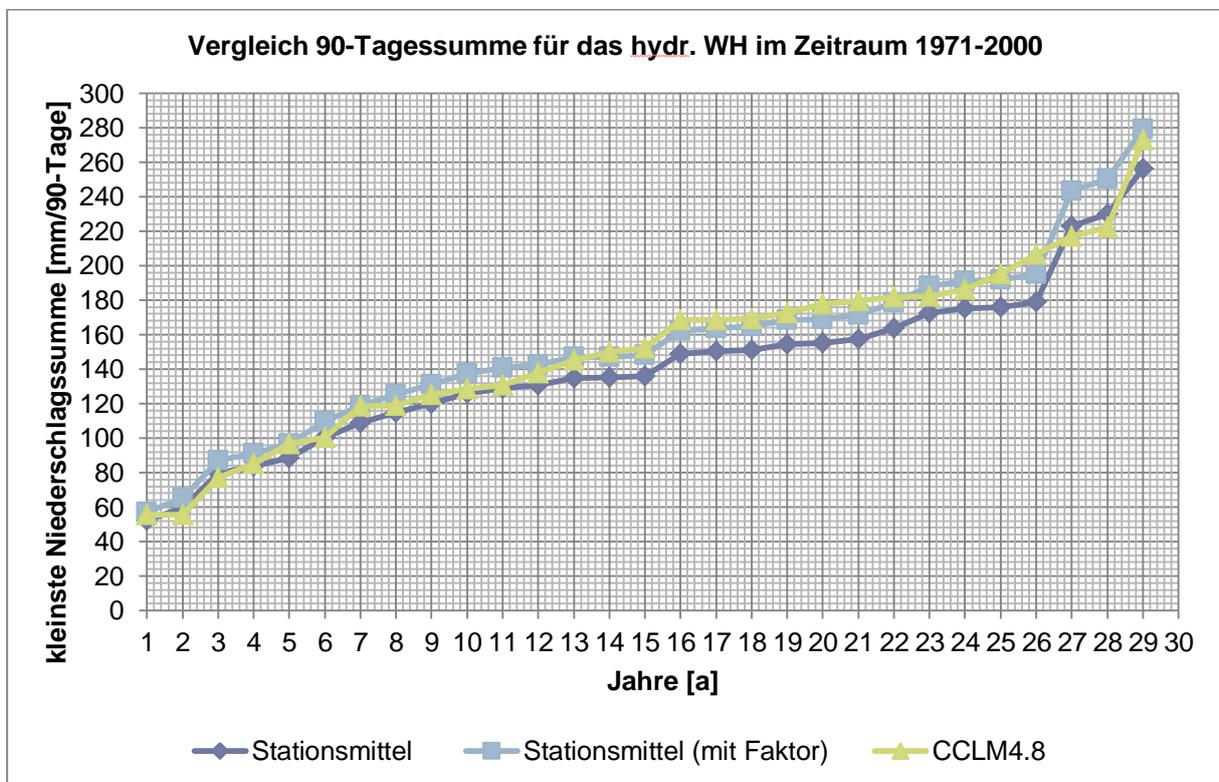


Abb. 41: RR(90d) für das hydrologische Winterhalbjahr

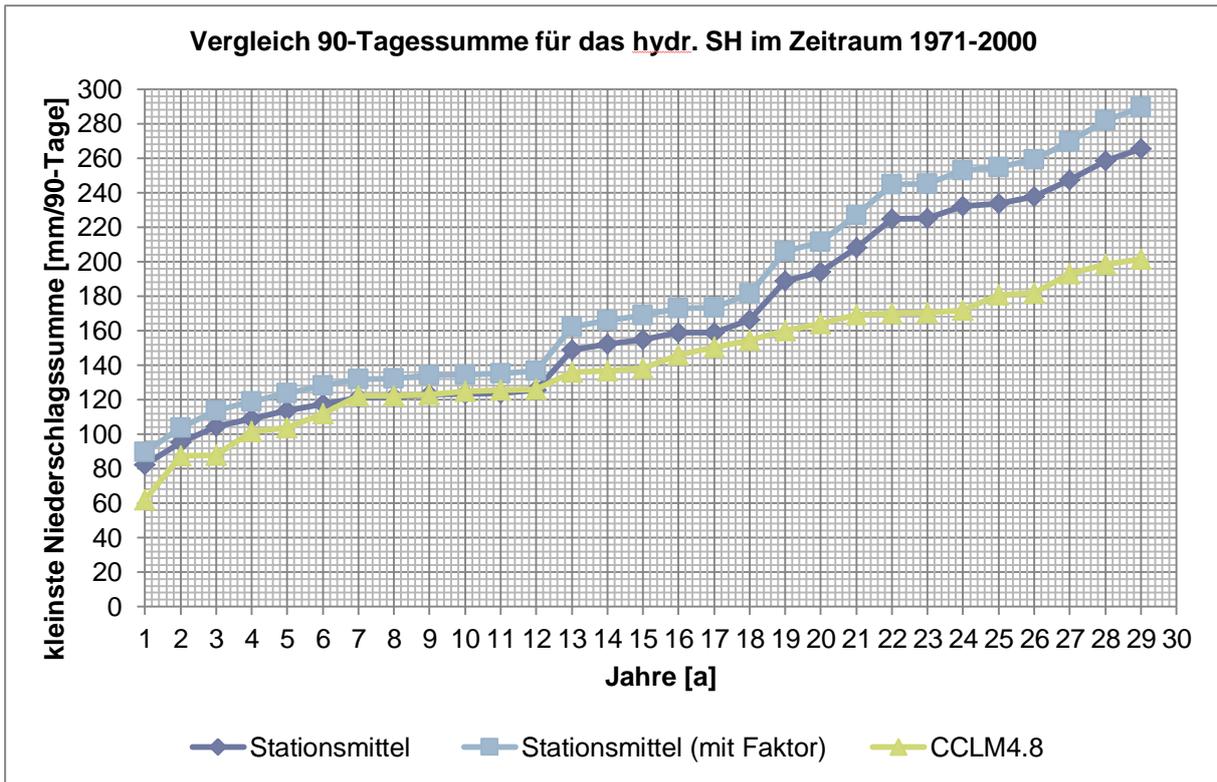


