

Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS) – Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit

Abschlussbericht

erstellt für das
**Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
(LANUV NRW)**

Leibnizstraße 10 · 45659 Recklinghausen

Aachen · Lübeck · Hattingen, den 16. März 2010

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen



Klimawandel
in Nordrhein-Westfalen
Wir handeln!



Arbeitsgemeinschaft
aqua_plan GmbH · hydro & meteo GmbH & Co KG · dr. papadakis GmbH



**Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW
(ExUS)**

**Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter
Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit**

**Abschlussbericht, erstellt für das Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW)**

**Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen**



Leibnizstraße 10 · 45659 Recklinghausen



Arbeitsgemeinschaft

aqua_plan GmbH · hydro & meteo GmbH & Co KG · dr. papadakis GmbH

Aachen · Lübeck · Hattingen, den 16. März 2010

Das Projekt ist Teil der Anpassungspolitik des Landes Nordrhein-Westfalen und wurde mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen finanziert. Weitere Informationen zum Thema Anpassung an den Klimawandel sowie die Anpassungsstrategie des Landes Nordrhein-Westfalen finden Sie im Internet unter: www.klimawandel.nrw.de.

Klimawandel
in Nordrhein-Westfalen
Wir handeln!



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Arbeitsgrundlagen	3
2.1	Werkzeuge	3
2.2	Datenübernahme	3
2.2.1	Übernahme der Stammdaten	3
2.2.2	Übernahme der Zeitreihen	3
3	Auswahl der Reihen für die weitere Bearbeitung	5
3.1	Kontinuierliche Daten	7
3.2	Tagessummenzeitreihen	8
3.3	Stationen mit kontinuierlichen Daten und Tagessummenzeitreihen	9
3.3.1	Auswahlkriterien für den Einsatz kontinuierlicher Reihen	9
3.3.2	Auswahlkriterien für den Einsatz von Tagessummenzeitreihen	10
3.4	Fazit	10
4	Datenprüfung	15
4.1	Aufbau der NIKLAS-Prüfung	16
4.2	Prüfergebnisse der Tagessummenzeitreihen	19
4.3	Prüfergebnisse der kontinuierlichen Niederschlagsdaten	19
4.4	Zusammenfassung	21
5	Datenstruktur	23
5.1	Anteil der Originaldaten an den Starkregenserien	23
5.2	Lückenanteile	28
6	Einteilung der Zeitfenster	31
6.1	Gleitende Zeitfenster	32
6.2	Wachsende Zeitfenster	32
6.3	Verwendung der gleitenden und wachsenden Fenster	33
7	Statistische Verfahren	35
7.1	Mann-Kendall-Test	35
7.2	Lineare Regression/t-Test	36
7.3	Erläuterung zur Ergebnisdarstellung	37

7.4	Prüfung der Normalverteilung der Hauptwerte mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests	38
7.4.1	Allgemeines Vorgehen	38
7.4.2	Beschreibung der Variablen und Berechnungsschritte	40
7.4.3	Untersuchte Zeitreihen und Ergebnisse	41
7.4.3.1	Prüfung der Normalverteilung der Jahressummen	41
7.4.3.2	Prüfung der Normalverteilung der Halbjahressummen	42
7.4.3.3	Prüfung der Normalverteilung der Monatssummen	42
7.4.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	45
8	Starkregenanalyse	47
8.1	Ermittlung der Regenhöhen für die Niederschlagsstatistik nach ATV-A 121 durch gleitende Fenster auf Basis von 1-Minuten-Zeitschritten	47
8.1.1	Veranlassung	47
8.1.2	Einfluss der Blockbildung auf die Regenhöhen der Niederschlagsereignisse der partiellen Serie	48
8.1.3	Einfluss der Methode der gleitenden Fenster auf die Ergebnisse der statistischen Auswertung	49
8.1.4	Schlussfolgerungen und Ausblick	50
8.2	Wahl der Serien für die Statistik	51
8.3	Parameterausgleich	51
8.3.1	Ergebnisse der individuellen Bereichsgrenzenwahl	52
9	Auswertung der Niederschlagssummen	57
9.1	Allgemeine Erläuterung zur Darstellung der Ergebnisse in den Karten	57
9.2	Auswertung der Jahressummen (WWJ)	58
9.2.1	Dekadenweise Betrachtung der Jahresniederschlagssummen	58
9.2.2	Ergebnisinterpretation für Gesamt-NRW	60
9.2.2.1	Bewertung der Trendanalysen für den Gesamtzeitraum 1950-2008	60
9.2.2.2	Bewertung der Trendanalysen für die gleitenden Zeitfenster	69
9.2.2.3	Bewertung der Trendanalysen für die wachsenden Zeitfenster	74
9.2.3	Regionale Besonderheiten	76
9.2.4	Zusammenfassung zu den Jahresniederschlagssummen	77
9.3	Auswertung der Halbjahressummen	77
9.3.1	Ergebnisinterpretation für Gesamt-NRW	78
9.3.1.1	Bewertung der Trendanalysen für den Gesamtzeitraum 1950-2008, Winterhalbjahr	78
9.3.1.2	Bewertung der Trendanalysen für den Gesamtzeitraum 1950-2008, Sommerhalbjahr	86
9.3.1.3	Bewertung der Trendanalysen für die gleitenden Zeitfenster, Winterhalbjahr	94
9.3.1.4	Bewertung der Trendanalysen für die gleitenden Zeitfenster, Sommerhalbjahr	98

9.3.2	Regionale Besonderheiten, Winterhalbjahr	103
9.3.3	Regionale Besonderheiten, Sommerhalbjahr	104
9.3.4	Zusammenfassung zu den Halbjahresniederschlagssummen	105
9.4	Auswertung der Monatssummen	106
9.4.1	Ergebnisinterpretation für NRW	106
9.4.2	Regionale Besonderheiten	109
9.4.3	Quartalsweise Auswertung	113
10	Auswertung der Kenngrößen	115
10.1	Anzahl Tage $\leq 0,1$ mm/Tag	115
10.1.1	1950-2008	115
10.1.2	1979-2008	116
10.1.3	1950-1979	116
10.1.4	1961-1990	116
10.1.5	1971-2000	117
10.2	Anzahl Tage > 10 mm/Tag	117
10.2.1	1950-2008	117
10.2.2	1979-2008	118
10.2.3	1950-1979	118
10.2.4	1961-1990	118
10.2.5	1971-2000	119
10.3	Anzahl Tage > 20 mm/Tag	119
10.3.1	1950-2008	119
10.3.2	1979-2008	119
10.3.3	1950-1979	120
10.3.4	1961-1990	120
10.3.5	1971-2000	121
10.4	Anzahl Tage > 30 mm/Tag	121
10.4.1	1950-2008	121
10.4.2	1979-2008	122
10.4.3	1950-1979	122
10.4.4	1961-1990	123
10.4.5	1971-2000	123
11	Auswertung der partiellen Serien	125
11.1	Zeitliche Auflösung der Messdaten und ihre Eignung für die statistische Auswertung kleiner Dauerstufen	125
11.1.1	Dauerstufe 5 Minuten	128
11.1.2	Dauerstufe 15 Minuten	129
11.1.3	Dauerstufe 60 Minuten	130
11.1.4	Dauerstufe 2 Stunden	132
11.1.5	Dauerstufe 4 Stunden	133
11.1.6	Dauerstufe 12 Stunden	135
11.2	Interpretation der Ereigniszahlen der partiellen Serien für NRW	136

11.3	Auswertung der Dauerstufen D=5 Minuten bis D=12 Stunden nach Groß-	137
11.4	Untersuchung der partiellen Serien auf Trend	138
12	Entwicklung der statistischen Regenhöhen	141
12.1	Gleitende Zeitfenster	144
12.2	Wachsende Zeitfenster	158
12.3	Zusammenfassung zur Entwicklung der statistischen Regenhöhen	175
13	Trendanalysen von Niederschlagszeitreihen regionaler Klimamodelle	177
13.1	Ausgewähltes Szenario und verwendete regionale Klimamodelle	178
13.2	Betrachtete Untersuchungszeiträume und Dauerstufen	179
13.3	Auswahl an Stationen und Rasterfeldern für die Trendanalysen	180
13.4	Jahresniederschlagssummen	185
13.4.1	Dekadenweise Betrachtung der Jahresniederschlagssummen	185
13.4.2	Ergebnisinterpretation für Gesamt-NRW	187
13.4.2.1	Vergleich der Trends in den Modelldaten mit denen der	
	historischen Messdaten im Referenzzeitraum 1961-1990 . .	188
13.4.2.2	Bewertung der Trendanalysen für die Nahe Zukunft 2050 .	193
13.4.2.3	Bewertung der Trendanalysen für die Ferne Zukunft 2100	200
13.4.3	Regionale Besonderheiten	212
13.4.3.1	Räumliche Differenzierung der Trendanalysen für die Nahe	
	Zukunft 2050	212
13.4.3.2	Räumliche Differenzierung der Trendanalysen für die Fer-	
	ne Zukunft 2100	212
13.4.4	Zusammenfassung zu den Jahresniederschlagssummen	213
13.5	Halbjahresniederschlagssummen	214
13.5.1	Ergebnisinterpretation für Gesamt-NRW	214
13.5.1.1	Vergleich der Trends in den Modelldaten mit denen der	
	historischen Messdaten im Referenzzeitraum 1961-1990 . .	214
13.5.1.2	Bewertung der Trendanalysen für die Nahe Zukunft 2050,	
	Winterhalbjahr	216
13.5.1.3	Bewertung der Trendanalysen für die Nahe Zukunft 2050,	
	Sommerhalbjahr	225
13.5.1.4	Bewertung der Trendanalysen für die Ferne Zukunft 2100,	
	Winterhalbjahr	234
13.5.1.5	Bewertung der Trendanalysen für die Ferne Zukunft 2100,	
	Sommerhalbjahr	242
13.5.2	Regionale Besonderheiten	244
13.5.2.1	Räumliche Differenzierung der Trendanalysen für die Nahe	
	Zukunft 2050, Winterhalbjahr	244
13.5.2.2	Räumliche Differenzierung der Trendanalysen für die Nahe	
	Zukunft 2050, Sommerhalbjahr	245

13.5.2.3	Räumliche Differenzierung der Trendanalysen für die Ferne Zukunft 2100, Winterhalbjahr	246
13.5.2.4	Räumliche Differenzierung der Trendanalysen für die Ferne Zukunft 2100, Sommerhalbjahr	247
13.5.3	Zusammenfassung zu den Halbjahresniederschlagssummen	248
13.6	Monatsniederschlagssummen	248
13.6.1	Trendanalysen der Monatsniederschlagssummen	249
13.6.2	Änderungen der mittleren monatlichen Niederschlagssummen in der Nahen und Fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum	258
13.6.3	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der Änderungen in den mittleren monatlichen Niederschlagssummen unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Trendanalysen	261
13.7	Niederschlagsstatistik nach dem ATV Arbeitsblatt A 121 für D=1 Tag und D=3 Tage	262
13.7.1	Ergebnisinterpretation für Gesamt-NRW	263
13.7.1.1	Entwicklung der Regenhöhen D=1 Tag und D=3 Tage im Modell CLM, Realisierung 1	263
13.7.1.2	Entwicklung der Regenhöhen D=1 Tag und D=3 Tage im Modell CLM, Realisierung 2	269
13.7.1.3	Entwicklung der Regenhöhen D=1 Tag und D=3 Tage im Modell WETTREG	275
13.7.2	Regionale Besonderheiten	279
13.7.2.1	Räumliche Differenzierung der Entwicklungen der Regenhöhen D=1 Tag im Modell CLM, Realisierung 1	279
13.7.2.2	Räumliche Differenzierung der Entwicklungen der Regenhöhen D=1 Tag im Modell CLM, Realisierung 2	284
13.7.2.3	Räumliche Differenzierung der Entwicklungen der Regenhöhe D=1 Tag im Modell WETTREG	285
13.7.3	Zusammenfassung zu den Regenhöhen D=1 Tag und D=3 Tage	287
14	Zusammenfassung	289
14.1	Ziel und Aufgabenstellung	289
14.2	Daten und Methoden	289
14.3	Zusammenfassung der Hauptwerte (Jahressummen, Halbjahresniederschlagssummen und Monatssummen)	290
14.4	Kenngrößen	291
14.5	Niederschlagsverhalten kurzer Zeitdauern	292
14.5.1	Ereignisse je Dauerstufe und Jahr	292
14.5.2	Entwicklung der statistischen Regenhöhen	293
14.5.3	Fazit der Untersuchung der kurzen Dauerstufen	294
14.6	Klimaprognosedaten	295
14.7	Schlussfolgerungen, Ausblick und Bewertung	297
14.7.1	Konsequenzen aus den Messdaten	297
14.7.2	Konsequenzen aus den Klimaprojektionen	298

14.7.3	Folgerungen für die Wasserwirtschaft	299
Literaturverzeichnis		301
Anhang (A-H) befindet sich auf der beigefügten CD		

Tabellenverzeichnis

4.1	Art der Prüfung und Summe der Auffälligkeiten	17
5.1	Stationen mit sehr hohem Aufbereitungsanteil	27
5.2	Reduzierung der N-Summe in der Aufbereitung	27
7.1	Tabellarische Auswertung des χ^2 -Tests (in Anlehnung an Plate, 1993 [32]) am Beispiel für die Überprüfung der Jahresniederschlagssummen an einer Auswahl an Niederschlagsstationen in der Region Ruhr/Emscher)	39
7.4	Ergebnisse der Überprüfung der Normalverteilung der Jahresniederschlags- summen	43
7.6	Ergebnisse der Überprüfung der Normalverteilung der Halbjahresnieder- schlagssummen	43
7.8	Ergebnisse der Überprüfung der Normalverteilung der Monatsniederschlags- summen	44
9.1	Anzahl der bei den Trendanalysen der Jahresniederschlagssummen berück- sichtigten Stationen in Abhängigkeit vom Zeitfenster	60
9.2	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen an 173 Stationen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (WWJ) nach dem Verfahren der linearen Re- gression	61
9.3	Spannbreite der Trends der Jahresniederschlagssummen für den Gesamt- zeitraum 1950-2008 (WWJ) nach dem Verfahren der linearen Regression (Steigung der Trendgeraden) und dem Mann-Kendall-Test (Tau)	62
9.4	Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Über- prüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Jahresniederschlags- summen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (WWJ)	65
9.5	Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Jahresnieder- schlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (WWJ)	65
9.6	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen unter Berücksichtigung von Wasserwirtschaftsjahren (WWJ, 173 Stationen) und Kalenderjahren (KJ, 181 Stationen) für den Gesamtzeitraum 1950-2008 nach dem Verfahren der linearen Regression	68

9.7	Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Jahresniederschlagssummen unter Berücksichtigung von Wasserwirtschaftsjahren (WWJ) und Kalenderjahren (KJ) im Gesamtzeitraum 1950-2008	68
9.8	Unterschiede der beiden Verfahren Lineare Regression/t-Test und Mann-Kendall-Test beim Signifikanzniveau (Jahresniederschlagssummen)	69
9.9	Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Jahressummen in den vier gleitenden Fenstern im Vergleich zum Gesamtzeitraum; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), 90-%-Spanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test .	73
9.10	Anzahl der bei den Trendanalysen der Halbjahresniederschlagssummen berücksichtigten Stationen in Abhängigkeit vom Zeitfenster	78
9.11	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen an 183 Stationen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (Winterhalbjahr) nach dem Verfahren der linearen Regression	79
9.12	Spannbreite der Trends der Halbjahresniederschlagssummen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (Winterhalbjahr) nach dem Verfahren der linearen Regression (Steigung der Trendgeraden) und dem Mann-Kendall-Test (Tau)	79
9.13	Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Halbjahresniederschlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (Winterhalbjahr)	83
9.14	Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Halbjahresniederschlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (Winterhalbjahr) . . .	83
9.15	Unterschiede der beiden Verfahren Lineare Regression/t-Test und Mann-Kendall-Test beim Signifikanzniveau (Winterhalbjahr)	86
9.16	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen an 182 Stationen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (Sommerhalbjahr) nach dem Verfahren der linearen Regression	88
9.17	Spannbreite der Trends der Halbjahresniederschlagssummen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (Sommerhalbjahr) nach dem Verfahren der linearen Regression (Steigung der Trendgeraden) und dem Mann-Kendall-Test (Tau)	88
9.18	Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Halbjahresniederschlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (Sommerhalbjahr)	91
9.19	Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Halbjahresniederschlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (Sommerhalbjahr) . .	91
9.20	Unterschiede der beiden Verfahren Lineare Regression/t-Test und Mann-Kendall-Test beim Signifikanzniveau (Sommerhalbjahr)	94

9.21	Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Halbjahressummen (Winterhalbjahr) in den vier gleitenden Fenstern im Vergleich zum Gesamtzeitraum; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), 90%-Spanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test	98
9.22	Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Halbjahressummen (Sommerhalbjahr) in den vier gleitenden Fenstern im Vergleich zum Gesamtzeitraum; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), 90%-Spanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test	102
9.23	Mittlerer monatlicher Niederschlag für den Zeitraum 1950-2008	107
9.24	Trends (Mann-Kendall) in den monatlichen Niederschlagsmengen, nach Großlandschaften für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (gelb markiert sind Anteile von mehr als 20 % der Stationen mit signifikanten Trends)	110
11.1	Anzahl der Einzelereignisse in den Großlandschaften	137
12.1	Gleitende Zeitfenster: Änderung der Regenhöhen seit angegebenem Anfangsjahr, berechnet aus Trend [%] je Großlandschaft für alle Dauerstufen und Jährlichkeiten	147
12.2	Gleitende Zeitfenster: Dauerstufen mit den höchsten Steigerungen der Regenhöhen [%] aus allen Dauerstufen	150
12.3	Gleitende Zeitfenster: Dauerstufen > 60min mit den stärksten Steigerungen der Regenhöhen [%]	151
12.4	Gleitende Zeitfenster: Dauerstufen mit den stärksten Abnahmen der Regenhöhen [%] aus allen Dauerstufen	152
12.5	Wachsende Zeitfenster: Änderung der Regenhöhen [%] zwischen 1979-2008 und 1989-2008, berechnet aus Trend je Großlandschaft für alle Dauerstufen und Jährlichkeiten	161
12.6	Wachsende Zeitfenster: Dauerstufen mit den höchsten Steigerungen der Regenhöhen [%] aus allen Dauerstufen	164
12.7	Wachsende Zeitfenster: Dauerstufen > 60min mit den höchsten Steigerungen der Regenhöhen [%]	165
12.8	Wachsende Zeitfenster: Dauerstufen mit den stärksten Abnahmen der Regenhöhen [%] aus allen Dauerstufen	166
12.9	Wachsende Zeitfenster: Änderung der Regenhöhen [%] vom Zeitfenster 1950-2008 zu dem von 1979-2008, berechnet aus Trend je Großlandschaft bezogen auf den Gesamtzeitraum	172
13.1	In den Trendanalysen berücksichtigte Rasterfelder und Niederschlagsstationen	183

13.2	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den Messdaten in den Zeitfenstern 1961-1990 (415 Stationen) und 1950-1979 (344 Stationen) und in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach dem Verfahren der linearen Regression	189
13.3	Spannbreite der Trends der Jahresniederschlagssummen in den Messdaten in den Zeitfenstern 1961-1990 (415 Stationen) und 1950-1979 (344 Stationen) und in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach dem Verfahren der linearen Regression (Steigung der Trendgeraden) und dem Mann-Kendall-Test (Tau)	191
13.4	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG/STAR2: 29 Stationen) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression	193
13.5	Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Jahresniederschlagssummen in den Modelldaten (Nahe Zukunft 2001-2050)	197
13.6	Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Jahresniederschlagssummen in den Modelldaten (Nahe Zukunft 2001-2050)	197
13.7	Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Jahressummen in den vier Modellen/Modellläufen; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), Gesamtspanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test	198
13.8	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression	200
13.9	Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Jahresniederschlagssummen in den Modelldaten (Ferne Zukunft 2001-2100)	207
13.10	Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Jahresniederschlagssummen in den Modelldaten (Ferne Zukunft 2001-2100)	207
13.11	Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Jahressummen in den drei Modellen/Modellläufen; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), Gesamtspanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test	208
13.12	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Messdaten in den Zeitfenstern 1961-1990 (417 Stationen) und 1950-1979 (346 Stationen) und in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach dem Verfahren der linearen Regression	215
13.13	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Messdaten in den Zeitfenstern 1961-1990 (415 Stationen) und 1950-1979 (344 Stationen) und in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach dem Verfahren der linearen Regression	216

13.14Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG/STAR2: 29 Stationen) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression	217
13.15Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Modelldaten (Nahe Zukunft 2001-2050)	221
13.16Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Modelldaten (Nahe Zukunft 2001-2050)	221
13.17Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Halbjahressummen (Winterhalbjahr) in den vier Modellen/Modellläufen; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), Gesamtspanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test	222
13.18Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG/STAR2: 29 Stationen) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression	226
13.19Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Modelldaten (Nahe Zukunft 2001-2050)	228
13.20Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Modelldaten (Nahe Zukunft 2001-2050)	228
13.21Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Halbjahressummen (Sommerhalbjahr) in den vier Modellen/Modellläufen; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), Gesamtspanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test	229
13.22Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression .	234
13.23Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Modelldaten (Ferne Zukunft 2001-2100)	236
13.24Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Modelldaten (Ferne Zukunft 2001-2100)	236
13.25Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Halbjahressummen (Winterhalbjahr) in den drei Modellen/Modellläufen; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), Gesamtspanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test	239

13.26	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression .	242
13.27	Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Modelldaten (Ferne Zukunft 2001-2100)	244
13.28	Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Modelldaten (Ferne Zukunft 2001-2100)	245
13.29	Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Halbjahressummen (Sommerhalbjahr) in den drei Modellen/Modellläufen; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), Gesamtspanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test . . .	246
13.30	Anzahl der Rasterfelder/Stationen mit signifikanten Trends ($\alpha \geq 0,8$) in den Monatsniederschlagssummen in der Nahen Zukunft 2001-2050 (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG/STAR2: 29 Stationen); signifikant positive Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind blau, signifikant negative Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind orange markiert	250
13.31	Anzahl der Rasterfelder/Stationen mit signifikanten Trends ($\alpha \geq 0,9$) in den Monatsniederschlagssummen in der Nahen Zukunft 2001-2050 (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG/STAR2: 29 Stationen); signifikant positive Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind blau, signifikant negative Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind orange markiert	255
13.32	Anzahl der Rasterfelder/Stationen mit signifikanten Trends ($\alpha \geq 0,8$) in den Monatsniederschlagssummen in der Fernen Zukunft 2001-2100 (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen); signifikant positive Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind blau, signifikant negative Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind orange markiert	256
13.33	Anzahl der Rasterfelder/Stationen mit signifikanten Trends ($\alpha \geq 0,9$) in den Monatsniederschlagssummen in der Fernen Zukunft 2001-2100 (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen); signifikant positive Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind blau, signifikant negative Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind orange markiert	257
13.34	Färbungen der einzelnen Packs in den grafischen Darstellungen zu den Tages- und 3-Tagesniederschlagssummen	263

- 13.35 Spanne der Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) in den Dauerstufen D=1 Tag und D=3 Tage für die Wiederkehrzeiten T=1 Jahr, 5 Jahre und 20 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM1 . 264
- 13.36 Spanne der Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) in den Dauerstufen D=1 Tag und D=3 Tage für die Wiederkehrzeiten T=1 Jahr, 5 Jahre und 20 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2 . 270
- 13.37 Spanne der Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) in den Dauerstufen D=1 Tag und D=3 Tage für die Wiederkehrzeiten T=1 Jahr, 5 Jahre und 20 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG 276

Abbildungsverzeichnis

2.1	Übersicht aller Niederschlagsstationen in NRW	4
3.1	Übersicht der verwendeten kontinuierlichen Niederschlagszeitreihen und Tagessummenzeitreihen, zusammenhängend >20 Jahre zwischen 1950-2008	6
3.2	Stationen mit kontinuierlichen Reihen und Tagessummenzeitreihen, Tabelle, Teil 1	11
3.3	Stationen mit kontinuierlichen Reihen und Tagessummenzeitreihen, Tabelle, Teil 2	12
3.4	Stationen mit kontinuierlichen Reihen und Tagessummenzeitreihen, Grafik	13
4.1	NIKLAS LOG-Datei mit Auffälligkeiten	18
4.2	Ergebnisse der Tagessummenprüfung (Stationen mit Anmerkungen) . . .	19
4.3	Ergebnisse der Tagessummenprüfung (Auswertung der Anmerkungen) . .	20
4.4	Prüfergebnisse der kontinuierlichen Niederschlagsdaten (Stationen mit Anmerkungen)	20
4.5	Prüfergebnisse der kontinuierlichen Niederschlagsdaten (Auswertung der Anmerkungen)	21
5.1	Zeitlicher Anteil der Originaldaten in den Starkregenereignissen: Kontinuierliche und Tagessummen-Zeitreihen	24

5.2	Zeitlicher Anteil der Originaldaten in den Starkregenereignissen: Kontinuierliche Zeitreihen	25
5.3	Summenanteil der Originaldaten in den Starkregenereignissen: Kontinuierliche Zeitreihen	26
5.4	Zeitlicher Anteil der Originaldaten in den Starkregenereignissen: Kontinuierliche Zeitreihen, Beisp. Dortmund	29
6.1	Vergleich der mittleren Jahrestemperatur, global (a) und für die nördliche Halbkugel (b), im Vergleich zum langjährigen Mittel zwischen 1961-1990 [41]	31
6.2	Gleitende Zeitfenster	32
6.3	Wachsende Zeitfenster	33
7.1	Vergleich der realen Niederschlagsverteilung gegenüber einer normalverteilten Stichprobe am Beispiel der Jahresniederschlagssummen in der Ruhr-Emscher-Region I	45
7.2	Vergleich der realen Niederschlagsverteilung gegenüber einer normalverteilten Stichprobe am Beispiel der Monatsniederschlagssummen für den Monat März in der Ruhr-Emscher-Region	46
8.1	Einfluss der Blockbildung (5-Minuten-Intervalle) auf die Regenhöhen der Niederschlagsereignisse der partiellen Serie für die Dauerstufe $D=5$ Minuten	49
8.2	Einfluss der Blockbildung (5-Minuten-Intervalle) auf die Regenhöhen der statistischen Auswertung für h_N (15 Minuten; 1 Jahr) und h_N (5 Minuten; 3,3 Jahre)	50
8.3	Übersicht optimierter Verteilungsparameter durch Veränderung der Bereichsgrenzen	53
8.4	Verteilung innerhalb der 1. Bereichsgrenze	54
8.5	Verteilung innerhalb der 2. Bereichsgrenze	54
8.6	Bereichsgrenzen Rhynern, Standard	55
8.7	Bereichsgrenzen Rhynern, optimiert	55
9.1	Mittlere Jahresniederschlagssummen in den einzelnen Dekaden (Mittelwert über Gesamt-NRW)	59
9.2	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen an 173 Stationen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (WWJ) nach dem Verfahren der linearen Regression	61
9.3	Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen (WWJ) aus linearer Regression für den Gesamtzeitraum 1950-2008	63
9.4	Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen (WWJ) aus Mann-Kendall-Test für den Gesamtzeitraum 1950-2008	64
9.5	Trends der Jahresniederschlagssummen (WWJ) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für den Gesamtzeitraum 1950-2008	66

Abbildungsverzeichnis

9.6	Trends der Jahresniederschlagssummen (WWJ) aus Mann-Kendall-Test für den Gesamtzeitraum 1950-2008	67
9.7	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen an 344 Stationen für den 30-Jahreszeitraum 1950-1979 nach dem Verfahren der linearen Regression	70
9.8	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen an 453 Stationen für den 30-Jahreszeitraum 1971-2000 nach dem Verfahren der linearen Regression	70
9.9	Trends der Jahresniederschlagssummen aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für das Zeitfenster 1950-1979	71
9.10	Trends der Jahresniederschlagssummen aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für das Zeitfenster 1971-2000	72
9.11	Entwicklung der Trends mit wachsendem Zeitfenster am Beispiel der Station Bielefeld-Sennestadt; blau: Steigung der Trendgeraden pro Zeitfenster; rot: Signifikanzniveau pro Zeitfenster (kein roter Punkt: Signifikanzniveau < 80 %)	74
9.12	Entwicklung der Trends mit wachsendem Zeitfenster am Beispiel der Station Gelsenkirchen-Altstadt; blau: Steigung der Trendgeraden pro Zeitfenster; rot: Signifikanzniveau pro Zeitfenster (kein roter Punkt: Signifikanzniveau < 80 %)	75
9.13	Entwicklung der Trends mit wachsendem Zeitfenster am Beispiel der Station Werne-Wessels DWD; blau: Steigung der Trendgeraden pro Zeitfenster; rot: Signifikanzniveau pro Zeitfenster (kein roter Punkt: Signifikanzniveau < 80 %)	75
9.14	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen an 183 Stationen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (Winterhalbjahr) nach dem Verfahren der linearen Regression	80
9.15	Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) aus linearer Regression für den Gesamtzeitraum 1950-2008	81
9.16	Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) aus Mann-Kendall-Test für den Gesamtzeitraum 1950-2008	82
9.17	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für den Gesamtzeitraum 1950-2008	84
9.18	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) aus Mann-Kendall-Test für den Gesamtzeitraum 1950-2008	85
9.19	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen an 182 Stationen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (Sommerhalbjahr) nach dem Verfahren der linearen Regression	87
9.20	Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) aus linearer Regression für den Gesamtzeitraum 1950-2008	89

9.21	Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) aus Mann-Kendall-Test für den Gesamtzeitraum 1950-2008	90
9.22	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für den Gesamtzeitraum 1950-2008	92
9.23	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) aus Mann-Kendall-Test für den Gesamtzeitraum 1950-2008	93
9.24	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) an 344 Stationen für den 30-Jahreszeitraum 1950-1979 nach dem Verfahren der linearen Regression	95
9.25	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) an 452 Stationen für den 30-Jahreszeitraum 1971-2000 nach dem Verfahren der linearen Regression	95
9.26	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für das Zeitfenster 1950-1979	96
9.27	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für das Zeitfenster 1971-2000	97
9.28	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) an 346 Stationen für den 30-Jahreszeitraum 1950-1979 nach dem Verfahren der linearen Regression	99
9.29	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) an 454 Stationen für den 30-Jahreszeitraum 1971-2000 nach dem Verfahren der linearen Regression	99
9.30	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für das Zeitfenster 1950-1979	100
9.31	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für das Zeitfenster 1971-2000	101
9.32	Monatliche Niederschlagsmengen in den Großlandschaften und Gesamt-NRW für den Gesamtzeitraum	107
9.33	Monatliche Niederschlagsmengen in NRW für die gleitenden Fenster und den Gesamtzeitraum	108
9.34	Monatliche Niederschlagsmengen in NRW für die gleitenden Fenster und den Gesamtzeitraum, Netzdarstellung	108
9.35	Richtung der Trends als Pfeile (Mann-Kendall, ohne Signifikanzniveau) und Anteil der Stationen mit signifikantem Trend (Signifikanzniveau $\geq 80\%$) als Intensität des farblichen Hintergrundes in den monatlichen Niederschlagsmengen in NRW für den Gesamtzeitraum 1950-2008	109

Abbildungsverzeichnis

9.36	Anteil der Stationen mit einem signifikanten Trend (pos. bzw. neg., Mann-Kendall, Signifikanzniveau $> 80\%$) in den monatlichen Niederschlagsmengen in NRW für den Gesamtzeitraum 1950-2008	109
9.37	Mittlere monatliche Niederschlagsmengen, quartalsweise gemittelt für die gleitenden Zeitfenster und den Gesamtzeitraum	113
11.1	Anzahl der kontinuierlichen Stationen in NRW (pro Datenjahr für die partielle Serie bei Dauerstufe $D=60$ Minuten)	126
11.2	Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für $D=5$ Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=4,0-9,7$ mm in Abhängigkeit von der Station)	127
11.3	Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für $D=5$ Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=4,0-9,7$ mm in Abhängigkeit von der Station, mit 10 % Mindeststationenzahl pro Jahr)	127
11.4	Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für $D=5$ Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=2,1-4,5$ mm in Abhängigkeit von der Station)	128
11.5	Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für $D=15$ Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=4,8-7,6$ mm in Abhängigkeit von der Station)	129
11.6	Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für $D=15$ Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=7,7-17,0$ mm in Abhängigkeit von der Station)	130
11.7	Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für $D=60$ Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=7,6-11,5$ mm in Abhängigkeit von der Station)	131
11.8	Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für $D=60$ Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=13,1-25,0$ mm in Abhängigkeit von der Station)	131
11.9	Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für $D=2$ Stunden in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=10,4-14,1$ mm in Abhängigkeit von der Station)	132
11.10	Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für $D=2$ Stunden in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=15,8-29,3$ mm in Abhängigkeit von der Station)	133
11.11	Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für $D=4$ Stunden in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=13,0-18,6$ mm in Abhängigkeit von der Station)	134
11.12	Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für $D=4$ Stunden in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=18,9-33,1$ mm in Abhängigkeit von der Station)	134

11.13	Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für D=12 Stunden in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von N=18,2-31,0 mm in Abhängigkeit von der Station)	135
11.14	Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für D=12 Stunden in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von N=26,7-47,8 mm in Abhängigkeit von der Station)	136
12.1	Entwicklung der Regenhöhen: D=15 Minuten, T=1 Jahr (Gleitende Zeitfenster)	153
12.2	Entwicklung der Regenhöhen: D=60 Minuten, T=20 Jahre (Gleitende Zeitfenster)	154
12.3	Entwicklung der Regenhöhen: D=12 Stunden, T=20 Jahre (Gleitende Zeitfenster)	155
12.4	Entwicklung der Regenhöhen: D=1 Tag, T=20 Jahre (Gleitende Zeitfenster)	156
12.5	Entwicklung der Regenhöhen: D=3 Tage, T=1 Jahr (Gleitende Zeitfenster)	157
12.6	Entwicklung der Regenhöhen: D=5 Minuten, T=1 Jahr (Wachsende Zeitfenster)	167
12.7	Entwicklung der Regenhöhen: D=60 Minuten, T=1 Jahr (Wachsende Zeitfenster)	168
12.8	Entwicklung der Regenhöhen: D=2 Stunden, T=1 Jahr (Wachsende Zeitfenster)	169
12.9	Entwicklung der Regenhöhen: D=1 Tag, T=1 Jahr (Wachsende Zeitfenster)	170
12.10	Entwicklung der Regenhöhen: D=3 Tage, T=1 Jahr (Wachsende Zeitfenster)	171
13.1	Ausgewählte Rasterfelder für die Trendanalysen mit Niederschlagsdaten des regionalen Klimamodells CLM	181
13.2	Ausgewählte Stationen für die Trendanalysen mit Niederschlagsdaten der regionalen Klimamodelle WETTREG und STAR2	182
13.3	Prozentuale Abweichungen der mittleren Jahresniederschlagssummen in den einzelnen Dekaden (Mittelwert über alle 8 Packs) gegenüber dem Mittelwert über den Gesamtzeitraum	186
13.4	Prozentuale Änderung der mittleren Jahresniederschlagssummen in der Nahen und Fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum (Mittelwert über alle 8 Packs)	187
13.5	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den Messdaten (415 Stationen) und in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach dem Verfahren der linearen Regression	190
13.6	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den Messdaten (344 Stationen) für das Zeitfenster 1950-1979 und in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach dem Verfahren der linearen Regression	190

Abbildungsverzeichnis

13.7	Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM1 nach dem Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für den Referenzzeitraum 1961-1990	192
13.8	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den CLM1-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression	194
13.9	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den CLM2-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression	194
13.10	Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression für die Nahe Zukunft 2001-2050	195
13.11	Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression für die Nahe Zukunft 2001-2050	196
13.12	Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Nahe Zukunft 2001-2050	199
13.13	Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Nahe Zukunft 2001-2050	201
13.14	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den CLM1-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression	202
13.15	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den CLM2-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression	202
13.16	Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100	203
13.17	Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100	204
13.18	Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den WETTREG-Modelldaten (29 Stationen) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression	205
13.19	Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen für das Modell WETTREG aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100	206
13.20	Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100	209

13.21	Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100	210
13.22	Trends der Jahresniederschlagssummen für das Modell WETTREG aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100	211
13.23	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den CLM1-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression	218
13.24	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den CLM2-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression	218
13.25	Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression für die Nahe Zukunft 2001-2050	219
13.26	Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression für die Nahe Zukunft 2001-2050	220
13.27	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Nahe Zukunft 2001-2050	223
13.28	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Nahe Zukunft 2001-2050	224
13.29	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den CLM1-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression	227
13.30	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den CLM2-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression	227
13.31	Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression für die Nahe Zukunft 2001-2050	230
13.32	Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression für die Nahe Zukunft 2001-2050	231
13.33	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Nahe Zukunft 2001-2050	232
13.34	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Nahe Zukunft 2001-2050	233

13.35	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den CLM1-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression	235
13.36	Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100	237
13.37	Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für das Modell WETTREG aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100	238
13.38	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100	240
13.39	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für das Modell WETTREG aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100	241
13.40	Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den CLM1-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression	243
13.41	Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100	251
13.42	Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für das Modell WETTREG aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100	252
13.43	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100	253
13.44	Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für das Modell WETTREG aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100	254
13.45	Entwicklung der mittleren monatlichen Niederschlagssummen im Modelllauf CLM1 für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990; Mittelwerte aus 32 Rasterfeldern aus Gesamt-NRW	258
13.46	Entwicklung der mittleren monatlichen Niederschlagssummen im Modelllauf CLM2 für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990; Mittelwerte aus 32 Rasterfeldern aus Gesamt-NRW	259
13.47	Entwicklung der mittleren monatlichen Niederschlagssummen im Modell WETTREG für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990; Mittelwerte aus 29 Stationen aus Gesamt-NRW	259

13.48	Entwicklung der mittleren Niederschlagssummen pro Quartal im Modell- lauf CLM1 für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990; Mittelwerte aus 32 Rasterfeldern aus Gesamt-NRW	260
13.49	Entwicklung der mittleren Niederschlagssummen pro Quartal im Modell- lauf CLM2 für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990; Mittelwerte aus 32 Rasterfeldern aus Gesamt-NRW	260
13.50	Entwicklung der mittleren Niederschlagssummen pro Quartal im Modell WETTREG für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990; Mittelwerte aus 29 Stationen aus Gesamt-NRW	261
13.51	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=1 Jahr in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; un- tersuchter Modelllauf: CLM1	265
13.52	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wie- derkehrzeit T=20 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; un- tersuchter Modelllauf: CLM1	265
13.53	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; un- tersuchter Modelllauf: CLM1	266
13.54	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=3 Tage und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; un- tersuchter Modelllauf: CLM1	266
13.55	Räumliche Darstellung der Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Mo- delllauf: CLM1	267
13.56	Räumliche Darstellung der Änderungen der Regenhöhen in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Mo- delllauf: CLM1	268

13.57	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=1 Jahr in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2	270
13.58	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=20 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2	271
13.59	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2	271
13.60	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=3 Tage und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2	272
13.61	Räumliche Darstellung der Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2	273
13.62	Räumliche Darstellung der Änderungen der Regenhöhen in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2	274
13.63	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=1 Jahr in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG	276
13.64	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=20 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG	277

13.65	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG	277
13.66	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=3 Tage und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG	278
13.67	Räumliche Darstellung der Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG	281
13.68	Räumliche Darstellung der Änderungen der Regenhöhen in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG	282
13.69	Häufigkeiten der Starkregenereignisse in der partiellen Serie (81 Ereignisse) der Station Winterberg Züschen DWD (Pack 6) im Referenzzeitraum 1961-1990, in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) beim Modelllauf CLM1	283
13.70	Häufigkeiten der Starkregenereignisse in der partiellen Serie (81 Ereignisse) der Station Lichtenau i.W.-Blankenrode DWD (Pack 3) im Referenzzeitraum 1961-1990, in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) beim Modelllauf CLM1	283
13.71	Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre am Beispiel der Stationen Winterberg Züschen DWD (hellblau) und Lichtenau i.W.-Blankenrode DWD (dunkelblau); als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM1	284
13.72	Häufigkeiten der Starkregenereignisse in der partiellen Serie (81 Ereignisse) der Station Rietberg DWD (Pack 2) im Referenzzeitraum 1961-1990, in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) beim Modelllauf CLM2	285
13.73	Häufigkeiten der Starkregenereignisse in der partiellen Serie (81 Ereignisse) der Station Wadersloh DWD (Pack 2) im Referenzzeitraum 1961-1990, in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) beim Modell WETTREG	287

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels werden neue Herausforderungen an die Erarbeitung der Planungsgrundlagen gestellt. Die pauschale Aussage „Starkregenereignisse nehmen zu“ muss in diesem Zusammenhang differenziert werden.

Für die verschiedenen Fragestellungen in der Wasserwirtschaft sind unterschiedliche Betrachtungen des Starkregens erforderlich. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die jeweils relevante Dauerstufe des Niederschlages. So sind für siedlungswasserwirtschaftliche Bemessungen (z. B. Kanalnetze, Regenbecken, Abschlagsbauwerke) besonders die kurzen, intensiven Starkregen (15-60 Minuten) relevant, während für Hochwasserschutzanlagen an Gewässern oder bei Überschwemmungsgebietsermittlungen vor allem die längeren Dauerstufen (24 Stunden bis 3 Tage) zur Bemessung von Bedeutung sind.

Ziel dieses Projektes war daher die Untersuchung von Starkniederschlägen in Nordrhein-Westfalen (NRW) in Bezug auf die mögliche Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf der Grundlage beobachteter Ereignisse sowie die Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit. Für die verschiedenen Fragestellungen in der Wasserwirtschaft sind diese unterschiedlichen Betrachtungen des Starkregens unumgänglich. Nur durch differenzierte Aussagen zu Eigenschaften von Starkregenereignissen kann eine ausreichende Planungssicherheit gewährleistet werden. Vor diesem Hintergrund wurden alle in NRW relevanten Niederschlagsstationen ausgewertet.

1 Einleitung

2 Arbeitsgrundlagen

2.1 Werkzeuge

Das zentrale Werkzeug für diese Studie war das Zeitreiheninformationssystem AQUAZIS [1]. In AQUAZIS erfolgte die Sammlung und Haltung aller Stamm- und Zeitreihendaten von über 1000 Niederschlagsmessstationen. Es wurden verschiedenste Reports zu Zeitreihen- und Lückenübersichten erstellt. Mit diesem Datenpool wurden an den drei Firmensitzen der Arbeitsgemeinschaft die verschiedenen Untersuchungen durchgeführt und die Ergebnisse immer wieder abgeglichen. Auffälligkeiten in den Zeitreihen wurden in AQUAZIS visualisiert, geprüft und gegebenenfalls korrigiert. Alle Untersuchungen der Hauptwerte, Kennwerte, Serien, etc., wie Trendberechnungen nach linearer Regression oder Mann-Kendall, die Signifikanzprüfung mit t-Test oder Mann-Kendall-Test, sowie die Darstellung der Ergebnisse in Karten erfolgte in AQUAZIS.

Insgesamt wurden weit über 100 000 Serien berechnet und Starkregenanalysen nach ATV-A 121 [7] mit AQUAZIS durchgeführt und dort verwaltet.

Zur Unterstützung der Datenprüfung wurde das Programm NIKLAS [28] eingesetzt, das für Klimadatenprüfungen für das Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG) entwickelt wurde.

2.2 Datenübernahme

2.2.1 Übernahme der Stammdaten

Es wurden vom LANUV die Stammdaten von insgesamt 1293 Stationen an aqua_plan übergeben. Die Stammdaten wurden im aqua_plan-Stammdaten-Tauschformat übernommen, so dass alle Stationsdaten verlustfrei importiert werden konnten.

2.2.2 Übernahme der Zeitreihen

Dem LANUV liegen Niederschlagsdaten vom LANUV selbst, den Kommunen und den Wasserverbänden von insgesamt 531 Stationen in hochaufgelöster zeitlicher Form vor. Diese, sowie 774 Tagessummenstationen, wurden aqua_plan in allen Qualitäten im aqua_plan-Pack-Format zur Verfügung gestellt und in AQUAZIS übernommen.

2 Arbeitsgrundlagen

Die Karte aus Abbildung 2.1 zeigt eine Übersicht aller verfügbaren Niederschlagsstationen in NRW.

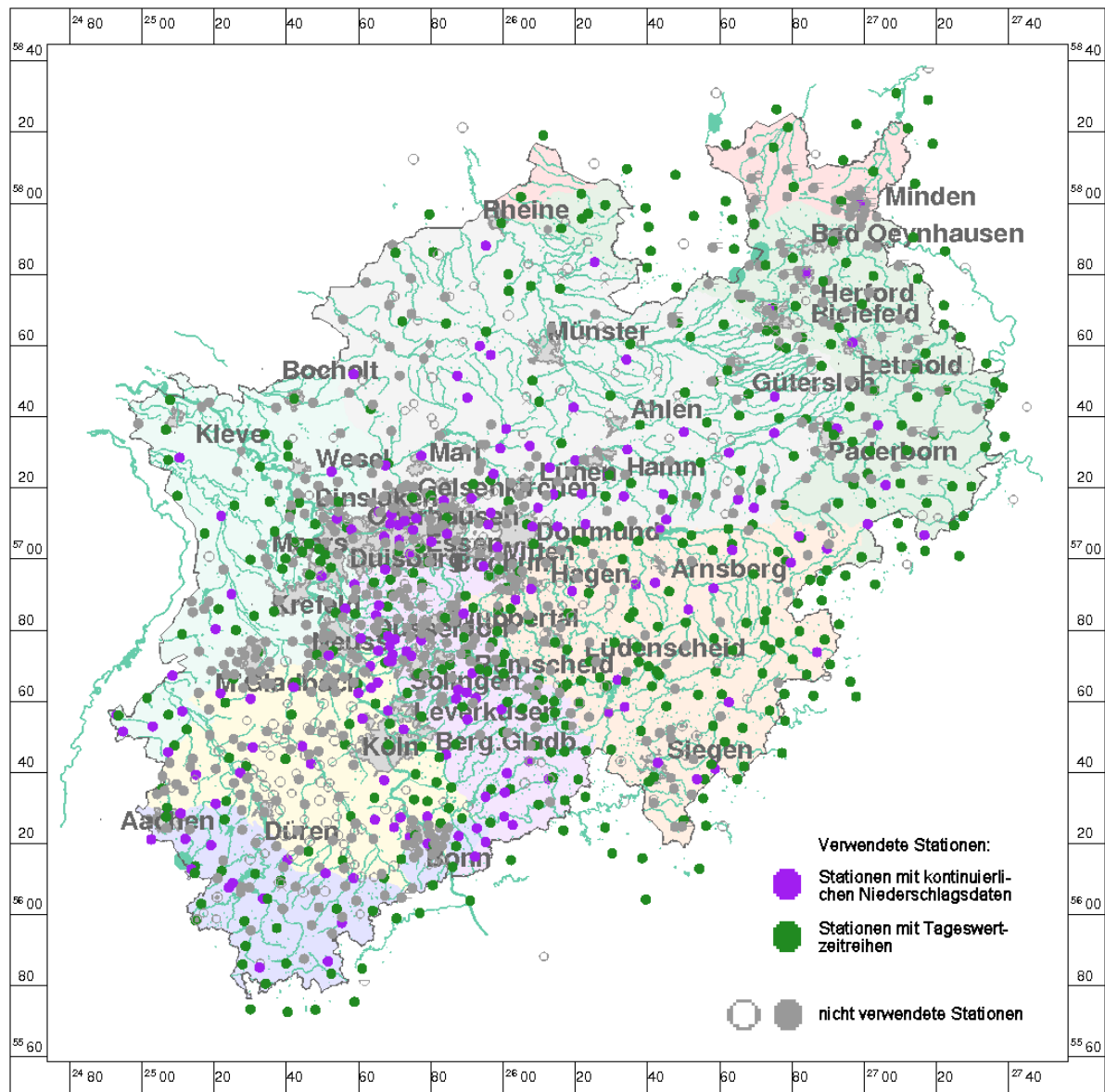


Abbildung 2.1: Übersicht aller Niederschlagsstationen in NRW

3 Auswahl der Reihen für die weitere Bearbeitung

Zwischen dem Auftraggeber (AG) und dem Auftragnehmer (AN) wurde festgelegt, dass der AG dem AN pro Station je eine Reihe bzw. eine Zeitreihenfolge nennt, die für die jeweilige Station relevant ist und die für die Auswertungen eingesetzt werden sollte. Die extremwertstatistischen Auswertungen wurden maximal für den Zeitbereich zwischen 1950 und 2008 (Wasserwirtschaftsjahre) durchgeführt. Die Niederschlagsdaten der Jahre vor 1950 sind mit großer Unsicherheit behaftet, so dass diese nicht in die Auswertung mit eingingen.

Vorab wurden zusammen mit dem LANUV die Grundvoraussetzungen definiert, die die Niederschlagsreihen mindestens erfüllen müssen, um für die extremwertstatistischen Untersuchungen eingesetzt werden zu können. Erfahrungen aus früheren Untersuchungen haben gezeigt, dass Starkregenanalysen kleiner 20 Jahre deutlich unsichere und zufällige Ergebnisse liefern, da sie sehr vom klimatologischen Zyklus und von Ausreißern beeinflusst sind. Daher wurde beschlossen, dass nur diejenigen Stationen in dieser Studie extremwertstatistisch untersucht werden, die ein **auszuwertendes Zeitfenster von mindestens 20 Jahren Länge innerhalb der Wasserwirtschaftsjahre 1950 bis 2008** aufweisen. Die Reihen kürzerer Dauer wurden zu Vergleichszwecken betrachtet und eingesetzt.

In der Übersichtskarte 3.1 sind die kontinuierlichen Reihen und die Tagessummenzeitreihen dargestellt, die diese Voraussetzungen erfüllen.