Abb. 42: RR(90d) für das hydrologische Sommerhalbjahr

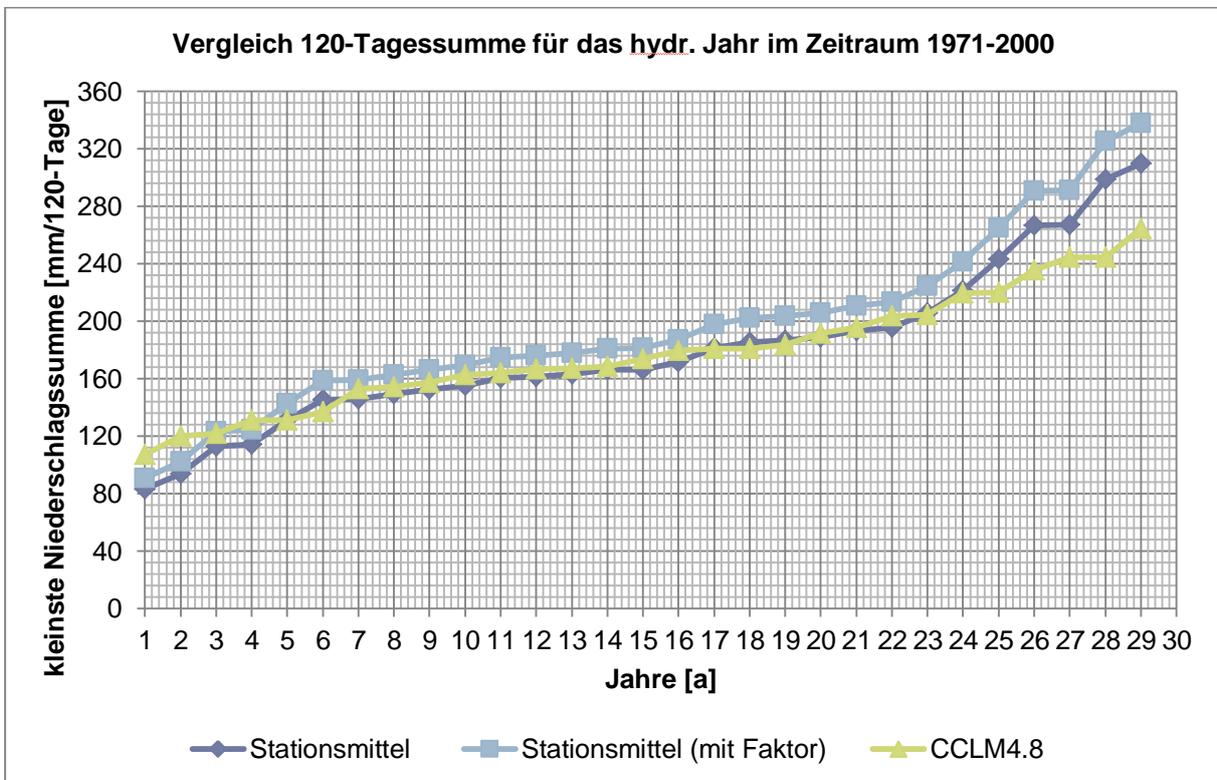


Abb. 43: RR(120d) für das hydrologische Jahr

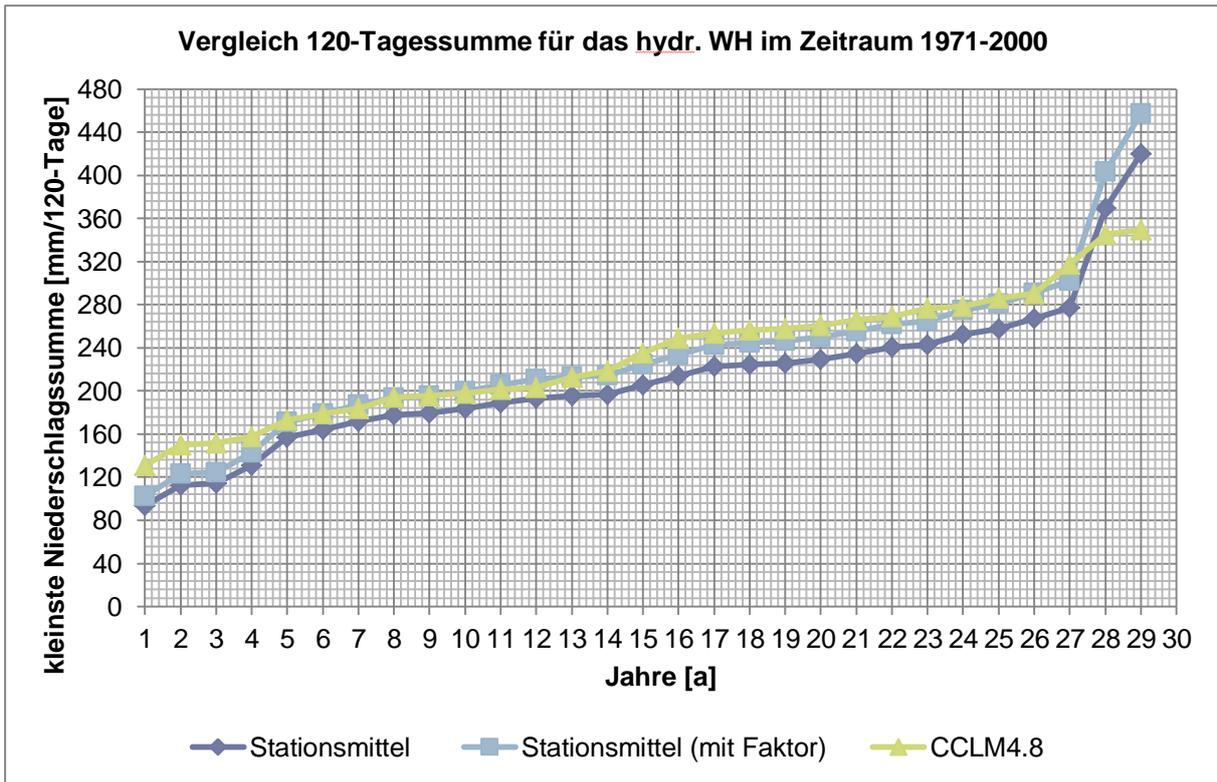


Abb. 44: RR(120d) für das