3 Auswahl der Reihen für die weitere Bearbeitung

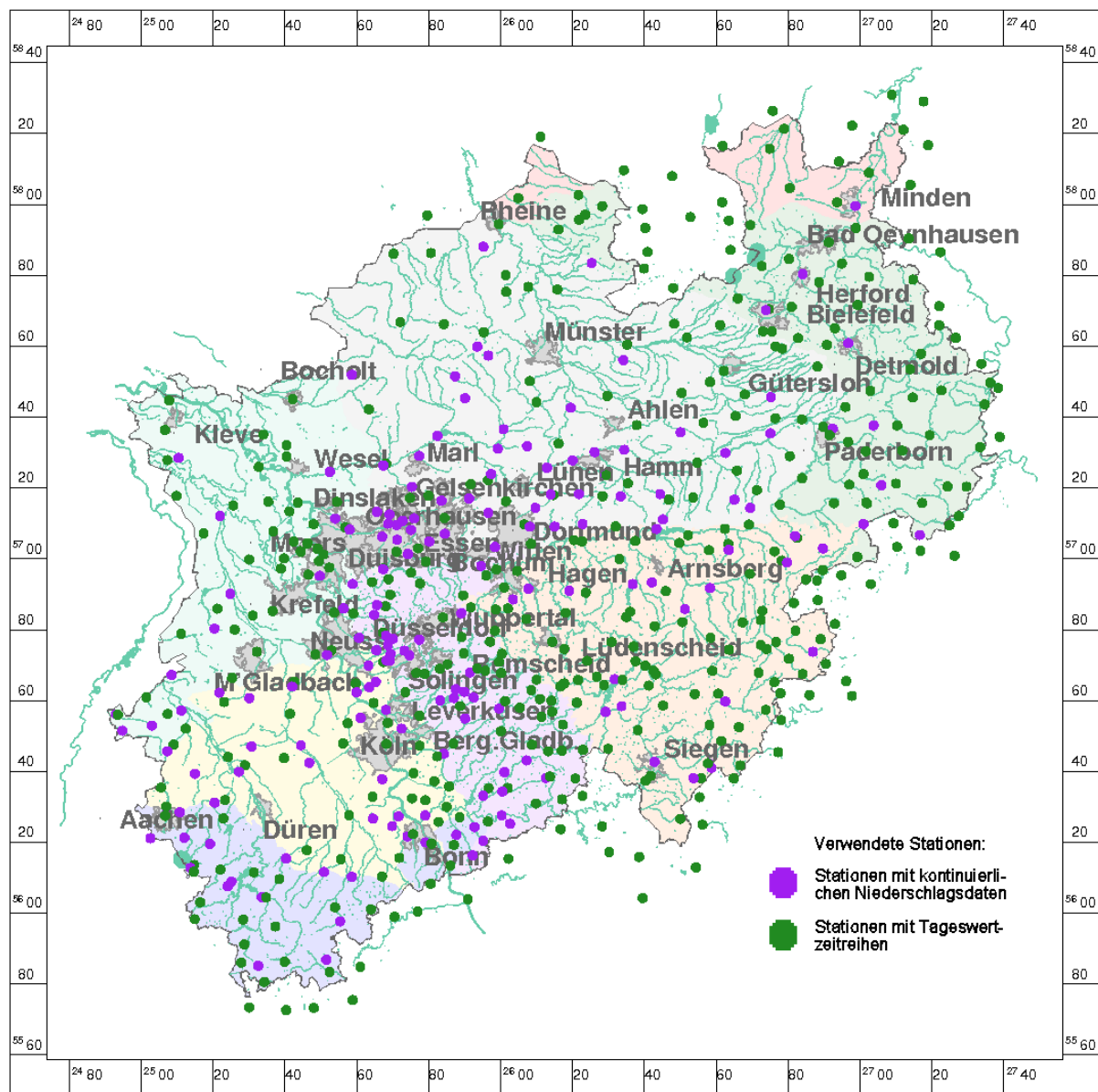


Abbildung 3.1: Übersicht der verwendeten kontinuierlichen Niederschlagszeitreihen und Tagessummenzeitreihen, zusammenhängend >20 Jahre zwischen 1950-2008

3.1 Kontinuierliche Daten

Um die in Kapitel 3 genannten Voraussetzungen zu erfüllen, wurden aus dem gesamten Datenpool der kontinuierlichen Niederschlagsreihen alle Reihen gesucht, die zwischen dem 1.11.1949 und dem 1.11.2008 einen Lückenanteil $< 66\%$ aufwiesen. Diese insgesamt 214 Reihen wurden visualisiert und darauf untersucht, dass sie einen zusammenhängenden Zeitbereich von mindestens 20 Jahren hatten. Nach dieser Prüfung blieben noch 203 Stationen übrig, die dann weiteren Prüfungen ($\hookrightarrow$ Kap. 4) unterzogen wurden.

Von den folgenden Betreibern gingen kontinuierliche Reihen in die weitere Bearbeitung ein:

- LANUV
 - LANUV Aachen (30 Reihen)
 - LANUV Bonn (1 Reihe)
 - LANUV Hagen (4 Reihen)
 - LANUV Herten (1 Reihe)
 - LANUV Köln (20 Reihen)
 - LANUV Lippstadt (12 Reihen)
 - LANUV Minden (11 Reihen)
 - LANUV Münster (8 Reihen)
 - LANUV Siegen (5 Reihen)
 - LANUV (2 Reihen)
- Verbände
 - BRW (18 Reihen)
 - Emschergenossenschaft (22 Reihen)
 - Erftverband (10 Reihen)
 - Lippeverband (21 Reihen)
 - Niersverband (4 Reihen)
 - Ruhrverband (9 Reihen)
 - WOL (1 Reihe)
 - Wupperverband (11 Reihen)
 - WVER (1 Reihe)
- Kommunen
 - Stadt Bonn (1 Reihe)

3 Auswahl der Reihen für die weitere Bearbeitung

- Stadt Dormagen (1 Reihe)
- Stadt Düsseldorf (1 Reihe)
- StEB Köln (2 Reihen)
- Stadt Mülheim (1 Reihe)
- Versorgungsbetriebe Duisburg (1 Reihe)
- DWD Essen (4 Reihen)
- Gesamthochschule Siegen (1 Reihe)

Die Grafiken im Anhang A.1 zeigen, nach Betreibern zusammengefasst, die Reihen und Zeitbereiche, die für die weitere Datenprüfung verwendet wurden.

3.2 Tagessummenzeitreihen

Bei der Vorauswahl der Tagessummenzeitreihen wurde nach der gleichen oben beschriebenen Vorgehensweise gearbeitet. Zunächst wurden aus dem gesamten Tagessummenzeitreihen-Datenpool (774 Reihen) die Reihen ausgewählt, die zwischen dem 1.11.1949 und dem 1.11.2008 einen Lückenanteil $< 66\%$ aufwiesen. Diese insgesamt 551 Reihen wurden visualisiert und daraufhin untersucht, ob sie einen zusammenhängenden Zeitbereich von mindestens 20 Jahren hatten. Nach dieser Prüfung blieben noch 455 Stationen übrig.

Von den folgenden Betreibern gingen Tagessummenzeitreihen in die weitere Bearbeitung ein:

- LANUV
 - LANUV Aachen (6 Reihen)
 - LANUV Herten (2 Reihen)
 - LANUV Köln (4 Reihen)
 - LANUV Minden (15 Reihen)
 - LANUV Münster (25 Reihen)
 - LANUV Siegen (1 Reihe)
- Verbände
 - Aggerverband (6 Reihen)
 - Emschergenossenschaft (10 Reihen)
 - Erftverband (2 Reihen)
 - LINEG (13 Reihen)

- Lippeverband (3 Reihen)
- Ruhrverband (29 Reihen)
- Wupperverband (4 Reihen)
- DWD
 - DWD Essen (268 Reihen)
 - DWD Hamburg (29 Reihen)
 - DWD Offenbach (38 Reihen)

Die Grafiken im Anhang A.2 zeigen eine Datenübersicht über alle eingesetzten Tagessummenzeitreihen, aufgeteilt nach Betreibern.

3.3 Stationen mit kontinuierlichen Daten und Tagessummenzeitreihen

Im Datenpool sind einige Niederschlagsstationen enthalten, bei denen zu einer Station für den gleichen Zeitbereich sowohl kontinuierliche Zeitreihen als auch Tagessummenzeitreihen vorliegen. Da es sich um redundante Daten handelt, mussten deshalb Kriterien festgelegt werden, die den Einsatz der entsprechenden Daten für die weiteren Auswertungen bestimmen. Im Folgenden werden diese Kriterien erläutert.

3.3.1 Auswahlkriterien für den Einsatz kontinuierlicher Reihen

Es wurden **kontinuierliche Reihen** verwendet, wenn die folgenden Kriterien zutraten:

- Länge der kontinuierlichen Reihe $\geq$ Länge der Tagessummenreihe,
- Länge der kontinuierlichen Reihe $<$ Länge der Tagessummenreihe und $\Delta L \leq 5$ Jahre,
- Länge der kontinuierlichen Reihe $<$ Länge der Tagessummenreihe und $\Delta L > 5$ Jahre und Beginn vor 1950,
- Länge der kontinuierlichen Reihe $<$ Länge der Tagessummenreihe und $\Delta L > 5$ Jahre und Vorhandensein von weniger als 3 weiteren Stationen mit kontinuierlichen Daten im Umfeld der Station.

3.3.2 Auswahlkriterien für den Einsatz von Tagessummenzeitreihen

Es wurden **Tagessummenreihen** verwendet, wenn die die folgenden Kriterien zutrafen:

- Länge der kontinuierlichen Reihe < 20 Jahre,
- Länge der kontinuierlichen Reihe $< \text{Länge der Tagessummenreihe}$ und $\Delta L > 5$ Jahre und Vorhandensein von 3 oder mehr Stationen mit kontinuierlichen Daten im Umfeld,
- Ausschluss der kontinuierlichen Zeitreihe aufgrund mangelnder Qualität.

Die folgenden Grafiken ($\hookrightarrow$ Abb. 3.2, 3.3 und 3.4) zeigen eine Übersicht über die Stationen und Zeitbereiche, bei denen sowohl kontinuierliche als auch Tagessummenzeitreihen an einer Station vorhanden sind.

Die kontinuierlichen Zeitreihen, die für die weitere Bearbeitung eingesetzt wurden, sind in den Tabellen 3.2 und 3.3 in lila und die Tagessummenzeitreihen, die für die weitere Bearbeitung eingesetzt wurden, in grün gekennzeichnet.

3.4 Fazit

Nach der in diesem Kapitel beschriebenen Auswahlkriterien standen 418 Tageswertstationen und 196 kontinuierliche Niederschlagsreihen für weitere Auswertungen zur Verfügung.

NR	STATION NAME	REIHE	Jahre	VOND	VONZ	BISD	BISZ
1	37107108 St. Arnold	Konti	44,0	01.11.1964	07:30:00	04.11.2008	00:01:00
1	37107108 St. Arnold	Tagessummen	44,0	01.11.1964	00:00:00	01.11.2008	07:30:00
2	38127118 Lengerich KA	Konti	30,0	01.11.1978	07:30:00	02.11.2008	07:30:00
2	38127118 Lengerich KA	Tagessummen	39,0	01.11.1969	07:30:00	01.11.2008	07:30:00
3	38180027 Herford N	Konti	36,3	01.11.1971	07:30:00	01.02.2008	00:00:00
3	38180027 Herford N	Tagessummen	57,9	01.01.1950	07:30:00	02.12.2007	07:30:00
4	40097118 Rorup	Konti	48,5	01.07.1959	07:30:00	01.01.2008	07:30:00
4	40097118 Rorup	Tagessummen	23,8	01.07.1959	07:30:00	30.04.1983	07:30:00
5	40107118 Schapdetten	Konti	33,0	01.11.1975	07:30:00	02.11.2008	07:30:00
5	40107118 Schapdetten	Tagessummen	33,0	01.11.1975	00:00:00	01.11.2008	07:30:00
6	40137108 Freckenhorst KA	Konti	32,8	02.02.1976	07:30:00	03.11.2008	07:30:00
6	40137108 Freckenhorst KA	Tagessummen	33,0	01.11.1975	07:30:00	01.11.2008	07:30:00
7	40170047 Bielefeld Sennestadt	Konti	24,3	01.11.1972	00:00:00	01.02.1997	00:00:00
7	40170047 Bielefeld Sennestadt	Tagessummen	51,2	01.12.1955	07:30:00	01.02.2007	07:30:00
8	41127118 Drensteinfurt KA	Konti	20,0	01.11.1988	00:00:00	02.11.2008	07:30:00
8	41127118 Drensteinfurt KA	Tagessummen	20,0	01.11.1988	00:00:00	01.11.2008	07:30:00
9	42090106 Haltern KA	Konti	57,0	01.01.1951	07:30:05	01.01.2008	07:30:00
9	42090106 Haltern KA	Tagessummen	24,0	01.01.1951	07:30:00	01.01.1975	07:30:00
10	42100015 Selm	Konti	57,0	01.01.1951	07:30:00	01.01.2008	07:30:00
10	42100015 Selm	Tagessummen	38,9	03.02.1951	07:30:00	01.01.1990	07:30:00
11	42117118 Suedkirchen	Konti	20,0	01.11.1988	07:30:00	02.11.2008	07:30:00
11	42117118 Suedkirchen	Tagessummen	23,4	05.06.1985	05:00:55	01.11.2008	07:30:00
12	42150056 Diestedde	Konti	20,3	01.07.1988	07:30:00	02.11.2008	07:30:00
12	42150056 Diestedde	Tagessummen	24,0	01.11.1984	07:30:00	01.11.2008	07:30:00
13	43080025 Marl Ost	Konti	57,2	01.11.1950	07:30:00	01.01.2008	07:30:00
13	43080025 Marl Ost	Tagessummen	24,2	01.11.1950	07:30:00	01.01.1975	07:30:00
14	44075015 Gladbeck Hahnenbach	Konti	58,0	01.01.1950	07:30:00	01.01.2008	07:30:00
14	44075015 Gladbeck Hahnenbach	Tagessummen	47,0	01.01.1950	07:30:00	01.01.1997	07:30:00
15	44075025 Bottrop Boye	Konti	55,0	01.01.1953	07:30:00	01.01.2008	07:30:00
15	44075025 Bottrop Boye	Tagessummen	22,0	01.01.1953	07:30:00	01.01.1975	07:30:00
16	44085075 Gelsenkirchen Altsta	Konti	58,0	01.01.1950	07:30:00	01.01.2008	07:30:00
16	44085075 Gelsenkirchen Altsta	Tagessummen	47,0	01.01.1950	07:30:00	01.01.1997	07:30:00
17	44095105 Castrop Rauxel Habin	Konti	58,2	01.11.1949	07:30:00	01.01.2008	07:30:15
17	44095105 Castrop Rauxel Habin	Tagessummen	20,0	01.01.1951	07:30:00	02.01.1971	07:54:05
18	44100125 Dortmund Nettebach	Konti	58,2	01.11.1949	07:30:00	01.01.2008	07:30:00
18	44100125 Dortmund Nettebach	Tagessummen	25,0	01.01.1950	07:30:00	01.01.1975	07:30:00
19	44145026 Soest KA	Konti	58,2	01.11.1949	07:30:00	01.01.2008	07:30:00
19	44145026 Soest KA	Tagessummen	27,8	12.03.1947	07:30:00	01.01.1975	07:30:00
20	44190026 Kleinenberg	Konti	34,2	01.11.1973	07:30:00	29.01.2008	00:01:00
20	44190026 Kleinenberg	Tagessummen	20,5	25.03.1987	05:51:50	03.10.2007	07:30:00
21	45080104 Essen Steele-KA	Konti	42,8	01.01.1952	10:01:00	01.11.1994	07:30:00
21	45080104 Essen Steele-KA	Tagessummen	24,6	01.04.1984	07:30:00	01.11.2008	07:30:00
22	45080115 Essen Ruhrhaus	Konti	26,8	01.01.1965	07:30:00	01.11.1991	07:30:00
22	45080115 Essen Ruhrhaus	Tagessummen	48,8	01.01.1960	07:30:00	01.11.2008	07:30:00

Abbildung 3.2: Stationen mit kontinuierlichen Reihen und Tagessummenzeitreihen, Tabelle, Teil 1

3 Auswahl der Reihen für die weitere Bearbeitung

NR	STATION NAME	REIHE	Jahre	VOND	VONZ	BISD	BISZ
23	45095005 Bochum (DMT)	Konti	58,2	01.11.1949	07:30:00	01.01.2008	07:30:00
23	45095005 Bochum (DMT)	Tagessummen	45,2	01.01.1950	07:30:00	17.03.1995	07:30:00
24	45105005 Do.-Kruckel	Konti	58,2	01.11.1949	00:00:00	01.01.2008	07:30:00
24	45105005 Do.-Kruckel	Tagessummen	25,0	01.01.1950	07:30:00	01.01.1975	07:30:00
25	45140016 Moehnetalsperre	Konti	57,8	05.01.1951	08:01:00	01.11.2008	00:00:00
25	45140016 Moehnetalsperre	Tagessummen	75,0	01.11.1933	07:30:00	01.11.2008	07:30:00
26	45200027 Warburg Welda	Konti	30,2	01.11.1977	07:30:00	29.01.2008	00:01:00
26	45200027 Warburg Welda	Tagessummen	23,9	09.11.1983	07:30:00	06.10.2007	07:30:00
27	46138154 Sorpetalsperre	Konti	25,0	05.11.1972	06:01:00	01.11.1997	00:00:00
27	46138154 Sorpetalsperre	Tagessummen	62,7	01.02.1946	07:30:00	01.11.2008	07:30:00
28	47080013 Wuppertal Buchenhofe	Konti	30,0	31.12.1959	07:30:00	01.01.1990	07:30:00
28	47080013 Wuppertal Buchenhofe	Tagessummen	58,0	01.01.1950	07:30:00	01.01.2008	07:30:00
29	47080093 Wuppertal-Buchenhofe	Konti	48,9	31.12.1959	07:29:00	14.11.2008	15:09:00
29	47080093 Wuppertal-Buchenhofe	Tagessummen	55,5	01.09.1949	07:30:00	01.03.2005	07:30:00
30	47138394 Allendorf	Konti	28,0	04.11.1972	17:01:00	31.10.2000	18:00:00
30	47138394 Allendorf	Tagessummen	47,8	01.01.1950	07:30:00	01.11.1997	07:30:00
31	48085043 Burg KA	Konti	16,3	13.09.1991	07:30:00	02.01.2008	07:30:00
31	48085043 Burg KA	Tagessummen	25,3	01.11.1978	07:30:00	01.02.2004	07:40:00
32	48090022 Remscheid (Eschbacht	Konti	20,0	02.01.1962	07:30:00	12.01.1982	15:18:40
32	48090022 Remscheid (Eschbacht	Tagessummen	57,0	01.01.1950	07:30:00	01.01.2007	07:30:00
33	48100042 Bever Talsperre Wv	Konti	40,9	06.12.1967	07:30:00	27.10.2008	06:40:00
33	48100042 Bever Talsperre Wv	Tagessummen	54,1	01.01.1950	07:30:00	01.02.2004	07:30:00
34	48100442 Hueckeswagen (Bever	Konti	31,9	06.12.1967	07:30:00	01.11.1999	07:30:00
34	48100442 Hueckeswagen (Bever	Tagessummen	58,0	01.01.1950	07:30:00	01.01.2008	07:30:00
35	48128574 Versetalsperre	Konti	55,5	06.05.1953	06:01:00	01.11.2008	00:00:00
35	48128574 Versetalsperre	Tagessummen	58,0	01.11.1950	07:30:00	01.11.2008	07:30:00
36	48138564 Biggetalsperre	Konti	42,0	04.11.1966	03:01:00	01.11.2008	00:00:00
36	48138564 Biggetalsperre	Tagessummen	48,8	01.01.1960	07:30:00	01.11.2008	07:30:00
37	49070062 Leverkusen DWD	Konti	23,0	31.12.1969	00:01:00	23.12.1992	08:00:00
37	49070062 Leverkusen DWD	Tagessummen	58,0	01.01.1950	07:30:00	01.01.2008	07:30:00
38	49138454 Olpe KA	Konti	29,0	01.11.1967	07:01:00	01.11.1996	06:00:00
38	49138454 Olpe KA	Tagessummen	58,8	01.01.1950	07:30:00	01.11.2008	07:30:00
39	50050081 Sindorf	Konti	32,4	28.06.1976	07:30:00	05.11.2008	00:01:00
39	50050081 Sindorf	Tagessummen	33,0	01.12.1955	07:30:00	01.12.1988	07:30:00
40	52030051 Zweifall	Konti	30,4	01.11.1975	07:30:00	11.04.2006	15:00:00
40	52030051 Zweifall	Tagessummen	20,1	01.11.1968	07:30:00	01.12.1988	07:30:00
41	52100032 Lascheid	Konti	33,0	01.11.1975	07:30:00	04.11.2008	00:01:00
41	52100032 Lascheid	Tagessummen	35,3	01.07.1973	07:30:00	01.11.2008	07:30:00
42	53030041 Roetgen	Konti	33,4	01.11.1974	07:30:00	08.04.2008	00:01:00
42	53030041 Roetgen	Tagessummen	21,6	01.05.1967	07:30:00	01.12.1988	07:30:00
43	53040041 Weidenbach	Konti	40,1	01.11.1965	07:30:00	30.11.2005	00:05:00
43	53040041 Weidenbach	Tagessummen	22,1	01.11.1966	07:30:00	01.12.1988	07:30:00
44	53040051 Kestemich	Konti	35,0	01.11.1966	00:00:00	01.11.2001	07:30:00
44	53040051 Kestemich	Tagessummen	22,1	01.11.1966	07:30:00	01.12.1988	07:30:00

Abbildung 3.3: Stationen mit kontinuierlichen Reihen und Tagessummenzeitreihen, Tabelle, Teil 2

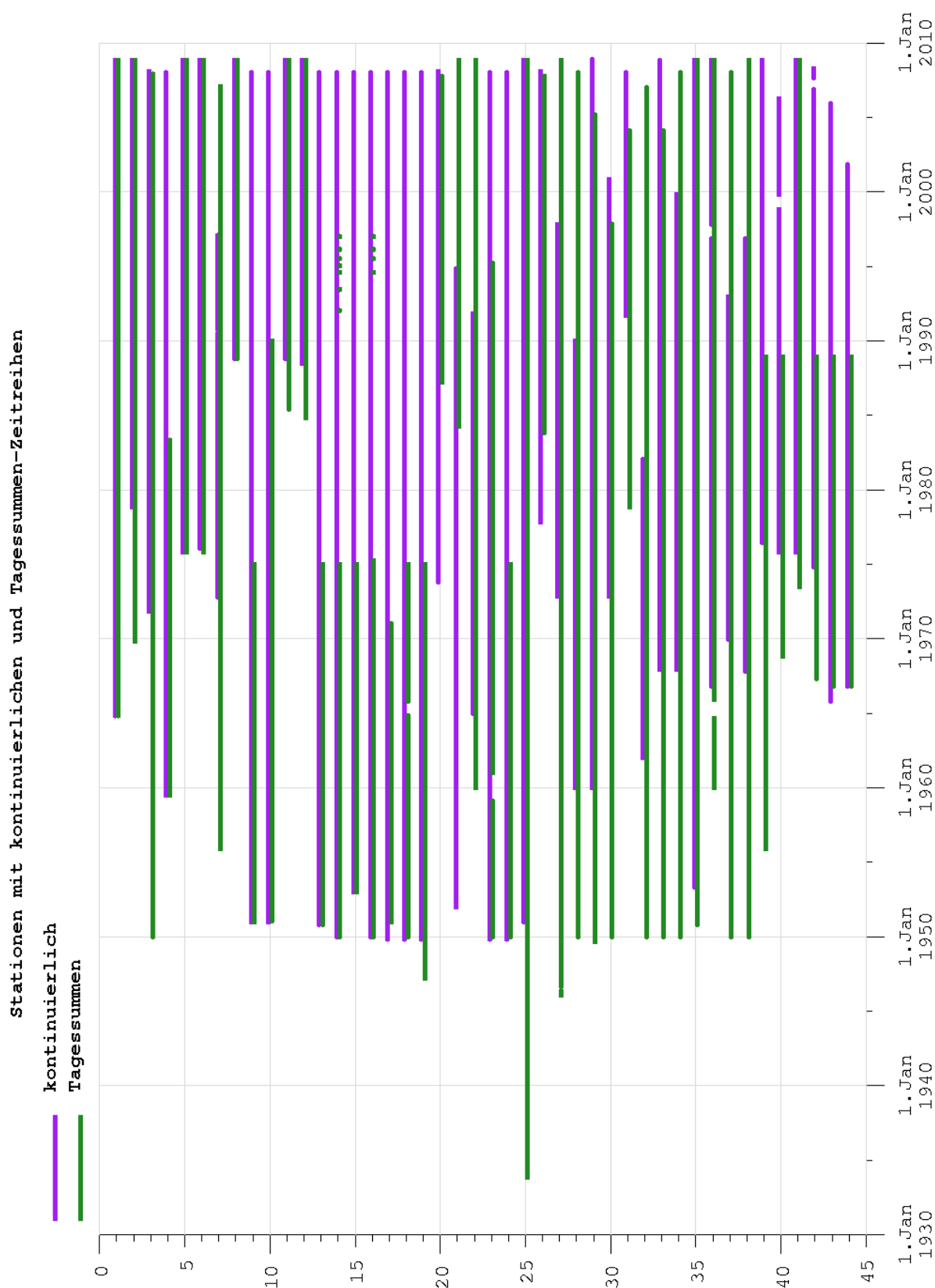


Abbildung 3.4: Stationen mit kontinuierlichen Reihen und Tagessummenzeitreihen, Grafik

3 Auswahl der Reihen für die weitere Bearbeitung

4 Datenprüfung

Die Prüfung der ausgewählten Reihen konzentrierte sich ausschließlich auf die relevanten Starkregenereignisse, da die Prüfung gesamter Reihen nicht Gegenstand des Auftrags war. Dazu wurden für alle Reihen die Starkregenserien nach DWA-A 118 [3] erstellt:

- partielle Serien mit 2,71 Ereignissen pro Jahr
- zeitlicher Mindestabstand zwischen einzelnen Ereignissen:
 - bei kontinuierlichen Daten: 4 Stunden
 - bei Tagessummen: 1 Tag
- Dauerstufen gemäß folgender Aufzählung:

Kontinuierliche Reihen:

- 5 min
- 15 min
- 60 min
- 2 h
- 4 h
- 12 h
- 1 d
- 3 d

Tagessummen-Reihen:

- 1 d
- 2 d
- 3 d

Im nächsten Schritt wurden alle Ergebnisse der Starkregenserien einer automatischen Datenprüfung mit NIKLAS unterzogen. Dabei wurde eine Grenzwertprüfung, eine Prüfung konstanter Werte sowie eine Prüfung auf räumliche Konsistenz durchgeführt.

Für die Grenzwertprüfung wurde nach folgenden Auffälligkeiten gesucht:

- Grenzwertprüfung
 - in 1 Minute eine Niederschlagsmenge von 5 mm
 - in 5 Minuten eine Niederschlagsmenge von 17,5 mm (*)
 - in 60 Minuten eine Niederschlagsmenge von 48 mm (*)

4 Datenprüfung

- in 1440 Minuten eine Niederschlagsmenge von 90 mm (*)
- „Pluvio“-Test
- ((*) entspricht dem 100-jährlichen Niederschlag für Essen)

„Pluvio-Test“: Suche nach Drei-Minuten-Intervallen in den Daten, die hohen Niederschlag aufweisen und denen je ein Ein-Minuten-Intervall vorausgeht und folgt.

Bei der Überprüfung konstanter Intensitäten wurde nach den folgenden Kriterien gesucht:

- Konstante Werte $> 0,5$ mm/h über 3 Stunden

Bei der räumlichen Konsistenz waren folgende Suchkriterien ausschlaggebend:

- Räumliche Konsistenz
 - Mengen: >5 mm und Tagessumme < 0.6 -faches der Nachbarn oder > 2 -faches der Nachbarn
 - Niederschlagsdauer (Trockenzeiten): hier wurde ebenso die Dauer der Trockenzeiten überprüft wie vorher die Menge
 - Nullwerte: es wurde geprüft, ob bei einer Station mit 0 mm Niederschlag zeitgleich die Nachbarstationen alle Niederschlag aufwiesen

4.1 Aufbau der NIKLAS-Prüfung

Für die insgesamt 203 kontinuierlichen Starkregenserien wurden 358 kontinuierliche Kontrollreihen, (d. h. vollständige Zeitreihen), zum Vergleich herangezogen und für die 455 Tagessummen-Starkregenserien 455 Tagessummen-Kontrollreihen. Es wurde jede Starkregenserie unter Nutzung aller Kontrollreihen im Umkreis von <40 km und einer Höhendifferenz von <100 m geprüft. Dabei ergaben sich insgesamt 2835 Auffälligkeiten (ohne die Station Remscheid DWD, die alleine schon eine Vielzahl von Auffälligkeiten aufwies), wie sie in Tabelle 4.1 dargestellt sind:

4.1 Aufbau der NIKLAS-Prüfung

Art der Prüfung	Summe der Auffälligkeiten
Grenzwertprüfung	
1 min	488
5 min	46
60 min	59
1440 min	49
„Pluvio“	354
Konstante Werte	176
Räumliche Konsistenz	
Mengen	743 zu hoch/45 zu niedrig
Niederschlagsdauer	115 zu hoch/143 zu niedrig
Nullwerte	514 (meist Zeitverzug)

Tabelle 4.1: Art der Prüfung und Summe der Auffälligkeiten

Für jede Reihe wurde von NIKLAS unter anderem eine LOG-Datei mit den jeweiligen Auffälligkeiten erzeugt. Die Abbildung 4.1 zeigt ein Beispiel für die Ausgaben der Auffälligkeiten.

4 Datenprüfung

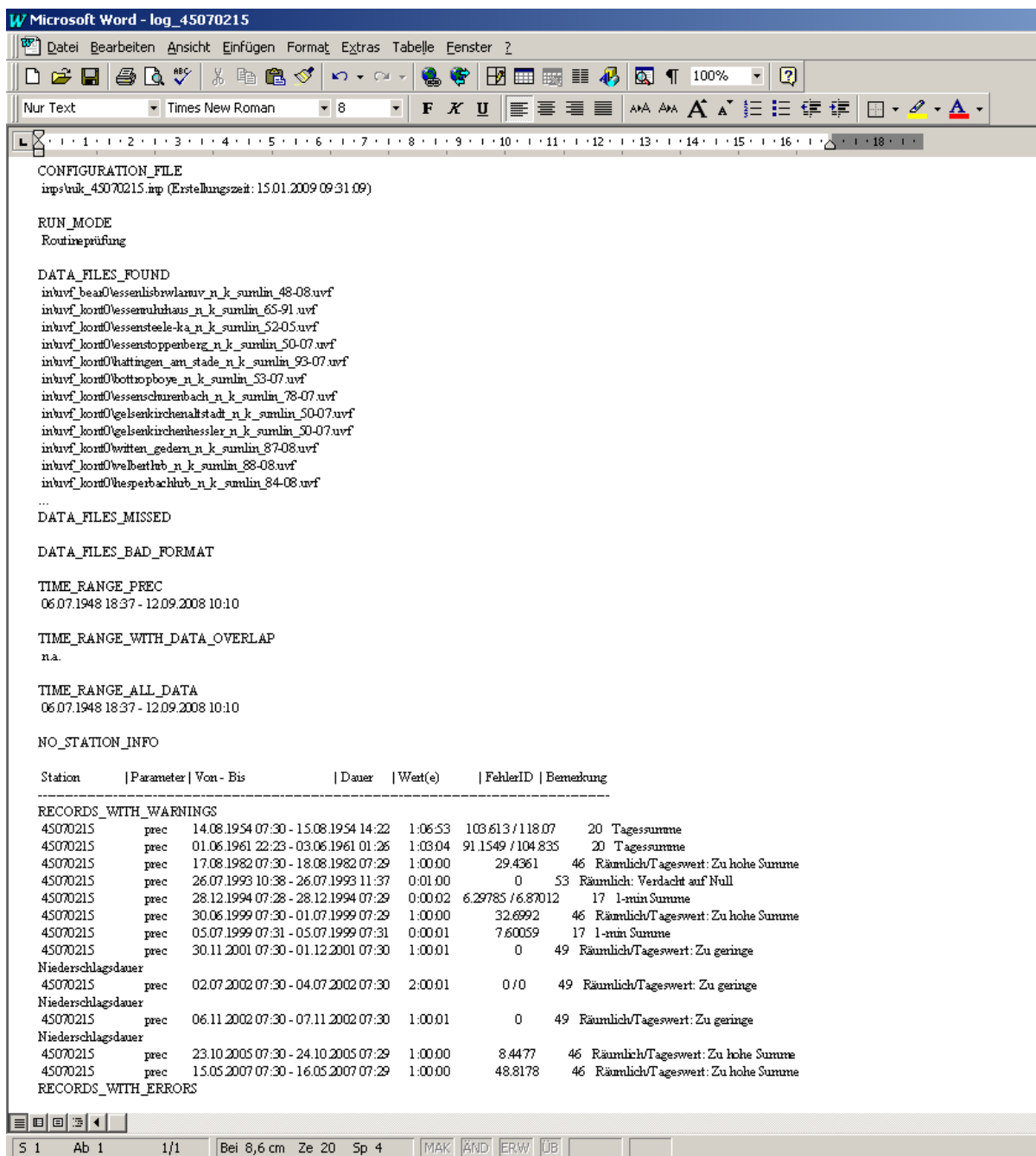


Abbildung 4.1: NIKLAS LOG-Datei mit Auffälligkeiten

Die automatisierte Erkennung von Fehlern und markanten Ereignissen ermöglichte eine objektive Vorauswahl von potentiell fehlerhaften Daten, ersetzte jedoch nicht die fachliche Begutachtung der Daten durch erfahrenes Personal. So wurden alle gefundenen Auffälligkeiten anschließend ereignisweise mit Hilfe von geeigneten Nachbarstationen (Schreibern und Messern) geprüft und die Ereignisse wurden verbessert, verworfen oder auch als plausibel bewertet und so belassen.

Um das Ausschließen möglicher systematischer Fehler zu gewährleisten, wurden die Auffälligkeiten nach dem Zufallsprinzip zur fachlichen Begutachtung auf die drei Büros verteilt. Dabei wurden offensichtlich fehlerhafte Daten und zu kurze Datenreihen bereits zu diesem Zeitpunkt aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Aus diesem Grunde finden sich in den Kapiteln 4.2 und 4.3 andere Gesamtanzahlen von Stationen als in Kapitel 4.1.

4.2 Prüfergebnisse der Tagessummenzeitreihen

Die Ergebnisse der Tagessummenprüfung ergaben für 418 Stationen 642 Anmerkungen, wobei für etwa 40 % der Stationen ($\leftrightarrow$ Abb. 4.2) keine Anmerkungen durch NIKLAS erzeugt wurden. Insgesamt führten weniger als 30 % der Anmerkungen auch zu Datenkorrekturen ($\leftrightarrow$ Abb. 4.3). Die Korrekturen bestanden bei den Tagessummen aus

- Lückensetzung und
- Zeitverschiebung (+/- 1d).

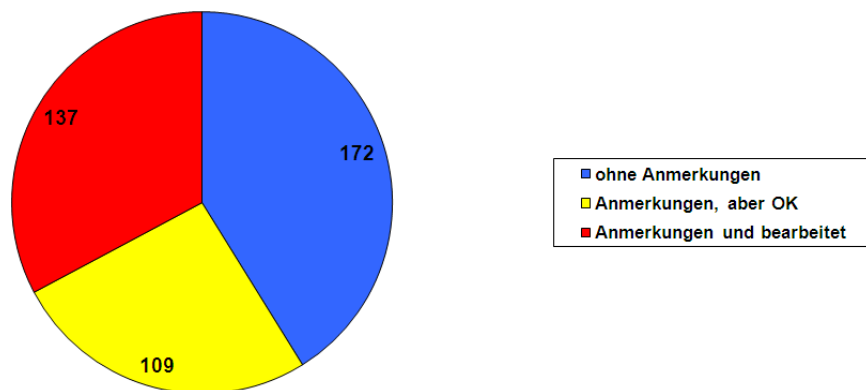


Abbildung 4.2: Ergebnisse der Tagessummenprüfung (Stationen mit Anmerkungen)

4.3 Prüfergebnisse der kontinuierlichen Niederschlagsdaten

Die Ergebnisse der kontinuierlichen Niederschlagsdaten zeigten für den überwiegenden Teil der 196 Stationen, dass NIKLAS Anmerkungen zur Datenqualität erstellte ($\leftrightarrow$ Abb. 4.4).

4 Datenprüfung

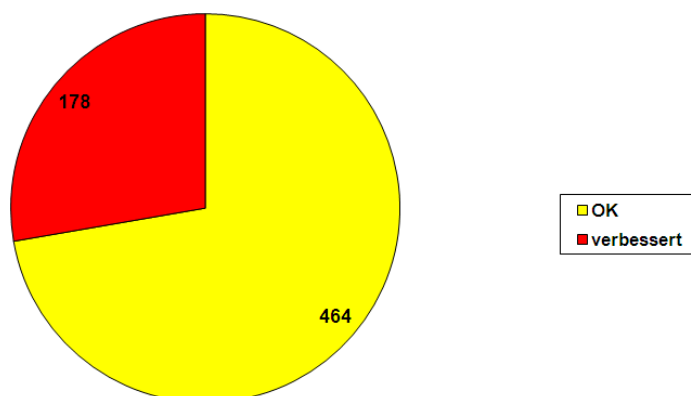


Abbildung 4.3: Ergebnisse der Tagessummenprüfung (Auswertung der Anmerkungen)

Von den 2450 Anmerkungen führte etwa ein Drittel nach visueller Prüfung zu Korrekturen der Daten ($\hookrightarrow$ Abb. 4.5). Die Korrekturen wurden wie folgt durchgeführt:

- Bei unplausiblen 1-Minuten-Werten mit stimmigen Stundensummen: Verteilung auf längeren Zeitraum (wie an Nachbarstationen)
- Bei Nullwertverdacht: Lücke gesetzt, außer der wahre Grund ist ein anderer
- Bei Zeitverschiebung: keine (da für die Statistik der Zeitbezug eine untergeordnete Rolle spielt)
- Bei Überschreiten der 5-Minuten-, Stunden- und Tagesgrenzen: Lücke gesetzt, wenn die Werte unplausibel im Vergleich zu Nachbarn waren, sonst wurden sie beibehalten
- Alle anderen offensichtlichen Fehler führten zum Ausschluss (Lückensetzung) der Daten

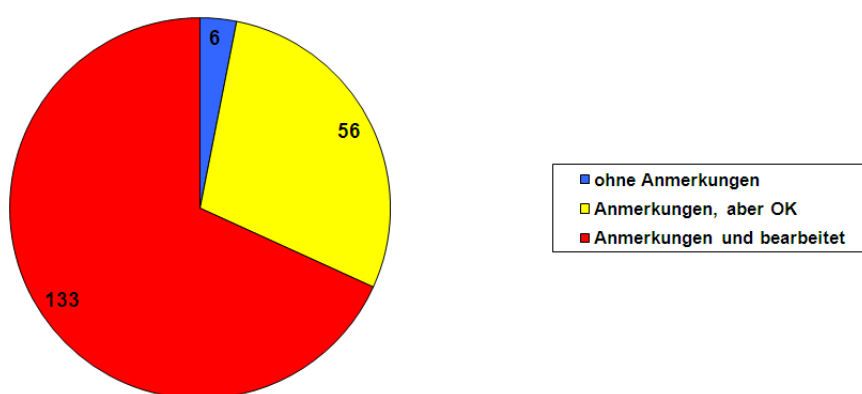


Abbildung 4.4: Prüfergebnisse der kontinuierlichen Niederschlagsdaten (Stationen mit Anmerkungen)

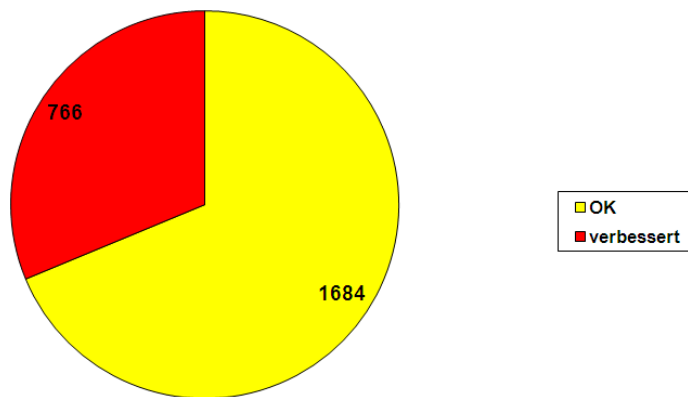


Abbildung 4.5: Prüfergebnisse der kontinuierlichen Niederschlagsdaten (Auswertung der Anmerkungen)

4.4 Zusammenfassung

Eine automatische Datenprüfung durch NIKLAS wurde auf die Daten angewandt. Die Datenprüfung erzeugte Kommentare anhand verschiedener Kriterien, wie Überschreitung von Grenzwerten, konstante Werte, Nullwerte bei Niederschlag an Nachbarstationen, usw. Die gefundenen Auffälligkeiten waren also nicht automatisch als Messfehler zu bewerten und wurden anschließend durch erfahrene Bearbeiter visuell geprüft. Die Auffälligkeiten führten zu Datenkorrekturen, Datenausschluss oder Akzeptanz der Daten ohne Änderung. Dabei ergab sich für die Tagessummen, dass etwa ein Drittel der Stationen Anmerkungen aufwies, die zu Korrekturen in den Daten führten. Bei den kontinuierlichen Daten waren etwa zwei Drittel der Stationen zu korrigieren.

5 Datenstruktur

5.1 Anteil der Originaldaten an den Starkregensserien

Nach Möglichkeit sollten für die Auswertungen nur Originaldaten verwendet werden. Jedoch ist die Beurteilung, welche Daten original und welche aufbereitet sind, oft nicht eindeutig festgelegt. Einige Daten liegen fälschlicherweise nicht als Originaldaten vor, obwohl es sich dabei um Originaldaten handelt. Der Hintergrund hierfür ist häufig, dass die Daten anderer Betreiber so importiert wurden, dass die Eigenschaft „Originaldaten“ beim Import nicht übernommen wurde.

Auch zeitliche Verschiebungen – meist um 1 Stunde wegen Sommerzeitwechsel – führt zum Verlust des Status „Originalzeitreihe“. Für statistische Auswertungen haben diese Zeitverschiebungen jedoch keine Relevanz. Eine formal strenge Beschränkung der Auswertungen auf „Originaldaten“ im Sinne der Datenhaltung würde dem Datenpool und den vorhandenen Datenqualitäten nicht gerecht. Dadurch würden unter Umständen statistisch relevante Ereignisse unnötig verloren gehen.

Originaldaten weisen oftmals offensichtliche Fehler auf. Diese wurden vielfach durch Fachpersonal von Ingenieurbüros sach- und fachgerecht aufbereitet. Häufige Fehlerquellen sind z. B. Verstopfungen, Uhrstillstände oder Kraftschlüsse bei Frost, die zu Falschregistrierungen der Geräte führen. Die fachmännisch aufbereiteten Daten geben das Niederschlagsverhalten genauer wieder als die fehlerhaften Originaldaten.

Die Daten wurden auch für bisher bereits durchgeführte wasserwirtschaftliche Auswertungen herangezogen und als belastbar genug bewertet.

Nach der Prüfung aller relevanten Ereignisse ergab sich für die Zeitreihen die folgende Datenstruktur. Die Abbildungen 5.1 und 5.2 geben Aufschluss über die Datenverfügbarkeit und über den zeitlichen Anteil der Originaldaten in den Starkregenereignissen.

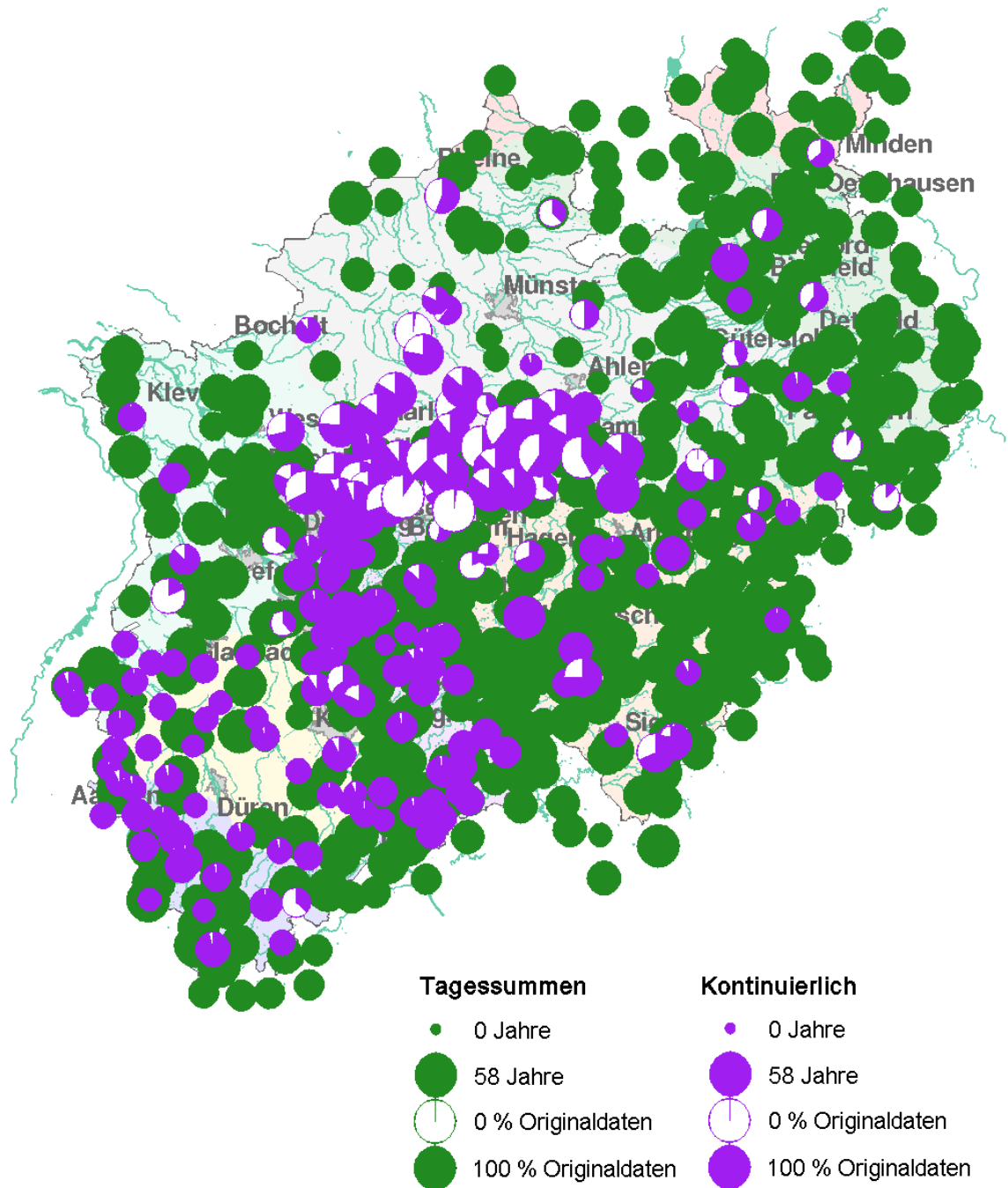


Abbildung 5.1: Zeitlicher Anteil der Originaldaten in den Starkregenereignissen: Kontinuierliche und Tagessummen-Zeitreihen

5.1 Anteil der Originaldaten an den Starkregensereisen

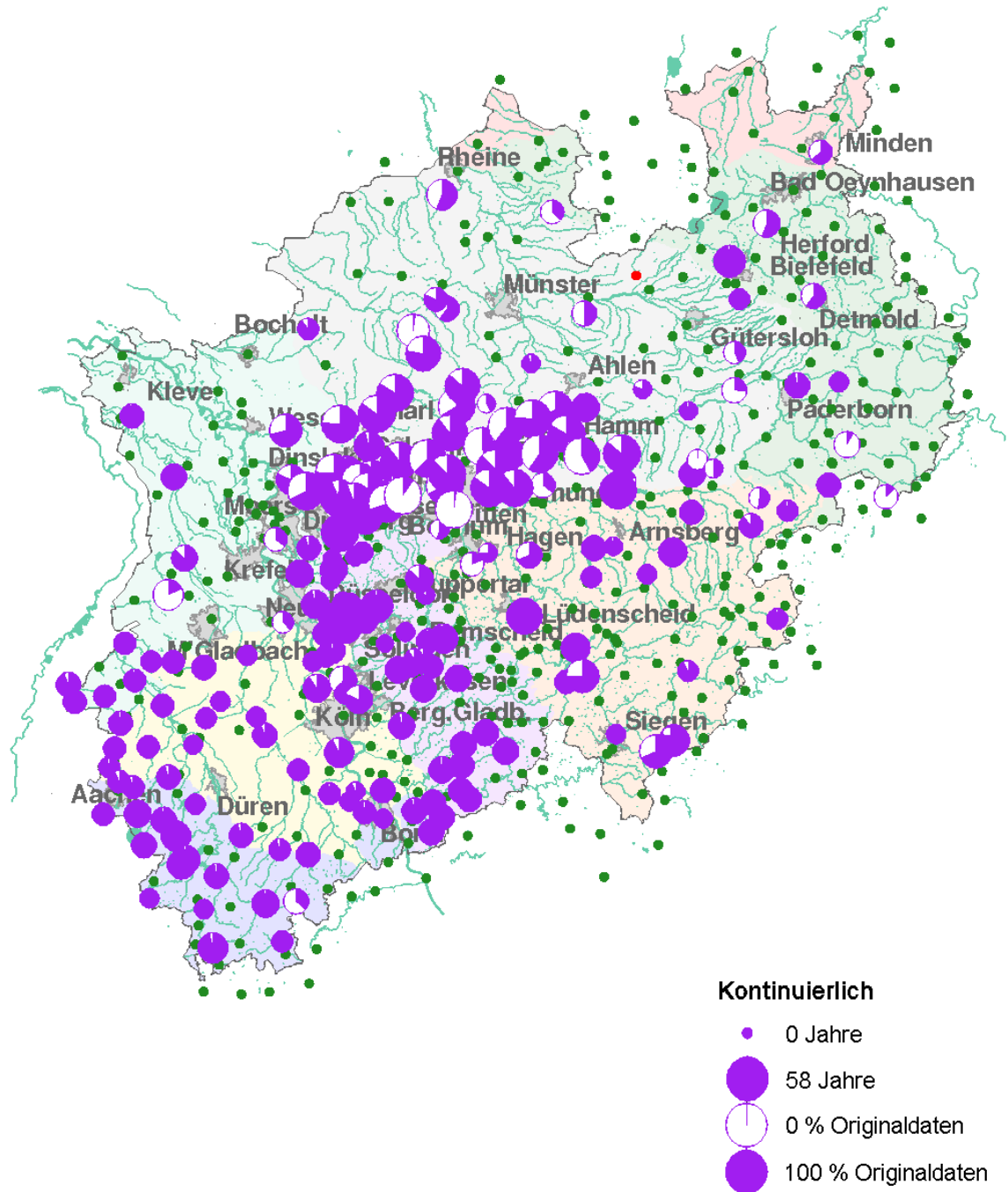


Abbildung 5.2: Zeitlicher Anteil der Originaldaten in den Starkregensereignissen: Kontinuierliche Zeitreihen

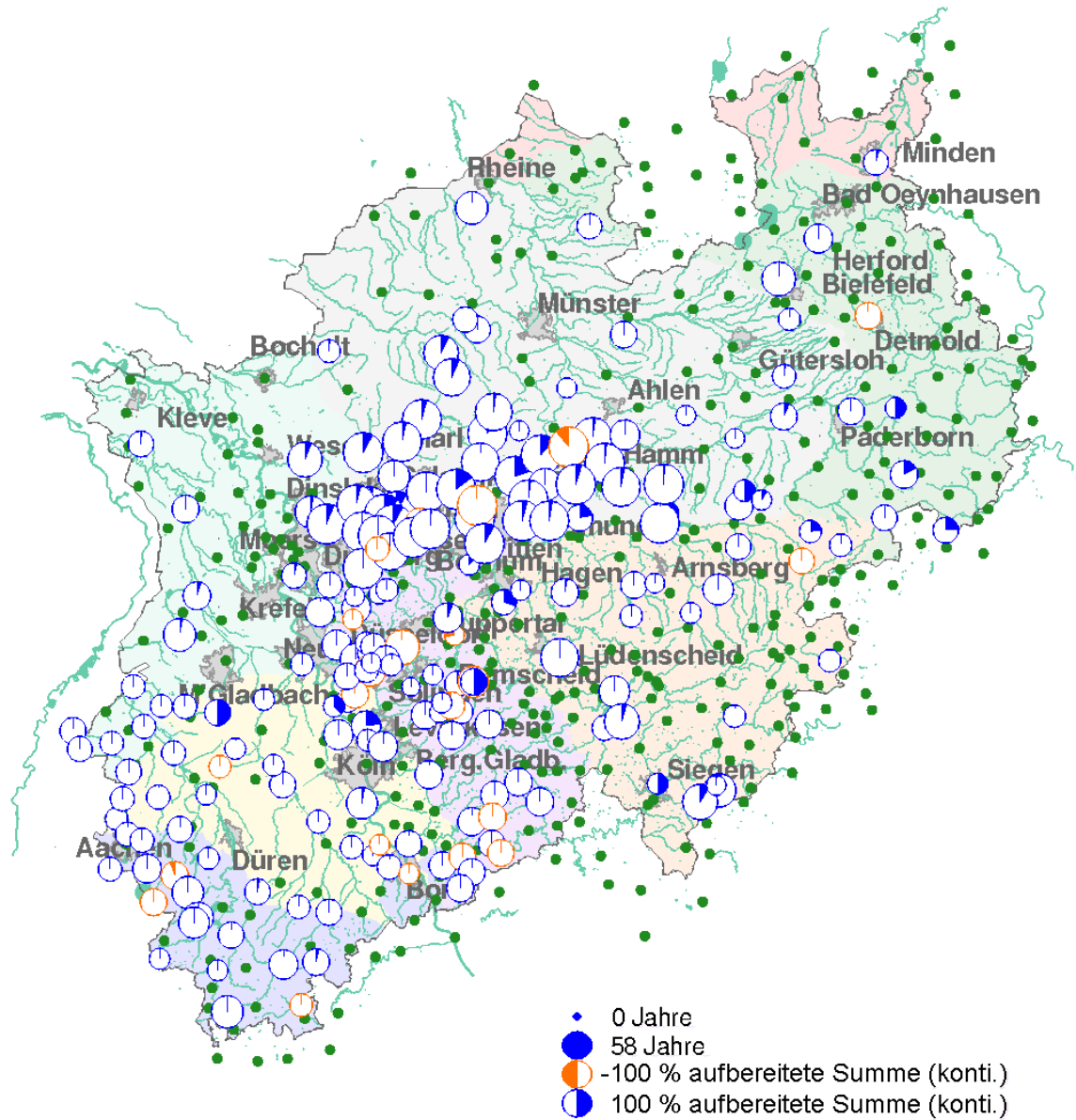


Abbildung 5.3: Summenanteil der Originaldaten in den Starkregenereignissen: Kontinuierliche Zeitreihen

5.1 Anteil der Originaldaten an den Starkregensserien

Die Stationen, die einen besonders hohen Anteil aufbereiteter Daten an der Gesamtniederschlagssumme haben, wurden gesondert untersucht.

Tabelle 5.1: Stationen mit sehr hohem Aufbereitungsanteil

Station	Name	Jahre	Aufb.-Anteil [%]	
			Summe	zeitlich
44145016	Wippringsen	26,0	67,2	79,7
49075053	Dormagen Rheinfeld	22,2	74,6	100,0
42190026	Buke	21,2	100,0	100,0
44160046	Weickede	22,9	100,0	100,0
47080013	Wuppertal Buchenhofen DWD	30,0	100,0	100,0
48100442	Hückeswagen (Bev.-Tsp.) DWD	31,9	100,0	100,0
49040011	Borschemich	31,0	100,0	100,0
50141194	Siegen Ges.Hochsch.	21,0	100,0	100,0

Dabei ergab sich, dass bei allen diesen Stationen die Originaldatenschicht fehlt, die Datenaufnahme beginnt mit Qualität „Lücken gefüllt“.

Bei einigen Reihen fiel die Reduzierung der Niederschlagssumme in der Aufbereitung auf.

Tabelle 5.2: Reduzierung der N-Summe in der Aufbereitung

Station	Name	Jahre	Aufb.-Anteil [%]	
			Summe	zeitlich
52030051	Zweifall	34.0	-11,5	2,0
49090072	Neumuehle	32.9	-15,2	11,7
43120035	Herringen	58.0	-22,4	23,7
05076200	Beyenburg	18.7	-54,7	15,3

Die Gründe für die Reduzierung der Niederschlagssumme waren die folgenden:

- Beyenburg bis Mitte der 1990er Jahre: Reduzierung vieler Ereignisse um Faktor 10
- Herringen in 2005: Rekonstruktion einiger sehr hoher Falschaufzeichnungen

- Neumühle 1981 und 2001: Reduzierung einzelner Ereignisse
- Zweifall 2004, 2006 und 2008: Reduzierung einzelner Ereignisse

Die Abbildung 5.4 zeigt für ausgewählte Stationen im Dortmunder Raum den Anteil der Originaldaten in den Starkregenereignissen.

5.2 Lückenanteile

Der maximale Lückenanteil für alle Auswertungen beträgt 3 %. Nach der NIKLAS-Prüfung, bei der einige Fehler zu Lücke gesetzt wurden, wurde der aktuelle Lückenanteil nochmals ermittelt. Dabei fielen einige Stationen für die weitere Bearbeitung heraus. Somit standen nun insgesamt

- 176 kontinuierliche Zeitreihen (531 zu Beginn des Projektes) und
- 412 Tagessummenzeitreihen (774 zu Beginn des Projektes) für die statistischen Auswertungen zur Verfügung.

Die Tabellen A.1 und A.2 im Anhang A.3 zeigen den Lückenanteil der einzelnen Stationen. Wie die Tabellen zeigen, sind ca. 50 % der Reihen bis zu einem maximalen Anteil von 3 % lückenbehaftet. Würde man einen Lückenanteil von 0 % für weitere Berechnungen voraussetzen, würden 50 % der in Frage kommenden Stationen nicht für die Auswertung zur Verfügung stehen.

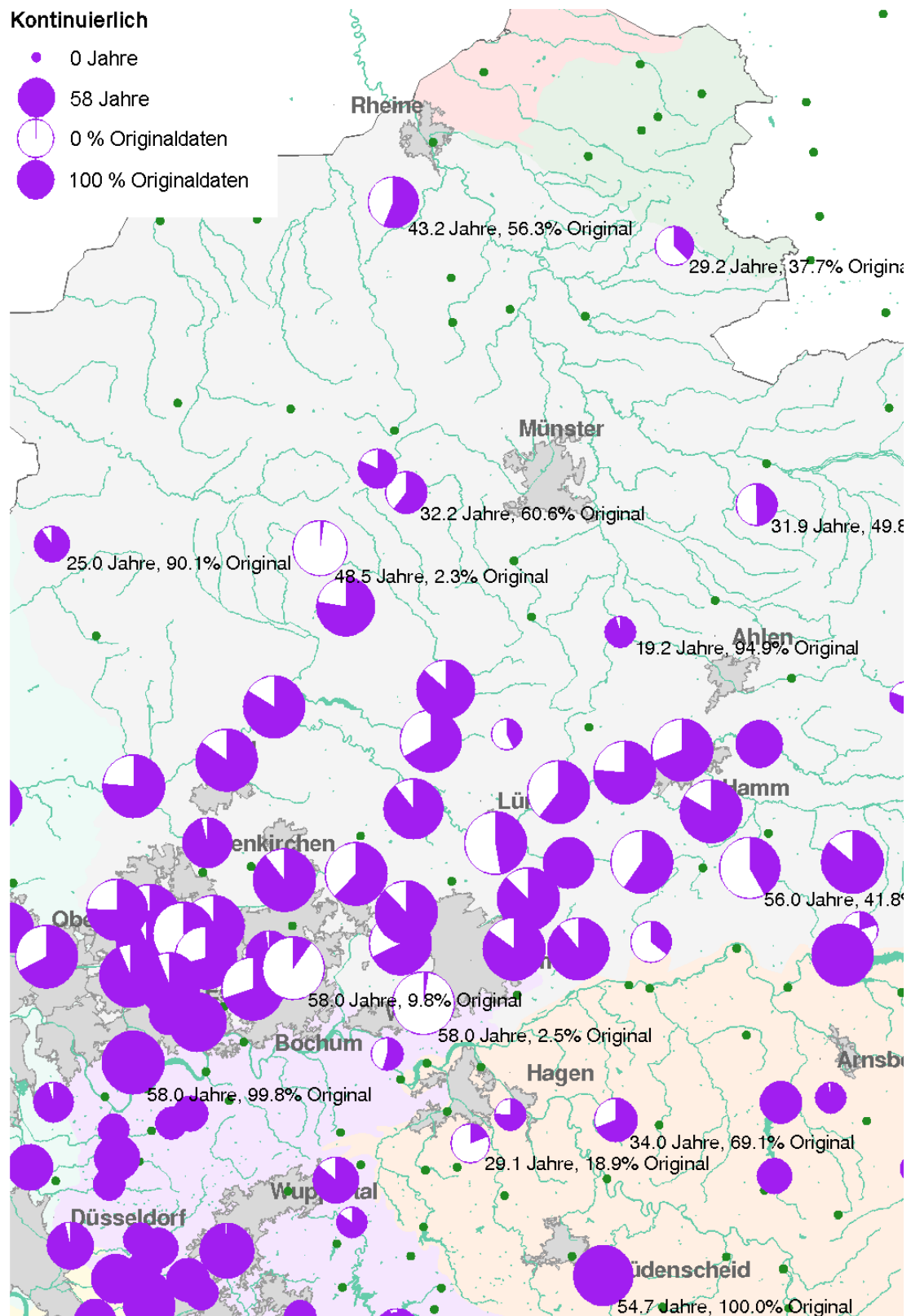


Abbildung 5.4: Zeitlicher Anteil der Originaldaten in den Starkregenereignissen: Kontinuierliche Zeitreihen, Beisp. Dortmund

6 Einteilung der Zeitfenster für die Statistik

Es sollte flächendeckend/regional untersucht werden, ob in den Niederschlagsdaten Trends festzustellen sind. Grundsätzlich sollen bei Trenduntersuchungen möglichst lange Zeitreihen betrachtet werden, so dass diese Untersuchungen wenn möglich für den Gesamtzeitraum 1950-2008 durchgeführt werden sollten.

Es ist aber bei langen Zeiträumen möglich, dass sich innerhalb des Untersuchungszeitraumes eine Trendumkehr einstellt. Dies ist z. B. bei den mittleren Jahrestemperaturen festzustellen. In den Jahren 1950-1979 war der Trend negativ, in den Jahren 1979-2008 positiv ($\leftrightarrow$ Abb. 6.1).

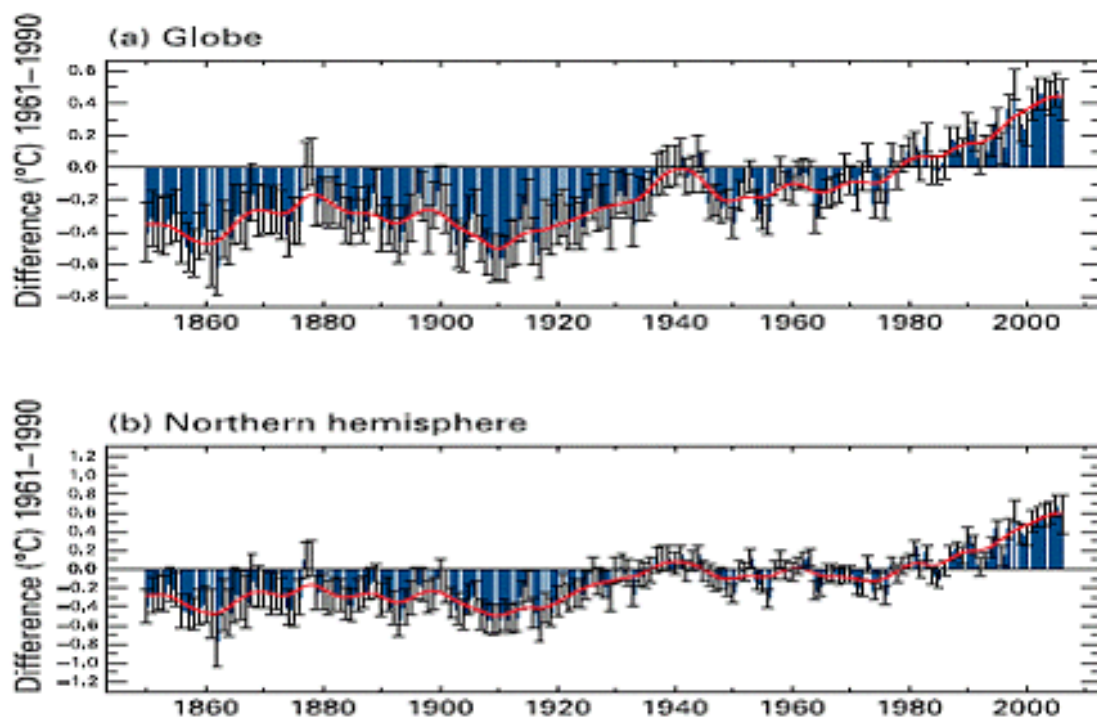


Abbildung 6.1: Vergleich der mittleren Jahrestemperatur, global (a) und für die nördliche Halbkugel (b), im Vergleich zum langjährigen Mittel zwischen 1961-1990 [41]

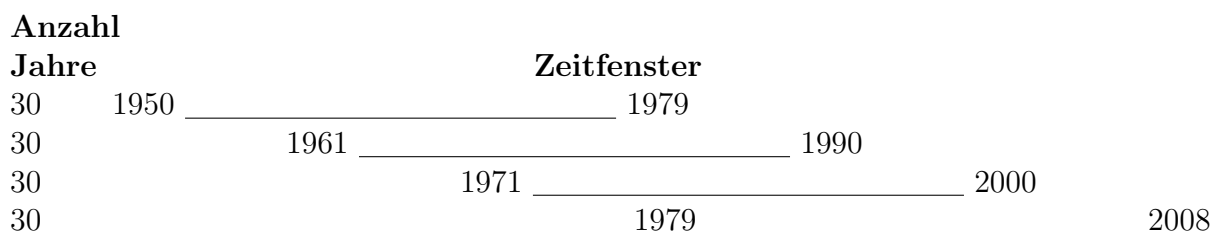
Sehr lange Zeitfenster größer 54 Jahre liegen nur an 31,4 % der Stationen und im Wesentlichen räumlich konzentriert auf die Emscher-Lippe-Region und die Eifel vor.

Es ist daher sinnvoll, auch kürzere, sich überschneidende Zeiträume zu betrachten. Für die Untersuchungen wurde deshalb eine Einteilung der Zeitbereiche in „gleitende“ und „wachsende“ Zeitfenster vorgenommen, die in den folgenden Abschnitten ($\leftrightarrow$ Kap. 6.1 und 6.2) näher erklärt wird.

6.1 Gleitende Zeitfenster

Bei den gleitenden Zeitfenstern wurden immer 30 Jahre ausgewertet. Neben der jüngeren Hälfte des Gesamtzeitraums (1979-2008) wurden drei weitere 30-Jahre-Zeitfenster untersucht: 1950-1979, 1961-1990 (Klimanormalperiode der WMO) und 1971-2000 (eine häufig zitierte aktuellere Periode).

Abbildung 6.2: Gleitende Zeitfenster



Für die Untersuchungen in den gleitenden 30-Jahre-Zeitfenstern wurden alle die Stationen herangezogen, für die in dem entsprechenden Zeitfenster mindestens 20 zusammenhängende Datenjahre vorlagen. Bei der Untersuchung der Regenhöhen konnten nur die Reihen verwendet werden, die in mindestens drei aufeinanderfolgenden Zeitfenstern ausreichend lange vorlagen.

6.2 Wachsende Zeitfenster

Bei den wachsenden Zeitfenstern wurden die Regenhöhen des Gesamtzeitraumes (1950-2008) und der sich in 5-Jahresschritten auf die Jetzt-Zeit konzentrierenden Zeitfenster in chronologischer Reihenfolge ihrer Anfangsjahre betrachtet. Die Anzahl der ausgewerteten Jahre reduziert sich, beträgt längstens 59, mindestens aber 20 Jahre. Die jüngere Vergangenheit ist immer dabei. Die schrittweise Verkürzung des Gesamtzeitraumes bis hin zur jüngeren Vergangenheit ($\leftrightarrow$ Abb. 6.3) bildet demnach die Entwicklung der Niederschlagsdaten ab, wenn die länger zurückliegenden Daten sukzessive nicht berücksichtigt werden. Im Umkehrschluss kann abgeleitet werden, wie sich die Ergebnisse ändern würden, wenn man an einer Station bzw. in einer Region den Gesamtzeitraum (1950-2008) zur Verfügung

hätte. Je länger der Auswertezeitraum ist, desto mehr nähert man sich der Grundgesamtheit, wenngleich auch 59 Jahre noch sehr weit davon entfernt sind.

Abbildung 6.3: Wachsende Zeitfenster

Anzahl Jahre	Zeitfenster	
59	1950	2008
55	1954	2008
50	1959	2008
45	1964	2008
40	1969	2008
35	1974	2008
30	1979	2008
25	1984	2008
20	1989	2008

6.3 Verwendung der gleitenden und wachsenden Fenster

Für die folgenden Auswertungen wurden **gleitende Fenster** verwendet:

- Jahressummen
- Halbjahressummen
- Monatssummen
- Grenzwertüberschreitungen (Anzahl Tage pro Jahr $N > 10 \text{ mm/Tag}$, $N > 20 \text{ mm/Tag}$, $N > 30 \text{ mm/Tag}$)
- Grenzwertunterschreitung (Anzahl Tage pro Jahr $\leq 0,1 \text{ mm/Tag}$)
- Entwicklung der partiellen Serien

Die Überprüfung der Belastbarkeit wurde allerdings nicht für alle Hauptwerte, sondern nur für die Jahresniederschlagssummen und beide Testverfahren (Mann-Kendall und Lineare Regression) durchgeführt. Es wurden sowohl kontinuierliche als auch Tagessummenzeitreihen betrachtet.

Für die Entwicklung der statistischen Regenhöhen nach ATV-A 121 [7] wurden **gleitende Zeitfenster** und **wachsende Zeitfenster** ausgewertet.

7 Statistische Verfahren

Alle Auswertungen wurden auf einen Trend untersucht. Die Trends wurden durch Lineare Regression ermittelt und durch den t-Test auf Signifikanz geprüft. Dies ist aber nur für normalverteilte Prüfgrößen zulässig. Zum anderen wurde der Mann-Kendall-Test eingesetzt, der jedoch keine Aussage über die Linearität und die Größe des Trends macht.

7.1 Mann-Kendall-Test

Der Mann-Kendall-Test ist ein verteilungsunabhängiger, (d. h. keine bestimmte Häufigkeitsverteilung voraussetzender) Trendtest. Er liefert ein Signifikanzmaß für einen Trend, unabhängig ob dieser linear oder nicht linear ist. Als Ergebnis erhält man eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Trend in den Daten enthalten ist.

Es wird die Summe der Differenzen aller Datenpaare gebildet:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_k)$$

mit

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

Ein positives Ergebnis für S weist also einen steigenden, ein negativer Wert einen fallenden Trend aus.

S ist standard-normalverteilt, hat einen Mittelwert von 0 und eine Varianz gemäß der folgenden Formel.

$$\operatorname{Var}[S] = \frac{\left\{ n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5) \right\}}{18}$$

p ist die Anzahl Gruppen gleicher („tied“) Werte. „Gleiche“ Werte werden bei Niederschlagssummen auf 1 mm und bei Starkregenserien auf 0,1 mm festgelegt.

Mit diesen Voraussetzungen kann geprüft werden, ob ein positiver oder negativer Trend signifikant von 0 abweicht. Z ist eine Zufallsgröße und standard-normalverteilt. Z wird auf Signifikanz α mit Hilfe der Standard-Normalverteilung getestet

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[Var(S)]^{1/2}} & , \quad if \ S > 0 \\ 0 & , \quad if \ S = 0 \\ \frac{S+1}{[Var(S)]^{1/2}} & , \quad if \ S < 0 \end{cases}$$

Der theoretisch maximal mögliche Wert für S trifft für folgenden Fall ein: $x_1 < x_2 < \dots < x_n$. Dieser Wert D berechnet sich nach folgender Formel:

$$D = \left[\frac{1}{2}n(n-1) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1) \right]^{1/2} \left[\frac{1}{2}n(n-1) \right]^{1/2}$$

Der Wert τ (Mann-Kendall-Tau) beschreibt den Anteil der tatsächlich beobachteten wachsenden bzw. fallenden Wertepaare (S) im Vergleich zu den absolut möglichen (D).

$$\tau = \frac{S}{D}$$

Das Mann-Kendall- τ bewegt sich also in den Grenzen $-1 \leq \tau \leq 1$.

7.2 Lineare Regression/t-Test

Die Trendanalyse mit Hilfe der Linearen Regression/t-Test setzt eine Normalverteilung der Stichprobe voraus.

Vermutet wird ein ungefährender linearer Zusammenhang:

$$y_i = a + bx_i + e_i$$

Das Residuum e_i gibt die Differenz zwischen der Regressionsgeraden $a + bx_i$ und den Messwerten y_i an.

Mit der Methode der kleinsten Quadrate minimiert man die summierten Quadrate der Residuen und erhält die Regressionskoeffizienten

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{SS_{xy}}{SS_{xx}} = Trend$$

und

$$a = \bar{y} - b\bar{x}.$$

- Der t-Test ist ein Hypothesentest unter Verwendung der t-Verteilung.

- Ob der berechnete lineare *Trend* b der Stichprobe signifikant von Null abweicht, wird durch Vergleich der Prüfgröße t mit dem vertafelten Wert $t_{n,\alpha}$ überprüft:

$$t = \frac{b}{c} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}$$

$t \leq t_{n,\alpha} : \text{nichtsignifikanter Trend}$

$t > t_{n,\alpha} : \text{signifikanter Trend}$

- Das Ergebnis ist also abhängig vom Stichprobenumfang n und der Irrtumswahrscheinlichkeit α
- Getestet wird die Hypothese:

„Die Stichprobe hat keinen linearen Trend.“

- Wird die Hypothese bei $\alpha = 20\%$ abgelehnt, kann diese Aussage in jedem fünften Fall falsch sein.
- Wird die Hypothese bei $\alpha = 1\%$ abgelehnt, kann diese Aussage in jedem 100sten Fall falsch sein.

Wenn der Trend auf dem 1%-Niveau nicht widerlegt werden kann, ist er also wahrscheinlicher als wenn er nur für $\alpha = 20\%$ nicht widerlegt werden kann.

7.3 Erläuterung zur Ergebnisdarstellung

- Bilanzwerte (Jahres- und Halbjahressummen) werden aufgrund ihrer Normalverteilung mit Hilfe der linearen Regression und Signifikanzniveau (t-Test) dargestellt, zusätzlich erfolgt auch die Darstellung mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests
- Bei der Darstellung der linearen Regression erfolgt die Darstellung der Signifikanz (t-Test) nur bei Normalverteilung.
- Die Ergebnisse der Kennwerte (Anzahl Tage $\leq 0,1$ mm/Tag, > 10 mm/Tag, > 20 mm/Tag, > 30 mm/Tag) und die der Entwicklung der Serien und Regenhöhen werden mit Hilfe von Mann-Kendall dargestellt, auch erfolgt die Darstellung der linearen Regression, jedoch ohne Ausweisung der Signifikanz (da nicht normalverteilt).
- Zusätzlich für beide Auswertungen erfolgt eine Einteilung der Häufigkeiten (Anzahl) in Klassen durch Darstellung in Histogrammen (Signifikanz immer $\geq 80\%$).

7.4 Prüfung der Normalverteilung der Hauptwerte mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests

7.4.1 Allgemeines Vorgehen

Während der Mann-Kendall-Test ein verteilungsunabhängiger Trendtest ist, setzt die Überprüfung der Signifikanz mit Hilfe des t-Tests im Anschluss an die Lineare Regression eine Normalverteilung der Stichprobe voraus. Daher ist zunächst die vorliegende Stichprobe der Hauptwerte (Jahres-, Halbjahres- und Monatsniederschlagssummen) auf ihre Normalverteilung zu prüfen. Die Überprüfung erfolgt mit Hilfe eines Anpassungstests.

Anpassungstest sind Tests, welche die H_0 -Hypothese nachprüfen, ob eine betrachtete Zufallsgröße X einem vorgegebenen Verteilungsgesetz $F_0(x)$ genügt ([5]). Für die Überprüfung der H_0 -Hypothese, ob die vorliegenden Stichproben einer Normalverteilung entsprechen, wird der Chi-Quadrat-Test gewählt, der grundsätzlich für den Nachweis jedes beliebigen Verteilungsgesetzes geeignet ist.

Das Vorgehen beim Chi-Quadrat-Test (χ^2 -Test) kann der einschlägigen Literatur entnommen werden. In den nachfolgenden Untersuchungen wird die tabellarische Auswertung durchgeführt, wie sie bei Plate ([32]) beschrieben wird. Diese wird in Tabelle 7.1 exemplarisch für die Überprüfung der Jahresniederschlagssummen an einer Auswahl an Niederschlagsstationen in der Region Ruhr-Emscher angegeben.

Im vorliegenden Beispiel gilt:

$$\chi^2\text{-Test} = 10,8 < 16,9 = \chi^2_{\alpha=0,05;m=9}$$

Für die Jahresniederschlagssummen an einer Auswahl an Niederschlagsstationen in der Region Ruhr-Emscher kann bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ die H_0 -Hypothese, dass die vorliegende Stichprobe einer Normalverteilung entspricht, somit nicht widerlegt werden.

Um den Stichprobenumfang zu vergrößern, wurden bei den durchgeführten Überprüfungen der Normalverteilung die Werte benachbarter Stationen zusammengefasst, wenn folgende Randbedingungen erfüllt sind:

- Die Stationen sind benachbart und gehören einer gleichen Landschaftsregion (z. B. Eifel oder Münsterland) an.
- An den Stationen liegen ähnliche Mittelwerte der Jahresniederschlagssummen vor. Die mittleren Jahresniederschläge dürfen nicht um mehr als 5 % voneinander abweichen, da durch die Zusammenfassung von Zeitreihen mit stark voneinander abweichenden Mittelwerten ansonsten mehrgipfelige Verteilungen entstehen können. Im vorliegenden Beispiel wurden sieben benachbarte Stationen der Ruhr-Emscher-Region mit mittleren Jahresniederschlägen zwischen 790 und 824 mm/Jahr ($\Delta N = 34 \text{ mm} < 5\%$) zusammengefasst.
- Es wurden nur Jahre berücksichtigt, in denen Werte an allen Stationen vorlagen.

7.4 Prüfung der Normalverteilung der Hauptwerte mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests

Tabelle 7.1: Tabellarische Auswertung des χ^2 -Tests (in Anlehnung an Plate, 1993 [32]) am Beispiel für die Überprüfung der Jahresniederschlagssummen an einer Auswahl an Niederschlagsstationen in der Region Ruhr/Emscher)

Tabellarische Auswertung des Chi-Quadrat-Tests								
Klasse j	Klassengrenze	$\mathbf{x}_j$	$\mathbf{n}_j$	$(X_j - x_Q)/s_x$	$\Phi(\eta)$	$\sum f_j = n \cdot \Phi(\eta)$	$\mathbf{f}_j$	$(f_j - n_j)^2 / f_j$
11	1160	1100	14	2,495	0,99	360,36	14,56	0,022
	1040			1,644	0,95	345,8		
10	980	1010	31	1,218	0,89	323,96	21,84	3,842
	920			0,793	0,79	287,56		
9	860	890	48	0,368	0,64	232,96	54,6	0,798
	800			-0,058	0,48	174,72		
8	740	770	56	-0,483	0,32	116,48	58,24	0,086
	680			-0,908	0,18	65,52		
7	620	650	23	-1,334	0,09	32,76	32,76	2,908
	560			-1,759	0,04	14,56		
6	500	530	12	-2,185	0,01	3,64	10,92	0,107
	440			-2,61	0	0		
Mittelwert x_Q		808					χ^2 -Test	10,792
Anzahl n		364						
Varianz s_x^2		19.895						
Standardabweichung s_x		141						
Freiheitsgrade m		9						

7.4.2 Beschreibung der Variablen und Berechnungsschritte

Mittelwert x_Q	Mittelwert aller Werte der Stichprobe
Anzahl n	Anzahl aller Werte der Stichprobe
Varianz s_x^2	Varianz der Stichprobe
Standardabweichung s_x	Standardabweichung der Stichprobe
Freiheitsgrade m	Die Freiheitsgrade m ergeben sich aus der Anzahl der Klassen j_{max} minus Anzahl der Parameter r minus 1: $m = j_{max} - r - 1$; hier: $m = 11 - 1 - 1 = 9$.
Klasse j	Die Daten sind in Klassen einzuteilen. Die Klassenbreite ist grundsätzlich beliebig, und sie muss auch nicht für jede Klasse gleich groß sein. Die Anzahl der Werte pro Klasse sollte aber mindestens 5 betragen.
Klassengrenze	Die Klassengrenzen ergeben sich aus der Wahl der Klassen.
Klassenmitte X_j	Mittelwert aus der oberen und unteren Klassengrenze der Klasse j
n_j	Anzahl der Werte pro Klasse j
$\frac{X_j - x_Q}{s_x}$	Werte der standardisierten Normalverteilung an den Klassengrenzen (Eingangswert in tabellarisch vorliegende Normalverteilung)
$\Phi(\eta)$	Unterschreitungswahrscheinlichkeit an der Klassengrenze bei einer angenommenen Normalverteilung (zu $\frac{X_j - x_Q}{s_x}$ korrespondierender Wert aus Tabelle)
$\sum f_j = n \cdot \Phi(\eta)$	Theoretische Summenhäufigkeit an der Klassengrenze bei einer angenommenen Normalverteilung
f_j	Häufigkeit (Anzahl der Werte) in einer Klasse bei einer angenommenen Normalverteilung; ergibt sich aus der Differenz der theoretischen Summenhäufigkeit an der oberen und unteren Klassengrenze
$\frac{(f_j - n_j)^2}{f_j}$	χ^2 -Werte als Maß für die Abweichung der angenommenen von der tatsächlichen Verteilung
χ^2 -Test	Summe der χ^2 -Werte. Dies ist die Testgröße, die mit dem Tabellenwert für $\chi_{a,m}^2$ verglichen werden muss. Ist χ^2 -Test $< \chi_{a,m}^2$, so kann die angenommene Verteilung (hier: Normalverteilung) nicht widerlegt werden.
Signifikanzniveau α	Das Signifikanzniveau gibt an, inwieweit die Unterschiede zwischen der Stichprobe und der angenommenen Verteilung signifikant (und nicht zufällig) sind.
$\chi_{a,m}^2$	Wert der χ^2 -Verteilung in Abhängigkeit vom Signifikanzniveau α und der Anzahl der Freiheitsgrade m ; Werte liegen in Tabellen vor.

7.4.3 Untersuchte Zeitreihen und Ergebnisse

Die Untersuchung auf Normalverteilung der Stichproben wurde für die Hauptwerte (Jahres-, Halbjahres- und Monatsniederschlagssummen) durchgeführt. Für die Untersuchung der Jahresniederschlagssummen wurden in mehreren Regionen Nordrhein-Westfalens stichprobenartig Stationen ausgewählt. Benachbarte Stationen wurden zur Vergrößerung des Stichprobenumfanges beim Chi-Quadrat-Test zusammengefasst ($\hookrightarrow$ Kap. 7.4.1). Die Untersuchung der Halbjahres- und Monatswerte wurde exemplarisch in den Regionen Ruhr/Emscher (Halbjahres- und Monatssummen) und Eifel (Halbjahressummen) durchgeführt. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde vereinbart, weitergehende Untersuchungen zur Normalverteilung nur dann durchzuführen, wenn lokal einzelne Zeitreihen in den Statistiken herausstechen und ein von den folgenden Ergebnissen abweichendes Verhalten der Niederschlagssummen erwartet wird.

7.4.3.1 Prüfung der Normalverteilung der Jahressummen

Für folgende Stationen wurde die Normalverteilung der Jahresniederschlagssummen mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests überprüft. Die Werte in Klammern geben die mittlere jährliche Niederschlagssumme der Gruppe bzw. der Station für die berücksichtigten Jahre an.

Ruhr/Emscher I (808):

Bochum DMT (824)
Bottrop Boye (802)
Bottrop Eigen (824)
Gelsenkirchen-Bismarck (798)
Gelsenkirchen-Hessler (817)
Gladbeck-Hahnenbach (790)
Wattenscheid (802)

Münsterland (815):

Dülmen (788)
Gronau (825)
Rorup (836)
Westerkappeln (810)

Eifel II (1213):

Monschau DWD (1235)
Monschau Kalterherberg DWD (1242)
Hellenthal Udenbreth (1162)

Rheinebene I (648):

Erfstadt Bliesheim DWD (638)
Bonn DWD (647)

Ruhr/Emscher II (853):

Essen-Hesselbruch (860)
Essen-Stoppenberg (852)
Gelsenkirchen-Altstadt (847)

Eifel I (792):

Schleiden Gemünd DWD (798)
Heimbach Schwammenauel DWD (807)
Heimbach Hergarten DWD (773)

Eifel III (1038):

Hellenthal Hollerath DWD (1044)
Dahlem Kronenburg DWD (1033)

Rheinebene II (802):

Leverkusen Hitdorf DWD (794)
Siegburg DWD (804)

Alfter Volmershoven DWD (658)

Köln Wahn Flugwetterwarte DWD (810)

Süderbergland I (1198):

Listertalsperre (1182)

Versetalsperre (1195)

Olpe KA (1216)

Süderbergland II (1350):

Hückeswagen (Bevertalsp.) DWD (1339)

Radevormwald DWD (1350)

Kierspe Höckinghausen DWD (1348)

Remscheid (Eschbachtal) DWD (1356)

Wipperfürth-Gardeweg DWD (1357)

Süderbergland III (1255):

Lindlar Oberlichtenhagen DWD (1240)

AggertalsperreW (1259)

Kürten DWD (1266)

Es wurde somit für 39 Stationen die Normalverteilung der Jahresniederschlagssummen überprüft. Die Ergebnisse des Chi-Quadrat-Tests in den einzelnen Regionen werden in der Tabelle 7.4 zusammengefasst.

7.4.3.2 Prüfung der Normalverteilung der Halbjahressummen

Für folgende Stationen wurde die Normalverteilung der Halbjahresniederschlagssummen mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests überprüft. Die Werte in Klammern geben die mittlere Niederschlagssumme pro Winter- bzw. Sommerhalbjahr der Gruppe bzw. der Station für die berücksichtigten Jahre an.

Ruhr/Emscher Winter (407):

Essen-Hesselbruch (416)

Essen-Stoppenberg (405)

Gelsenkirchen-Altstadt (400)

Ruhr/Emscher Sommer (447):

Essen-Hesselbruch (446)

Essen-Stoppenberg (451)

Gelsenkirchen-Altstadt (445)

Eifel Winter (664):

Monschau DWD (678)

Monschau Kalterherberg DWD (685)

Hellenthal Udenbreth (629)

Eifel Sommer (556):

Monschau DWD (564)

Monschau Kalterherberg DWD (566)

Hellenthal Udenbreth (539)

Es wurde somit für 6 Stationen die Normalverteilung der Halbjahresniederschlagssummen jeweils für das Winter- und Sommerhalbjahr überprüft. Die Ergebnisse des Chi-Quadrat-Tests werden in Tabelle 7.6 zusammengefasst.

7.4.3.3 Prüfung der Normalverteilung der Monatssummen

Für folgende Stationen wurde die Normalverteilung der Monatsniederschlagssummen mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests überprüft. Die Werte in Klammern geben die mittlere Nie-

7.4 Prüfung der Normalverteilung der Hauptwerte mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests

Tabelle 7.4: Ergebnisse der Überprüfung der Normalverteilung der Jahresniederschlagssummen

Normalverteilung der Jahresniederschlagssummen							
Region	Anzahl Stationen	Stichprobe	Mittelwert	Freiheitsgrade	χ^2 -Test	$\chi^2_{\alpha=0,05;m}$	H_0 -Hypothese
Emscher/Ruhr I	7	364	808	9	10,79	16,9	Nicht abgelehnt
Emscher/Ruhr II	3	156	853	7	7,61	14,1	Nicht abgelehnt
Münsterland	4	184	815	7	3,62	14,1	Nicht abgelehnt
Eifel I	3	132	792	7	2,85	14,1	Nicht abgelehnt
Eifel II	3	153	1213	13	14,8	22,4	Nicht abgelehnt
Eifel III	2	102	1038	9	7,96	16,9	Nicht abgelehnt
Rheinebene I	3	138	648	6	6,13	12,6	Nicht abgelehnt
Rheinebene II	3	162	802	7	11,04	14,1	Nicht abgelehnt
Süderbergland I	3	162	1198	12	21,06	21	Grenze
Süderbergland II	5	265	1350	13	35,4	22,4	Abgelehnt
Süderbergland III	3	147	1255	12	26,87	21	Abgelehnt

Tabelle 7.6: Ergebnisse der Überprüfung der Normalverteilung der Halbjahresniederschlagssummen

Normalverteilung der Halbjahresniederschlagssummen							
Region	Anzahl Stationen	Stichprobe	Mittelwert	Freiheitsgrade	χ^2 -Test	$\chi^2_{\alpha=0,05;m}$	H_0 -Hypothese
Emscher/Ruhr Winter	3	168	407	8	4,86	15,5	Nicht abgelehnt
Emscher/Ruhr Sommer	3	171	447	9	5,14	16,9	Nicht abgelehnt
Eifel Winter	3	159	664	11	12,14	19,7	Nicht abgelehnt
Eifel Sommer	3	159	556	8	5,86	15,5	Nicht abgelehnt

derschlagssumme pro Monat der Gruppe bzw. der Station für die berücksichtigten Jahre an. Es wurden jeweils die Monate März, Juni, September und Dezember (je ein Monat pro Quartal) untersucht.

Ruhr/Emscher März (64):

Essen-Hesselbruch (65)

Essen-Stoppenberg (65)

Gelsenkirchen-Altstadt (64)

Ruhr/Emscher Juni (79):

Essen-Hesselbruch (80)

Essen-Stoppenberg (80)

Gelsenkirchen-Altstadt (76)

Ruhr/Emscher September (71):

Essen-Hesselbruch (69)

Essen-Stoppenberg (72)

Gelsenkirchen-Altstadt (72)

Ruhr/Emscher Dezember (80):

Essen-Hesselbruch (82)

Essen-Stoppenberg (80)

Gelsenkirchen-Altstadt (80)

Es wurde somit für 3 Stationen die Normalverteilung der Monatsniederschlagssummen jeweils für einen Monat pro Quartal überprüft. Die Ergebnisse des Chi-Quadrat-Tests werden in Tabelle 7.8 zusammengefasst.

Tabelle 7.8: Ergebnisse der Überprüfung der Normalverteilung der Monatsniederschlagssummen

Normalverteilung der Monatsniederschlagssummen							
Region	Anzahl Stationen	Stichprobe	Mittelwert	Freiheitsgrade	χ^2 -Test	$\chi^2_{\alpha=0,05;m}$	H_0 -Hypothese
Emscher/Ruhr März	3	168	64	7	24,23	14,1	Abgelehnt
Emscher/Ruhr Juni	3	168	79	8	4,29	15,5	Nicht abgelehnt
Emscher/Ruhr September	3	171	71	6	45,71	12,6	Abgelehnt
Emscher/Ruhr Dezember	3	174	80	7	27,19	14,1	Abgelehnt

7.4.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Prüfungen durch den Chi-Quadrat-Test zeigen, dass man bei den Jahres- und Halbjahresniederschlagssummen grundsätzlich von normalverteilten Stichproben ausgehen kann, auch wenn die Stichproben im Süderbergland davon abweichen. Sollten bei den Ergebnisauswertungen in dieser Region signifikant andere Ergebnisse, z. B. gegenüber den Signifikanzaussagen des Mann-Kendall-Tests, herauskommen, so sind die aus dem Chi-Quadrat-Test gewonnenen Erkenntnisse bei der Interpretation der Trendaussagen zu berücksichtigen.

In Abbildung 7.1 wird exemplarisch die Niederschlagsverteilung der Jahresniederschlagssummen dargestellt, die beim Chi-Quadrat-Test für die Ruhr-Emscher-Region I berücksichtigt worden ist. Die Abbildung zeigt deutlich, dass sich die reale Stichprobe (blau) hinreichend gut an eine normalverteilte Stichprobe (violett) anpasst. Die Verteilungen zu allen bei den Jahres- und Halbjahresniederschlagssummen untersuchten Regionen können dem Anhang B entnommen werden.

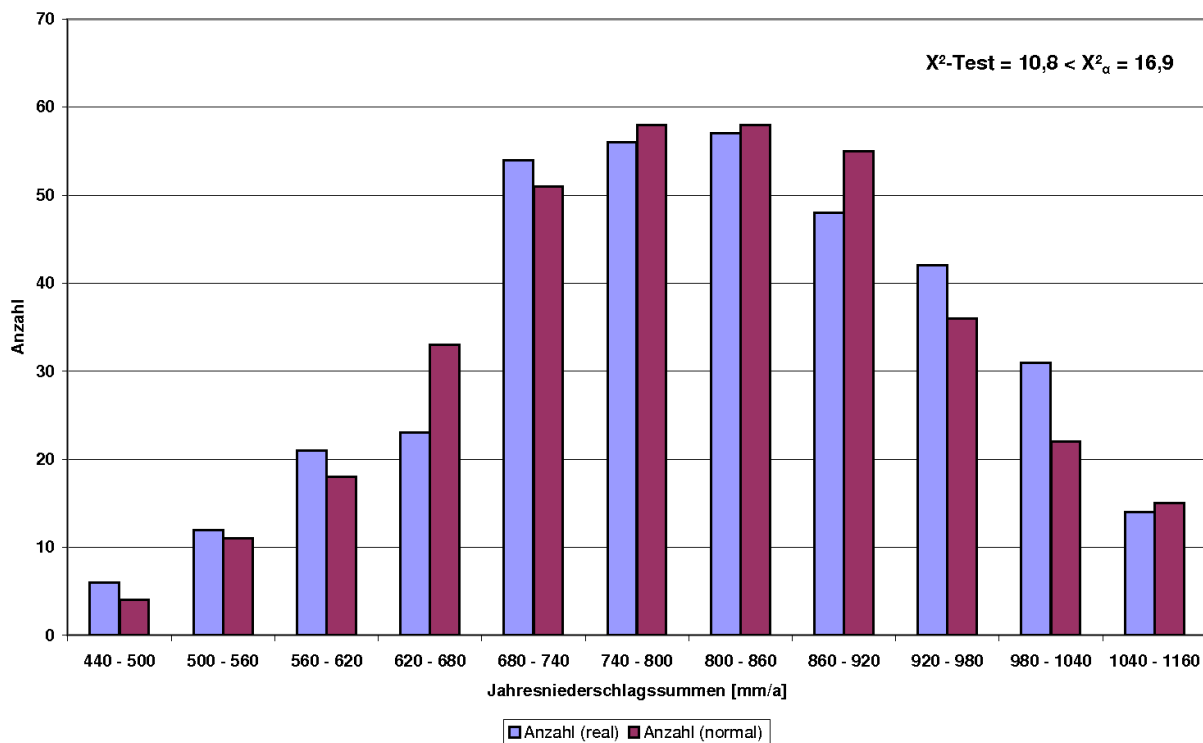


Abbildung 7.1: Vergleich der realen Niederschlagsverteilung gegenüber einer normalverteilten Stichprobe am Beispiel der Jahresniederschlagssummen in der Ruhr-Emscher-Region I

Bei den Monatsniederschlagssummen erscheinen die Stichproben dagegen in der Regel nicht normalverteilt zu sein. Exemplarisch wird in Abbildung 7.2 die Verteilung der Nie-

7 Statistische Verfahren

erschlagssummen für den Monat März in der Ruhr-Emscher-Region dargestellt. Die Abbildungen zu den Monaten Juni, September und Dezember sind ebenfalls im Anhang B zusammengefasst.

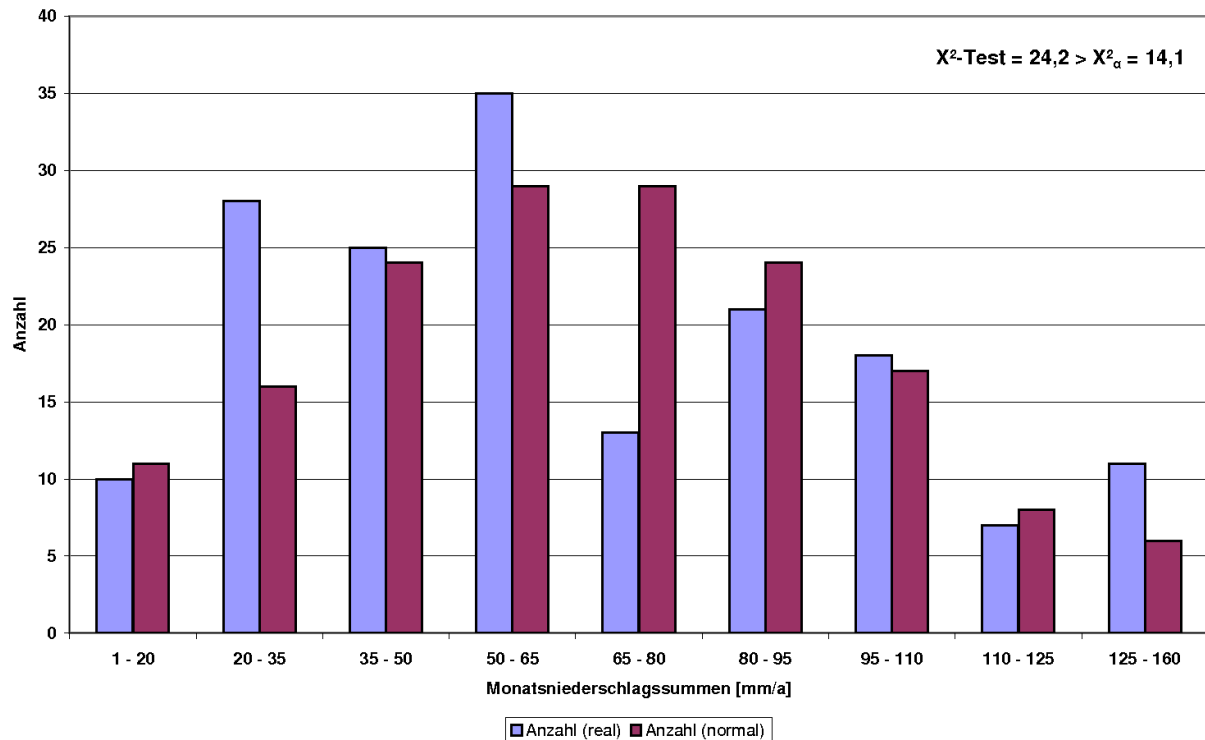


Abbildung 7.2: Vergleich der realen Niederschlagsverteilung gegenüber einer normalverteilten Stichprobe am Beispiel der Monatsniederschlagssummen für den Monat März in der Ruhr-Emscher-Region

8 Starkregenanalyse

Die Starkregenanalysen wurden einheitlich in AQUAZIS durchgeführt. Sie richten sich nach der ATV-A 121 [7]. Die maßgebenden Zeitreihen für die Statistik waren bei den

- kontinuierlichen Zeitreihen: Niederschlag, kontinuierlich, Zeitreihenfolge
- Tagessummenzeitreihen: Niederschlag, Tagessummen, original

Bei der Erzeugung der Serien wurden Wasserwirtschaftsjahre (WWJ) zu Grunde gelegt. Für 5 bis 10 Stationen wurden Auswertungen auch mit Kalenderjahren (KJ) erstellt und denen der Wasserwirtschaftsjahre gegenübergestellt. Für die partielle Serie wurde die e-fache Anzahl Ereignisse (2,71) der Stationsjahre gewählt.

8.1 Ermittlung der maßgebenden Regenhöhen für die Niederschlagsstatistik nach ATV-A 121 durch gleitende Fenster auf Basis von 1-Minuten-Zeitschritten

8.1.1 Veranlassung

Das ATV-Arbeitsblatt A 121 „Niederschlag – Starkregenauswertung nach Wiederkehrzeit und Dauer“ [7] sieht vor, bei der Ermittlung der Regenhöhen der Niederschlagsereignisse, die in die partiellen Serien für die Niederschlagsstatistik eingehen sollen, geblockte Grunddaten mit äquidistanten Zeitschritten zu verwenden. Gemäß A 121 sind die Niederschlagsmessdaten für Dauerstufen zwischen $D=5$ Minuten und $D=90$ Minuten auf äquidistante 5-Minuten-Intervalle zu blocken, für die Dauerstufen zwischen $D=2$ Stunden und $D=18$ Stunden äquidistante Stundenwerte und für die Dauerstufen zwischen $D=1$ Tag und $D=6$ Tage äquidistante Tagessummen zu verwenden.