hydrologische Winterhalbjahr

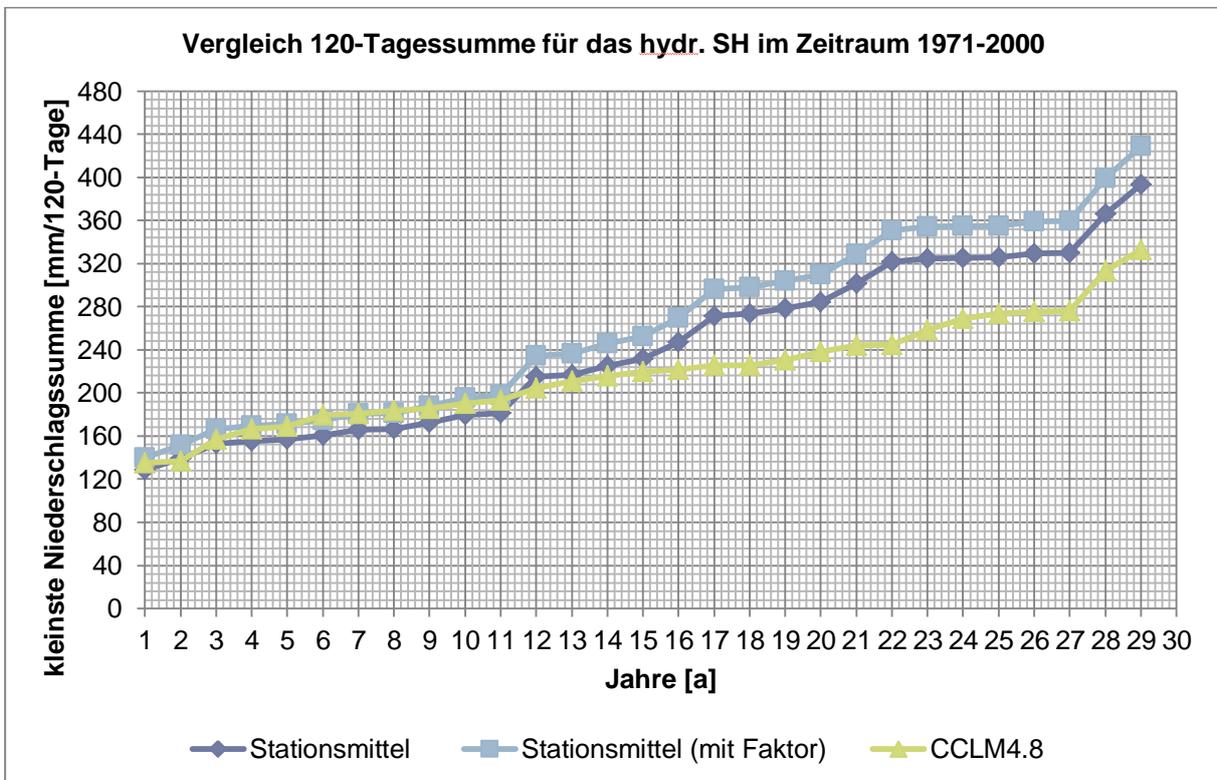


Abb. 45: RR(120d) für das hydrologische Sommerhalbjahr