Bei der Verwendung von äquidistanten Grunddaten entsteht bei der Bildung der Regenhöhen pro Dauerstufe ein systematischer Fehler, da sich natürliche Regenereignisse und ihre Spitzenintensitäten nicht an äquidistante Zeitschritte halten. Die maximale Spitzenintensität eines Regens, die z. B. zwischen 12:02 und 12:07 Uhr auftritt, würde auf die beiden äquidistanten Zeitschritte 12:00 bis 12:05 Uhr und 12:05 bis 12:10 Uhr aufgeteilt. Anschließend würde die größere der beiden Regenhöhen mit einem konstanten empirischen Faktor, der Korrektur nach Draschoff (hier 1,14), korrigiert.

Ereignisse, die aus einem Intervall gebildet werden, werden mit dem Faktor von 1,14 multipliziert, bei zwei Intervallen wird der Faktor von 1,07, bei drei Intervallen von 1,04, bei vier und fünf Intervallen von 1,03, bei 6 Intervallen von 1,02 und bei mehr als sechs Intervallen der Faktor 1 zu Grunde gelegt.

Als Folge ergibt sich eine Regenhöhe, die im Mittel über alle berücksichtigten Ereignisse zwar eine bessere Anpassung an die tatsächlich aufgetretenen maximalen Regenhöhen ergibt, im Einzelfall aber immer noch signifikant von der tatsächlich aufgetretenen maximalen Regenhöhe abweichen kann.

Neue Messtechniken mit zeitlichen Auflösungen von einer Minute und leistungsfähige Computer machen eine Blockung und damit eine Vereinfachung der Messdaten mit anschließender Korrektur überflüssig. Mit Hilfe von gleitenden Fenstern über die zeitlich hoch aufgelösten Messdaten können die tatsächlich aufgetretenen maximalen Regenhöhen minutengenau bestimmt werden.

In Rahmen von ExUS wurde die Ermittlung der maßgebenden Regenhöhen durch gleitende Fenster auf Basis von 1-Minuten-Zeitschritten für die Dauerstufen $D < 1$ Tag in die Niederschlagsstatistik in AQUAZIS implementiert. Die Blockung der Messdaten auf 5-Minuten-Werte und Stundenwerte entfiel somit. Für die Dauerstufen $D \geq 1$ Tag wurden weiterhin äquidistante Tagessummen mit anschließender Korrektur nach Draschhoff verwendet.

8.1.2 Einfluss der Blockbildung auf die Regenhöhen der Niederschlagsereignisse der partiellen Serie

Um den Einfluss der Blockbildung auf die Regenhöhen der Niederschlagsereignisse der partiellen Serie bewerten zu können, wurden 53 über Nordrhein-Westfalen verteilte Niederschlagsstationen mit kontinuierlichen Messdaten ausgewählt. Für die jeweils fünf größten Niederschlagsereignisse der partiellen Serie für die Dauerstufe $D = 5$ Minuten wurden nach folgenden drei Verfahren die Regenhöhen bestimmt:

- Regenhöhe auf Basis äquidistanter 5-Minuten-Zeitschritte ohne Korrekturfaktor
- Regenhöhe auf Basis äquidistanter 5-Minuten-Zeitschritte mit Korrekturfaktor (1,14)
- Regenhöhe auf Basis äquidistanter 1-Minuten-Zeitschritte ohne Korrekturfaktor

Die Regenhöhen auf Basis äquidistanter 1-Minuten-Zeitschritte ohne Korrekturfaktor wurden für die Auswahl der fünf größten Niederschlagsereignisse herangezogen und als Basiswert für den Vergleich mit den anderen beiden Verfahren zu Grunde gelegt.

Die Regenhöhen auf Basis äquidistanter 5-Minuten-Zeitschritte ohne Korrekturfaktor können maximal den Wert der Regenhöhe auf Basis äquidistanter 1-Minuten-Zeitschritte ohne Korrekturfaktor annehmen. Wie zuvor im Kapitel 8.1.1 beschrieben, liegt die maximale Niederschlagssumme aber meistens nicht genau im Zeitfenster der äquidistanten Intervalle, sondern teilt sich auf zwei nacheinander folgende äquidistante Intervalle auf. Als Folge würde sich bei einer sehr großen Stichprobe in vier von fünf Fällen eine kleinere

Niederschlagssumme ergeben. In der untersuchten Stichprobe sind die Unterschätzungen überwiegend gering. Dennoch treten in 23 % der Ereignisse Unterschätzungen von mindestens $\Delta N \leq -10\%$ auf ($\leftrightarrow$ Abb. 8.1).

Durch den Korrekturfaktor werden die Regenhöhen systematisch um +14 % angehoben. Bei einer zuvor korrekt ermittelten maximalen Regenhöhe führt dies somit zu einer maximalen Überschätzung von +14 %. In der untersuchten Stichprobe besitzen nach der Korrektur 58 % der Ereignisse Überschätzungen von mindestens $\Delta N \geq +10\%$. Dagegen ist die Anzahl der Ereignisse mit Unterschätzungen von mindestens $\Delta N \leq -10\%$ auf 6 % gesunken ($\leftrightarrow$ Abb. 8.1).

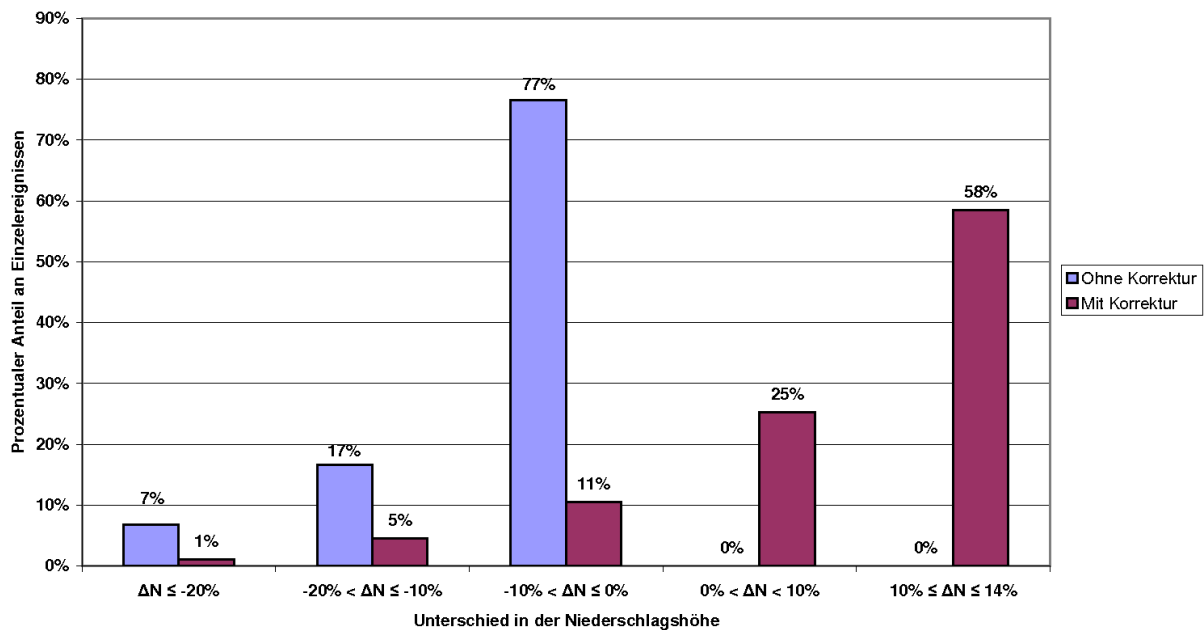


Abbildung 8.1: Einfluss der Blockbildung (5-Minuten-Intervalle) auf die Regenhöhen der Niederschlagsereignisse der partiellen Serie für die Dauerstufe D=5 Minuten

8.1.3 Einfluss der Methode der gleitenden Fenster auf die Ergebnisse der statistischen Auswertung

Die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Kapitel 8.1.2 lassen zunächst vermuten, dass sich die unterschiedlichen Regenhöhen der für die Statistik zu Grunde gelegten partiellen Serie auch auf die Ergebnisse der statistischen Auswertung auswirken würden. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung zeigen aber, dass die Unterschiede in den Grunddaten durch das statistische Verfahren gedämpft werden. Exemplarisch wurden die Regenhöhen h_N (15 Minuten; 1 Stunde) und h_N (5 Minuten; 3,3 Jahre) untersucht. Im Mittel entsteht durch die Blockung auf äquidistante Zeitschritte über 5 Minuten mit anschließender Korrektur eine Überschätzung der h_N (15 Minuten; 1 Jahr) um +2,5 % und eine

Überschätzung der h_N (5 Minuten; 3,3 Jahre) um +3,2 %. Auch die maximalen Unterschiede an einzelnen Stationen sind insgesamt moderat. Für die Regenhöhe h_N (5 Minuten; 3,3 Jahre) liegt die maximale Abweichung in der Stichprobe bei +11 %, und nur an 15 % der Stationen liegt die Abweichung bei $\Delta N \geq +5$ %. Für die Regenhöhe h_N (15 Minuten; 1 Jahr) liegt die maximale Abweichung in der Stichprobe gar nur bei +6 %, und nur an 6 % der Stationen liegt die Abweichung bei $\Delta N \geq +5$ % ($\hookrightarrow$ Abb. 8.2).

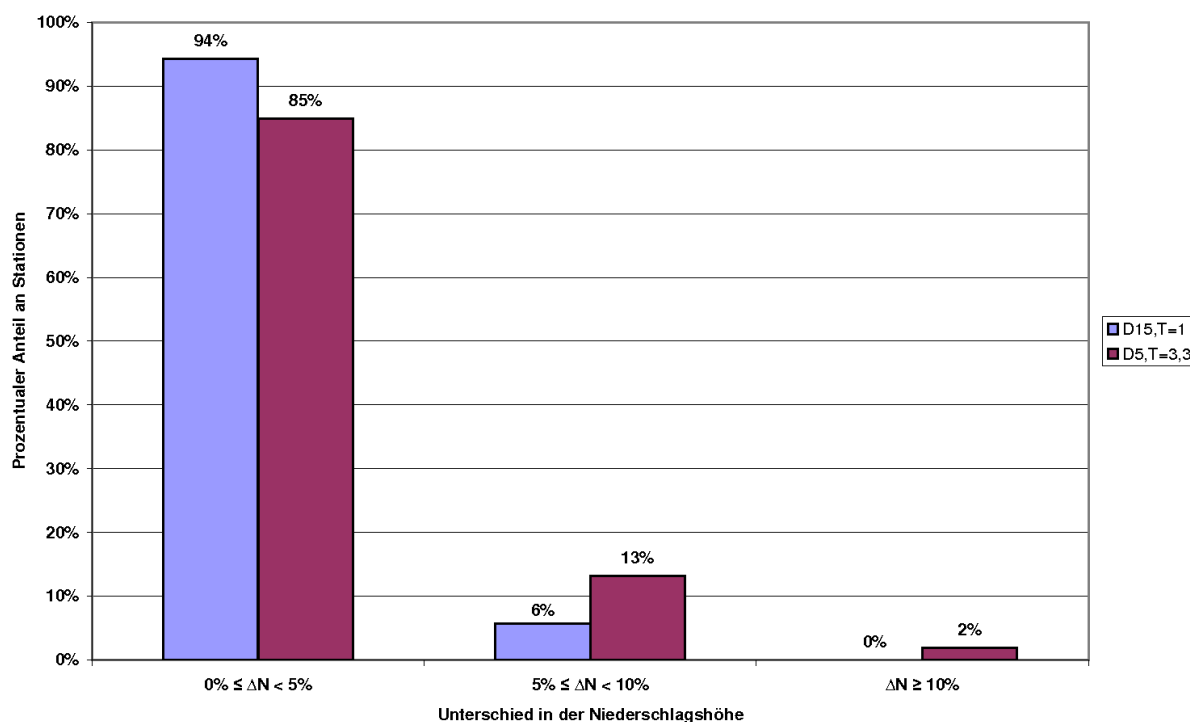


Abbildung 8.2: Einfluss der Blockbildung (5-Minuten-Intervalle) auf die Regenhöhen der statistischen Auswertung für h_N (15 Minuten; 1 Jahr) und h_N (5 Minuten; 3,3 Jahre)

Die Dämpfung der Unterschiede durch das statistische Verfahren ist auf zwei Dinge zurückzuführen. Zum Teil heben sich Unterschätzungen und Überschätzungen in den Ereignissen der partiellen Serie gegenseitig auf. Des Weiteren werden durch den Parameterausgleich über mehrere Dauerstufen die besonders hohen Unterschiede in der Dauerstufe $D=5$ Minuten durch die kleineren Unterschiede in den anderen Dauerstufen ausgeglichen.

8.1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Methode des gleitenden Fensters lediglich auf Dauerstufen $D < 1$ Tag angewendet. Für die Dauerstufen $D \geq 1$ Tag wurden weiterhin äquidistante Tagessummen mit anschließender Korrektur verwendet. Es ist zu vermuten, dass aufgrund der größeren Intervallbreite bei der Dauerstufe $D=1$ Tag durch

die Blockung größere Abweichungen der geblockten Grunddaten gegenüber den maximalen Regenhöhen aus einem gleitenden Fenster entstehen können. Mögliche Unterschiede würden sich primär auf die statistischen Ergebnisse der Dauerstufe $D=1$ Tag und aufgrund des Parameterausgleiches abgeschwächt auf die angrenzenden Dauerstufen auswirken. Die für die Stadtentwässerung relevanten kleinen Dauerstufen $D \leq 4$ Stunden würden hierdurch nicht oder nur geringfügig betroffen sein.

Grundsätzlich ist der Einsatz eines gleitenden Fensters gegenüber geblockten Grunddaten eine Verbesserung des statistischen Verfahrens. Aufgrund neuer Messtechniken mit zeitlichen Auflösungen von einer Minute und leistungsfähigeren Computern ist eine Vereinfachung (Blockung) mit anschließender Korrektur nicht mehr zeitgemäß.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen aber auch, dass das bisher angewendete Verfahren zu keinen signifikanten Fehlern und damit Nachteilen für die Bemessungspraxis geführt hat. Eine Überprüfung oder eine erneute Dimensionierung bestehender wasserwirtschaftlicher Anlagen sind aufgrund der neu gewonnenen Erkenntnisse nicht erforderlich.

8.2 Wahl der Serien für die Statistik

Bei langen Zeitreihen gleichen sich die statistischen Ergebnisse auf Basis von jährlichen und partiellen Serien hinreichend genau an. Der Aufwand, Statistiken auf Basis beider Serien durchzuführen, steht in keinem Verhältnis zu den Aussagen, die aus einer solchen Untersuchung resultieren. Eine detaillierte Untersuchung von 10 Stationen zeigte auch beim Variationskoeffizienten nach dem Parameterausgleich nur geringe Unterschiede.

	S_{up}	S_{uj}	S_{wp}	S_{wj}
Mittel	0,021	0,020	0,037	0,046

Die Statistik nach ATV-A 121 wurde daher gemäß dem Angebot nur auf Basis partieller Serien durchgeführt.

8.3 Parameterausgleich

Beim Parameterausgleich wird die Wahl der Bereichsgrenzen für jede Zeitreihe am Gesamtzeitraum (Max Fokus) individuell durchgeführt. Die Vorgaben hierfür sind nach

- ATV-A 121: Vorschlag 3 Stunden und 2 Tage
- KOSTRA: festgesetzt bei 1 Stunde und 12 Stunden

Die nachfolgenden Überlegungen/Festlegungen wurden anhand einer detaillierten Untersuchung an 10 Stationen überprüft bzw. sind das Resultat der detaillierten Untersuchung.

Die Optimierung erfolgt über die Minimierung der Variationskoeffizienten. In der Regel ist der Variationskoeffizient beim Parameter „u“ (Achsenabschnitt) klein und variiert mit

seinen absoluten Werten bei sich ändernden Bereichsgrenzen nur geringfügig. Der Variationskoeffizient beim Parameter „w“ (Steigung) ist dagegen in der Regel größer und reagiert auch empfindlicher auf Änderungen der Bereichsgrenzen. Kleinere Verschlechterungen bei „u“ werden hingenommen, wenn dadurch „w“ signifikant reduziert werden kann. Die Wahl der Bereichsgrenzen ist aus hydrologischer Sicht auf folgende Dauerstufen zu begrenzen, selbst wenn andere Kombinationen zu kleineren Variationskoeffizienten führen würden:

- Grenze I: zwischen D=1 Stunde und D=9 Stunden
- Grenze II: zwischen D=9 Stunden und D=3 Tage

Bei der Optimierung der Bereichsgrenzen ist die erste Auswahl relativ frei wählbar (z. B. Grenze I mit D=2 Stunden und Grenze II mit D=18 Stunden). Anhand der resultierenden Grafiken, für die die logarithmische Darstellung zu wählen ist, kann dann sehr schnell eine erste „gute“ gezielte Auswahl der Bereichsgrenzen durchgeführt werden.

Die abschließende Feinabstimmung durch weitere geringfügige Variationen der Bereichsgrenzen, führt dann zu den optimierten Bereichsgrenzen, die zu minimalen Variationskoeffizienten führen.

Da die Art des Parameterausgleichs nicht für jeden Bereich separat ausgewählt werden kann, ist einheitlich für den Parameter „u“ ein doppelt logarithmischer und für den Parameter „w“ ein einfach logarithmischer Ausgleich zu wählen. Bei der Untersuchung der 10 Stationen führte diese Kombination zu signifikant kleineren Variationskoeffizienten, als alle anderen Kombinationen.

Die Güte des Parameterausgleichs nimmt in der Regel mit zunehmender Zeitreihenlänge zu (die Variationskoeffizienten werden kleiner). Die Wahl der Bereichsgrenzen wird zunächst am Gesamtzeitraum durchgeführt und anschließend bei den Statistiken für kleinere Zeitfenster beibehalten.

Bei der Untersuchung der 10 Stationen zeigte sich zwar, dass bei kleineren Zeitfenstern andere Bereichsgrenzen zu kleineren Variationskoeffizienten führen können, die Qualitätsabnahme aber relativ gering und somit vernachlässigbar ist. Die Zunahme der Variationskoeffizienten aufgrund kleinerer Zeitfenster, oder aufgrund starr festgelegter Bereichsgrenzen (wie z. B. bei KOSTRA) ist signifikant größer.

8.3.1 Ergebnisse der individuellen Bereichsgrenzenwahl

Die Ergebnisse der individuellen Bereichsgrenzenwahl sind für alle Stationen in den Abbildungen 8.3 bis 8.5 grafisch dargestellt:

Im Vergleich zur starren Bereichsgrenzenwahl nach ATV-A 121 bringt die individuelle Bereichsgrenzenwahl eine kleine Reduzierung beim mittleren Variationskoeffizienten zum Parameter u (0 %) und eine signifikante Reduzierung beim mittleren Variationskoeffizienten zum Parameter w (-37%).

Im Mittel scheinen kleinere Bereichsgrenzen geeigneter zu sein. Auch bei KOSTRA DWD

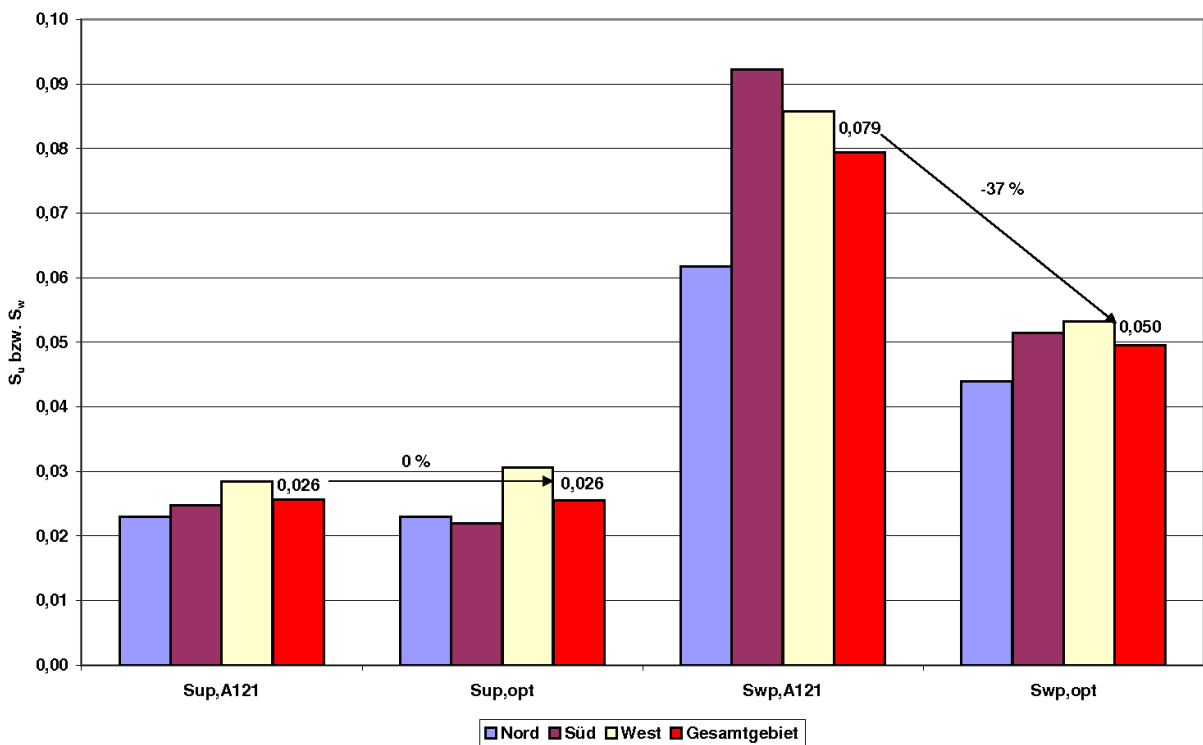


Abbildung 8.3: Übersicht optimierter Verteilungsparameter durch Veränderung der Bereichsgrenzen

liegen die starren Bereichsgrenzen wesentlich niedriger als bei der Empfehlung des A 121. Die Empfehlung des A 121 (3 Stunden und 2 Tage) führt nur bei nur 1 % der Stationen zu optimalen Bereichsgrenzen.

Das folgende Beispiel zeigt anhand der Station Rhynern die Verbesserung des Parameters w durch die Anpassung der Bereichsgrenzen ($\leftrightarrow$ Abb. 8.6 und 8.7).

Die Optimierung der Bereichsgrenzenwahl (60 Minuten und 9 Stunden) gegenüber den Standardwerten (3 Stunden und 2 Tage) führt zu einer Halbierung von swp (0,104 auf 0,052) ohne Änderung von sup (0,023). Die Reduzierung um -50 % (Mittelwert -37 %) ist natürlich ein besonders extremes Beispiel. Im Einzelfall kann es aber sein, dass man auf solche Stationen angewiesen ist, und somit die individuelle Bereichsgrenzenwahl sehr sinnvoll und dringend geboten ist.

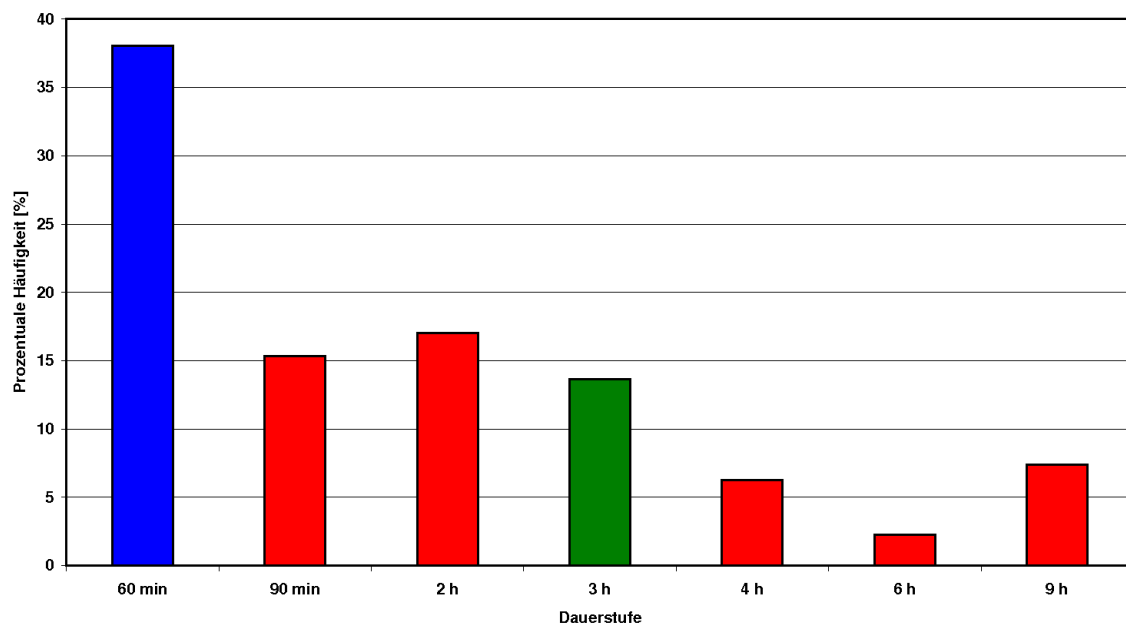


Abbildung 8.4: Verteilung innerhalb der 1. Bereichsgrenze

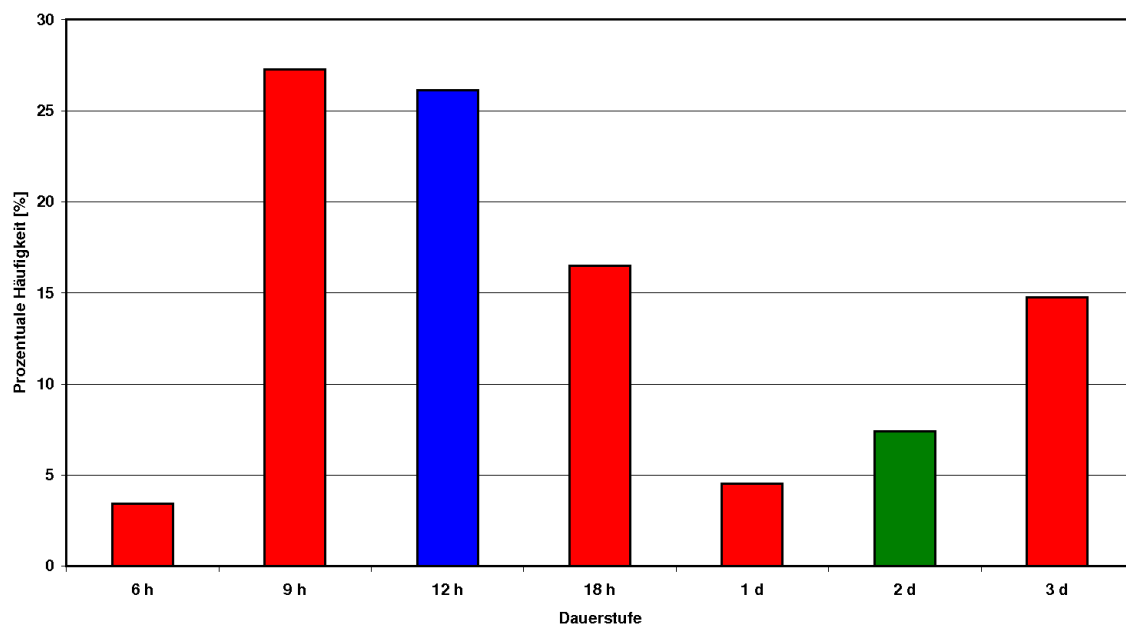


Abbildung 8.5: Verteilung innerhalb der 2. Bereichsgrenze

8.3 Parameterausgleich

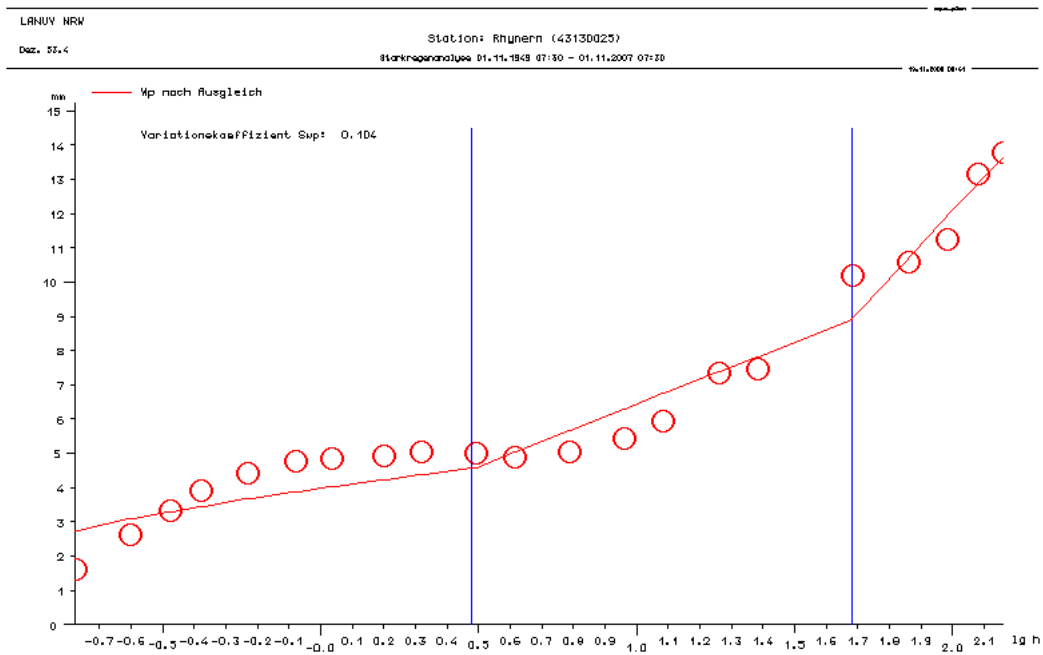


Abbildung 8.6: Bereichsgrenzen Rhynern, Standard

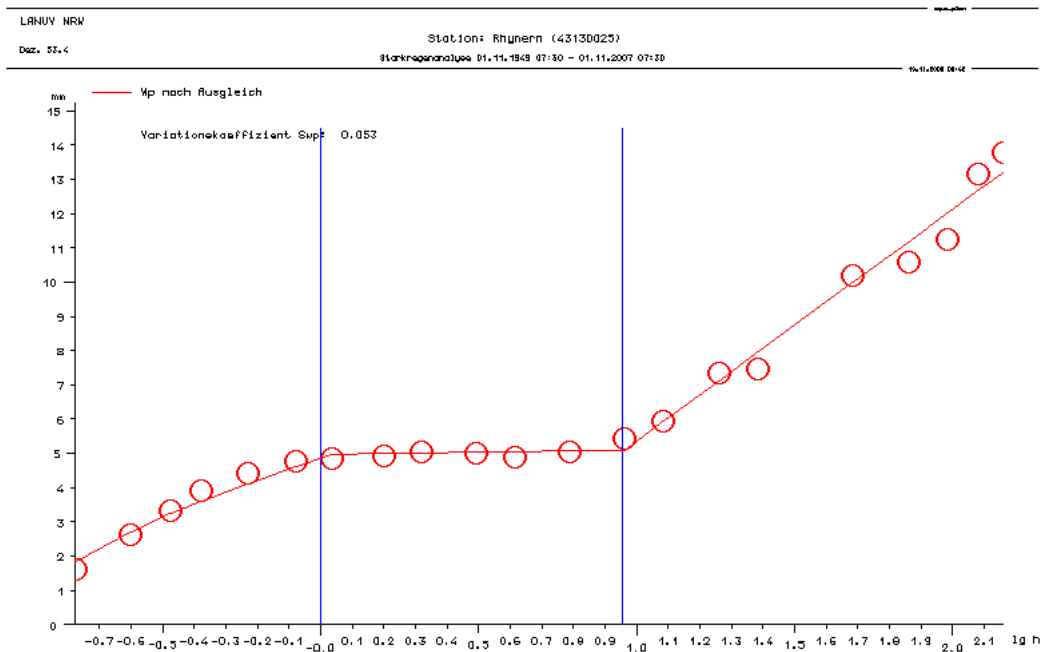


Abbildung 8.7: Bereichsgrenzen Rhynern, optimiert

9 Auswertung der Niederschlagssummen

9.1 Allgemeine Erläuterung zur Darstellung der Ergebnisse in den Karten

Die Karten zeigen die räumliche Verteilung der Trendaussage, einmal dargestellt als Mann-Kendall-Tau, einmal als Ergebnis der linearen Regression mit t-Test. Die Darstellung erfolgt durch Uhrendiagramme, deren Größe und deren Ausschlag unterschiedliche Auswertungen zulassen. Für den Mann-Kendall-Test ist die Darstellung wie folgt zu interpretieren: Hier wird eine qualitative Aussage über die Tendenz eines vorhandenen Trends gemacht. Da sich das Mann-Kendall-Tau bei den Ergebnissen immer auf den Wertebereich von -0,5 bis 0,5 bezieht, konnten die Uhren für diesen Wertebereich dargestellt werden und für das entsprechende Histogramm, das die Spannbreite und die Verteilung auf die einzelnen Klassen zeigt, einheitlich eine Klassenbreite von 0,1 gewählt werden. Dies hat den großen Vorteil, dass die verschiedenen Karten absolut vergleichbar sind.

Zusätzlich zu der Trendaussage zeigt die Größe der Uhren, welches Signifikanzniveau das jeweilige Ergebnis aufweist. Im Histogramm werden hierbei ausschließlich die Ergebnisse, mit einem Signifikanzniveau $>80\%$ dargestellt.

Bei den Uhren werden auch die Ergebnisse mit einer Signifikanz $<80\%$ dargestellt, da eine Häufung gleichgerichteter Trendaussagen eine schwache räumliche Aussage zulässt, auch wenn die einzelnen Ergebnisse keine große Signifikanz aufweisen.

Da das Mann-Kendall-Tau keine Aussage über die Größenordnung des Trends macht, wird auf einer weiteren Karte eine quantitative Trendaussage (linearer Trend mit t-Test) dargestellt. Da diese für die einzelnen Untersuchungszeiträume sehr stark variiert, wurde hierbei eine individuell angepasste Spannbreite der einzelnen Klassen vorgegeben. Eine absolute Vergleichbarkeit der einzelnen Ergebnisse wird dadurch zwar erschwert, jedoch werden durch die individuelle Anpassung die tatsächlichen Ergebnisse deutlicher.

Für die Karten der Jahres- und Halbjahressummen sind jeweils die Ergebnisse mit entsprechendem Signifikanzniveau dargestellt, d. h. dass auch im Histogramm nur die Stationen mit einer Signifikanz $>80\%$ dargestellt sind. Da die Monatssummen, Kennwerte und Serien nicht normalverteilt sind ($\leftrightarrow$ Kap. 7.4.3.4), sind die linearen Trends deshalb nicht auf Signifikanz geprüft worden.

9.2 Auswertung der Jahressummen (WWJ)

Die Trendanalysen der Jahresniederschlagssummen werden mit dem Mann-Kendall-Test und dem Verfahren der linearen Regression (Bestimmung der Signifikanz über t-Test) durchgeführt. Die Normalverteilung der Jahresniederschlagssummen zur Berechtigung der Durchführung des t-Tests wurde im Kapitel 7.4 nachgewiesen. Es werden sowohl Tagessummen als auch kontinuierliche Zeitreihen betrachtet.

Aufgrund der Ergebnisse aus den Trendanalysen für den Gesamtzeitraum und für die gleitenden Fenster wurde die Auswertung der Trendanalysen für die wachsenden Fenster nur an einer Auswahl an Stationen durchgeführt.

9.2.1 Dekadenweise Betrachtung der Jahresniederschlagssummen

Wie die später in diesem Kapitel beschriebenen Ergebnisse der Trendanalysen der gleitenden Fenster zeigen, können je nach betrachtetem Zeitfenster sehr unterschiedliche Trendaussagen getroffen werden. Um die Ursache für die zum Teil sehr großen Unterschiede in den Aussagen der Trendanalysen zu ergründen, wurden die mittleren Jahresniederschlagssummen in den einzelnen Dekaden bestimmt. Sowohl die Betrachtung aller in NRW verfügbaren Stationen mit langen Zeitreihen ($L \geq 54$ Jahre, $\leftrightarrow$ Abb. 9.1), als auch die regionalen Auswertungen der acht Großlandschaften ($\leftrightarrow$ Anhang C.1) zeigen eine sehr trockene Dekade 1971-1980. Diese trockene Dekade hat einen sehr starken Einfluss auf die Trendanalysen, wenn nur Zeitfenster über 30 Jahre betrachtet werden. Entsprechend weisen die Trendanalysen im Zeitfenster 1950-1979, wo die trockene Dekade am Ende auftritt, überwiegend negative Trends auf, während die Trendanalysen im Zeitfenster 1971-2000, wo die trockene Dekade am Anfang auftritt, überwiegend signifikant positive Trends zeigen.

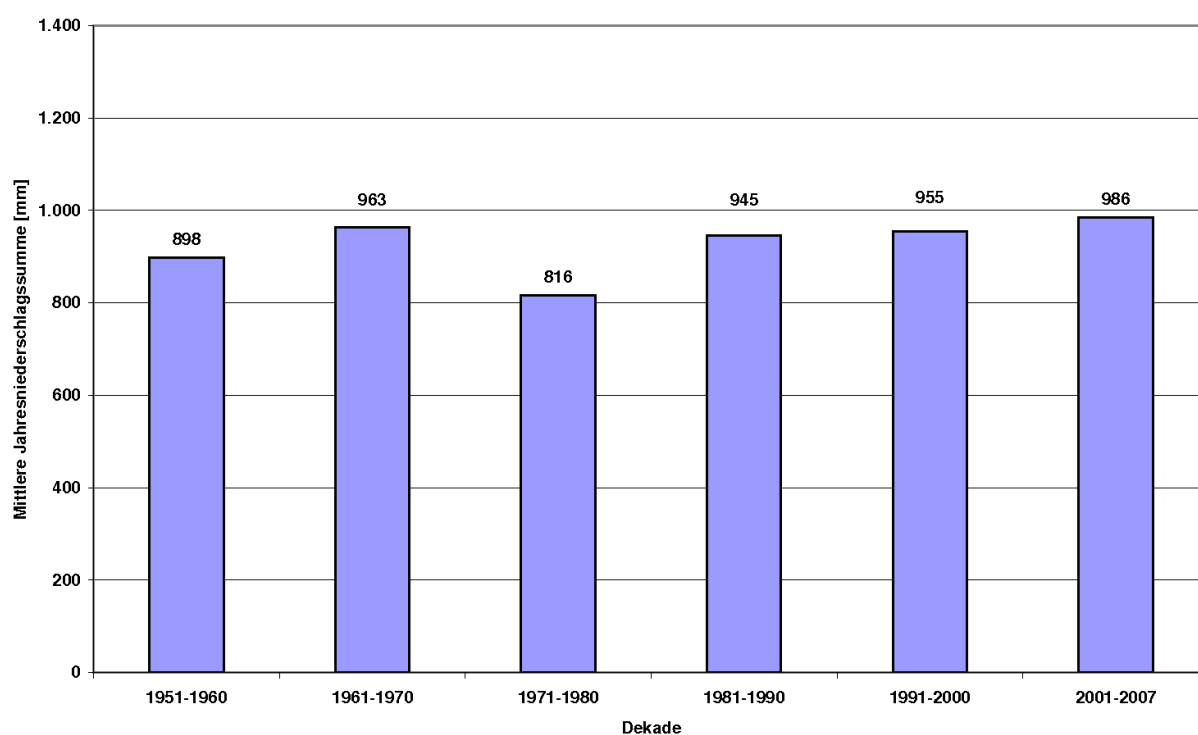


Abbildung 9.1: Mittlere Jahresniederschlagssummen in den einzelnen Dekaden (Mittelwert über Gesamt-NRW)

9.2.2 Ergebnisinterpretation für Gesamt-NRW

Aufgrund des zuvor beschriebenen Einflusses der trockenen Dekade 1971-1980 auf die Trendanalysen, eignet sich für die Beschreibung längerfristiger Entwicklungen und für die zeitlich begrenzte Extrapolation nur die Analyse des Gesamtzeitraums 1950-2008 bzw. eingeschränkt der Zeitraum 1959-2008 (siehe hierzu die anschließend beschriebenen Ergebnisse zu den wachsenden Fenstern). Die Ergebnisse jedes einzelnen gleitenden Fensters über 30 Jahre sind nur für den jeweils betrachteten Zeitraum gültig und liefern keine Erkenntnisse über längerfristige Entwicklungen.

Für die Trendanalysen der Jahresniederschlagssummen stehen je nach Zeitfenster unterschiedlich viele Stationen zur Verfügung, die die zuvor beschriebenen Kriterien für die jeweils gültige Mindestlänge bei einem Lückenanteil von maximal 3 % erfüllen. Die Tabelle 9.1 zeigt, dass selbst bei der Betrachtung des Gesamtzeitraums die Ergebnisse auf einer sehr breiten Datenbasis beruhen, wobei aber regionale Unterschiede mit hohen (Emscher-Region) und geringen Stationsdichten (Münsterland) bestehen.

Tabelle 9.1: Anzahl der bei den Trendanalysen der Jahresniederschlagssummen berücksichtigten Stationen in Abhängigkeit vom Zeitfenster

Verfügbare Stationen Jahressummen	
Zeitfenster	Anzahl der Stationen
1950-2008 (Gesamtzeitraum, WWJ)	173
1950-2008 (Gesamtzeitraum, KJ)	181
1950-1979 (Gleitendes Fenster I)	344
1961-1990 (Gleitendes Fenster II)	415
1971-2000 (Gleitendes Fenster III)	453
1979-2008 (Gleitendes Fenster IV)	402

9.2.2.1 Bewertung der Trendanalysen für den Gesamtzeitraum 1950-2008

Für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (WWJ) zeigen sich überwiegend positive Trends. Die Steigungen der Trendgeraden liegen nach dem Verfahren der linearen Regression an 90 % der Stationen zwischen $-0,7 - 3,7$ mm/Jahr ($\leftrightarrow$ Tab. 9.2, Abb. 9.2 und Tab. 9.3).

Tabelle 9.2: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen an 173 Stationen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (WWJ) nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten Jahresniederschlagssummen 1950-2008		
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl [-]	Anzahl [%]
< -10	0	0
-10 bis -8	0	0
-8 bis -6	0	0
-6 bis -4	0	0
-4 bis -2	1	1
-2 bis 0	11	6
0 bis 2	94	54
2 bis 4	61	35
4 bis 6	3	2
6 bis 8	3	2
8 bis 10	0	0
> 10	0	0

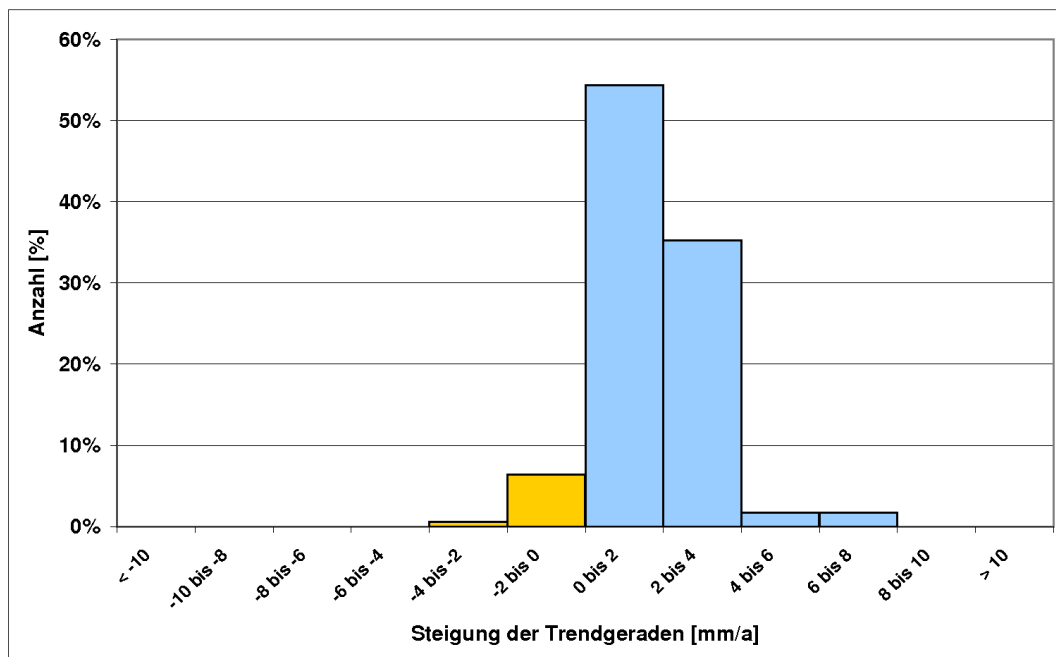


Abbildung 9.2: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen an 173 Stationen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (WWJ) nach dem Verfahren der linearen Regression

9 Auswertung der Niederschlagssummen

In Tabelle 9.3 wird die Spannbreite der Trends an allen berücksichtigten Stationen für die Jahresniederschlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (WWJ) zusammengefasst. Beim Verfahren der linearen Regression wird die Spannbreite für die Steigungen der Trendgeraden angegeben, beim Mann-Kendall-Test die Spannbreite für den Parameter Tau ($\hookrightarrow$ Kap. 7). Extreme Trends an einzelnen Stationen können durch lokal begrenzte Besonderheiten oder eventuell nicht erkannte Fehler in der Datenbasis zurückzuführen sein, und können somit Aussagen zu generellen mittleren Entwicklungen verfälschen. In Tabelle 9.3 wird daher zusätzlich eine 90-%-Spanne ohne Berücksichtigung der 5 % größten und der 5 % kleinsten Werte angegeben.

Tabelle 9.3: Spannbreite der Trends der Jahresniederschlagssummen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (WWJ) nach dem Verfahren der linearen Regression (Steigung der Trendgeraden) und dem Mann-Kendall-Test (Tau)

Spannbreite der Trends für die Jahresniederschlagssummen 1950-2008		
Lineare Regression		
Steigung der Trendgeraden [mm/a]	Minimum	Maximum
Gesamtspanne	-2,5	+6,8
90-%-Spanne	-0,7	+3,7
Mann-Kendall-Test		
Tau [-]	Minimum	Maximum
Gesamtspanne	-0,16	+0,34
90-%-Spanne	-0,02	+0,24

Die räumliche Verteilung der Trends in den Jahresniederschlagssummen sind in Abbildung 9.3 (Lineare Regression, Steigung der Trendgeraden) und Abbildung 9.4 (Mann-Kendall-Test, Tau) dargestellt.

9.2 Auswertung der Jahressummen (WWJ)

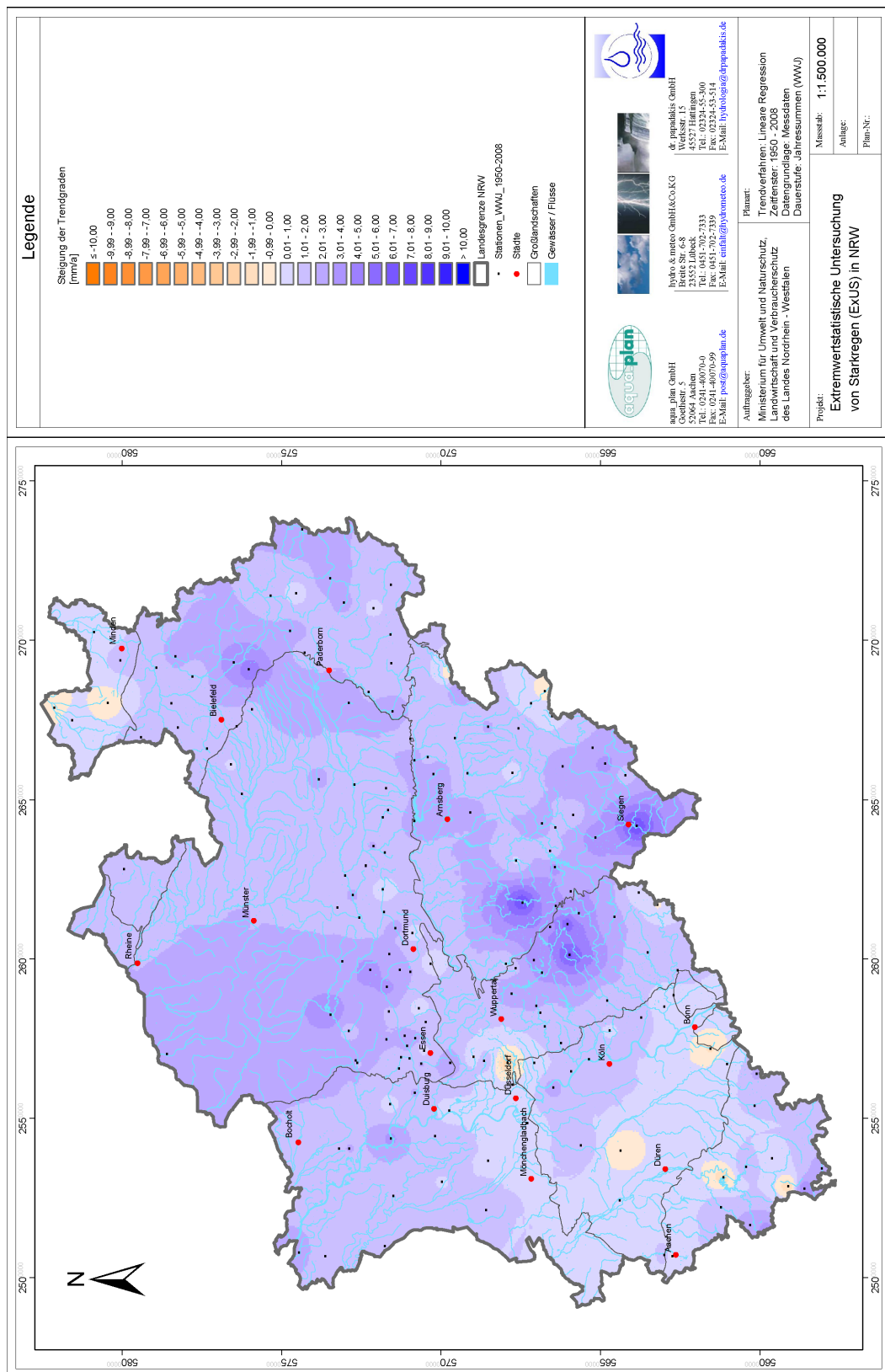


Abbildung 9.3: Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen (WWJ) aus linearer Regression für den Gesamtzeitraum 1950-2008

9 Auswertung der Niederschlagssummen

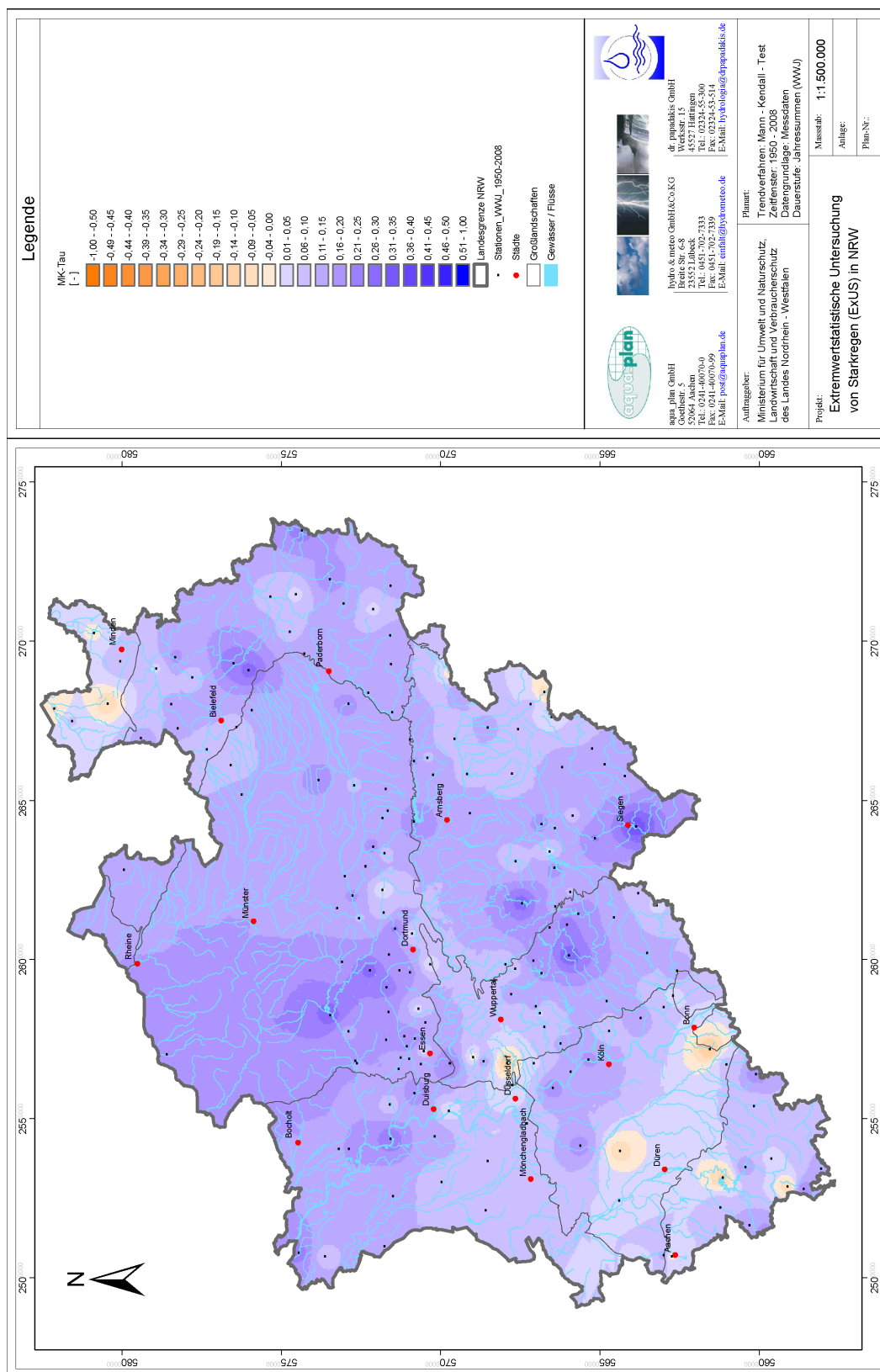


Abbildung 9.4: Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen (WWJ) aus Mann-Kendall-Test für den Gesamtzeitraum 1950-2008

9.2 Auswertung der Jahressummen (WWJ)

Die Signifikanz der positiven Trendentwicklung der Jahresniederschlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (WWJ) liegt bei ca. jeder zweiten Station bei mindestens 80 %. In Tabelle 9.4 (Lineare Regression, LR) und Tabelle 9.5 (Mann-Kendall-Test, MKT) werden die Signifikanzniveaus, mit denen die Trends an den Stationen auftreten, zusammengefasst.

Tabelle 9.4: Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Jahresniederschlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (WWJ)

Signifikanzniveaus der Trends (LR), Jahresniederschlagssummen				
Signifikanzniveau [%]	Anzahl positiver Trends [-]	Anzahl negativer Trends [-]	Anzahl Gesamt [-]	Gesamt [%]
< 80	71	10	81	47
80	35	1	36	21
90	23	1	24	14
95	21	0	21	12
99	11	0	11	6

Tabelle 9.5: Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Jahresniederschlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (WWJ)

Signifikanzniveaus der Trends (MKT), Jahresniederschlagssummen				
Signifikanzniveau [%]	Anzahl positiver Trends [-]	Anzahl negativer Trends [-]	Anzahl Gesamt [-]	Gesamt [%]
< 80	80	11	91	53
80	30	0	30	17
90	22	2	24	14
95	18	0	18	10
99	10	0	10	6

In Abbildung 9.5 (Lineare Regression) und Abbildung 9.6 (Mann-Kendall-Test) wird durch die Größe der Uhr an jeder Station neben dem Trend auch das jeweilige Signifikanzniveau und somit die Verteilung signifikanter Trends im Raum dargestellt.

9 Auswertung der Niederschlagssummen

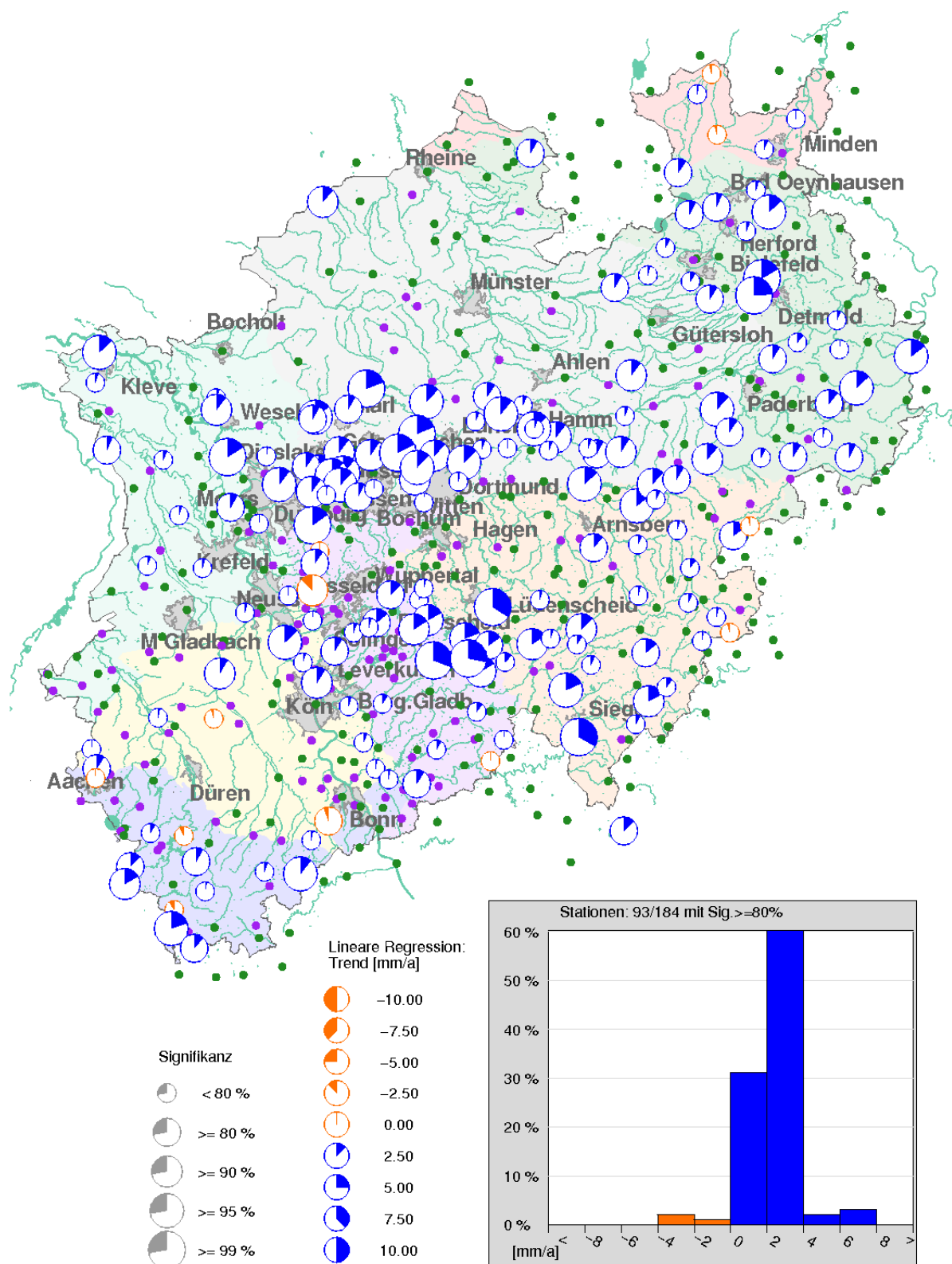


Abbildung 9.5: Trends der Jahresniederschlagssummen (WWJ) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für den Gesamtzeitraum 1950-2008

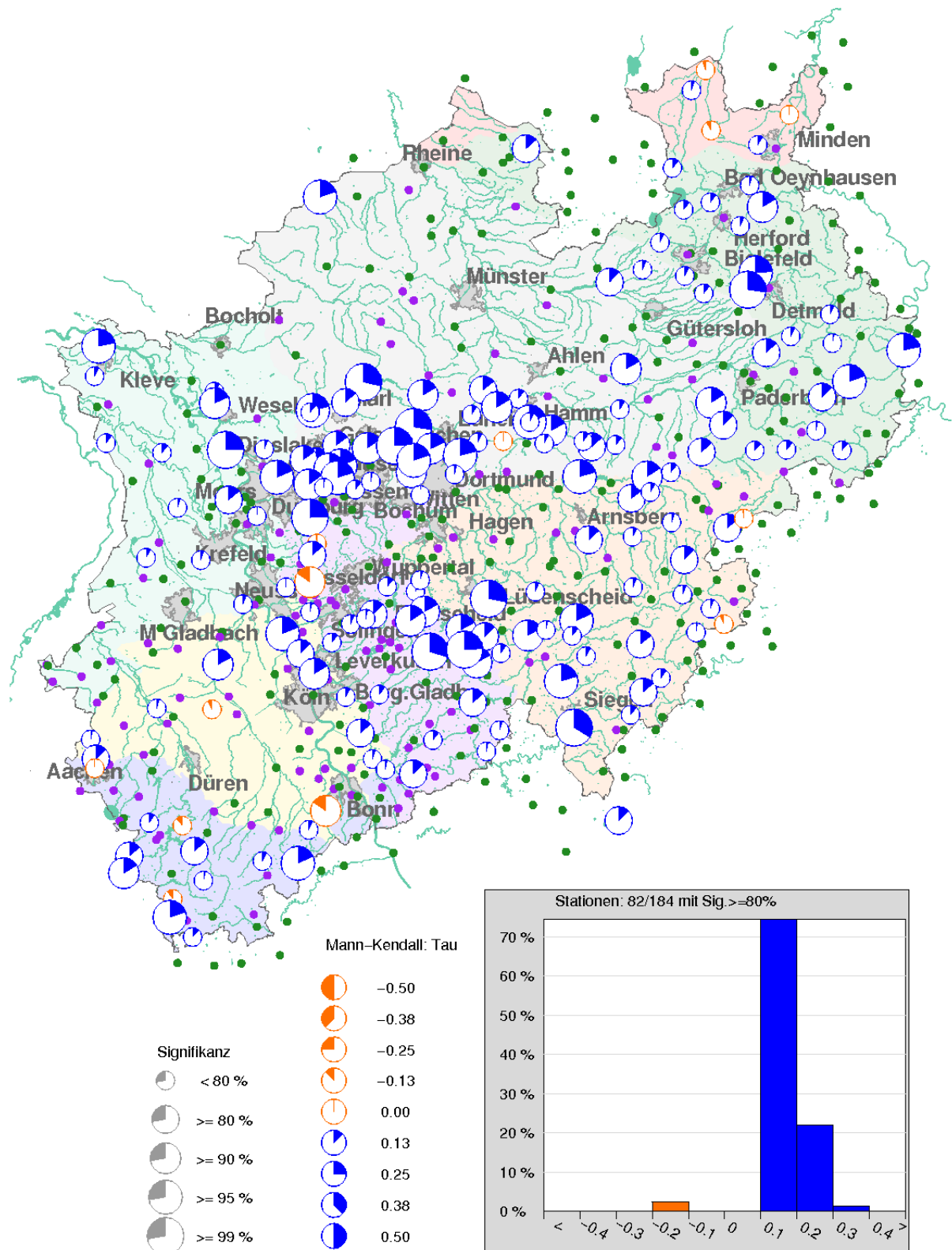


Abbildung 9.6: Trends der Jahresniederschlagssummen (WWJ) aus Mann-Kendall-Test für den Gesamtzeitraum 1950-2008

9 Auswertung der Niederschlagssummen

Die Berücksichtigung von Wasserwirtschaftsjahren oder Kalenderjahren bei den Trendanalysen hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse. An einzelnen Stationen treten zwar geringfügige Unterschiede auf, in der Summe sind diese aber zu vernachlässigen ($\hookrightarrow$ Tab. 9.6 und Tab. 9.7).

Tabelle 9.6: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen unter Berücksichtigung von Wasserwirtschaftsjahren (WWJ, 173 Stationen) und Kalenderjahren (KJ, 181 Stationen) für den Gesamtzeitraum 1950-2008 nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten Jahresniederschlagssummen WWJ/KJ 1950-2008		
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl WWJ [%]	Anzahl KJ [%]
< -10	0	0
-10 bis -8	0	0
-8 bis -6	0	0
-6 bis -4	0	0
-4 bis -2	1	1
-2 bis 0	6	8
0 bis 2	54	55
2 bis 4	35	33
4 bis 6	2	2
6 bis 8	2	2
8 bis 10	0	0
> 10	0	0

Tabelle 9.7: Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Jahresniederschlagssummen unter Berücksichtigung von Wasserwirtschaftsjahren (WWJ) und Kalenderjahren (KJ) im Gesamtzeitraum 1950-2008

Signifikanzniveaus der Trends WWJ/KJ (LR)				
Signifikanzniveau [%]	Anzahl positiver Trends [-]	Anzahl negativer Trends [-]	Anzahl Gesamt [-]	Gesamt [%]
< 80	71/79	10/14	81/93	47/51
80	35/32	1/1	36/33	21/18
90	23/22	1/0	24/22	14/12
95	21/22	0/0	21/22	12/12
99	11/11	0/0	11/11	6/6

Zwischen den beiden Trendverfahren Lineare Regression und Mann-Kendall-Test treten nur geringe Unterschiede auf. Beide Verfahren geben das generelle Trendverhalten und auch die Signifikanz der Trends in einer vergleichbaren Größenordnung wieder. Tabelle 9.8 gibt an, wie oft in beiden Verfahren die Signifikanz der Trends in dieselbe Klasse (Signifikanzniveau < 80 %, 80 %, 90 %, 95 % und 99 %) fallen, bzw. wie oft sich die Ergebnisse um eine oder mehr als eine Klasse unterscheiden.

Tabelle 9.8: Unterschiede der beiden Verfahren Lineare Regression/t-Test und Mann-Kendall-Test beim Signifikanzniveau (Jahresniederschlagssummen)

Unterschiede LR und MKT beim Signifikanzniveau, Jahresniederschlagssummen		
Unterschiede	Anzahl [-]	Anzahl [%]
0 Klassen	142	82
1 Klasse	29	17
> 1 Klasse	2	1

9.2.2.2 Bewertung der Trendanalysen für die gleitenden Zeitfenster

Die Auswertung der gleitenden Fenster zeigt deutlich den großen Einfluss einzelner trockener bzw. feuchter Dekaden. In Abbildung 9.7 und Abbildung 9.8 wird exemplarisch das bereits angesprochene gegenläufige Trendverhalten in den beiden Zeitfenstern 1950-1979 und 1971-2000 gezeigt. Die Trends an den einzelnen Stationen und ihr jeweiliges Signifikanzniveau werden in Abbildung 9.9 (1950-1979) und Abbildung 9.10 (1971-2000) dargestellt.

9 Auswertung der Niederschlagssummen

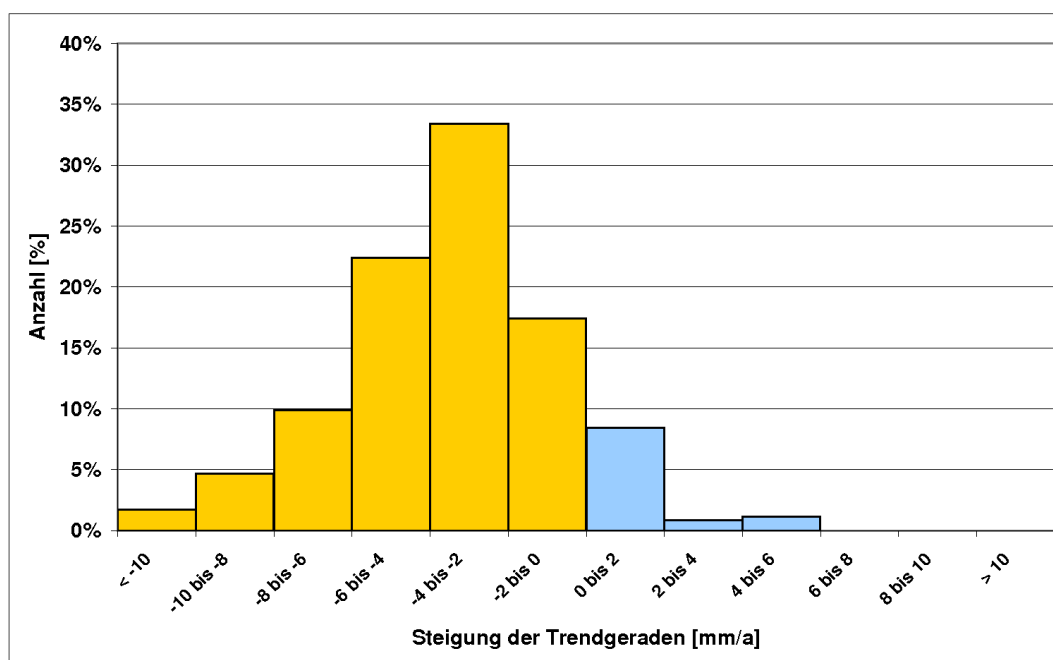


Abbildung 9.7: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen an 344 Stationen für den 30-Jahreszeitraum 1950-1979 nach dem Verfahren der linearen Regression

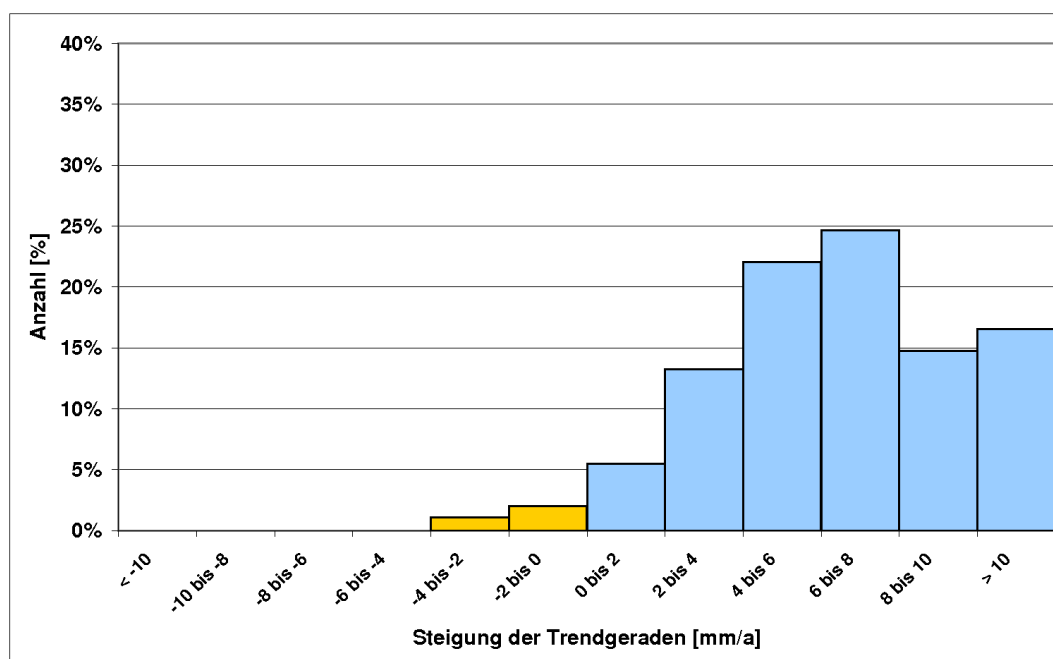


Abbildung 9.8: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen an 453 Stationen für den 30-Jahreszeitraum 1971-2000 nach dem Verfahren der linearen Regression

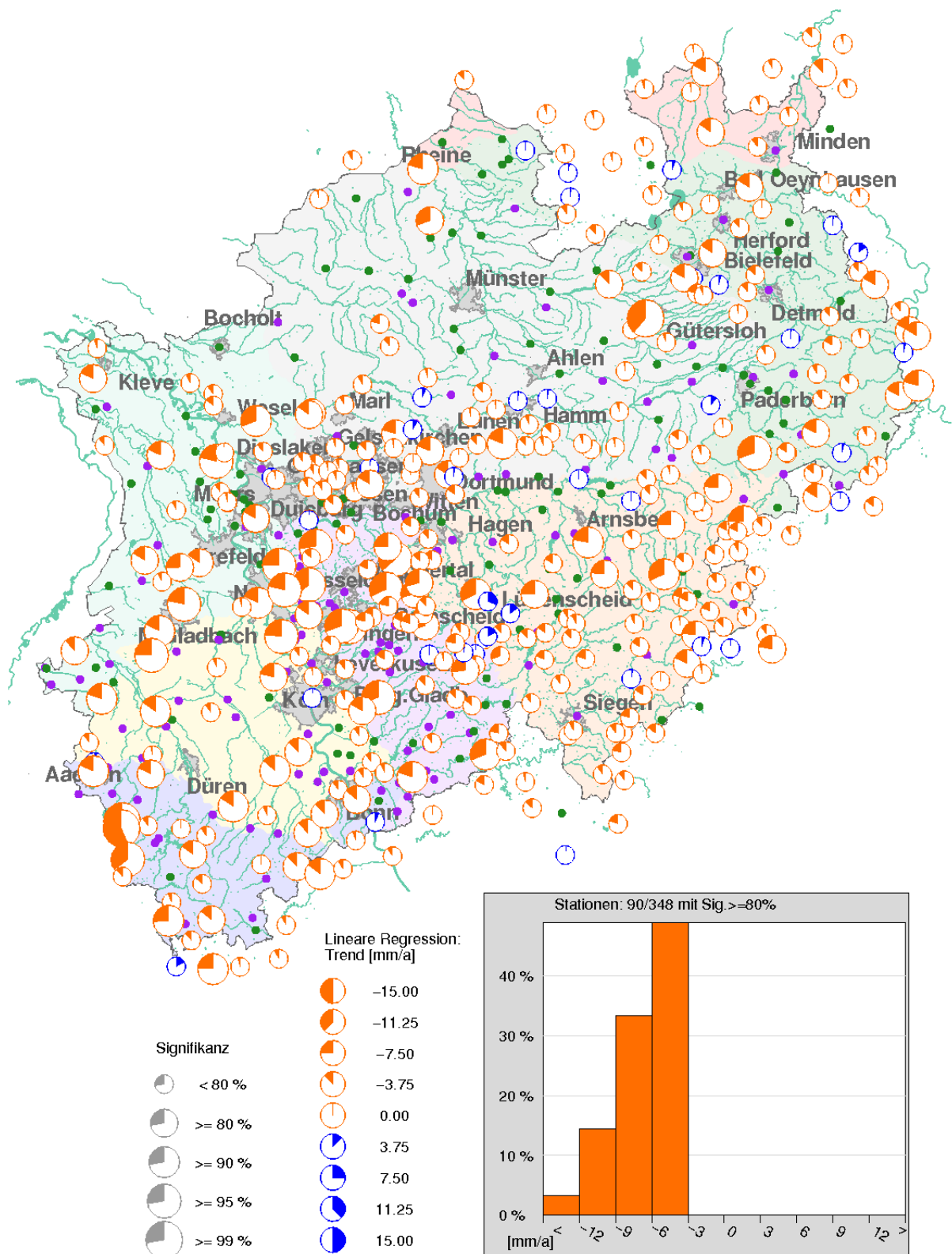


Abbildung 9.9: Trends der Jahresniederschlagssummen aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für das Zeitfenster 1950-1979

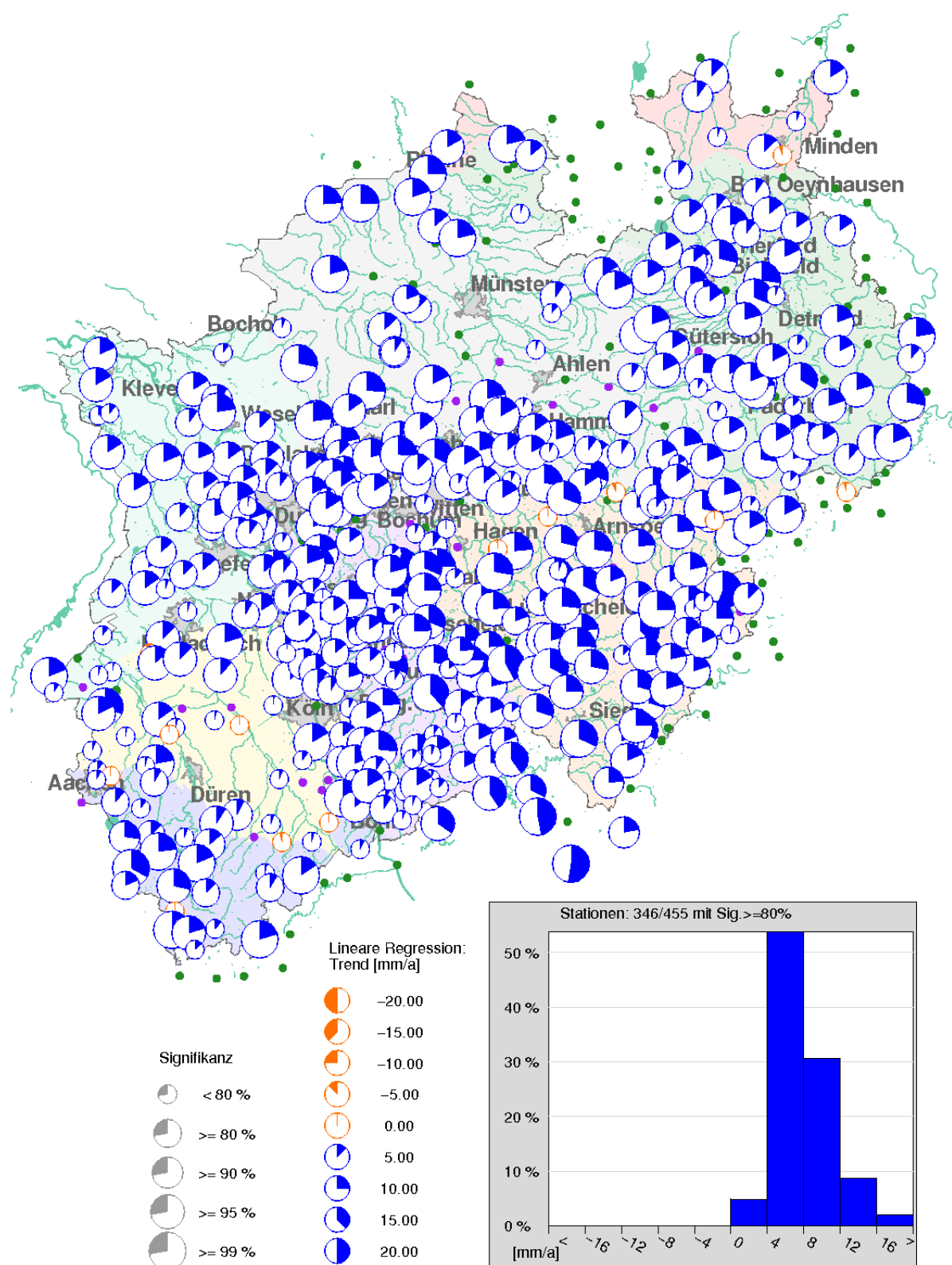


Abbildung 9.10: Trends der Jahresniederschlagssummen aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für das Zeitfenster 1971-2000

Im Folgenden werden die wesentlichen Eigenschaften der Trends in den vier gleitenden Zeitfenstern zusammengefasst ($\leftrightarrow$ Tab. 9.9). Als Vergleich werden zudem noch einmal die Kernaussagen zum Gesamtzeitraum mit angegeben. Detaillierte Informationen zu den gleitenden Zeitfenstern, wie sie in den Tabellen und Abbildungen zum Gesamtzeitraum dargestellt wurden, werden im Anhang C.2 zusammengefasst.

Tabelle 9.9: Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Jahressummen in den vier gleitenden Fenstern im Vergleich zum Gesamtzeitraum; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), 90%-Spanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test

Trendeigenschaften der gleitenden Fenster, Jahressummen				
Zeitraum	Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden)	90%-Spanne [mm/a]	Signifikanz	Unterschiede MKT/LR
1950-1979	überwiegend negativ, 73 % der Trends liegen in den Klassen zwischen -6 mm/a und 0 mm/a	-8,9 bis +0,9	nur 26 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	gering
1961-1990	2/3 positiv, 1/3 negativ, 77 % der Trends liegen in den Klassen zwischen -4 mm/a und +4 mm/a	-4,1 bis +7,7	nur 14 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	gering
1971-2000	überwiegend positiv, 75 % der Trends liegen in den Klassen zwischen +2 mm/a und +10 mm/a	+1,2 bis +12,8	76 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 64 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	treten an 26 % der Stationen auf, ohne die Gesamtaussagen zu verfälschen
1979-2008	2/3 positiv, 1/3 negativ, 82 % der Trends liegen in den Klassen zwischen -2 mm/a und +6 mm/a	-5,2 bis +5,9	nur 19 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	keine
1950-2008	überwiegend positiv, 90 % der Trends liegen in den Klassen zwischen 0 mm/a und +4 mm/a	-0,7 bis +3,7	53 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 32 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	gering

Die Ergebnisse der Tabelle 9.9 zeigen deutlich, dass die Spannen und die Beträge der Trends mit zunehmender Zeitreihenlänge (Gesamtzeitraum gegenüber gleitenden Fenstern) abnehmen. Bei längeren Betrachtungszeiträumen sind aufgrund sich ausgleichender Wirkungen in den natürlichen klimatologischen Schwankungen geringere absolute Werte in den Trends zu erwarten.

9.2.2.3 Bewertung der Trendanalysen für die wachsenden Zeitfenster

Entsprechend den Ergebnissen aus den Untersuchungen zum Gesamtzeitraum und zu den gleitenden Fenstern zeigen auch die Analysen der wachsenden Fenster, dass bei kurzen Zeiträumen signifikant unterschiedliche Trends gegenüber dem Gesamtzeitraum auftreten. Es ist daher nicht zulässig, in Regionen ohne Stationen mit langen Zeitreihen eine höhere räumliche Informationsdichte durch das Vermischen von Stationen mit kurzen Zeitreihen zu erzeugen. Aufgrund der eindeutigen Aussagen der gleitenden Fenster zur Trendstabilität und der fehlenden Eignung kurzer Zeitreihen zur Beschreibung des Trendverhaltens über den Gesamtzeitraum wurden die Trendanalysen der wachsenden Fenster nur für eine Auswahl von 75 der 173 Stationen durchgeführt. Sämtliche Stationen liegen nördlich der Ruhr und östlich des Rheins. Die folgenden drei Abbildungen 9.11, 9.12 und 9.13 zeigen typische Entwicklungsmuster der Trends und ihres Signifikanzniveaus bei wachsenden Zeitfenstern. Annähernd stabile Trends mit ähnlichen Aussagen wie der Gesamtzeitraum können nur getroffen werden, wenn die Zeitreihen mindestens bis 1959 zurückreichen. Bei den etwas kürzeren Zeitfenstern 1959-2008 ergeben sich an den Stationen fast ausschließlich geringfügig stärkere positive Trends als gegenüber dem Gesamtzeitraum 1950-2008.

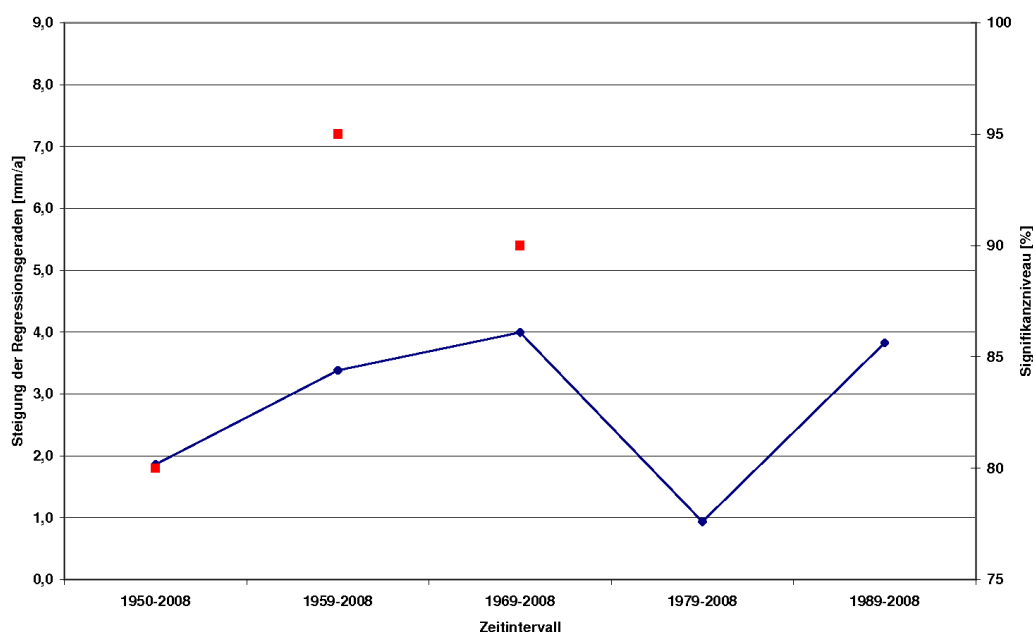


Abbildung 9.11: Entwicklung der Trends mit wachsendem Zeitfenster am Beispiel der Station Bielefeld-Sennestadt; blau: Steigung der Trendgeraden pro Zeitfenster; rot: Signifikanzniveau pro Zeitfenster (kein roter Punkt: Signifikanzniveau < 80 %)

9.2 Auswertung der Jahressummen (WWJ)

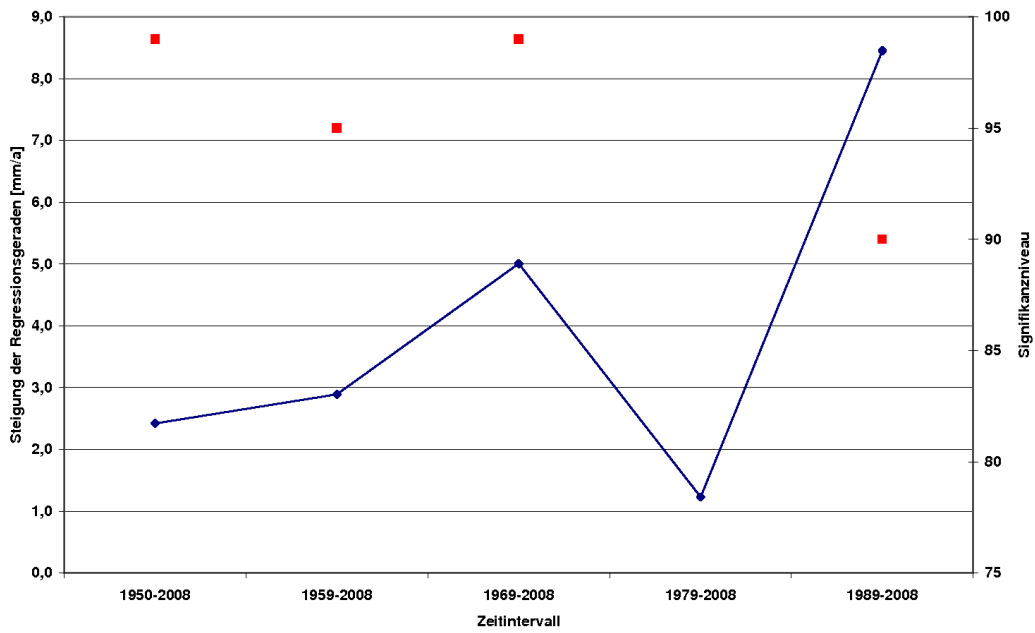


Abbildung 9.12: Entwicklung der Trends mit wachsendem Zeitfenster am Beispiel der Station Gelsenkirchen-Altstadt; blau: Steigung der Trendgeraden pro Zeitfenster; rot: Signifikanzniveau pro Zeitfenster (kein roter Punkt: Signifikanzniveau < 80 %)

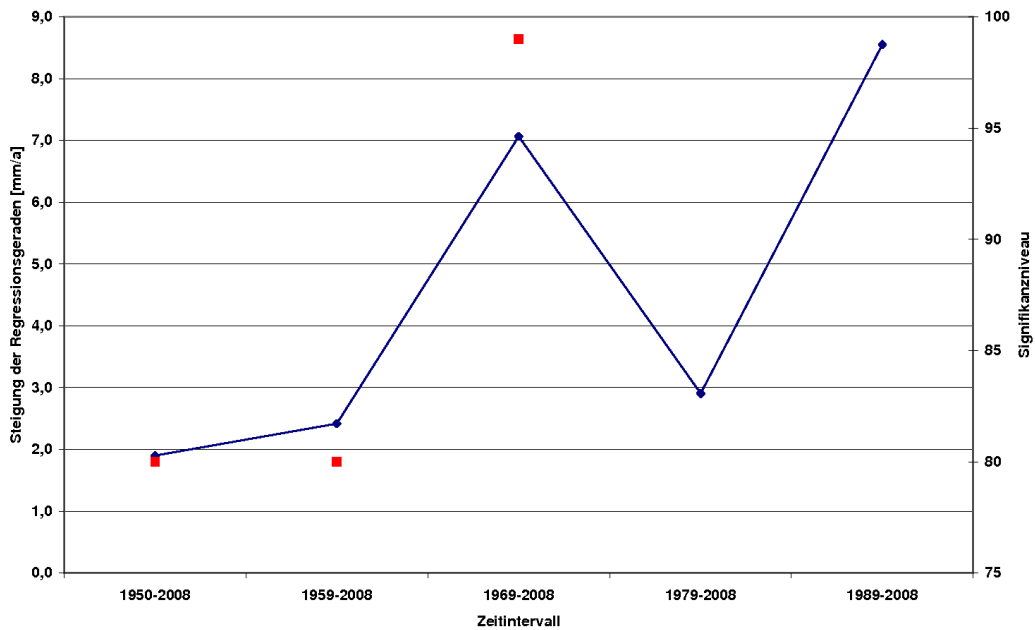


Abbildung 9.13: Entwicklung der Trends mit wachsendem Zeitfenster am Beispiel der Station Werne-Wessels DWD; blau: Steigung der Trendgeraden pro Zeitfenster; rot: Signifikanzniveau pro Zeitfenster (kein roter Punkt: Signifikanzniveau < 80 %)

9.2.3 Regionale Besonderheiten

- **Niederrheinisches Tiefland und Niederrheinische Bucht**

Der Anteil signifikanter Trends (mit einem Signifikanzniveau ≥ 80 %) liegt mit 37 % der Stationen unter dem Landesdurchschnitt (53 %). Entsprechend sind die Spannbreite der Trends, die mittlere Zunahme (1,08 mm/Jahr) und die maximale Zunahme pro Jahr an einer Station (3,2 mm/Jahr) relativ klein.

- **Westfälisches Tiefland**

Die Trends schwanken um den Nullwert und an keiner Station ist ein signifikanter Trend zu erkennen. Beim Westfälischen Tiefland handelt es sich allerdings um eine kleine Region mit nur fünf berücksichtigten Stationen.

- **Westfälische Bucht**

Die Westfälische Bucht ist gekennzeichnet durch eine sehr geringe Stationsdichte in der nördlichen Hälfte und durch eine sehr hohe Stationsdichte in der südlichen Hälfte. Dennoch führen die Trendanalysen zu ähnlichen Ergebnissen sowohl in der Nord-, als auch in der Südhälfte ($\leftrightarrow$ Abb. 9.3), auch wenn dies durch die zahlreichen großen „Uhren“ im Südteil ($\leftrightarrow$ Abb. 9.5) zunächst nicht den Anschein hat. Der Anteil signifikanter Trends (mit einem Signifikanzniveau ≥ 80 %) liegt mit 71 % der Stationen über dem Landesdurchschnitt (53 %). Auch wenn wie im Niederrheinischen Tiefland und in der Niederrheinischen Bucht die Spannbreite der Trends und die maximale Zunahme pro Jahr an einer Station (3,9 mm/Jahr) vergleichbar klein sind, so ist hier die mittlere Zunahme mit 1,85 mm/Jahr wesentlich größer.

- **Weserbergland**

Der Anteil signifikanter Trends (mit einem Signifikanzniveau ≥ 80 %) liegt mit 63 % der Stationen etwas über dem Landesdurchschnitt (53 %). Dabei stechen zwei benachbarte Stationen in Lage (Kreis Lippe) mit maximalen Zunahmen pro Jahr von 3,3 mm/Jahr und 4,8 mm/Jahr auf einem Signifikanzniveau von 99 % hervor. Ansonsten liegen hier vergleichbare Verhältnisse wie in der Westfälischen Bucht vor.

- **Eifel (mit Siebengebirge), Bergisches Land, Sauer- und Siegerland**

In den Mittelgebirgen fällt grundsätzlich auf, dass hier einerseits hohe signifikante positive Trends und andererseits schwache positive Trends auf einem geringen Signifikanzniveau oder gar negative Trends in unmittelbarer Nachbarschaft auftreten können. Da dieses Erscheinungsbild sowohl beim Mann-Kendall-Test als auch bei der linearen Regression auftritt, scheint eine eventuell fehlende Normalverteilung an einzelnen Stationen ($\leftrightarrow$ Kap. 7.4) nicht der Grund für diese starken Unterschiede zu sein. Vielmehr scheinen sich lokale Besonderheiten der Standorte (wie Luv-/Lee-Effekte) überproportional auf die Zeitreihen und damit auf die Trendanalysen auszuwirken. Entsprechend sind die Spannbreiten der Trends und die maximalen Zunahmen pro Jahr an einer Station (bis zu 6,8 mm/Jahr) überdurchschnittlich

groß. Die mittleren Zunahmen haben aufgrund der großen Unterschiede in unmittelbarer Nachbarschaft keine Aussagekraft. Nördlich von Arnsberg treten ähnlich wie in der angrenzenden Westfälischen Bucht überdurchschnittlich (im Vergleich zu Gesamt-NRW) viele Stationen mit einem Signifikanzniveau $\geq 80\%$ auf. Die größten Zunahmen auf einem Signifikanzniveau $\geq 95\%$ sind hier im Dreieck der Ortschaften Lüdenscheid-Lindlar-Siegen an der Grenze des Bergischen Landes zum Sauer- und Siegerland zu verzeichnen. Ansonsten sind die Anteile der Stationen mit signifikanten Trends (mit einem Signifikanzniveau $\geq 80\%$) in der Eifel (46 %) und im Sauer- und Siegerland (42 %) eher unterdurchschnittlich. Nur im Bergischen Land liegt der Anteil mit 57 % etwas über dem Landesdurchschnitt (53 %).

9.2.4 Zusammenfassung zu den Jahresniederschlagssummen

Die Untersuchung der Trends in den Jahresniederschlagssummen zeigt für den Gesamtzeitraum 1950-2008 überwiegend positive Trends zwischen 0 mm/Jahr und +3,7 mm/Jahr. An etwa jeder zweiten Station liegen diese positiven Trends auf einem Signifikanzniveau von mindestens 80 %.

Die Unterschiede in den beiden verwendeten Trendverfahren sind insgesamt gering und vernachlässigbar. Dabei sticht die Region im Dreieck der Ortschaften Lüdenscheid-Lindlar-Siegen an der Grenze des Bergischen Landes zum Sauer- und Siegerland etwas heraus. In dieser Region liegen konzentriert mehrere Stationen, an denen stärkere Zunahmen ($> +3,7$ mm/Jahr) auf einem sehr hohem Signifikanzniveau ($\geq 95\%$) festgestellt wurden. In den Mittelgebirgen fällt zudem grundsätzlich auf, dass hier einerseits hohe signifikante positive Trends und andererseits schwache positive Trends auf einem geringen Signifikanzniveau oder gar negative Trends in unmittelbarer Nachbarschaft auftreten können. Die Aussagekraft einzelner lokaler Stationen im Hinblick auf die umliegende Region ist somit in den Mittelgebirgen wesentlich geringer als in den Tiefländern.

Die Untersuchung mehrerer gleitender Zeitfenster über jeweils 30 Jahre und die Untersuchung wachsender Zeitfenster zwischen 20 und 58 Jahren haben gezeigt, dass die natürlichen Klimaschwankungen, insbesondere die trockene Dekade 1971-1980, einen großen Einfluss auf die Trendanalysen besitzen. Je nach Zeitfenster können bei Zeitreihen von 30 Jahren völlig gegenläufige Trends resultieren. Annähernd stabile Trends mit ähnlichen Aussagen wie der Gesamtzeitraum können nur getroffen werden, wenn die Zeitreihen mindestens bis 1959 zurückreichen, dies entspricht einer minimal erforderlichen Zeitreihenlänge von 50 Jahren.

9.3 Auswertung der Halbjahressummen

Die Ergebnisse aus den Trendanalysen der Halbjahreswerte (und auch der Monatswerte) können zudem Erkenntnisse zu möglichen Verschiebungen der Niederschlagssummen im Jahresverlauf liefern. Dies ist z. B. zu vermuten, wenn die beiden Halbjahreswerte gegenläufige Trends aufweisen. Die Trendanalysen der Halbjahresniederschlagssummen

werden sowohl für das Sommer- als auch für das Winterhalbjahr mit dem Mann-Kendall-Test und dem Verfahren der linearen Regression (Bestimmung der Signifikanz über t-Test) durchgeführt. Die Normalverteilung der Halbjahresniederschlagssummen zur Berechtigung der Durchführung des t-Tests wurde im Kapitel 7.4.3.2 nachgewiesen. Es werden sowohl Tagessummen als auch kontinuierliche Zeitreihen betrachtet. Die Trendanalysen wurden für den Gesamtzeitraum und für die gleitenden Fenster durchgeführt ($\hookrightarrow$ Kap. 6.1).

9.3.1 Ergebnisinterpretation für Gesamt-NRW

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Trendanalysen der Jahresniederschlagssummen ($\hookrightarrow$ Kap. 9.2) wird bei den Halbjahresniederschlagssummen für die Interpretation der Trendanalysen primär der Gesamtzeitraum herangezogen. Eine kurze Analyse der gleitenden Fenster erfolgt im Anschluss. Für die Trendanalysen der Halbjahresniederschlagssummen stehen wie bei den Jahresniederschlagssummen je nach Zeitfenster unterschiedlich viele Stationen zur Verfügung, die die gültige Mindestlänge bei einem Lückenanteil von maximal 3 % erfüllen ($\hookrightarrow$ Tab. 9.10).

Tabelle 9.10: Anzahl der bei den Trendanalysen der Halbjahresniederschlagssummen berücksichtigten Stationen in Abhängigkeit vom Zeitfenster

Verfügbare Stationen Halbjahressummen		
Zeitfenster	Anzahl der Stationen Winter	Anzahl der Stationen Sommer
1950-2008 (Gesamtzeitraum)	183	182
1950-1979 (Gleitendes Fenster I)	344	346
1961-1990 (Gleitendes Fenster II)	415	417
1971-2000 (Gleitendes Fenster III)	452	454
1979-2008 (Gleitendes Fenster IV)	405	403

9.3.1.1 Bewertung der Trendanalysen für den Gesamtzeitraum 1950-2008, Winterhalbjahr

Für den Gesamtzeitraum 1950-2008 zeigen sich fast ausschließlich positive Trends. Die Steigungen der Trendgeraden liegen beim Verfahren der linearen Regression an 90 % der Stationen zwischen 0,4 und 3,4 mm/Jahr ($\hookrightarrow$ Tab. 9.11, Abb. 9.14 und Tab. 9.12).

Die Signifikanz der positiven Trendentwicklung der Halbjahresniederschlagssummen des Winterhalbjahres im Gesamtzeitraum 1950-2008 liegt bei mehr als 80 % der Stationen bei mindestens 80 %, bei mehr als jeder zweiten Station bei mindestens 95 %. In Tabelle 9.13 (Lineare Regression) und Tabelle 9.14 (Mann-Kendall-Test) werden die Signifikanzniveaus, mit denen die Trends an den Stationen auftreten, zusammengefasst.

Tabelle 9.11: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen an 183 Stationen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (Winterhalbjahr) nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten der Winterhalbjahre 1950-2008		
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl [-]	Anzahl [%]
< -10	0	0
-10 bis -8	0	0
-8 bis -6	0	0
-6 bis -4	0	0
-4 bis -2	0	0
-2 bis 0	5	3
0 bis 2	114	62
2 bis 4	60	33
4 bis 6	4	2
6 bis 8	0	0
8 bis 10	0	0
> 10	0	0

In Tabelle 9.12 wird wie bei den Jahresniederschlagssummen ($\leftrightarrow$ Tab. 9.3) die Spannweite der Trends an allen berücksichtigten Stationen für die Halbjahresniederschlagssummen des Winterhalbjahres im Gesamtzeitraum 1950-2008 zusammengefasst.

Tabelle 9.12: Spannweite der Trends der Halbjahresniederschlagssummen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (Winterhalbjahr) nach dem Verfahren der linearen Regression (Steigung der Trendgeraden) und dem Mann-Kendall-Test (Tau)

Spannweite der Trends der Winterhalbjahre 1950-2008		
Lineare Regression		
Steigung der Trendgeraden [mm/a]	Minimum	Maximum
Gesamtspanne	-0,2	+5,2
90%-Spanne	+0,4	+3,4
Mann-Kendall-Test		
Tau [-]	Minimum	Maximum
Gesamtspanne	-0,01	+0,39
90%-Spanne	+0,05	+0,30

9 Auswertung der Niederschlagssummen

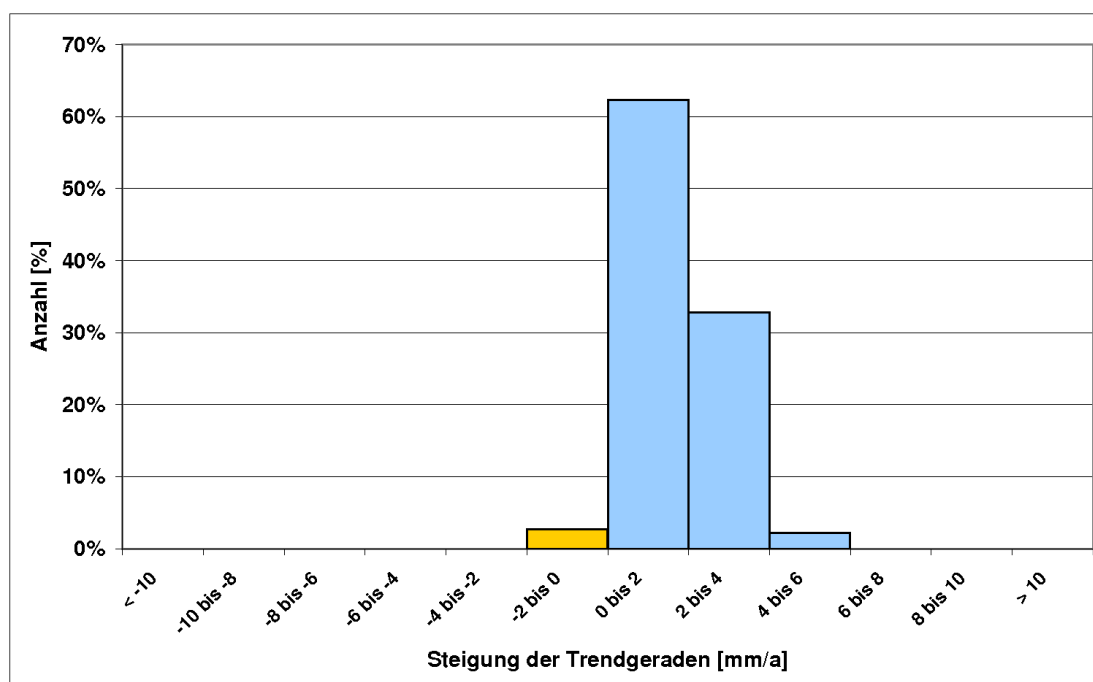


Abbildung 9.14: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen an 183 Stationen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (Winterhalbjahr) nach dem Verfahren der linearen Regression

Die räumliche Verteilung der Trends in den Halbjahresniederschlagssummen des Winterhalbjahres sind in Abbildung 9.15 (Lineare Regression, Steigung der Trendgeraden) und Abbildung 9.16 (Mann-Kendall-Test, Tau) dargestellt.

9.3 Auswertung der Halbjahressummen

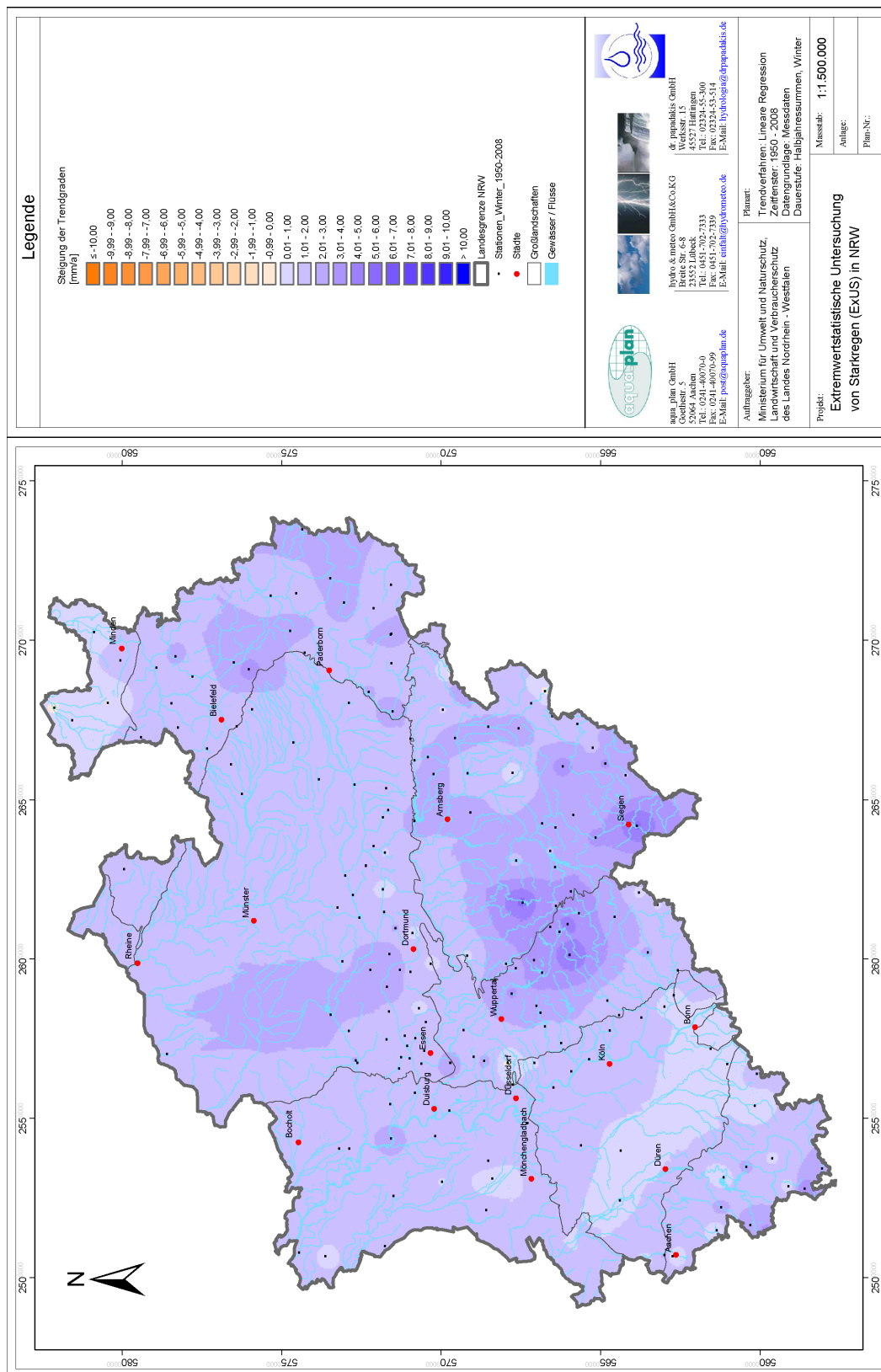


Abbildung 9.15: Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) aus linearer Regression für den Gesamtzeitraum 1950-2008

9 Auswertung der Niederschlagssummen

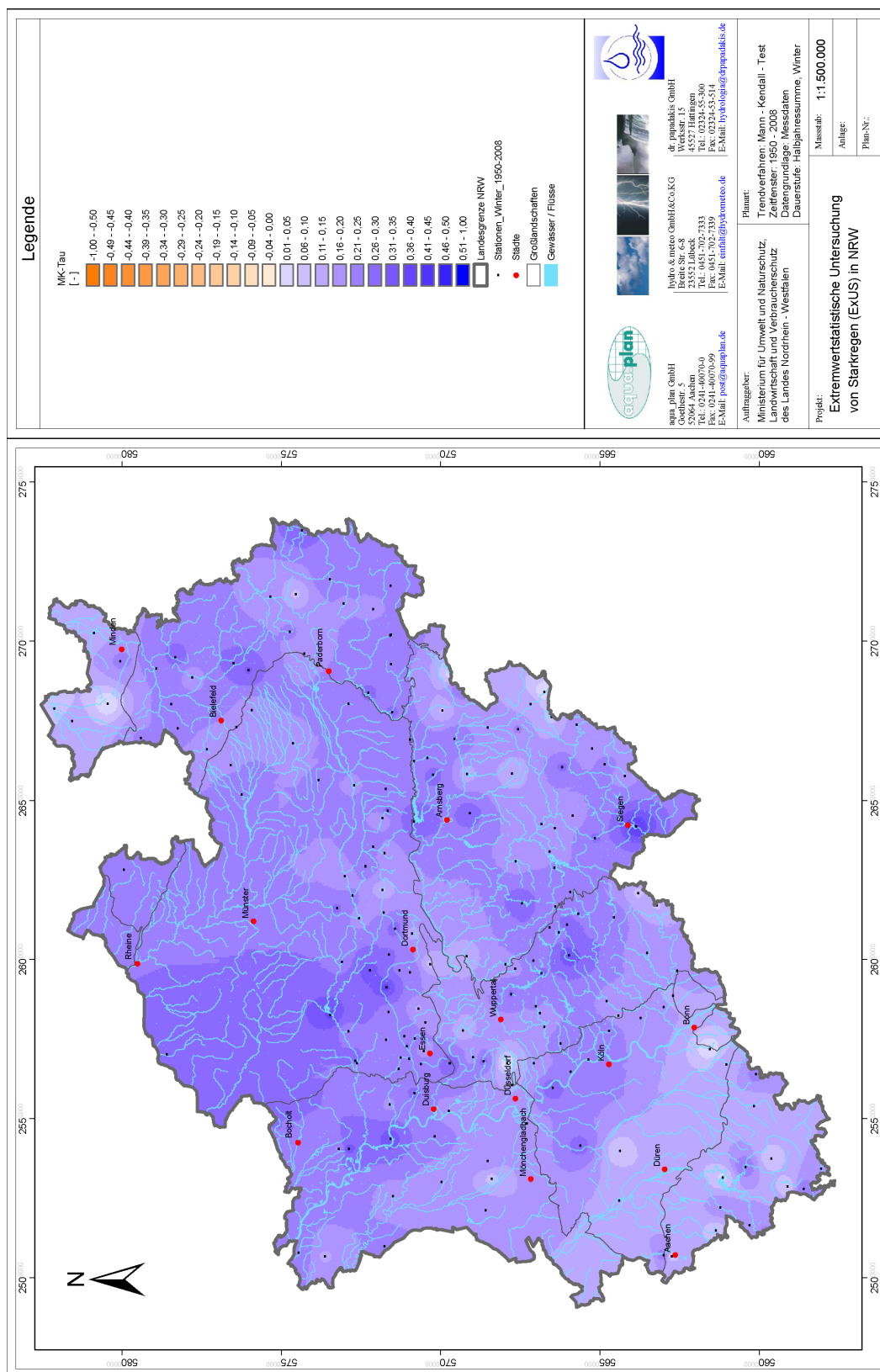


Abbildung 9.16: Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) aus Mann-Kendall-Test für den Gesamtzeitraum 1950-2008

9.3 Auswertung der Halbjahressummen

Die Signifikanz der positiven Trendentwicklung der Halbjahresniederschlagssummen des Winterhalbjahres im Gesamtzeitraum 1950-2008 liegt bei mehr als 80 % der Stationen bei mindestens 80 %, bei mehr als jeder zweiten Station bei mindestens 95 %. In Tabelle 9.13 (Lineare Regression) und Tabelle 9.14 (Mann-Kendall-Test) werden die Signifikanzniveaus, mit denen die Trends an den Stationen auftreten, zusammengefasst.

Tabelle 9.13: Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Halbjahresniederschlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (Winterhalbjahr)

Signifikanzniveaus der Trends (LR), Winterhalbjahr				
Signifikanzniveau [%]	Anzahl positiver Trends [-]	Anzahl negativer Trends [-]	Anzahl Gesamt [-]	Gesamt [%]
< 80	28	5	33	18
80	20	0	20	11
90	27	0	27	15
95	60	0	60	33
99	43	0	43	23

Tabelle 9.14: Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Halbjahresniederschlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (Winterhalbjahr)

Signifikanzniveaus der Trends (MKT), Winterhalbjahr				
Signifikanzniveau [%]	Anzahl positiver Trends [-]	Anzahl negativer Trends [-]	Anzahl Gesamt [-]	Gesamt [%]
< 80	24	1	25	14
80	15	0	15	8
90	25	0	25	14
95	63	0	63	34
99	55	0	55	30

In Abbildung 9.17 (Lineare Regression) und Abbildung 9.18 (Mann-Kendall-Test) wird durch die Größe der Uhr an jeder Station neben dem Trend auch das jeweilige Signifikanzniveau und somit die Verteilung signifikanter Trends im Raum dargestellt.

9 Auswertung der Niederschlagssummen

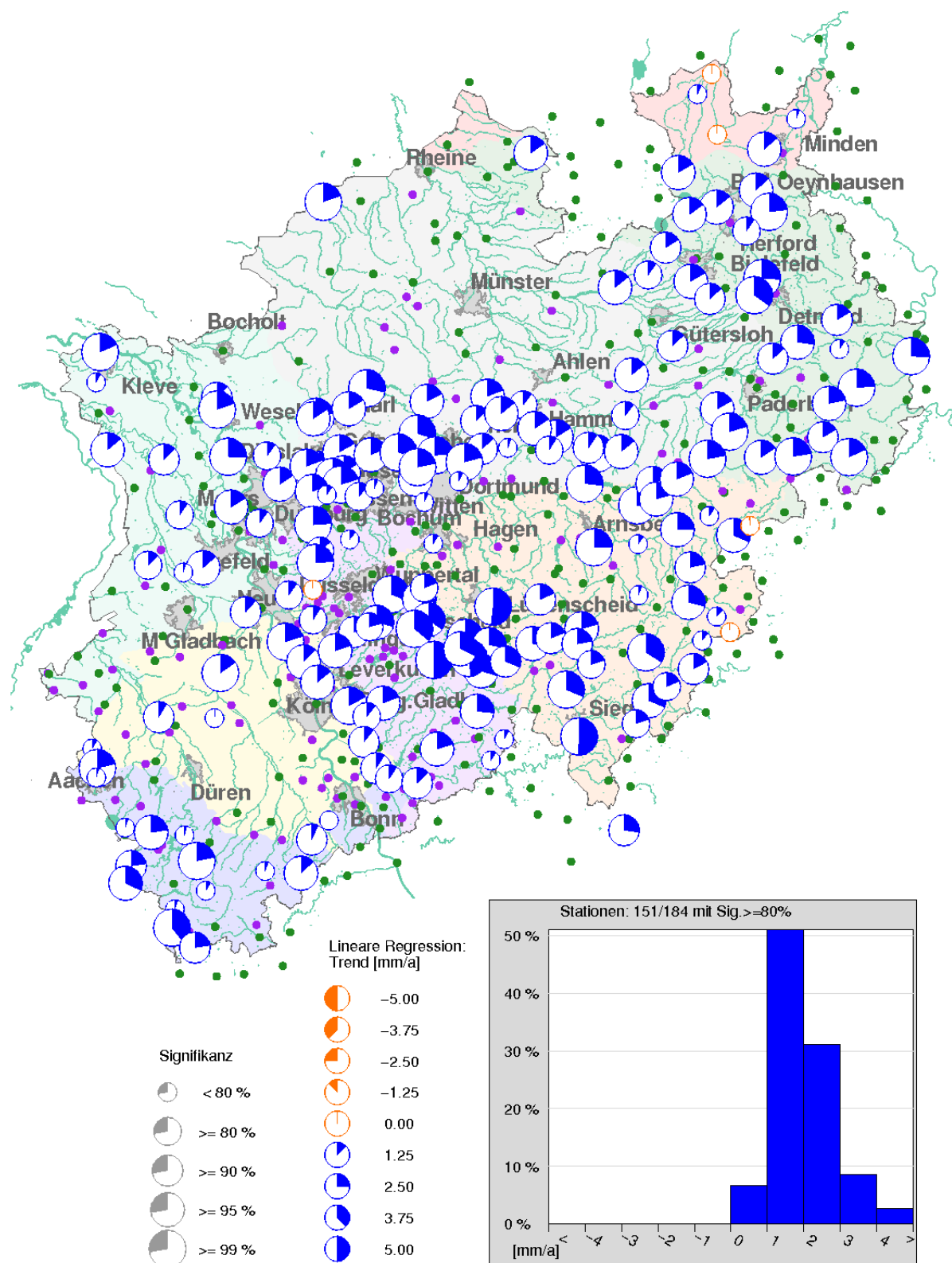


Abbildung 9.17: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalfjahr) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für den Gesamtzeitraum 1950-2008

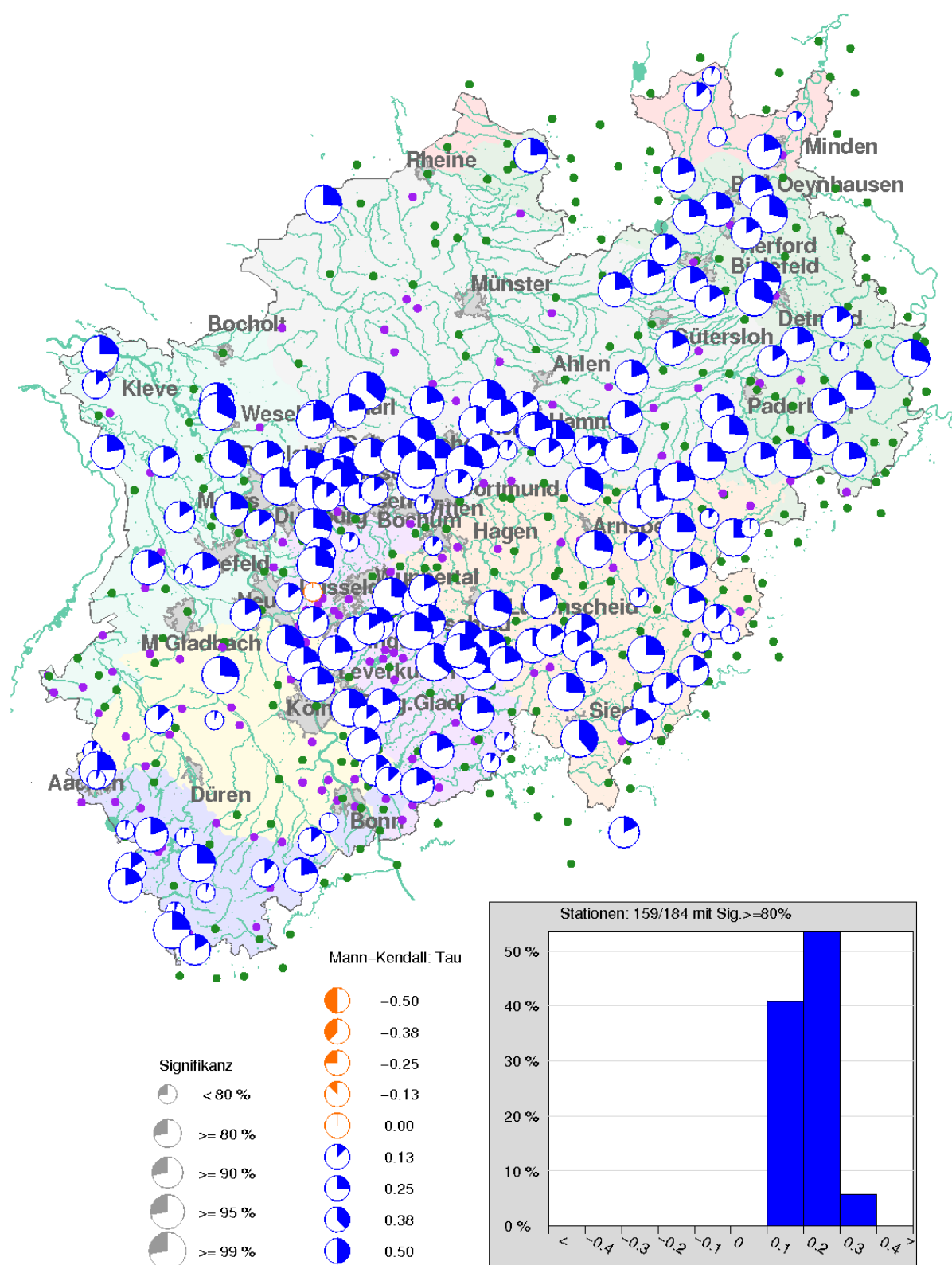


Abbildung 9.18: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) aus Mann-Kendall-Test für den Gesamtzeitraum 1950-2008

9 Auswertung der Niederschlagssummen

Zwischen den beiden Trendverfahren Lineare Regression und Mann-Kendall-Test sind die Unterschiede etwas größer als bei den Jahresniederschlagssummen ($\leftrightarrow$ Tab. 9.8), sie werden aber immer noch als gering bewertet. Beide Verfahren geben überwiegend das generelle Trendverhalten und auch die Signifikanz der Trends in einer vergleichbaren Größenordnung wieder. Tabelle 9.15 gibt an, wie oft in beiden Verfahren die Signifikanz der Trends in dieselbe Klasse (Signifikanzniveau $< 80\%$, 80% , 90% , 95% und 99%) fallen, bzw. wie oft sich die Ergebnisse um eine oder mehr als eine Klasse unterscheiden.

Tabelle 9.15: Unterschiede der beiden Verfahren Lineare Regression/t-Test und Mann-Kendall-Test beim Signifikanzniveau (Winterhalbjahr)

Unterschiede LR und MKT beim Signifikanzniveau, Winterhalbjahr		
Unterschiede	Anzahl [-]	Anzahl [%]
0 Klassen	132	72
1 Klasse	46	25
> 1 Klasse	5	3

9.3.1.2 Bewertung der Trendanalysen für den Gesamtzeitraum 1950-2008, Sommerhalbjahr

Für den Gesamtzeitraum 1950-2008 zeigen sich ausgewogen viele positive und negative Trends auf einem insgesamt niedrigen Niveau. Die Steigungen der Trendgeraden liegen beim Verfahren der linearen Regression an 90% der Stationen zwischen $-1,0$ und $0,9$ mm/Jahr ($\leftrightarrow$ Abb. 9.19, Tab. 9.16 und Tab. 9.17).

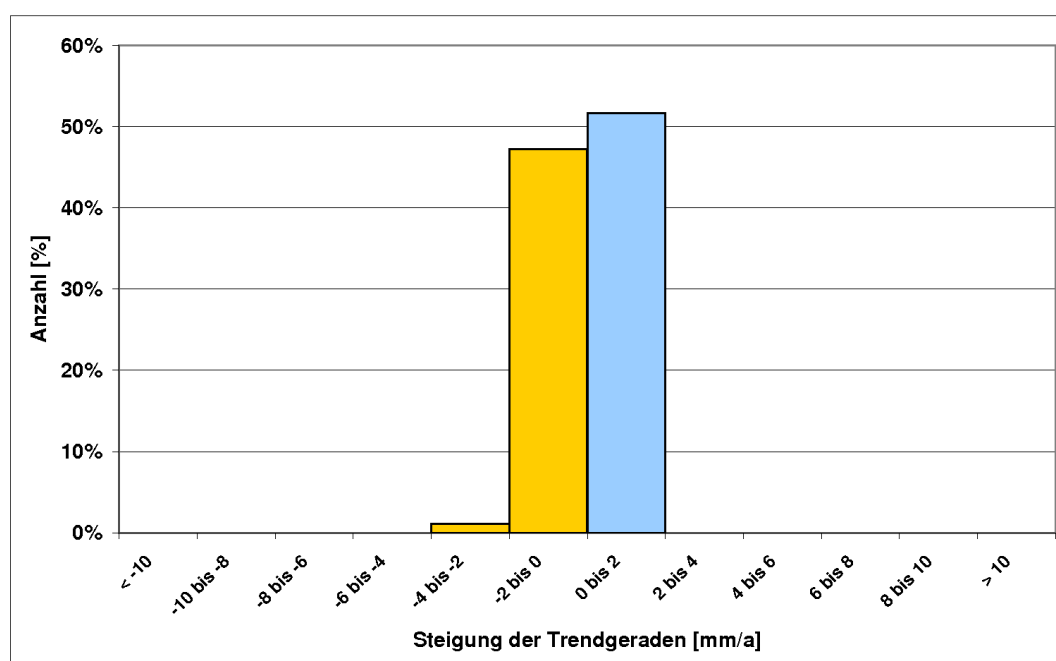


Abbildung 9.19: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen an 182 Stationen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (Sommerhalbjahr) nach dem Verfahren der linearen Regression

9 Auswertung der Niederschlagssummen

Tabelle 9.16: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen an 182 Stationen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (Sommerhalbjahr) nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten der Sommerhalbjahre 1950-2008		
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl [-]	Anzahl [%]
< -10	0	0
-10 bis -8	0	0
-8 bis -6	0	0
-6 bis -4	0	0
-4 bis -2	2	1
-2 bis 0	86	47
0 bis 2	94	52
2 bis 4	0	0
4 bis 6	0	0
6 bis 8	0	0
8 bis 10	0	0
> 10	0	0

In Tabelle 9.17 wird wie bei den Jahresniederschlagssummen ($\leftrightarrow$ Tab. 9.3) die Spannbreite der Trends an allen berücksichtigten Stationen für die Halbjahresniederschlagssummen des Sommerhalbjahres im Gesamtzeitraum 1950-2008 zusammengefasst.

Tabelle 9.17: Spannbreite der Trends der Halbjahresniederschlagssummen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (Sommerhalbjahr) nach dem Verfahren der linearen Regression (Steigung der Trendgeraden) und dem Mann-Kendall-Test (Tau)

Spannbreite der Trends für die Sommerhalbjahre 1950-2008		
Lineare Regression		
Steigung der Trendgeraden [mm/a]	Minimum	Maximum
Gesamtspanne	-2,3	+1,7
90%-Spanne	-1,0	+0,9
Mann-Kendall-Test		
Tau [-]	Minimum	Maximum
Gesamtspanne	-0,28	+0,11
90%-Spanne	-0,11	+0,08

Die räumliche Verteilung der Trends in den Halbjahresniederschlagssummen des Sommerhalbjahres sind in Abbildung 9.20 (Lineare Regression, Steigung der Trendgeraden) und Abbildung 9.21 (Mann-Kendall-Test, Tau) dargestellt.

9.3 Auswertung der Halbjahressummen

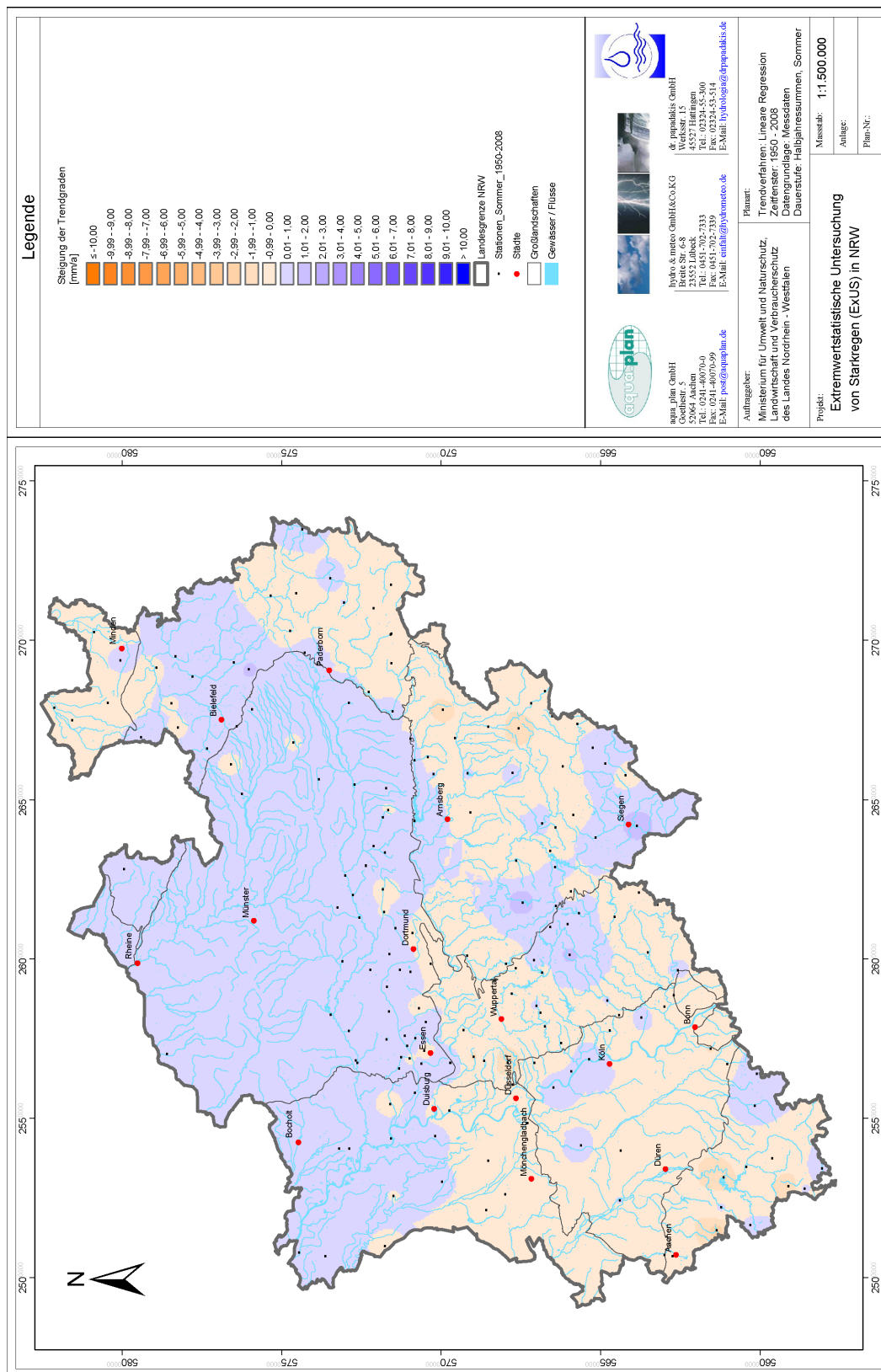


Abbildung 9.20: Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) aus linearer Regression für den Gesamtzeitraum 1950-2008

9 Auswertung der Niederschlagssummen

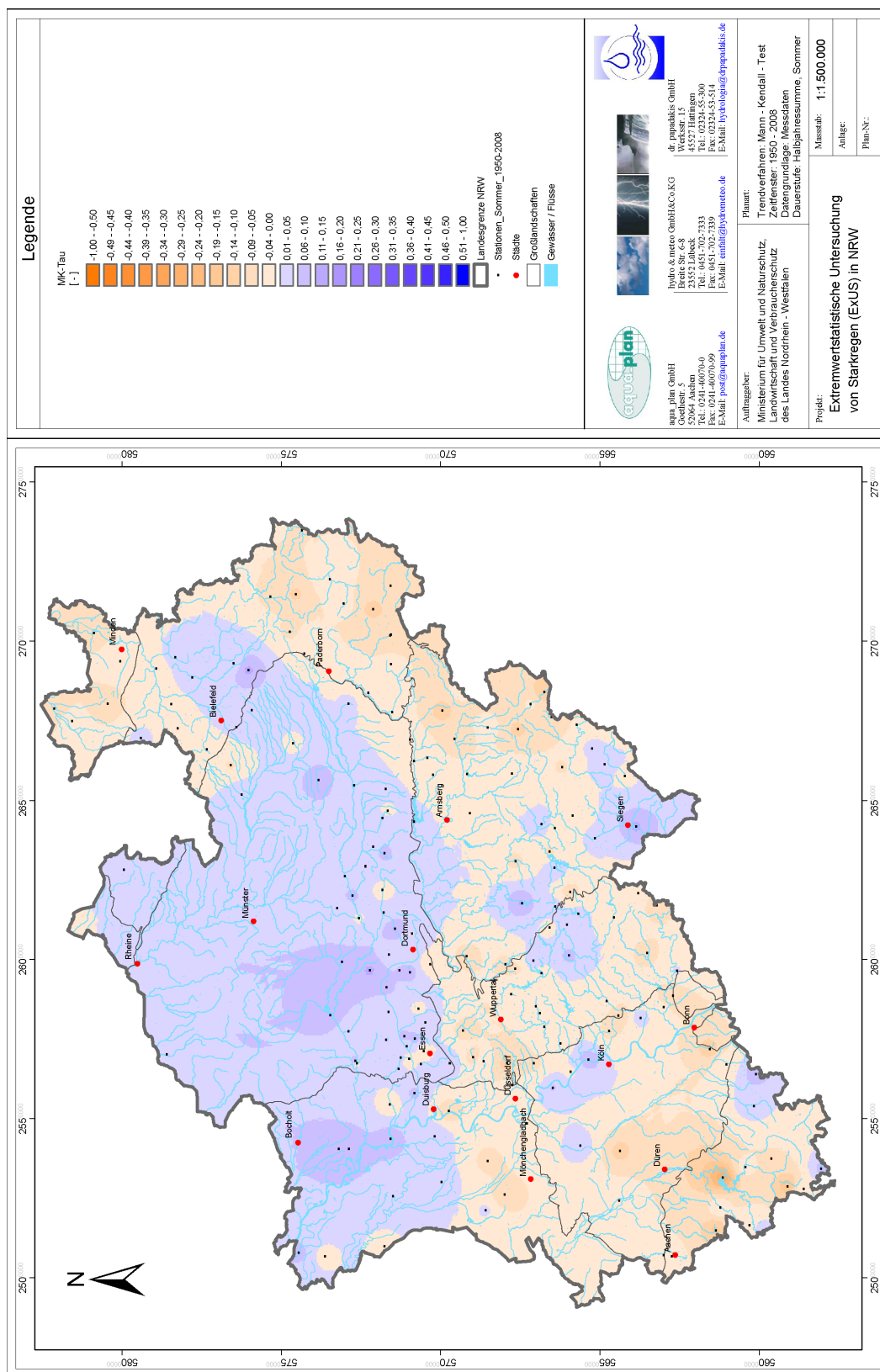


Abbildung 9.21: Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) aus Mann-Kendall-Test für den Gesamtzeitraum 1950-2008

9.3 Auswertung der Halbjahressummen

Die Signifikanz der Trendentwicklungen der Halbjahresniederschlagssummen des Sommerhalbjahres im Gesamtzeitraum 1950-2008 liegt nur in Ausnahmefällen (4 % der Stationen) bei 80 % oder darüber. In Tabelle 9.18 (Lineare Regression) und Tabelle 9.19 (Mann-Kendall-Test) werden die Signifikanzniveaus, mit denen die Trends an den Stationen auftreten, zusammengefasst.

Tabelle 9.18: Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Halbjahresniederschlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (Sommerhalbjahr)

Signifikanzniveaus der Trends (LR), Sommerhalbjahr				
Signifikanzniveau [%]	Anzahl positiver Trends [-]	Anzahl negativer Trends [-]	Anzahl Gesamt [-]	Gesamt [%]
< 80	91	80	171	94
80	3	4	7	4
90	0	1	1	1
95	0	2	2	1
99	0	1	1	1

Tabelle 9.19: Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Halbjahresniederschlagssummen im Gesamtzeitraum 1950-2008 (Sommerhalbjahr)

Signifikanzniveaus der Trends (MKT), Sommerhalbjahr				
Signifikanzniveau [%]	Anzahl positiver Trends [-]	Anzahl negativer Trends [-]	Anzahl Gesamt [-]	Gesamt [%]
< 80	76	98	174	96
80	0	5	5	3
90	0	1	1	1
95	0	1	1	1
99	0	1	1	1

In Abbildung 9.22 (Lineare Regression) und Abbildung 9.23 (Mann-Kendall-Test) wird durch die Größe der Uhr an jeder Station neben dem Trend auch das jeweilige Signifikanzniveau und somit die Verteilung signifikanter Trends im Raum dargestellt.

9 Auswertung der Niederschlagssummen

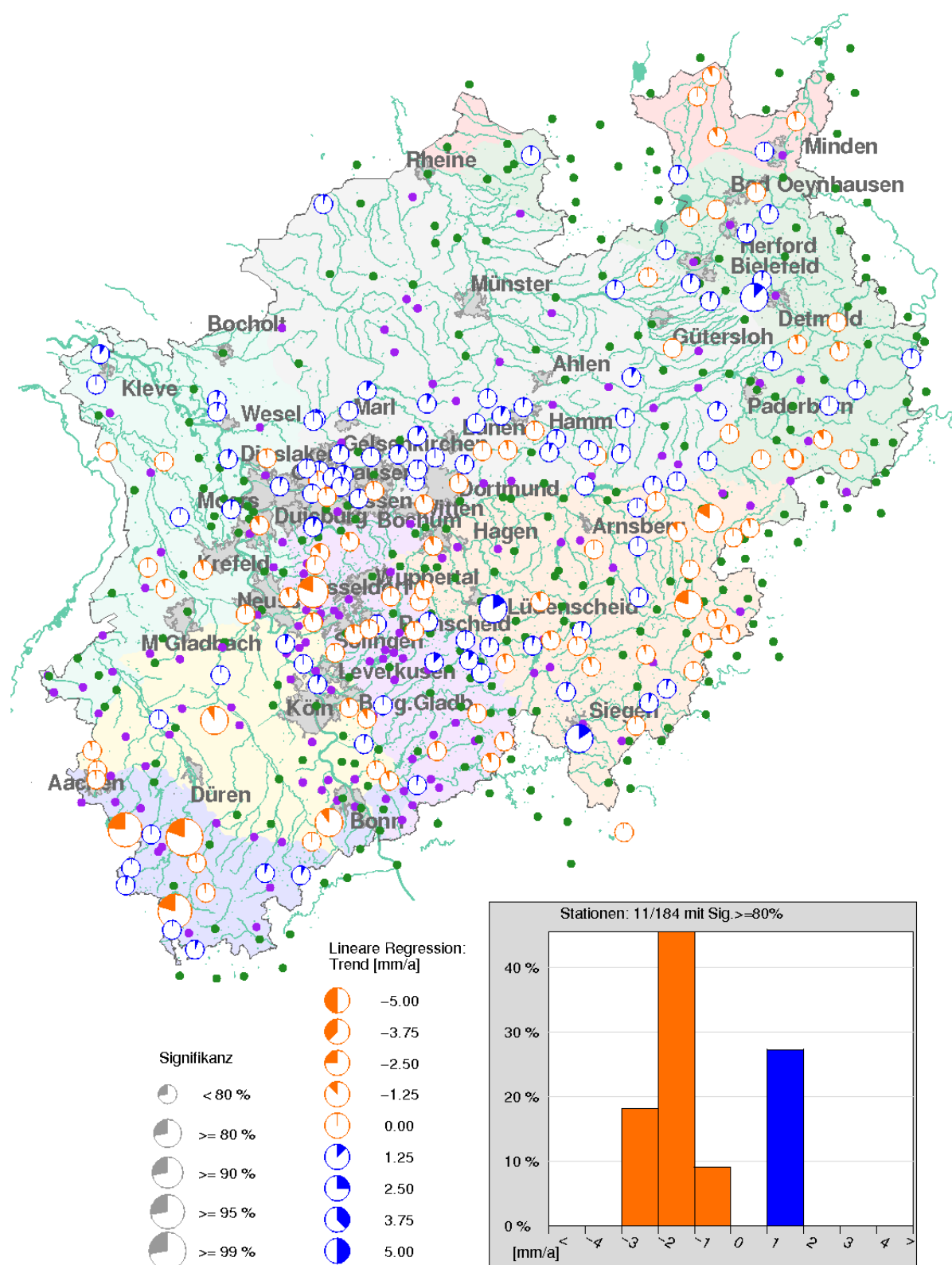


Abbildung 9.22: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für den Gesamtzeitraum 1950-2008

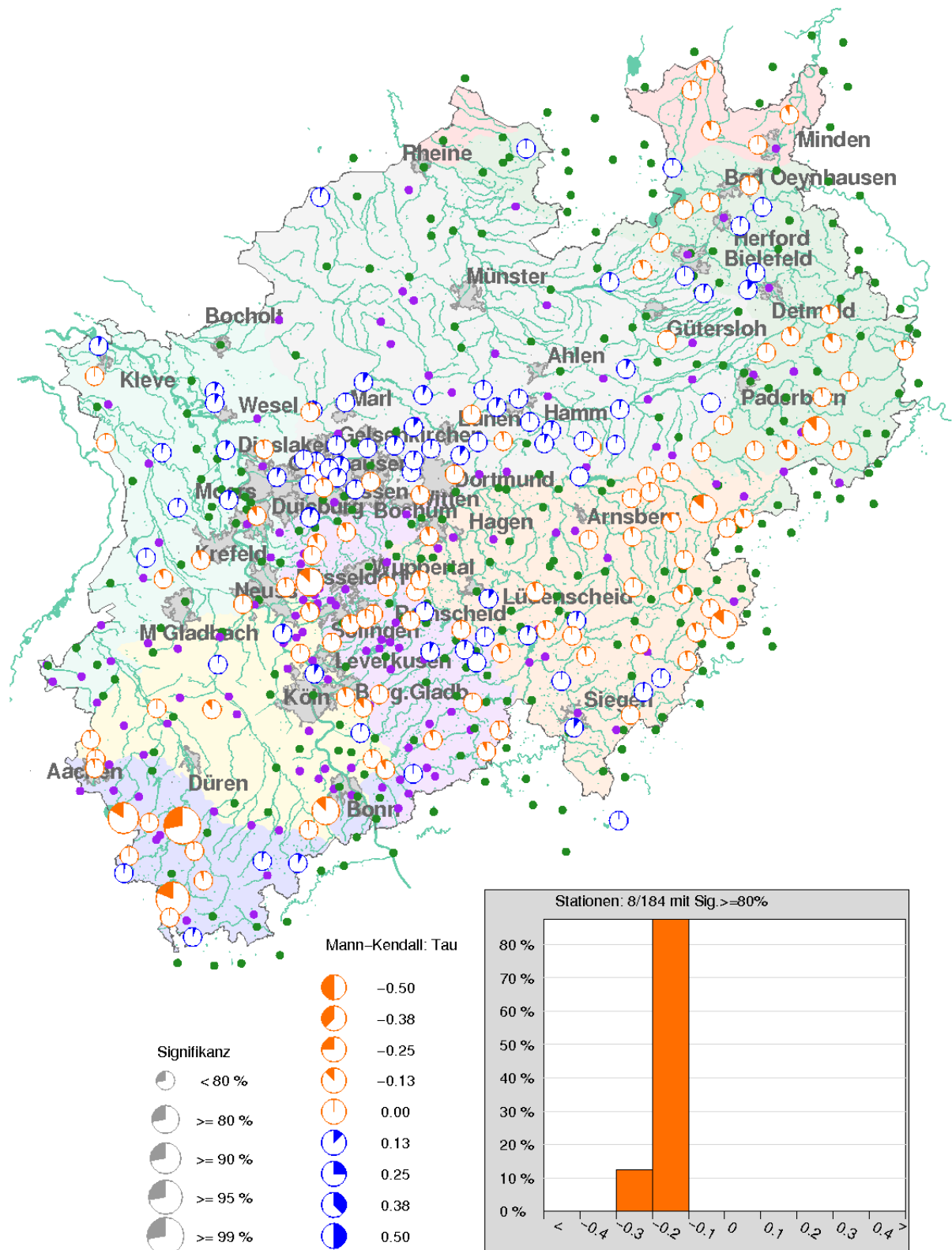


Abbildung 9.23: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) aus Mann-Kendall-Test für den Gesamtzeitraum 1950-2008

9 Auswertung der Niederschlagssummen

Zwischen den beiden Trendverfahren Lineare Regression und Mann-Kendall-Test treten nur sehr geringe Unterschiede auf. Beide Verfahren geben das generelle Trendverhalten und auch die Signifikanz der Trends in einer vergleichbaren Größenordnung wieder. Tabelle 9.20 gibt an, wie oft in beiden Verfahren die Signifikanz der Trends in dieselbe Klasse (Signifikanzniveau < 80 %, 80 %, 90 %, 95 % und 99 %) fallen, bzw. wie oft sich die Ergebnisse um eine oder mehr als eine Klasse unterscheiden.

Tabelle 9.20: Unterschiede der beiden Verfahren Lineare Regression/t-Test und Mann-Kendall-Test beim Signifikanzniveau (Sommerhalbjahr)

Unterschiede LR und MKT beim Signifikanzniveau, Sommerhalbjahr		
Unterschiede	Anzahl [-]	Anzahl [%]
0 Klassen	173	95
1 Klasse	9	5
> 1 Klasse	0	0

9.3.1.3 Bewertung der Trendanalysen für die gleitenden Zeitfenster, Winterhalbjahr

Für das Winterhalbjahr zeigen sich in den einzelnen 30-Jahres-Zeitfenstern unterschiedliche Trendverhalten. Die Unterschiede fallen allerdings nicht so extrem wie bei den Jahresniederschlagssummen und bei den Halbjahresniederschlagssummen im Sommerhalbjahr aus. In Abbildung 9.24 und Abbildung 9.25 werden exemplarisch das Trendverhalten in den beiden Zeitfenstern 1950-1979 und 1971-2000 gezeigt. Die Trends an den einzelnen Stationen und ihr jeweiliges Signifikanzniveau werden in Abbildung 9.26 (1950-1979) und Abbildung 9.27 (1971-2000) dargestellt.

Im Folgenden werden die wesentlichen Eigenschaften der Trends in den vier gleitenden Zeitfenstern zusammengefasst (Tabelle 9.21). Als Vergleich werden zudem noch einmal die Kernaussagen zum Gesamtzeitraum mit angegeben. Detaillierte Informationen zu den gleitenden Zeitfenstern, wie sie in den Tabellen und Abbildungen zum Gesamtzeitraum dargestellt wurden, werden im Anhang C.2 zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Tabelle 9.21 zeigen deutlich, dass die Spannen und die Beträge der Trends mit zunehmender Zeitreihenlänge (Gesamtzeitraum gegenüber gleitenden Fenstern) abnehmen. Bei längeren Betrachtungszeiträumen sind aufgrund sich ausgleichender Wirkungen in den natürlichen klimatologischen Schwankungen geringere absolute Werte in den Trends zu erwarten.

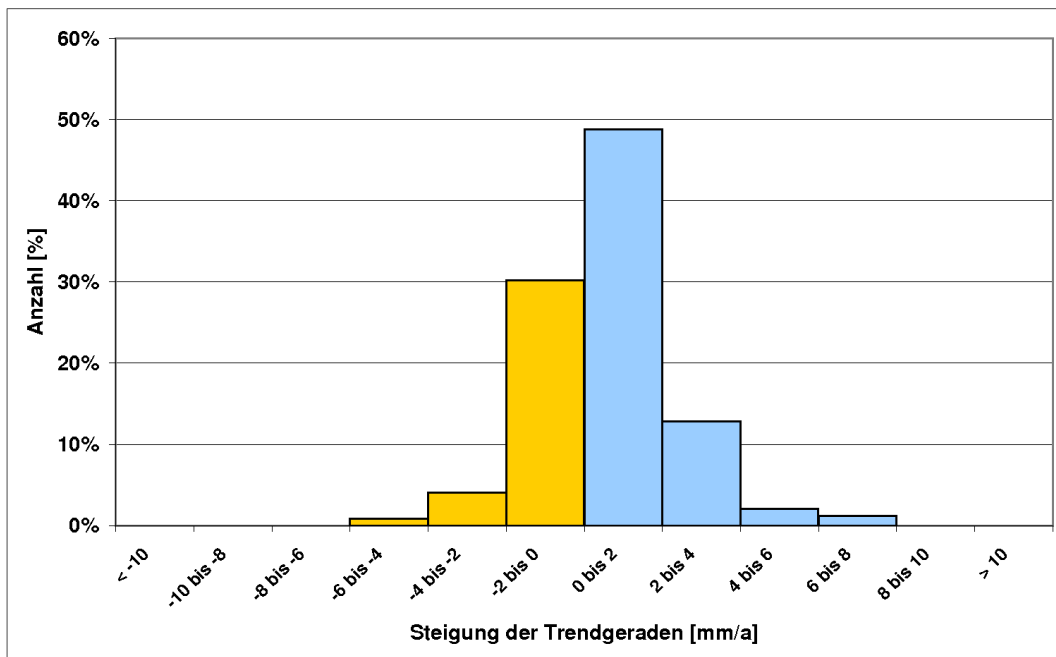


Abbildung 9.24: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) an 344 Stationen für den 30-Jahreszeitraum 1950-1979 nach dem Verfahren der linearen Regression

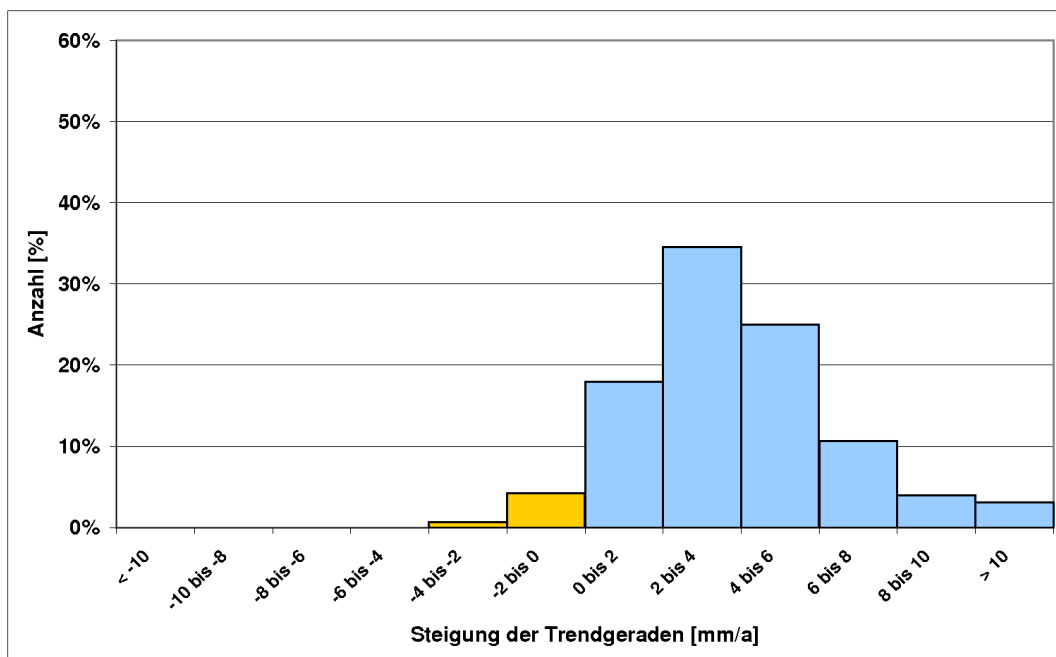


Abbildung 9.25: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) an 452 Stationen für den 30-Jahreszeitraum 1971-2000 nach dem Verfahren der linearen Regression

9 Auswertung der Niederschlagssummen

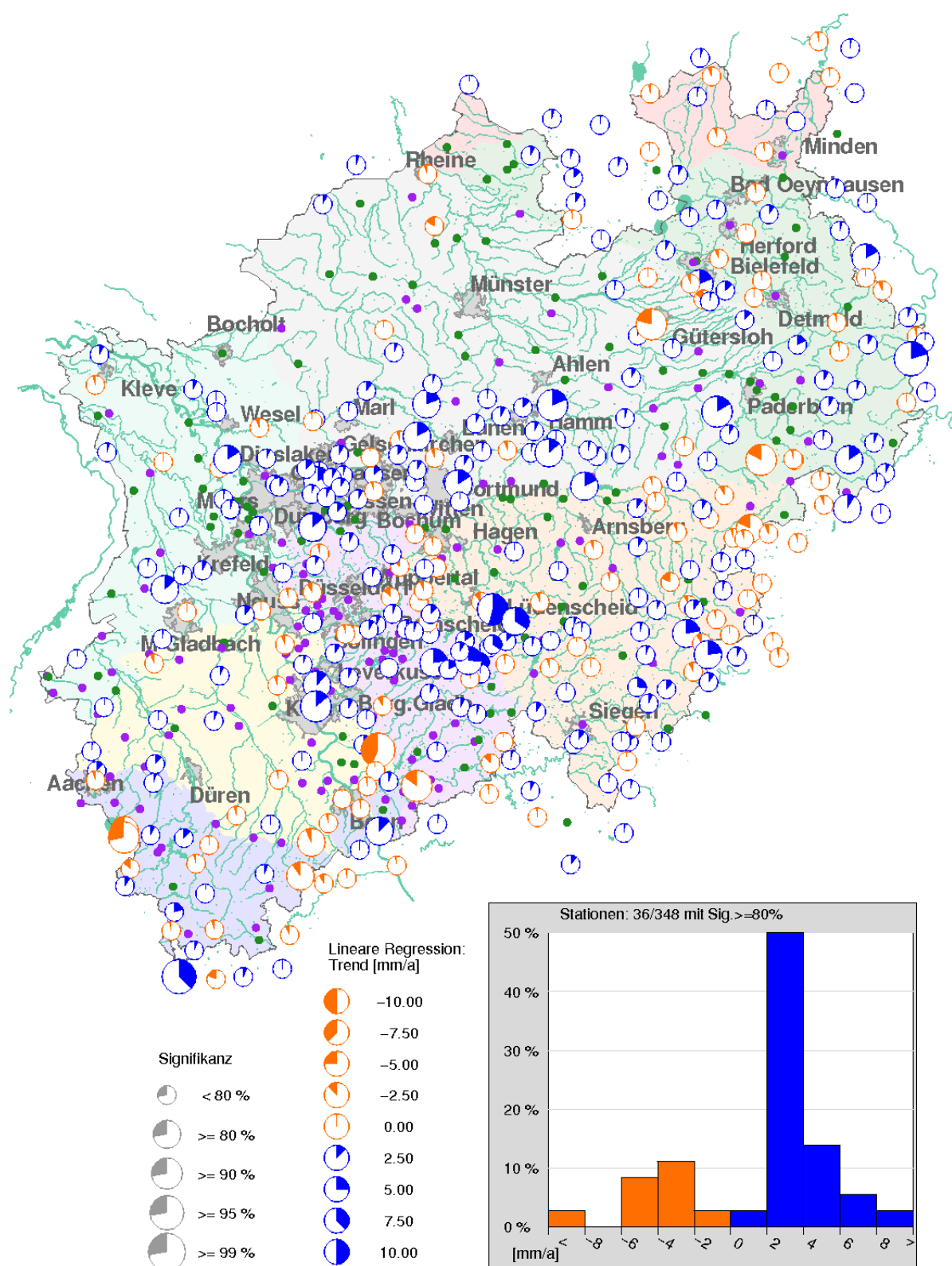


Abbildung 9.26: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für das Zeitfenster 1950-1979

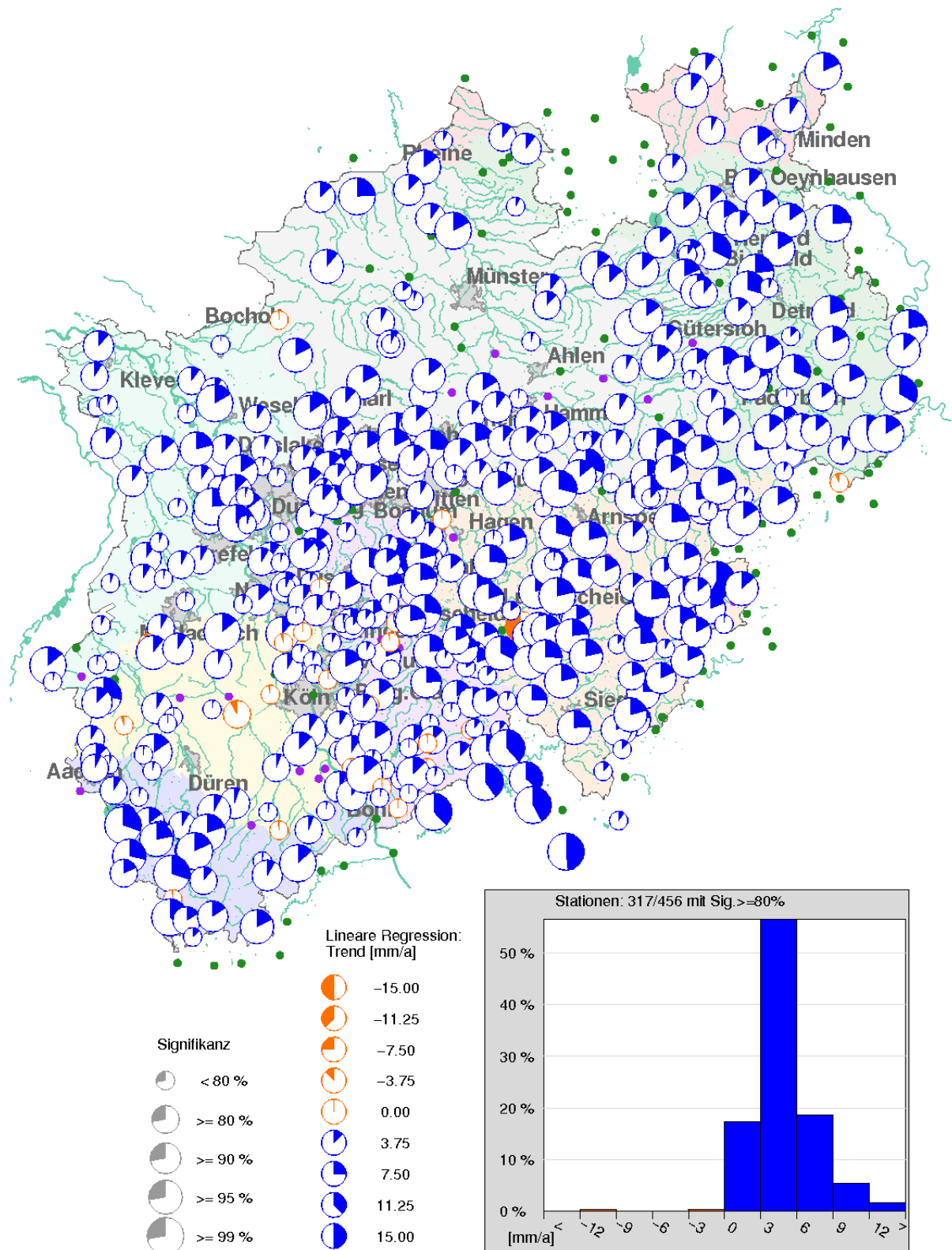


Abbildung 9.27: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für das Zeitfenster 1971-2000

9 Auswertung der Niederschlagssummen

Tabelle 9.21: Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Halbjahressummen (Winterhalbjahr) in den vier gleitenden Fenstern im Vergleich zum Gesamtzeitraum; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), 90%-Spanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test

Trendeigenschaften der gleitenden Fenster, Winterhalbjahr				
Zeitraum	Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden)	90%- Spanne [mm/a]	Signifikanz	Unterschiede MKT/LR
1950-1979	2/3 positiv, 1/3 negativ, 79 % der Trends liegen in den Klassen zwischen -2 mm/a und +2 mm/a	-2,0 bis +3,5	nur 10 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	sehr gering
1961-1990	3/4 positiv, 1/4 negativ, 81 % der Trends liegen in den Klassen zwischen -2 mm/a und +4 mm/a	-2,0 bis +6,2	nur 21 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	gering
1971-2000	fast ausschließlich positiv, 77 % der Trends liegen in den Klassen zwischen 0 mm/a und +6 mm/a	0 bis +8,8	69 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 54 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	hoch (an 50 % der Stationen), aber überwiegend (43 %) nur Unterschiede um eine Klasse
1979-2008	57 % positiv, 43 % negativ, 75 % der Trends liegen in den Klassen zwischen -2 mm/a und +2 mm/a	-3,5 bis +3,1	nur 10 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	sehr gering
1950-2008	fast ausschließlich positiv, 95 % der Trends liegen in den Klassen zwischen 0 mm/a und +4 mm/a	-0,4 bis +3,4	82 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 71 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	treten an 28 % der Stationen auf, ohne die Gesamtaussagen zu verfälschen

9.3.1.4 Bewertung der Trendanalysen für die gleitenden Zeitfenster, Sommerhalbjahr

Auch für das Sommerhalbjahr zeigen sich in den einzelnen 30-Jahres-Zeitfenstern unterschiedliche Trendverhalten. In Abbildung 9.28 und Abbildung 9.29 wird exemplarisch das gegenläufige Trendverhalten in den beiden Zeitfenstern 1950-1979 und 1971-2000 gezeigt. Die Trends an den einzelnen Stationen und ihr jeweiliges Signifikanzniveau werden in Abbildung 9.30 (1950-1979) und Abbildung 9.31 (1971-2000) dargestellt.

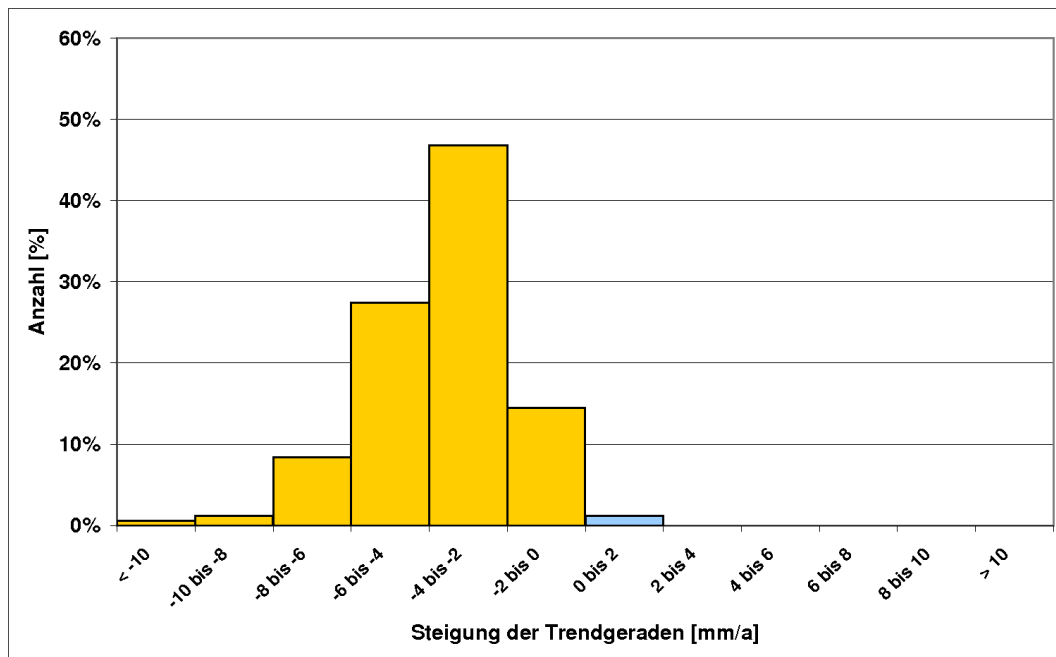


Abbildung 9.28: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) an 346 Stationen für den 30-Jahreszeitraum 1950-1979 nach dem Verfahren der linearen Regression

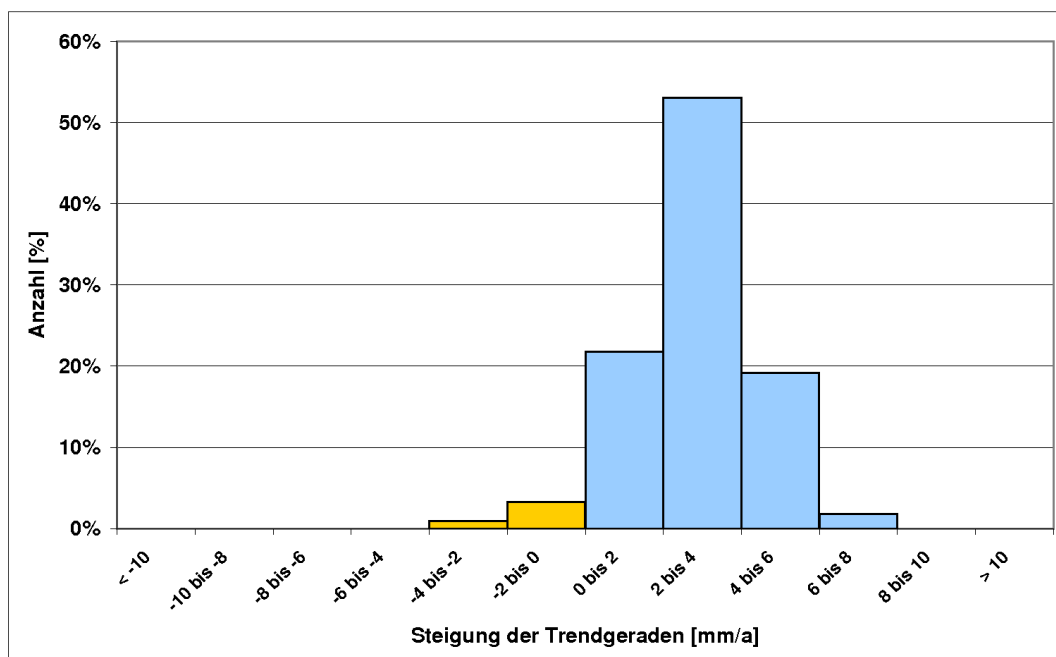


Abbildung 9.29: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) an 454 Stationen für den 30-Jahreszeitraum 1971-2000 nach dem Verfahren der linearen Regression

9 Auswertung der Niederschlagssummen

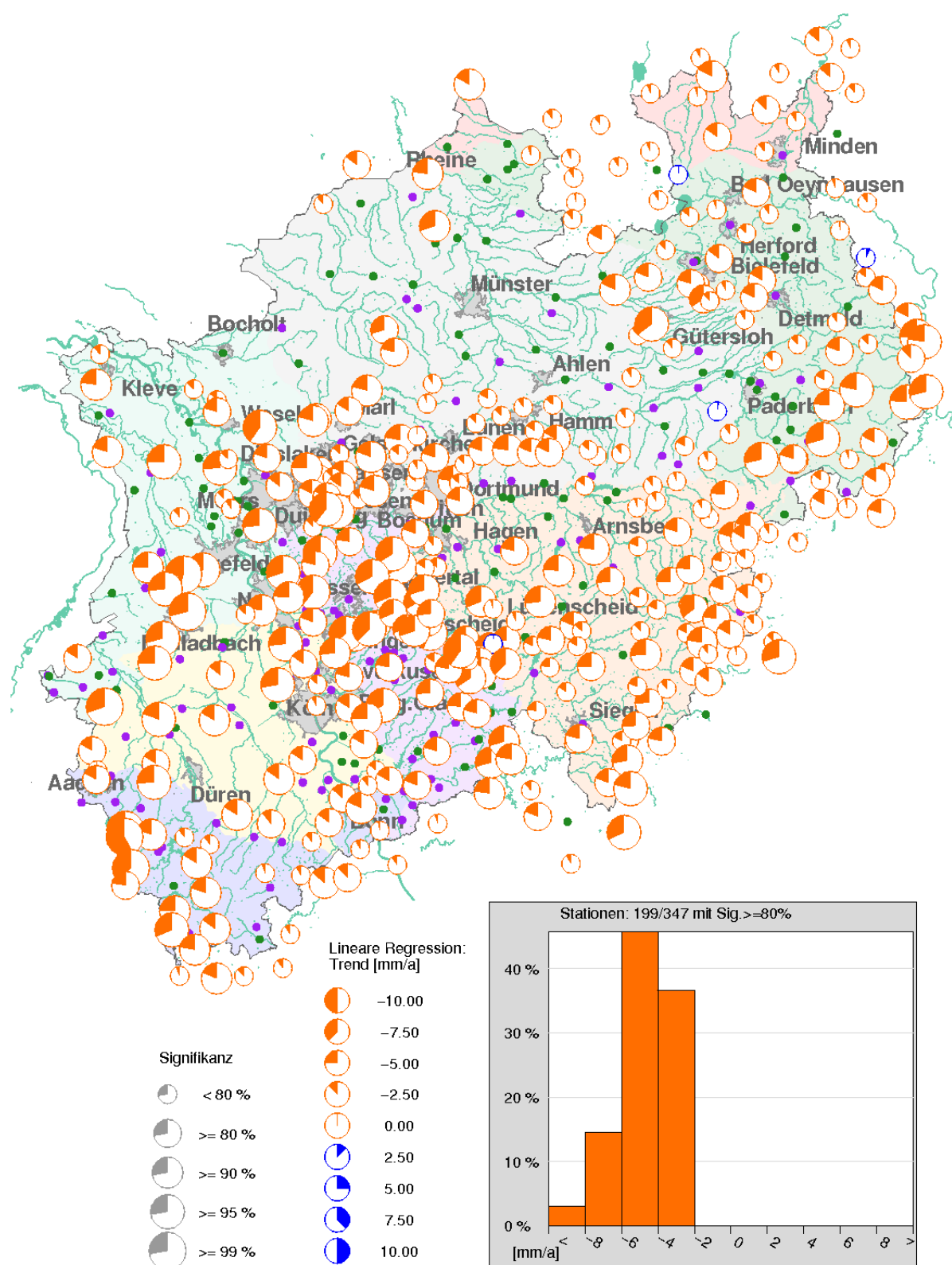


Abbildung 9.30: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für das Zeitfenster 1950-1979

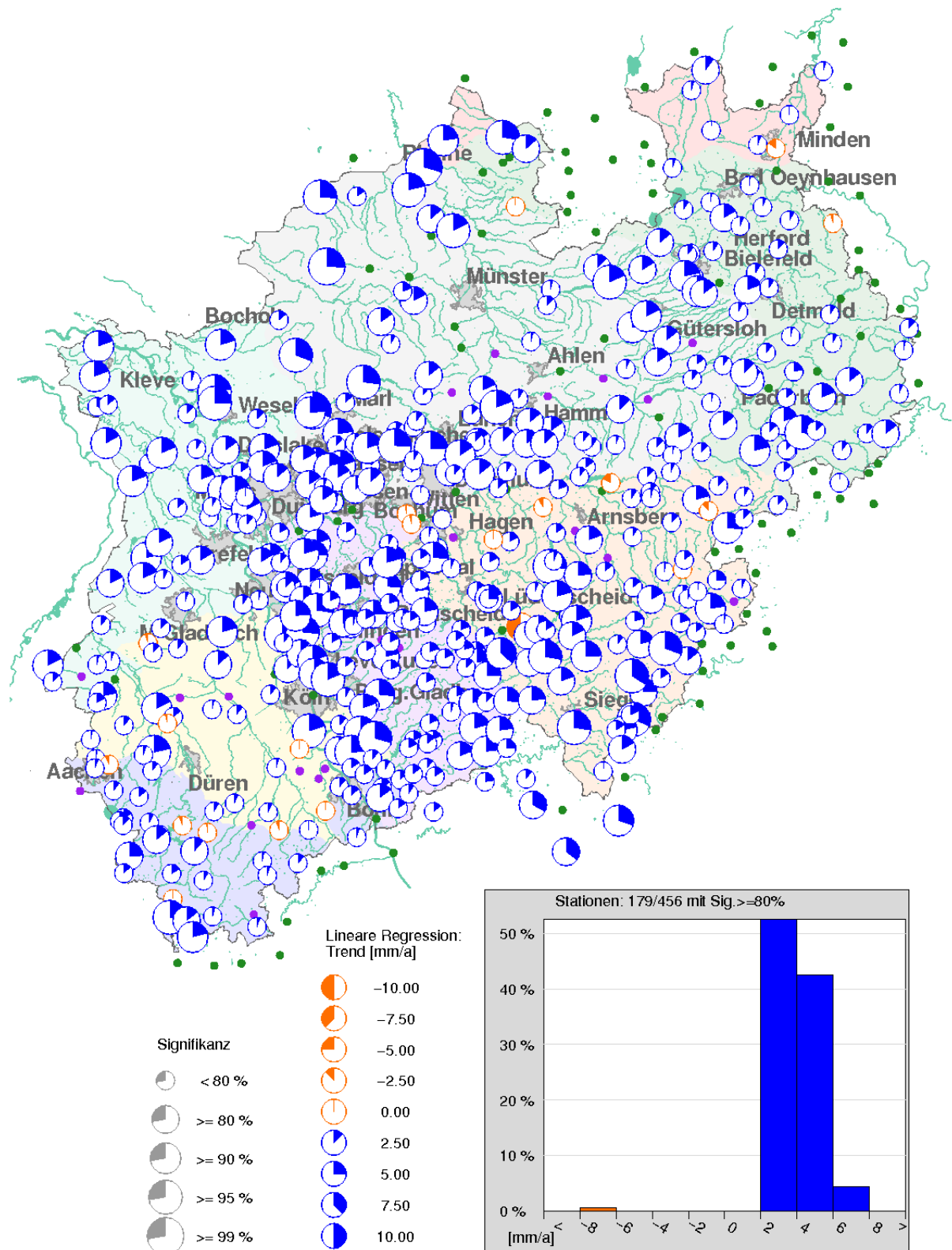


Abbildung 9.31: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für das Zeitfenster 1971-2000

9 Auswertung der Niederschlagssummen

Im Folgenden werden die wesentlichen Eigenschaften der Trends in den vier gleitenden Zeitfenstern zusammengefasst (Tabelle 9.22). Als Vergleich werden zudem noch einmal die Kernaussagen zum Gesamtzeitraum mit angegeben. Detaillierte Informationen zu den gleitenden Zeitfenstern, wie sie in den Tabellen und Abbildungen zum Gesamtzeitraum dargestellt wurden, werden im Anhang C.2 zusammengefasst.

Tabelle 9.22: Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Halbjahressummen (Sommerhalbjahr) in den vier gleitenden Fenstern im Vergleich zum Gesamtzeitraum; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), 90%-Spanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test

Trendeigenschaften der gleitenden Fenster, Sommerhalbjahr				
Zeitraum	Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden)	90%- Spanne [mm/a]	Signifikanz	Unterschiede MKT/LR
1950-1979	fast ausschließlich negativ, 74 % der Trends liegen in den Klassen zwischen -6 mm/a und -2 mm/a	-6,9 bis -1,2	58 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 29 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	treten an 25 % der Stationen auf, ohne die Gesamtaussagen zu verfälschen
1961-1990	40 % positiv, 60 % negativ, 80 % der Trends liegen in den Klassen zwischen -2 mm/a und +2 mm/a	-2,6 bis +2,5	nur 5 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	sehr gering
1971-2000	fast ausschließlich positiv, 94 % der Trends liegen in den Klassen zwischen 0 mm/a und +6 mm/a	+0,1 bis +5,3	39 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 18 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	treten an 24 % der Stationen auf, ohne die Gesamtaussagen zu verfälschen
1979-2008	3/4 positiv, 1/4 negativ, 90 % der Trends liegen in den Klassen zwischen -2 mm/a und +4 mm/a	-2,4 bis +3,7	nur 12 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	gering
1950-2008	1/2 positiv, 1/2 negativ, 99 % der Trends liegen in den Klassen zwischen -2 mm/a und +2 mm/a	-1,0 bis +0,9	nur 6 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	sehr gering

Die Ergebnisse der Tabelle 9.22 zeigen deutlich, dass die Spannen und die Beträge der Trends mit zunehmender Zeitreihenlänge (Gesamtzeitraum gegenüber gleitenden Fenstern) abnehmen. Bei längeren Betrachtungszeiträumen sind aufgrund sich ausgleichender Wirkungen in den natürlichen klimatologischen Schwankungen geringere absolute Werte in den Trends zu erwarten.

9.3.2 Regionale Besonderheiten, Winterhalbjahr

- **Niederrheinisches Tiefland, Niederrheinische Bucht und Westfälische Bucht**

Der Anteil signifikanter Trends (mit einem Signifikanzniveau $\geq 80\%$ und $\geq 90\%$) entspricht in etwa dem Landesdurchschnitt. Der größte Teil der Trends liegt in der relativ kleinen Spanne zwischen 0,5 mm/Jahr und 2,5 mm/Jahr, mit einer mittleren Zunahme von 1,46 mm/Jahr. In der Niederrheinischen Bucht fällt die Region zwischen Elsdorf (westlich von Köln) und Alter Volmershoven (nahe Bonn) heraus, da an diesen beiden Stationen äußerst kleine Trends auftreten. In der Westfälischen Bucht fällt die Region um Haltern, Castrop-Rauxel und Waltrop (nordwestlich von Dortmund) heraus, da an diesen drei Stationen relativ hohe Trends im Vergleich zur umliegenden Region auftreten. In beiden Regionen erscheinen die beiden Sonderfälle in der flächigen Darstellung ($\leftrightarrow$ Abb. 9.15) relativ großräumig. Dies ist in erster Linie auf die in diesen Regionen vorliegende geringe Stationsdichte und den damit überproportionalen Einfluss einzelner Stationen zurückzuführen.

- **Westfälisches Tiefland**

Die Trends beim Westfälischen Tiefland liegen wie bereits bei den Jahresniederschlagssummen weit unterhalb vom Landesdurchschnitt. Der Anteil signifikanter Trends (mit einem Signifikanzniveau $\geq 80\%$ bzw. $\geq 90\%$) liegt entsprechend nur bei 40 % bzw. 20 %. An zwei der Stationen liegen sogar für das Winterhalbjahr untypische negative Trends vor. Beim Westfälischen Tiefland handelt es sich allerdings nur um eine kleine Region mit nur fünf berücksichtigten Stationen.

- **Weserbergland**

Beim Weserbergland handelt es sich um die Region mit dem größten Anteil signifikanter Trends. 23 von 25 Stationen (92 %) besitzen ein Signifikanzniveau $\geq 90\%$. Die Spanne an 24 der 25 Stationen ist mit Zunahmen zwischen 1,0 mm/Jahr und 2,7 mm/Jahr relativ klein. Die mittlere Zunahme liegt mit 1,85 mm/Jahr aber auf einem relativ hohen Niveau. Wie bereits bei den Jahresniederschlagssummen besitzt eine Station in Lage (Kreis Lippe) eine für diese Region überdurchschnittliche Zunahme von 3,5 mm/Jahr.

- **Eifel (mit Siebengebirge), Bergisches Land, Sauer- und Siegerland**

In den Mittelgebirgen fällt wie bei den Jahresniederschlagssummen auf, dass hier einerseits hohe signifikante positive Trends und andererseits schwache positive Trends auf einem geringen Signifikanzniveau oder in wenigen Einzelfällen sogar negative Trends in unmittelbarer Nachbarschaft auftreten können. Da die Trends insgesamt ein hohes Signifikanzniveau besitzen, sind die Unterschiede vor allem im Bergischen Land und im westlichen Sauer- und Siegerland weniger stark ausgeprägt als bei den Jahresniederschlagssummen. In der Eifel (mit Siebengebirge) und im östlichen Sauer- und Siegerland, wo der Anteil signifikanter Trends unter dem Landesdurchschnitt liegt, sind die Unterschiede dagegen stärker ausgeprägt. Die größten Zunahmen zwischen 3,8 mm/Jahr und 5,2 mm/Jahr auf einem Signifikanzniveau von 99 % sind wie bei den Jahresniederschlagssummen im Dreieck der Ortschaften Lüdenscheid-Lindlar-Siegen an der Grenze des Bergischen Landes zum Sauer- und Siegerland zu verzeichnen.

9.3.3 Regionale Besonderheiten, Sommerhalbjahr

Im Sommerhalbjahr verläuft die Grenze zwischen positiven und negativen Trends zum Teil quer durch, dafür aber überregional über mehrere Großlandschaften hinweg ($\leftrightarrow$ Abb. 9.20). Die Stationen mit positiven Trends liegen im Wesentlichen nördlich einer horizontalen Linie durch die Städte Duisburg, Dortmund und Arnsberg sowie nordwestlich einer Geraden zwischen den Städten Arnsberg und Paderborn. Nördlich von Paderborn (bis Minden) reichen die Stationen mit positiven Trends bis an die östliche Landesgrenze von Nordrhein-Westfalen heran. Nördlich von Minden (Westfälische Bucht), östlich von Paderborn (südliches Weserbergland) und in der Südhälfte von Nordrhein-Westfalen treten dagegen überwiegend negative Trends auf, wobei auch regionale, kleinräumige Ausnahmen mit positiven Trends festzustellen sind. Eine dieser Ausnahmen stellen wiederum die Stationen im Dreieck der Ortschaften Lüdenscheid-Lindlar-Siegen an der Grenze des Bergischen Landes zum Sauer- und Siegerland dar, in denen (zum Teil sogar signifikante) positive Trends zu verzeichnen sind. Die Trends schwanken landesweit an 90 % der Stationen in einer Spanne zwischen $-1,0$ mm/Jahr und $+0,9$ mm/Jahr um den Nullwert, und an nur 6 % der Stationen ist ein signifikanter Trend (mit einem Signifikanzniveau ≥ 80 %) zu erkennen. Weitere Details sind den folgenden regionalen Bewertungen zu entnehmen.

- **Westfälische Bucht**

Die Trends an den Stationen der Westfälischen Bucht besitzen überwiegend (78 %) einen leicht positiven (bis $+1,0$ mm/Jahr), nicht signifikanten Charakter. Die Stationen mit nicht signifikanten negativen Trends (bis $-0,6$ mm/Jahr) liegen überwiegend an der südlichen Grenze der Westfälischen Bucht und bilden den Übergang in den südlichen Landesteil, der überwiegend von negativen Trends geprägt ist. Es ist aber zu berücksichtigen, dass in der Nordhälfte der Westfälischen Bucht nur eine geringe Stationsdichte vorliegt.

- **Niederrheinisches Tiefland**

Die überwiegend leicht positiven, nicht signifikanten Trends der Westfälischen Bucht finden sich auch in der Nordhälfte des Niederrheinischen Tieflandes (nördlich von Duisburg) wieder. Die Zunahmen betragen hier bis zu $+0,9$ mm/Jahr. In der südlichen Hälfte treten dagegen ausnahmslos nicht signifikante negative Trends mit Abnahmen bis zu $-1,0$ mm/Jahr auf.

- **Weserbergland**

Auch das Weserbergland ist wie das Niederrheinische Tiefland zweigeteilt. Ganz im Norden, im Übergang zum Westfälischen Tiefland (mit überwiegend negativen Trends) und in der südlichen Hälfte treten nicht signifikante, überwiegend negative Trends auf. In der verbleibenden nördlichen Hälfte sind die Trends dagegen positiv, auf einem überwiegend nicht signifikanten Niveau.

Westfälisches Tiefland: Das Trendverhalten der im Nordosten liegenden Stationen des Westfälischen Tieflands ähnelt den ansonsten eher in der Südhälfte von Nordrhein-Westfalen vorkommenden Stationen mit negativen Trends. Nur an einer Station (20 %) treten positive Trends auf. An allen Stationen sind die Trends nicht

signifikant. Beim Westfälischen Tiefland handelt es sich allerdings um eine kleine Region mit nur fünf berücksichtigten Stationen.

- **Niederrheinische Bucht**

An 57 % der Stationen, die großräumig über die Niederrheinische Bucht verteilt sind, treten negative Trends auf, die zwischen Elsdorf (westlich von Köln) und Alfter Volmershoven (nahe Bonn) ein Signifikanzniveau von 80 % besitzen. Die nicht signifikanten positiven Trends konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Stationen im Rheinland zwischen Köln, Leverkusen und Dormagen.

- **Eifel (mit Siebengebirge)**

Der Anteil an Stationen mit positiven Trends (50 %) entspricht etwa dem Landesdurchschnitt (52 %) und ist damit für eine im Süden liegende Großlandschaft relativ hoch. Besonders hervorzuheben ist in der Eifel der Anteil an Stationen (21 %) mit stark negativen Trends (Signifikanzniveau ≥ 95 %). Darüber hinaus sind wie bei den Jahresniederschlagssummen und den Halbjahresniederschlagssummen im Winterhalbjahr die großen Unterschiede im Trendverhalten an benachbarten Stationen auffällig.

- **Bergisches Land, Sauer- und Siegerland**

Der Anteil an Stationen mit positiven Trends ist mit 35 % (Bergisches Land) bzw. 38 % (Sauer- und Siegerland) relativ gering. Durch die Konzentration der Stationen mit zum Teil sogar signifikanten positiven Trends auf das Dreieck der Ortschaften Lüdenscheid-Lindlar-Siegen an der Grenze des Bergischen Landes zum Sauer- und Siegerland und auf die Stationen nördlich von Arnsberg, ergibt sich ein ansonsten großräumiges negatives Trendverhalten. Im Ostteil des Sauerlandes und in der Region zwischen Mettmann und Velbert-Langenberg (nordwestlich von Wuppertal) führen die relativ großen Abnahmen zwischen -1,0 mm/Jahr und -2,0 mm/Jahr teilweise sogar zu signifikant negativen Trends (Signifikanzniveau ≥ 80 %).

9.3.4 Zusammenfassung zu den Halbjahresniederschlagssummen

Die Untersuchungen der Trends in den Halbjahresniederschlagssummen für den Gesamtzeitraum 1950-2008 zeigen, dass die überwiegend positiven Trends der Jahresniederschlagssummen aus den Zunahmen im Winterhalbjahr resultieren. Im Winterhalbjahr treten fast ausschließlich signifikant positive Trends (Signifikanzniveau ≥ 80 %) zwischen 0 mm/Jahr und +3,4 mm/Jahr auf. Im Sommerhalbjahr zeigen sich dagegen zwischen 1950-2008 nur geringfügige, überwiegend nicht signifikante Trends zwischen -1,0 mm/Jahr und +0,9 mm/Jahr. Dabei fällt im Sommerhalbjahr eine relativ klare räumliche Abgrenzung zwischen Stationen mit positiven Trends und Stationen mit negativen Trends auf. Während nördlich der Ruhr und in der Region im Dreieck der Ortschaften Lüdenscheid-Lindlar-Siegen an der Grenze des Bergischen Landes zum Sauer- und Siegerland über-

wiegend positive Trends auftreten, sind die Trends in den übrigen Regionen Nordrhein-Westfalens überwiegend negativ. Die Unterschiede zwischen den beiden Trendverfahren Lineare Regression und Mann-Kendall-Test sind im Winterhalbjahr etwas größer als im Sommerhalbjahr und etwas größer als bei den Jahresniederschlagssummen. Da die Unterschiede aber die Gesamtaussage nicht verfälschen, werden sie immer noch als gering bewertet.

9.4 Auswertung der Monatssummen

Auch die Ergebnisse aus den Trendanalysen der Monatswerte können Erkenntnisse zu möglichen Verschiebungen der Niederschlagssummen im Jahresverlauf liefern. Dies ist z. B. zu vermuten, wenn zwei aufeinander folgende Monate gegenläufige Trends aufweisen. Aufgrund des geringen Niederschlages in den siebziger Jahren ($\leftrightarrow$ Kap. 9.2) und den damit verbundenen nicht verwertbaren Trendaussagen, wurde auf eine einzelne Trendauswertung der verschiedenen 30-Jahres-Fenster bei Auswertung der Monatssummen verzichtet.

Die Monatssummen der Messstationen in NRW wurden zum einen insgesamt für NRW und zum anderen einzeln für die acht Großlandschaften analysiert. Da Monatssummen in der Regel nicht normalverteilt sind, war hier eine Trenduntersuchung nur eingeschränkt, ausschließlich über den Mann-Kendall-Test möglich. Deshalb wurde zusätzlich ein wesentliches Augenmerk auf die Verschiebung der Niederschlagsgewichte innerhalb eines Jahres gelegt.

9.4.1 Ergebnisinterpretation für NRW

Der Niederschlagsverlauf in NRW zeigt einen deutlichen Jahresgang, der in den verschiedenen Großlandschaften unterschiedlich ausgeprägt ist ($\leftrightarrow$ Tab. 9.23).

Ein Vergleich über die verschiedenen 30-Jahres-Zeiträume zeigt ($\leftrightarrow$ Abb. 9.33), dass im Zeitraum 1950-1979 das Jahresmaximum noch im Sommer (Juli/August lag), sich seitdem in den Dezember verschoben hat. Auffallend sind der Monat März, dessen Niederschläge kontinuierlich angestiegen sind, und die Verschiebung des Sommermaximums von den Monaten Juli/August zu den Monaten Juni/Juli.

Betrachtet man die Trends in den einzelnen Monaten, so wird ein klarer Unterschied deutlich: in den Sommermonaten sind die Niederschläge zurückgegangen, in den Wintermonaten angestiegen, wobei der Monat März dabei herausragt. Die Abbildung 9.35 zeigt, in welche Richtung sich der Trend bewegt hat (Pfeil) und wie signifikant er ist (farbliche Intensität des Hintergrundes). So sind besonders die Änderungen in den Monaten März und August signifikant.

Einen anderen Blick auf die Anzahl der Stationen mit Trends gibt Abbildung 9.36. Es wird der Anteil der Stationen mit einem signifikanten Trend gezeigt, sortiert nach positivem und negativem Trend. Hier wird klar deutlich, dass der Monat März herausragt.

Tabelle 9.23: Mittlerer monatlicher Niederschlag für den Zeitraum 1950-2008

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Niederrh. Tiefland	64,3	51,9	56,6	48,4	63,6	71,6	74,9	72,7	64,9	59,4	66,4	71,5
Niederrh. Bucht	59,7	51,5	55,7	52,6	67,3	78,1	77,8	77,2	64,8	57,6	64,6	66,4
Westf. Bucht	66,5	53,2	58,5	52,1	65,7	75,0	82,3	76,5	68,7	60,7	67,1	73,4
Westf. Tiefland	56,6	43,7	48,2	48,0	59,8	68,9	72,0	72,3	59,0	52,9	55,2	61,3
Weser- bergland	77,4	60,5	65,1	58,0	70,2	77,3	86,1	80,3	69,6	64,8	74,4	85,2
Eifel (mit Siebeng.)	89,4	76,9	76,1	68,5	74,4	80,8	85,1	83,7	74,4	71,8	86,7	96,2
Bergisches Land	113,3	88,6	90,6	75,1	82,2	97,3	104,7	99,3	96,2	94,1	106,7	123,8
Sauer- und Siegerland	111,6	86,2	88,4	73,6	79,5	90,3	98,7	92,3	86,5	86,9	101,1	118,7
NRW	83,1	66,2	69,7	60,7	71,4	81,2	87,6	83,0	75,1	70,7	80,4	90,6

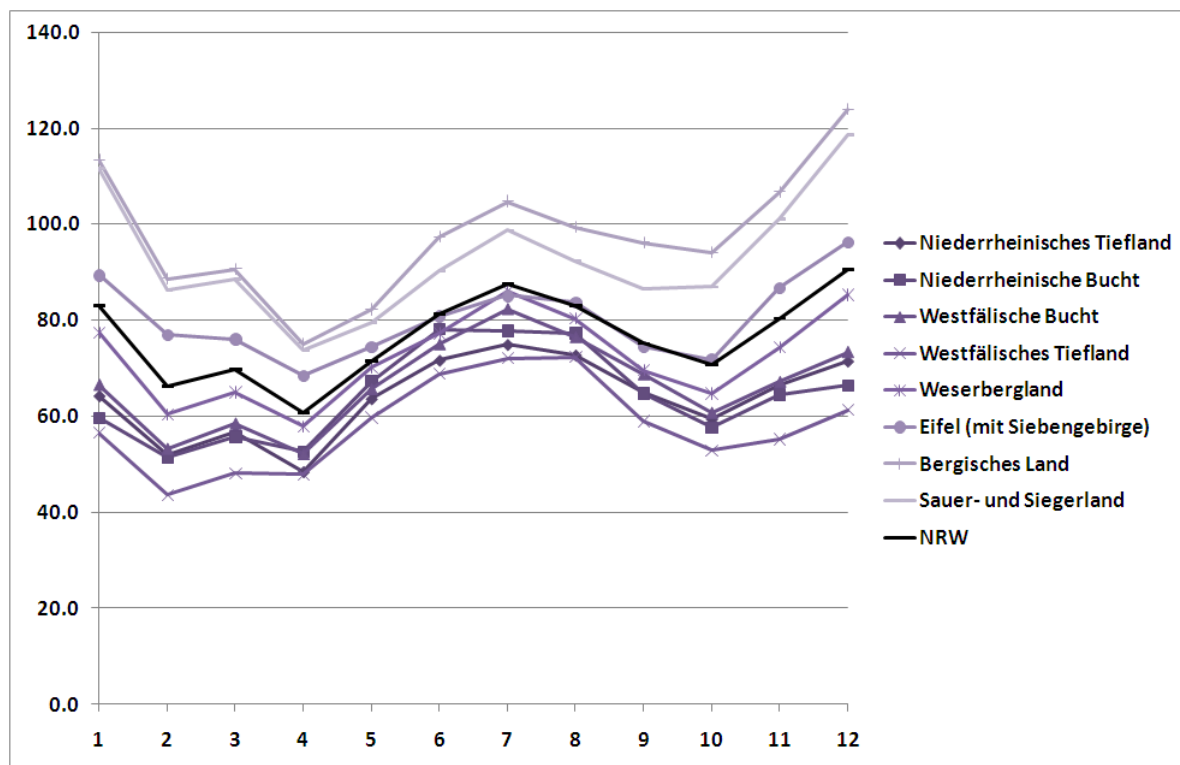


Abbildung 9.32: Monatliche Niederschlagsmengen in den Großlandschaften und Gesamt-NRW für den Gesamtzeitraum

9 Auswertung der Niederschlagssummen

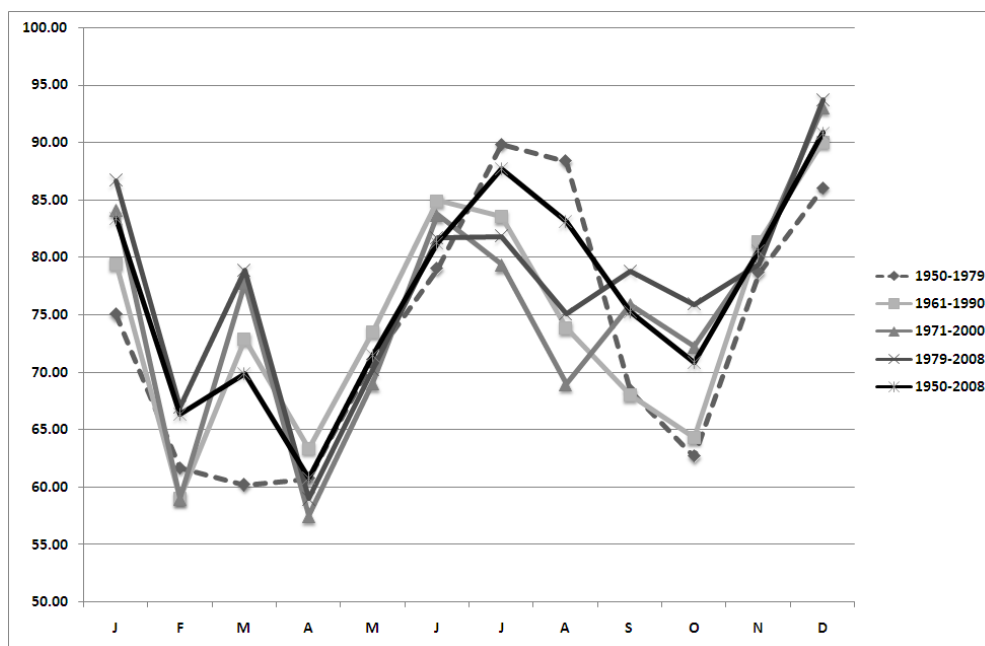


Abbildung 9.33: Monatliche Niederschlagsmengen in NRW für die gleitenden Fenster und den Gesamtzeitraum



Abbildung 9.34: Monatliche Niederschlagsmengen in NRW für die gleitenden Fenster und den Gesamtzeitraum, Netzdarstellung

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1950-2008	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑

Abbildung 9.35: Richtung der Trends als Pfeile (Mann-Kendall, ohne Signifikanzniveau) und Anteil der Stationen mit signifikantem Trend (Signifikanzniveau $\geq 80\%$) als Intensität des farblichen Hintergrundes in den monatlichen Niederschlagsmengen in NRW für den Gesamtzeitraum 1950-2008

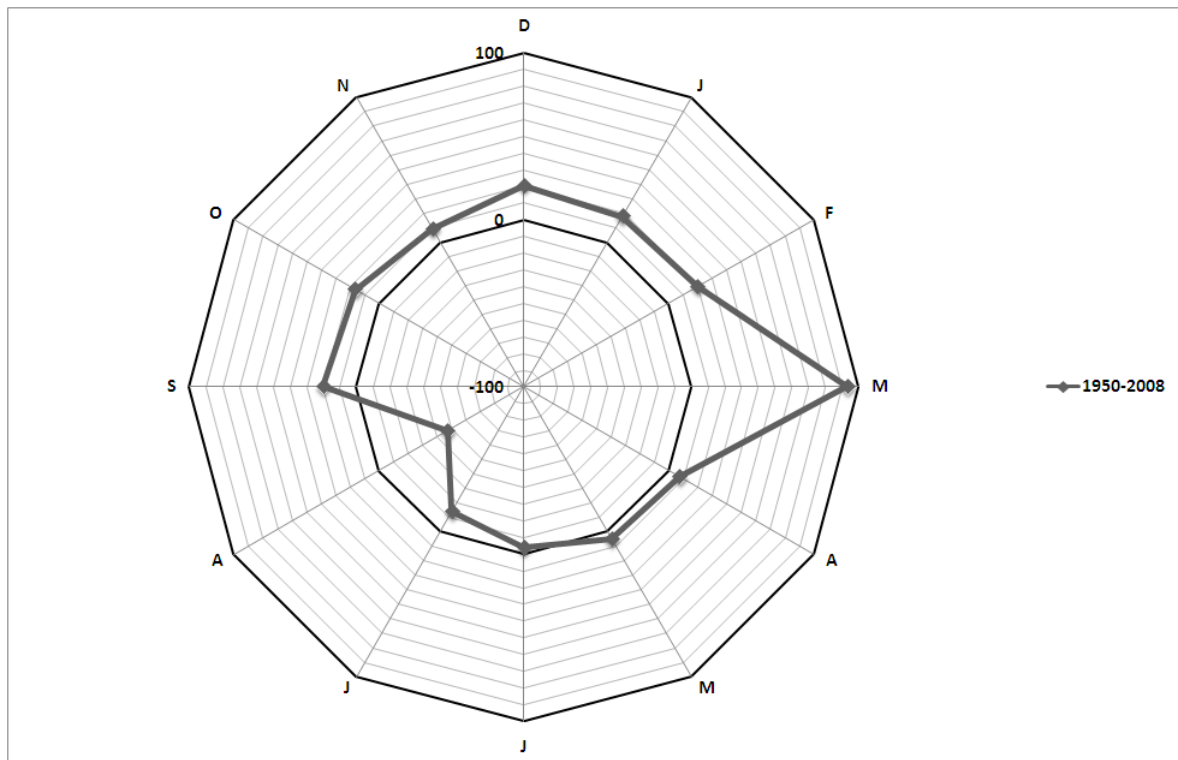


Abbildung 9.36: Anteil der Stationen mit einem signifikanten Trend (pos. bzw. neg., Mann-Kendall, Signifikanzniveau $> 80\%$) in den monatlichen Niederschlagsmengen in NRW für den Gesamtzeitraum 1950-2008

9.4.2 Regionale Besonderheiten

Die Tabelle 9.24 zeigt für die Großlandschaften in NRW, wie sich die oben beschriebenen Trends räumlich verteilen.

9 Auswertung der Niederschlagssummen

Tabelle 9.24: Trends (Mann-Kendall) in den monatlichen Niederschlagsmengen, nach Großlandschaften für den Gesamtzeitraum 1950-2008 (gelb markiert sind Anteile von mehr als 20 % der Stationen mit signifikanten Trends)

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Mittel
Niederrh. Tiefland	negativ	6%	0%	0%	11%	39%	72%	100%	100%	50%	0%	6%	6%	32%
	positiv	94%	100%	100%	89%	61%	28%	0%	0%	50%	100%	94%	94%	68%
	signifikant	11%	17%	94%	6%	6%	0%	22%	61%	6%	28%	11%	17%	23%
Niederrh. Bucht	negativ	29%	7%	0%	0%	93%	50%	86%	100%	36%	7%	21%	21%	38%
	positiv	71%	93%	100%	100%	7%	50%	14%	0%	64%	93%	79%	79%	63%
	signifikant	14%	14%	93%	43%	7%	0%	14%	57%	0%	21%	14%	7%	24%
Westf. Bucht	negativ	2%	0%	0%	22%	16%	24%	88%	90%	14%	0%	8%	2%	22%
	positiv	98%	100%	100%	78%	84%	76%	12%	10%	86%	100%	92%	98%	78%
	signifikant	29%	29%	100%	2%	8%	4%	24%	10%	18%	18%	2%	27%	23%
Westf. Tiefland	negativ	20%	0%	0%	100%	80%	80%	100%	80%	0%	0%	60%	0%	43%
	positiv	80%	100%	100%	0%	20%	20%	0%	20%	100%	100%	40%	100%	57%
	signifikant	0%	0%	40%	0%	0%	0%	60%	40%	40%	0%	0%	0%	15%
Weser-bergland	negativ	4%	0%	0%	56%	92%	52%	84%	92%	0%	0%	8%	0%	32%
	positiv	96%	100%	100%	44%	8%	48%	16%	8%	100%	100%	92%	100%	68%
	signifikant	16%	36%	100%	0%	12%	0%	4%	20%	64%	4%	28%	36%	27%
Eifel (mit Siebeng.)	negativ	29%	0%	0%	0%	71%	100%	86%	100%	57%	0%	50%	21%	43%
	positiv	71%	100%	100%	100%	29%	0%	14%	0%	43%	100%	50%	79%	57%
	signifikant	0%	21%	79%	21%	0%	21%	14%	86%	0%	14%	0%	14%	23%
Berg. Land	negativ	0%	0%	0%	13%	54%	79%	75%	100%	29%	0%	4%	0%	30%
	positiv	100%	100%	100%	88%	46%	21%	25%	0%	71%	100%	96%	100%	70%
	signifikant	17%	13%	88%	8%	8%	4%	4%	79%	0%	21%	17%	21%	23%
Sauer- und Siegerland	negativ	3%	6%	0%	31%	51%	97%	71%	97%	9%	6%	23%	6%	33%
	positiv	97%	94%	100%	69%	49%	3%	29%	3%	91%	94%	77%	94%	67%
	signifikant	20%	9%	97%	3%	14%	9%	3%	71%	26%	14%	3%	14%	24%
NRW	negativ	7%	2%	0%	25%	52%	63%	84%	95%	21%	2%	16%	5%	31%
	positiv	93%	98%	100%	75%	48%	37%	16%	5%	79%	98%	84%	94%	69%
	signifikant	18%	20%	93%	8%	9%	5%	14%	47%	20%	16%	9%	21%	23%

Der Anteil signifikanter Trends (mit einem Signifikanzniveau $\geq 80\%$) liegt in NRW im Schnitt bei etwas über 23%. Positive Trends (unbeachtet ihrer Signifikanz) überwiegen mit etwa zwei Dritteln gegenüber einem Drittel negativer Trends.

- **Niederrheinisches Tiefland**

Diese Großlandschaft entspricht im Wesentlichen dem Durchschnitt in NRW, wobei es nur vier Monate mit Anteilen an signifikanten Trends von mehr als 20 % gibt (NRW-Durchschnitt: fünf Monate). Anders als im Schnitt in NRW gibt es weniger Trends in den Monaten Februar, Dezember und September, hingegen aber im Juli und Oktober.

- **Niederrheinische Bucht**

Der Anteil signifikanter Trends (mit einem Signifikanzniveau $\geq 80\%$) liegt mit 24 % der Stationen im Landesdurchschnitt. Diese Großlandschaft ist eine von dreien, bei der sich weniger positive Trends als im Durchschnitt in NRW gezeigt haben. In Abweichung vom allgemeinen Verhalten in NRW weisen die Monate April und Oktober einen Anteil von mehr als 20% signifikanter Stationen auf, die Monate Februar, September und Dezember weniger.

- **Westfälisches Tiefland**

Beim Westfälischen Tiefland handelt es sich um eine kleine Region mit nur fünf berücksichtigten Stationen. Diese Großlandschaft weist mit 15 % der Stationen im Schnitt deutlich weniger positive Trends als NRW im Durchschnitt. Auch hier hat der Monat Juli einen Anteil von mehr als 20 % signifikanter Stationen auf, die Monate Februar und Dezember weniger.

- **Westfälische Bucht**

Die Westfälische Bucht weist einen durchschnittlichen Anteil signifikanter Trends (mit einem Signifikanzniveau $\geq 80\%$) auf. Allerdings gibt es deutlich mehr positive Trends (78 %) im Vergleich zum NRW-Durchschnitt (68 %). Die Monate Januar und Juli haben mehr signifikante Trends als 20 % der Stationen, die Monate August und September weniger.

- **Weserbergland**

Der Anteil signifikanter Trends (mit einem Signifikanzniveau $\geq 80\%$) liegt mit 27 % der Stationen etwas über dem Landesdurchschnitt (23 %). Die Monate November zeigt mehr als 20 % der Stationen mit signifikantem Trend, der August weniger.

- **Eifel (mit Siebengebirge)**

In dieser Großlandschaft wurden mit 57 % deutlich weniger positive Trends beobachtet als im Landesdurchschnitt. Anstelle der Monate September und Dezember wurden hier in den Monaten April und Juni signifikante Trends bei mehr als 20 % der Stationen beobachtet.

- **Bergisches Land**

Hier liegen durchschnittliche Anzahlen von signifikanten Trends und eine durchschnittliche Verteilung zwischen positiven und negativen Trends vor. Weder der Februar noch der September liegen bei der Anzahl der signifikanten Trends über 20 % der Stationen, hingegen aber der Oktober.

- **Sauer- und Siegerland**

Hier liegen durchschnittliche Anzahlen von signifikanten Trends und eine durchschnittliche Verteilung zwischen positiven und negativen Trends vor. Allerdings liegt der Anteil der Stationen mit signifikanten Trends in den Monaten Februar und Dezember bei unter 20 %.

Räumliche Zusammenhänge springen hierbei nicht ins Auge. Abnehmende Niederschläge im Juli liegen in den Flachländern Niederrheinisches Tiefland, Westfälisches Tiefland und Westfälische Bucht vor. Zunahmen im Oktober sind bei den Rheinanliegern Niederrheinisches Tiefland, Niederrheinische Bucht und Bergisches Land zu beobachten.

Die Kartendarstellung im Anhang C.3 zeigt, dass sich die sichtbaren Trends (1950-2008) nicht immer an die Großlandschaften halten:

- signifikante Trends für die Niederschlagszunahme in den Wintermonaten (November bis Februar) sind im Emscherraum zu beobachten
- signifikante Trends für die Niederschlagszunahme in den Wintermonaten (November bis Februar) treten – etwas weniger deutlich, teilweise nur punktuell signifikant – im rechtsrheinischen Bergland (Bergisches Land, Sauerland, Teutoburger Wald) auf
- signifikante Trends für die Niederschlagszunahme sind im März flächendeckend rechtsrheinisch, etwas weniger ausgeprägt linksrheinisch zu beobachten
- im April liegen nur im Rheintal signifikante Trends für die Niederschlagszunahme konzentriert vor – der Rest von NRW zeigt sich diffus
- die Monate Mai, Juni und Juli präsentieren sich diffus – vereinzelt liegen in den Bergländern signifikante Abnahmen vor
- im Juli sind darüber hinaus im Emscherraum signifikante Abnahmen der Niederschlagssumme erkennbar
- für den August sind für alle Bergländer, das Rheintal und den Niederrhein signifikante Abnahmen der Niederschlagssumme sichtbar
- im September gibt es signifikante Zunahmen im Niederschlag im gesamten Ostwestfalen bis hin zum nördlichen Sauerland
- der Oktober zeigt signifikante Zunahmen in der Niederschlagssumme punktuell für das Emschergebiet, das Bergische Land, das Sauerland und den Niederrhein

9.4.3 Quartalsweise Auswertung

Die Auswertung je Quartal für die gleitenden Fenster über jeweils 30 Jahre zeigt deutlich, dass in den Winterquartalen die mittleren Monatssummen stetig gestiegen sind, so dass das Sommerquartal in den letzten 30 Jahren nicht mehr das mit dem höchsten Niederschlag ist und vom Winterquartal abgelöst wurde. Weitere Auswertungen (z. B. auf Trends und ihre Signifikanz) wurden jeweils monatsweise bzw. halbjahresweise durchgeführt.

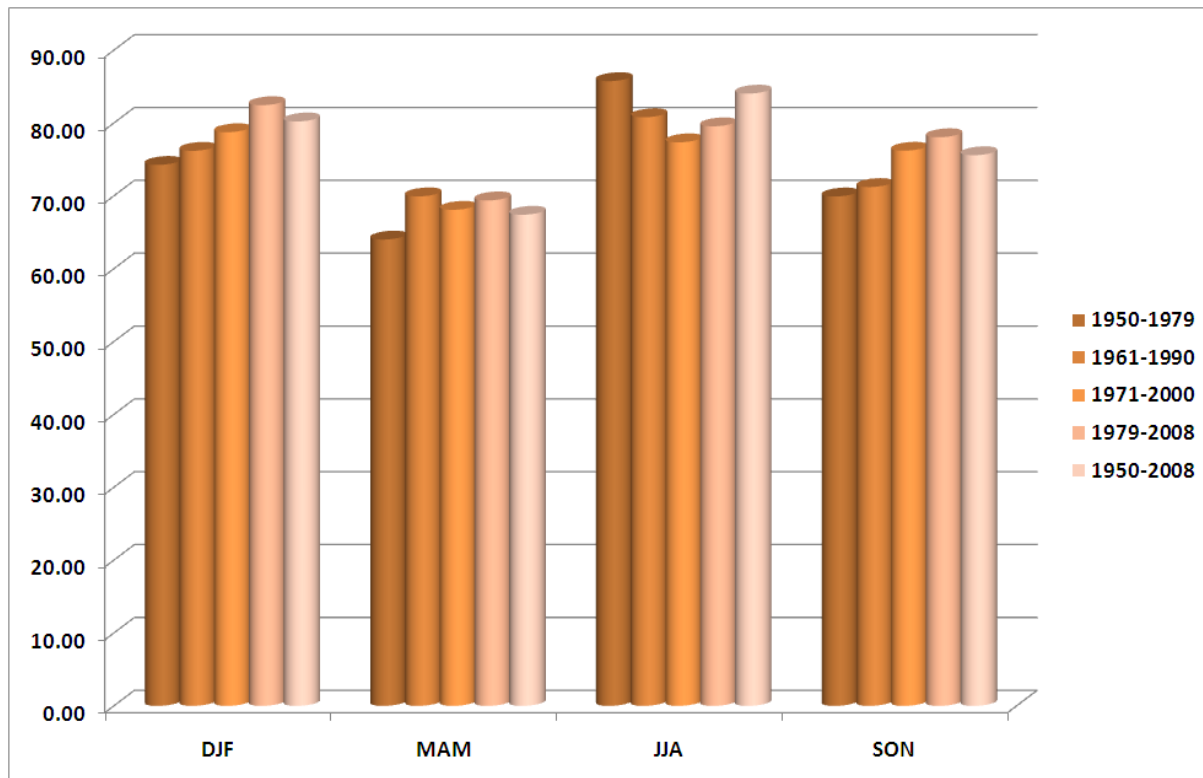


Abbildung 9.37: Mittlere monatliche Niederschlagsmengen, quartalsweise gemittelt für die gleitenden Zeitfenster und den Gesamtzeitraum

9 Auswertung der Niederschlagssummen

10 Auswertung der Kenngrößen

Mit der Untersuchung der Kenngrößen

- Anzahl Tage $\leq 0,1$ mm/Tag
- Anzahl Tage > 10 mm/Tag
- Anzahl Tage > 20 mm/Tag
- Anzahl Tage > 30 mm/Tag

soll festgestellt werden, ob sich möglicherweise die zeitliche Niederschlagsverteilung verändert hat. Mit Tagessummenzeitreihen kann keine Aussage zur Entwicklung der niederschlagsfreien Zeit gemacht werden, deshalb wurde hier die Anzahl der Tage $\leq 0,1$ mm/Tag untersucht. Die Auswertung der Kenngrößen wurde für die folgenden Zeitfenster durchgeführt:

- Gesamtzeitraum: 1950-2008 und
- Gleitende Fenster: 1950-1979 / 1961-1990 / 1971-2000 / 1979-2008

10.1 Anzahl Tage $\leq 0,1$ mm/Tag

10.1.1 1950-2008

Bei der Betrachtung der Kenngröße Anzahl Tage $\leq 0,1$ mm/Tag für den Gesamtzeitraum 1950-2008 lässt sich für die einzelnen Großlandschaften keine eindeutige Aussage treffen ($\leftrightarrow$ Abb. D.1 und D.2). Für diesen Zeitraum standen 184 Stationen für die Auswertung zur Verfügung. Betrachtet man die Auswertung der Wasserwirtschaftsjahre, ergibt sich kein differenziertes Bild. Das Verhältnis zwischen Stationen mit Zunahme der Anzahl der Tage $\leq 0,1$ mm/Tag und Abnahme ist annähernd gleich. Insgesamt weisen 28 von 184 Stationen einen Trend von $> 0,5$ Tage/Jahr auf. Das heißt, dass seit 1950 die Anzahl der Tage $\leq 0,1$ mm/Tag um 25 Tage zugenommen hat.

In den Winterhalbjahren überwiegen deutlich die Stationen, an denen die Anzahl der Tage $\leq 0,1$ mm/Tag abnimmt. Diese Entwicklung lässt sich so in allen Großlandschaften erkennen, jedoch gibt es auch überall Stationen mit einem gegenläufigen Trend ($\leftrightarrow$ Abb. D.3 und D.4).

Für die Sommerhalbjahre nimmt über den Gesamtzeitraum die Anzahl der Tage $\leq 0,1$ mm/Tag zu ($\leftrightarrow$ Abb. D.5 und D.6).

10.1.2 1979-2008

Bei Betrachtung der Wasserwirtschaftsjahre der letzten 30 Jahre (1979-2008), bei der 424 Stationen für die Auswertung herangezogen werden konnten, ergibt sich ein sehr heterogenes Bild; zwar überwiegen die Stationen mit steigendem Trend, jedoch gibt es auch zahlreiche Stationen, an denen die Anzahl der Tage $\leq 0,1$ mm/Tag abnimmt. Bei Betrachtung nur der signifikanten Trends (141 Stationen) ist das Verhältnis von Zu- und Abnahme von 2/3 zu 1/3 deutlicher. Mehr als 60 Stationen haben einen starken Trend von >1 Tag/a. In der Niederrheinischen Bucht ist eine eindeutige Abnahme der Anzahl Tage $\leq 0,1$ mm/Tag zu verzeichnen ($\leftrightarrow$ Abb. D.25 und D.26).

Im Winter ist das Bild sehr uneinheitlich, es lässt sich keine regionale Aussage treffen. Auffällig ist, dass es sowohl für Zu- als auch für Abnahmen signifikante Trends mit hohen Werten von ca. 1 Tag pro Jahr gibt ($\leftrightarrow$ Abb. D.27 und D.28).

Für die Sommer ist das Bild ebenfalls sehr uneinheitlich. Es überwiegen Zunahmen, jedoch sind in allen Regionen auch Stationen mit signifikanten Abnahmen zu erkennen ($\leftrightarrow$ Abb. D.29 und D.30).

10.1.3 1950-1979

Bei Auswertung der Wasserwirtschaftsjahre (348 Stationen, davon 100 signifikant) ist das Verhältnis von Zu- und Abnahmen annähernd gleich, wobei bei den signifikanten Trends die Abnahmen leicht überwiegen. Regionale Aussagen lassen sich nicht treffen, über ganz NRW gibt es sowohl signifikante Zu- als auch Abnahmen. Auffällig ist, dass über 40 Stationen einen Trend >1 Tag/Jahr aufweisen ($\leftrightarrow$ Abb. D.7 und D.8). Dass die Ergebnisse für die gesamten Wasserwirtschaftsjahre wenig aussagekräftig sind, liegt daran, dass in den Sommer- und Winterhalbjahren gegenläufige Trends zu verzeichnen sind.

Im Winter nimmt die Anzahl der Tage $\leq 0,1$ mm/Tag bei über 90 % aller Stationen ab. Der durchschnittliche Trend aller Stationen beträgt $>0,4$ Tage/Jahr ($\leftrightarrow$ Abb. D.9 und D.10).

Im Sommer ist das Verhalten entgegengesetzt. Mit einem durchschnittlichen Anstieg des Trends von $<0,3$ Tage/Jahr fällt die Größe des Trends etwas geringer aus als im Winter ($\leftrightarrow$ Abb. D.11 und D.12).

10.1.4 1961-1990

Wie oben beschrieben, lassen sich für die Betrachtung der Wasserwirtschaftsjahre für dieses Zeitfenster keine eindeutigen Aussagen machen ($\leftrightarrow$ Abb. D.13 und D.14).

Die Zeitfenster 1950-1979, 1961-1990, 1971-2000 sind stark durch den Einfluss der trockenen Dekade der 70er Jahre geprägt. Dies lässt sich auf den Karten im Anhang D.11 und D.9 erkennen.

In dem Zeitfenster 1961-1990 liegen die trockenen Sommer in der Mitte. Wie bei der Betrachtung der anderen Zeitfenster (1950-1979 und 1971-2000) zu erkennen ist, findet

zwischen diesen beiden Fenstern bei den Sommerhalbjahren eine Trendumkehr statt. Deswegen ist für das Zeitfenster 1961-1990 eine Trenduntersuchung nicht geeignet. Jedoch ist auch hier für die Sommermonate die Tendenz zu erkennen, dass der Trend nicht ausgeglichen wird. Das bedeutet, dass die Zunahme zu Beginn des Zeitfensters von der Abnahme zum Ende des Zeitfensters nicht kompensiert werden kann.

Im Winter ist ein leicht sinkender Trend zu beobachten. In allen Großlandschaften überwiegen die Stationen mit fallenden Trends. Bei ausschließlicher Betrachtung der Stationen mit signifikanten Trends ist das Verhältnis mit 2/3 (Zunahme) zu 1/3 (Abnahme) etwas stärker ausgeprägt ($\leftrightarrow$ Abb. D.15 und D.16).

10.1.5 1971-2000

Bei Auswertung der Wasserwirtschaftsjahre überwiegen leicht die sinkenden Trends, d. h. dass die Anzahl der Tage $\leq 0,1$ mm/Tag mit einem Verhältnis von ungefähr 40/60 abnimmt. Für die Auswertung standen 455 Stationen zur Verfügung, wobei 1/3 der Stationen einen signifikanten Trend aufweist. Sowohl für Zu- als auch für die Abnahmen liegen Trends von 2 Tage/Jahr vor ($\leftrightarrow$ Abb. D.19 und D.20).

Im Winter ist kein einheitlicher Trend zu erkennen. Bei den signifikanten Stationen überwiegen eindeutig die fallenden Trends. Der durchschnittliche Trend ist recht gering ($\leftrightarrow$ Abb. D.21 und D.22).

Im Sommer ist bei 2/3 der Stationen ebenfalls ein fallender Trend zu verzeichnen ($\leftrightarrow$ Abb. D.23 und D.24). Es sind 108 von 455 Stationen signifikant, davon ca. 80 % mit sinkendem Trend.

Die festgestellte Zunahme der Sommerhalbjahre im Zeitfenster 1950-1979 kann nicht ausgeglichen werden. Wie zu erwarten verhält sich die Entwicklung der Sommerhalbjahre von 1971-2000 entgegengesetzt der Entwicklung der Sommerhalbjahre 1950-1979. Jedoch ist diese gegensätzliche Entwicklung etwas schwächer. Daraus lässt sich folgern, dass die Sommer für alle Großlandschaften eine steigende Anzahl von Tagen mit einer Niederschlagsmenge $\leq 0,1$ mm/Tag aufweisen und die Winterhalbjahre eine sinkende Anzahl. Dies ist die gleiche Entwicklung, die sich auch bei Betrachtung des Gesamtzeitraumes gezeigt hat.

10.2 Anzahl Tage >10 mm/Tag

10.2.1 1950-2008

Für den Zeitbereich von 1950-2008, in dem 184 Stationen betrachtet wurden, ist für ganz NRW eine deutliche Zunahme der Anzahl der Tage mit einer Niederschlagssumme >10 mm/Tag erkennbar. Mehr als die Hälfte der Stationen weist eine Signifikanz >80 % auf. Alle Stationen, die signifikant sind, weisen eine Zunahme auf. Bei mehr als 2/3 der Stationen ist der Trend mit weniger als 0,1 Tag/Jahr recht gering ($\leftrightarrow$ Abb. D.31 und

D.32).

Das Verhalten der Winterhalbjahre entspricht dem der Wasserwirtschaftsjahre ($\leftrightarrow$ Abb. D.33 und D.34).

In den Sommerhalbjahren befindet sich in der Westfälischen Bucht, im Bereich nördlich der Ruhr und im Bereich des Teutoburger Waldes eine Häufung von Stationen, für die die Anzahl der Tage >10 mm/Tag ansteigt. Für die übrigen Gebiete ist das Bild sehr heterogen, wobei die Anzahl der Tage >10 mm/Tag vorwiegend abnimmt. Die Anzahl der signifikanten Stationen ist mit 25 von 184 Stationen recht gering ($\leftrightarrow$ Abb. D.35 und D.36).

10.2.2 1979-2008

Die Entwicklung der letzten 30 Jahre (1979-2008) zeigt für die Auswertung der Wasserwirtschaftsjahre und der Winterhalbjahre, für die 424 ausgewerteten Stationen eine Zunahme der Anzahl der Tage >10 mm/Tag über die meisten Großlandschaften NRWs. Eine Ausnahme bilden der südliche Teil der Eifel und das östliche Bergische Land, wo eine Abnahme zu verzeichnen ist ($\leftrightarrow$ Abb. D.55, D.56, D.57 und D.58).

Die Entwicklung der Sommerhalbjahre verhält sich ähnlich. In der Eifel und im Siebengebirge sowie an vereinzelt Stationen gibt es jedoch einen fallenden, nicht signifikanten Trend. In den übrigen Gebieten überwiegen deutlich, wenn auch nicht signifikant, (68 von 424 Stationen) die Zunahmen ($\leftrightarrow$ Abb. D.59 und D.60).

10.2.3 1950-1979

Bei der Auswertung der Anzahl der Tage >10 mm/Tag ist für das Zeitfenster 1950-1979 sowohl für die Wasserwirtschaftsjahre als auch für die Sommerhalbjahre für ganz NRW eine Abnahme festzustellen ($\leftrightarrow$ Abb. D.37, D.38, D.41 und D.42).

Es ist auffällig, dass in den Winterhalbjahren die Trends gering sind ($<0,1$ Tag/Jahr). Es weisen insgesamt 40 % der Stationen einen ansteigenden Trend auf, diese sind auf alle Regionen verteilt ($\leftrightarrow$ Abb. D.39 und D.40).

10.2.4 1961-1990

Der Anteil der signifikanten Stationen bei Auswertung der Wasserwirtschaftsjahre ist mit 64 von 416 Stationen sehr gering. Fast 75 % der signifikanten Stationen weisen eine Zunahme auf. Im Süden von NRW (Eifel und Sieger- und Sauerland) ist eine Zunahme festzustellen. Alle übrigen Naturräume weisen ein uneinheitliches Bild auf ($\leftrightarrow$ Abb. D.43 und D.44).

In den Winterhalbjahren ist eine Zunahme in der Südhälfte NRWs festzustellen. Dort befindet sich auch die große Mehrheit der 107 signifikanten von insgesamt 416 Stationen ($\leftrightarrow$ Abb. D.45 und D.46).

In den Sommerhalbjahren gibt es wenig signifikante Abnahmen (Sieger- und Sauerland,

nördliches Westfälisches Tiefland), Zunahmen gibt es vorwiegend in der Eifel ($\leftrightarrow$ Abb. D.47 und D.48).

10.2.5 1971-2000

Im Zeitfenster 1971-2000 ist über ganz NRW für die Wasserwirtschaftsjahre eine deutliche Zunahme erkennbar. Von insgesamt 455 Stationen weisen 342 Stationen ein Signifikanzniveau von >80 % auf ($\leftrightarrow$ Abb. D.49 und D.50).

Auch für die Sommerhalbjahre ist eine deutliche Zunahme erkennbar. Hier ist die Signifikanz mit 134 von 455 Stationen deutlich geringer als in den Wasserwirtschaftsjahren. Auch die Höhe des durchschnittlichen Trends ist mit ca. 0,1 Tag/Jahr geringer als in den Winterhalbjahren mit 0,25 Tagen/Jahr ($\leftrightarrow$ Abb. D.53 und D.54).

In den Winterhalbjahren ist die Signifikanz mit 333 von 455 Stationen deutlich höher als im Sommer, das zeigt, dass das Ergebnis der Wasserwirtschaftsjahre nicht hauptsächlich durch die Tendenz der Sommerhalbjahre geprägt ist, sondern dass vor allem die Entwicklung der Winterhalbjahre für das Ergebnis verantwortlich ist ($\leftrightarrow$ Abb. D.51 und D.52).

10.3 Anzahl Tage >20 mm/Tag

10.3.1 1950-2008

Insgesamt wurden für diese Auswertung 184 Stationen berücksichtigt. In ganz NRW überwiegen bei der Betrachtung der Wasserwirtschaftsjahre Zunahmen. Ungefähr 50 % der Stationen sind signifikant (94 von 184 Stationen). Westlich des Rheins befinden sich nur wenige Stationen mit signifikanten Trends. Im Münsterland befinden sich keine auswertbaren Stationen ($\leftrightarrow$ Abb. D.61 und D.62).

Bei der Betrachtung der Winterhalbjahre lässt sich für den Zeitbereich von 1950-2008 über ganz NRW eine Zunahme der Anzahl der Tage >20 mm/Tag feststellen. Der Anteil signifikanter Trends ist mit 65 % etwas höher als bei den Wasserwirtschaftsjahren. Im Nord-Westen des Bergischen Landes befindet sich eine Ansammlung von Stationen mit deutlich höherem Trend (ca. 0,08 Tage/Jahr). Dieser Trend ist stärker als der im übrigen NRW (0,035 Tage/Jahr) ($\leftrightarrow$ Abb. D.63 und D.64).

Auch für die Sommerhalbjahre sind mehr Zu- als Abnahmen festzustellen. Allerdings sind nur 20 % der Stationen signifikant. Es befindet sich im nördlichen Ruhrgebiet eine Ansammlung von Stationen mit höherer Signifikanz ($\leftrightarrow$ Abb. D.65 und D.66).

10.3.2 1979-2008

Für das Zeitfenster 1979-2008 weisen für die Wasserwirtschaftsjahre 96 Stationen von 424 eine Signifikanz von > 80 % auf. An ca. 60 % aller Stationen liegt ein steigender Trend vor, bei Betrachtung nur der signifikanten Stationen sind es 70 %. Für NRW ergibt

sich kein homogenes Bild. In der Eifel überwiegen Stationen mit Abnahme der Tage >20 mm/Tag, im Rheintal und im Ruhrgebiet überwiegen positive Trends. In diesen Gebieten befinden sich viele signifikante Trends. Im übrigen NRW sind Zu- und Abnahmen relativ ausgeglichen und es gibt nur noch wenige signifikante Trends. An den meisten Stationen ist der Trend mit 0,1 Tag/Jahr recht gering. Es gibt aber auch Stationen mit Trends $>0,2$ Tage/Jahr ($\leftrightarrow$ Abb. D.85 und D.86).

In den Winterhalbjahren wurden 425 Stationen ausgewertet, davon weisen nur 53 einen signifikanten Trend auf. In der Osthälfte NRWs sowie in der Eifel ist vorwiegend eine Abnahme der Anzahl der Tage >20 mm/Tag zu verzeichnen.

In der Westhälfte ohne Eifel überwiegen Stationen, bei denen die Anzahl der Tage >20 mm/Tag zunimmt. Viele Stationen weisen kleine Trends von $<0,05$ Tage/Jahr auf. In den Mittelgebirgen befinden sich auch Trends von 0,2 Tagen/Jahr ($\leftrightarrow$ Abb. D.87 und D.88).

In den Sommerhalbjahren sind 67 von 424 Stationen signifikant. In NRW überwiegen geringe Zunahmen. In der Eifel befinden sich signifikante fallende Trends, in den Mittelgebirgen, im Sieger- und Sauerland und im Bergischen Land gibt es annähernd gleich viele Zu- und Abnahmen ($\leftrightarrow$ Abb. D.89 und D.90).

10.3.3 1950-1979

Wie erwartet zeigt sich für die Wasserwirtschaftsjahre 1950-1979 eine Abnahme der Anzahl der Tage >20 mm/Tag über ganz NRW. An ca. 35 % der 348 Stationen ist der Trend signifikant. Davon haben über 95 % einen abnehmenden Trend. Besonders in der Westhälfte und im Norden NRWs lassen sich viele signifikante abnehmende Trends finden. Im Sieger- und Sauerland überwiegen zwar auch Abnahmen, jedoch gibt es hier nur vereinzelt signifikante Trends ($\leftrightarrow$ Abb. D.67 und D.68).

Im Winter ist das Verhalten ähnlich. Im Westen und Norden gibt es signifikante Abnahmen und in den übrigen Landesteilen ein heterogenes Bild. Im Sieger- und Sauerland sind auch signifikante Zunahmen zu finden. Das Signifikanzniveau ist geringer als bei der Auswertung der Wasserwirtschaftsjahre. Nur sehr wenige Stationen haben einen Trend $>0,1$ Tag/Jahr ($\leftrightarrow$ Abb. D.69 und D.70).

Im Sommer finden sich in der Westhälfte viele signifikante fallende Trends, nur eine Station weist einen steigenden Trend auf. Auch in der Osthälfte überwiegen die fallenden Trends, jedoch finden sich hier kaum signifikante Trends darunter. Insgesamt wurden 348 Stationen ausgewertet, davon sind 84 Stationen signifikant. An den meisten Stationen ist der Trend $<0,05$ Tage/Jahr ($\leftrightarrow$ Abb. D.71 und D.72).

10.3.4 1961-1990

Für die Wasserwirtschaftsjahre 1961-1990 konnten 416 Stationen ausgewertet werden. Davon sind 92 signifikant. Auffällig ist, dass im Norden NRWs viele signifikante Trends festzustellen sind. In den Mittelgebirgen (Eifel, Sieger- und Sauerland und Weserbergland)

befinden sich viele signifikante Zunahmen. In den übrigen Gebieten gibt es nur wenige signifikante Trends. Das Verhältnis von Zu- und Abnahmen ist relativ ausgeglichen ($\leftrightarrow$ Abb. D.73 und D.74).

Auch im Winterhalbjahr ist die Abnahme im Norden NRWs deutlich erkennbar. In den übrigen Landesteilen überwiegen zunehmende Trends, besonders in den Mittelgebirgen sind diese Trends signifikant. Insgesamt sind in den Winterhalbjahren 30 % (130 Stationen) von 416 Stationen signifikant ($\leftrightarrow$ Abb. D.75 und D.76).

In den Sommerhalbjahren findet man im nördlichen Weserbergland, östlich des Ruhrgebietes und in der Eifel signifikante Zunahmen. Für die weiteren Landesteile ergibt sich ein heterogenes Bild ($\leftrightarrow$ Abb. D.77 und D.78).

10.3.5 1971-2000

Über ganz NRW sind bei Auswertung der Wasserwirtschaftsjahre des Zeitraumes 1971-2000 Zunahmen zu verzeichnen. Es sind von den 455 Stationen 65 % (299 Stationen) signifikant. Nur im Eifelschatten liegen mehr als 1 Station mit abnehmendem Trend. Der Trend ist überwiegend $<0,25$ Tage/Jahr, ist insgesamt jedoch vom Betrag höher als im Zeitbereich 1950-1979 ($\leftrightarrow$ Abb. D.79 und D.80).

Die Winterhalbjahre verhalten sich genauso wie die Wasserwirtschaftsjahre. Auch die Anzahl der signifikanten Stationen ist ungefähr gleich ($\leftrightarrow$ Abb. D.81 und D.82).

Im Sommer ist die Anzahl der signifikanten Stationen wesentlich geringer. 144 Stationen (ca. 30 %) sind hierbei signifikant. Die Westhälfte NRWs verhält sich genauso wie die Wasserwirtschaftsjahre und die Winterhalbjahre. Es gibt viele signifikante Zunahmen und einige Abnahmen im Eifelschatten. In der Osthälfte finden sich deutlich weniger signifikante Zunahmen, auch gibt es hier einige Stationen mit fallenden Trends, diese sind jedoch weitgehend nicht signifikant ($\leftrightarrow$ Abb. D.83 und D.84).

10.4 Anzahl Tage >30 mm/Tag

10.4.1 1950-2008

Im Zeitbereich von 1950-2008, in dem für die Wasserwirtschaftsjahre 184 (68 signifikant, davon 90 % mit Zunahme) Stationen in die Berechnung mit eingingen, lässt sich eine deutliche Zunahme der Anzahl Tage >30 mm/Tag erkennen. Eine Ausnahme bilden die Eifel, in der hauptsächlich eine Abnahme zu verzeichnen ist. Weitere Ausreißer gibt es besonders im Weserbergland und in Teilen des Niederrheinischen Tieflandes ($\leftrightarrow$ Abb. D.91 und D.92).

Bei Betrachtung der Winterhalbjahre ergibt sich ein ähnliches Bild. Bis auf Teile der Eifel, des Weserberglandes und des Westfälischen Tieflandes nimmt die Anzahl der Tage >30 mm/Tag vorwiegend zu. Bei dieser Auswertung sind 73 Stationen von 185 signifikant ($\leftrightarrow$ Abb. D.93 und D.94).

Auch bei der Betrachtung der Sommerhalbjahre ist für NRW weitgehend eine Zunahme der Tage >30 mm/Tag festzustellen. Die Eifel bildet wieder eine Ausnahme, zusammen mit Teilen des Niederrheinischen Tieflandes und einigen Ausreißern im Bergischen Land ($\leftrightarrow$ Abb. D.95 und D.96).

10.4.2 1979-2008

In den letzten 30 Jahren konnten 424 Stationen ausgewertet werden, bei 79 Stationen liegt ein signifikanter Trend vor, 30 % davon weisen eine Abnahme auf. Diese signifikanten Abnahmen befinden sich vor allem in der Eifel und im Siebengebirge. Ansonsten ist das Verhältnis von Zu- und Abnahmen sehr ausgeglichen, es ergibt sich ein heterogenes Bild ($\leftrightarrow$ Abb. D.115 und D.116).

Für die Winterhalbjahre lässt sich für die einzelnen Naturräume keine differenzierte Aussage treffen. Im Bergischen Land, sowie im Sieger- und Sauerland sind die Trends etwas höher als im übrigen NRW ($>0,05$ Tage/Jahr) ($\leftrightarrow$ Abb. D.117 und D.118).

In den Sommerhalbjahren sind in der Eifel und im Siebengebirge fallende Trends festzustellen. Es gibt 78 von 424 signifikante Stationen. Im Weserbergland, im Westfälischen Tiefland und im Norden der Westfälischen Bucht sind hauptsächlich steigende Trends zu verzeichnen ($\leftrightarrow$ Abb. D.119 und D.120).

10.4.3 1950-1979

Das Zeitfenster 1950-1979 (125 signifikante von 348 Stationen) zeigt bei Auswertung der Wasserwirtschaftsjahre eine eindeutige Abnahme der Anzahl der Tage >30 mm/Tag mit einer hohen Signifikanz. Das Sieger- und Sauerland, ein Bereich des südlichen Bergischen Landes, sowie einige Ausreißer in der Westfälischen Bucht verzeichnen eine Zunahme ($\leftrightarrow$ Abb. D.97 und D.98).

Die Winterhalbjahre dieses Zeitfensters sind durch eine eindeutige Abnahme der Anzahl Tage >30 mm/Tag geprägt. Hier wurden insgesamt 96 signifikante von 342 Stationen berücksichtigt. Der östliche Teil des Sieger- und Sauerlandes, Teile der Eifel sowie eine Linie entlang des Rheins zwischen Leverkusen und Duisburg weisen eine Zunahme, jedoch mit geringer Signifikanz auf ($\leftrightarrow$ Abb. D.99 und D.100).

Die Sommerhalbjahre, mit 86 signifikanten von 348 ausgewerteten Stationen, zeigen eine deutliche Abnahme der Anzahl Tage >30 mm/Tag, vorwiegend mit hoher Signifikanz, besonders in der Westhälfte NRWs. Auch das östliche Weserbergland und die nördliche Westfälische Bucht sind durch eine Abnahme gekennzeichnet, hier jedoch mit einer geringeren Signifikanz. Der Westen des Weserberglandes, die süd-östliche Westfälische Bucht, der Osten des Sieger- und Sauerlandes, der Eifelschatten und das Siebengebirge lassen eine wenn auch wenig signifikante Zunahme der Anzahl Tage >30 mm/Tag erkennen ($\leftrightarrow$ Abb. D.101 und D.102).

10.4.4 1961-1990

Für die Wasserwirtschaftsjahre 1961-1990 lässt sich eine Zunahme der Anzahl der Tage >30 mm/Tag erkennen. Insgesamt sind 76 von 416 Stationen signifikant. Die Zunahmen sind insbesondere im Siebengebirge, im Eifelschatten sowie im Teutoburger Wald festzustellen (↔ Abb. D.103, D.104).

In den Winterhalbjahren sind 115 von 409 Stationen signifikant. Das Westfälische Tiefland und der nördliche Teil der Eifel fallen durch die signifikante Abnahme der Anzahl Tage >30 mm/Tag auf. Deutliche Zunahmen finden sich im Rheintal bis Duisburg und im östlichen Teil des Ruhrgebietes (↔ Abb. D.105 und D.106).

Die Sommerhalbjahre verhalten sich sehr heterogen. Es gibt nur 53 signifikante von 417 Stationen. Regionale Aussagen lassen sich nicht treffen (↔ Abb. D.107 und D.108).

10.4.5 1971-2000

In den Wasserwirtschaftsjahren 1971-2000 ist für ganz NRW eine eindeutige Zunahme der Anzahl Tage >30 mm/Tag zu erkennen. Die Zunahmen der meisten Stationen sind nicht >0,04 Tage/Jahr, das bedeutet, dass in den letzten 30 Jahren die Anzahl der Tage >30 mm/Tag um 1 Tag zugenommen hat. Es gibt 202 von 455 signifikante Stationen (↔ Abb. D.109 und D.110).

Auch in den Winterhalbjahren lässt sich eine Zunahme erkennen. Besonders in den Mittelgebirgen (Bergisches Land, Sieger- und Sauerland, Eifel und Weserbergland) ist die Zunahme stärker ausgeprägt als in den übrigen Landesteilen. Bei dieser Auswertung sind 133 von 455 Stationen signifikant (↔ Abb. D.111 und D.112).

Im Sommer überwiegen ebenfalls die Zunahmen. Im Sauerland, in der Eifel, im Siebengebirge und im Weserbergland ist das Verhältnis von Zu- und Abnahmen annähernd ausgeglichen. 130 von 455 Stationen sind signifikant (↔ Abb. D.113 und D.114).

11 Auswertung der partiellen Serien

11.1 Zeitliche Auflösung der Messdaten und ihre Eignung für die statistische Auswertung kleiner Dauerstufen

Die partiellen Serien der kontinuierlichen Stationen wurden auf Auftretenshäufigkeiten von Extremwerten in einzelnen Jahren und auf die mittleren Extremwerte in diesen Jahren überprüft.

Hierfür wurden für die Dauerstufen 5 Minuten, 15 Minuten, 60 Minuten, 2 Stunden, 4 Stunden und 12 Stunden die partiellen Serien von insgesamt 176 Stationen ausgewertet. Für NRW ergab sich mit einer Stationszahl von minimal 31 (1951) und maximal 176 (1988) eine verlässliche Datenbasis zu den Häufigkeiten des Auftretens der Ereignisse der partiellen Serie in einzelnen Jahren ($\hookrightarrow$ Abb. 11.1).

Unbefriedigend ist die Tatsache, dass es in den jüngeren Jahren weniger Stationen zur Auswertung gab, wobei das Jahr 2008 mit ca. 80 Stationen nur etwa die Hälfte der Stationen aus 1988 umfasst.

Die partiellen Serien wurden vor ihrer statistischen Auswertung visuell überprüft, inwieweit sie frei von Inhomogenitäten in der Zeit waren. Unterschiede zwischen den Dauerstufen entstanden dadurch, dass einige Stationen durch ihr Messverfahren keine belastbaren Auswertungen für kurze Dauerstufen zuließen, und durch fehlerhafte Basisdaten.

Eine weitere Auswertung umfasste die 15 größten Ereignisse einer Dauerstufe, aus denen für jedes Datenjahr und jede Station ein mittlerer Wert ermittelt wurde. Diese Werte wurden dann ebenfalls für Gesamt-NRW jahresweise ausgewertet. Hierbei war allerdings die Zahl der Werte, die zur Verfügung standen, nicht immer ausreichend für eine verlässliche Aussage. Die Anzahlen reichten von 0 (Dauerstufe 12 Stunden, 1963) bis zu 128 (Dauerstufe 12 Stunden, 1981). Berücksichtigt man nur Jahre, für die Daten von mindestens 10 % der Stationen vorlagen, so ändert sich beispielsweise die ursprüngliche Auswertung ($\hookrightarrow$ Abb. 11.2) in eine bereinigte, verlässliche Darstellung ($\hookrightarrow$ Abb. 11.3), bei der allerdings viele der frühen Jahre fehlen.

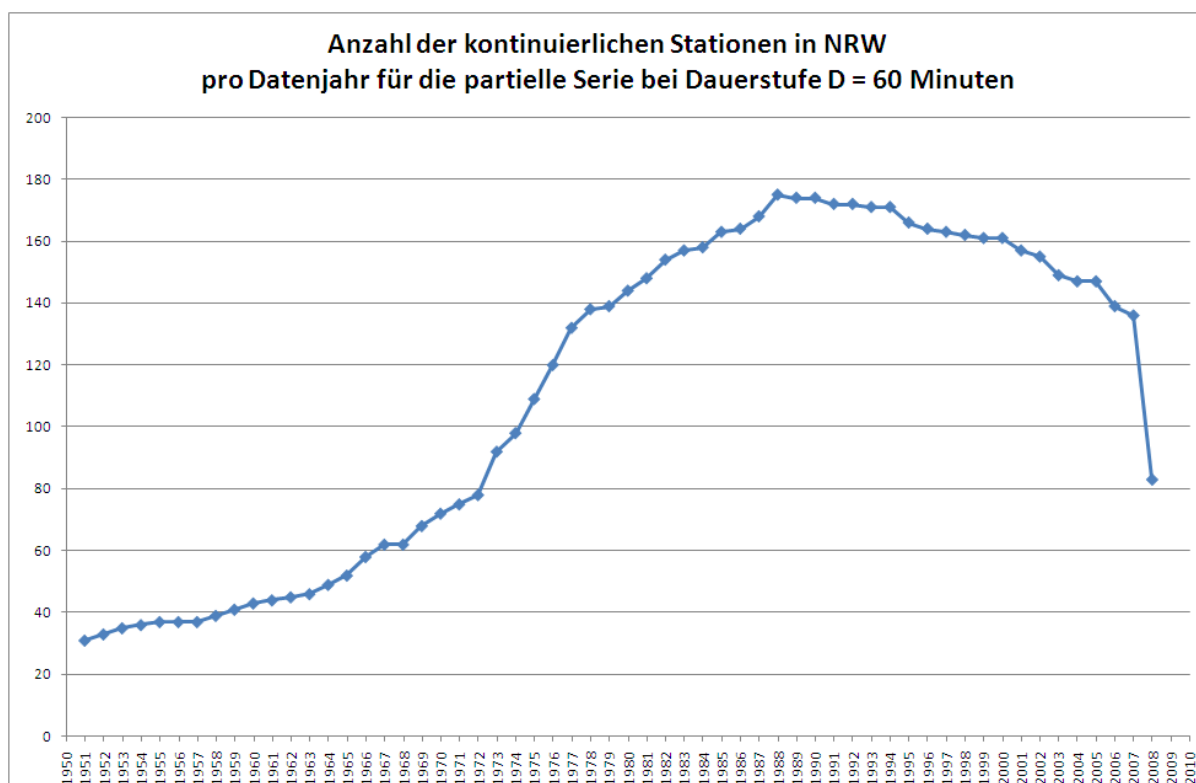


Abbildung 11.1: Anzahl der kontinuierlichen Stationen in NRW (pro Datenjahr für die partielle Serie bei Dauerstufe D=60 Minuten)

11.1 Zeitliche Auflösung der Messdaten...

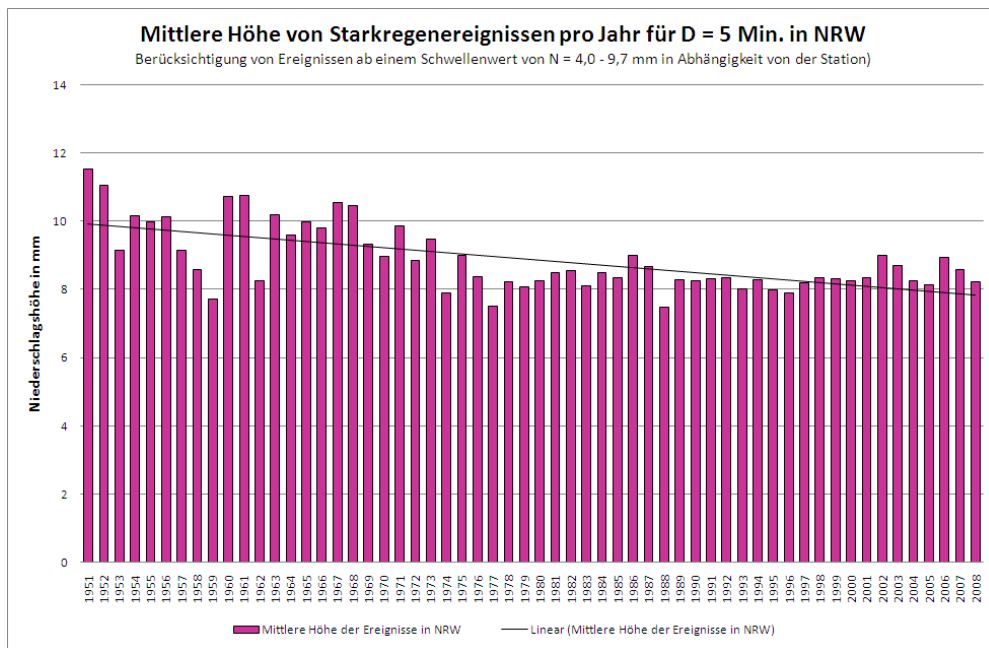


Abbildung 11.2: Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für D=5 Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von N=4,0-9,7 mm in Abhängigkeit von der Station)

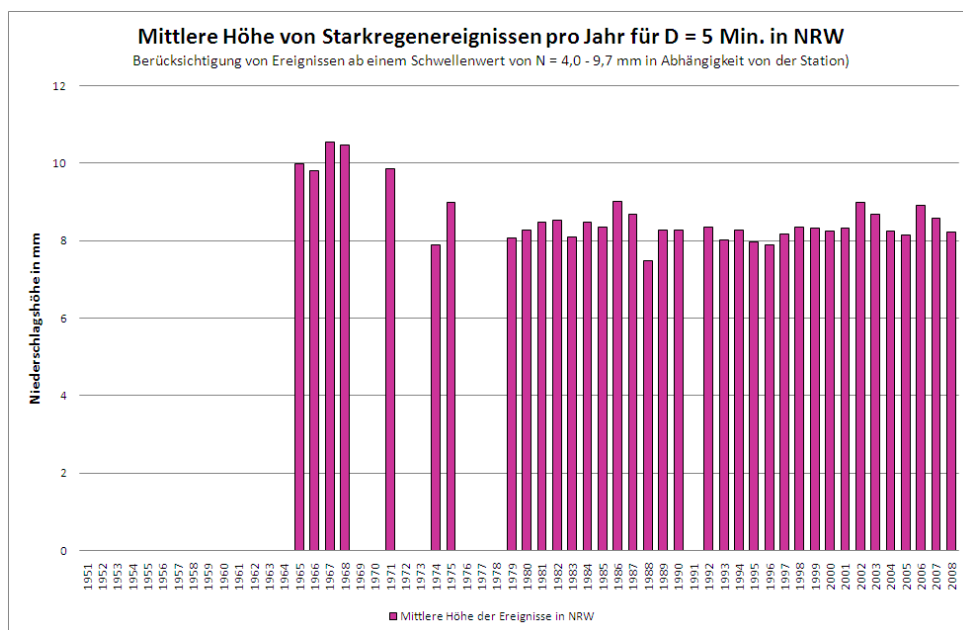


Abbildung 11.3: Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für D=5 Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von N=4,0-9,7 mm in Abhängigkeit von der Station, mit 10 % Mindeststationenzahl pro Jahr)

11.1.1 Dauerstufe 5 Minuten

Die Dauerstufe 5 Minuten ist die am höchsten aufgelöste Dauerstufe. Die Ereignisse sind wesentlich von kurzen Starkregen geprägt, allerdings sind die Daten auch sehr empfindlich auf Messverfahren und Datenaufnahme bei Digitalisierung. Die Auswertung zeigt für NRW einen leichten Anstieg der Anzahl der Ereignisse. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass sowohl ab Anfang der 90er Jahre durch die Einführung von Wippengeräten als auch ab etwa dem Jahr 2000 durch die Umstellung auf Wäagegeräte hochaufgelöste Kurzzeitzniederschläge besser erfasst werden können. Trotzdem gibt es sowohl Mitte der 60er Jahre als auch zu Beginn der 50er Jahre ähnlich hohe Ereignisanzahlen wie sie seit den 90er Jahren beobachtet wurden.

Die Trendgerade ist nur informationshalber dargestellt – keine der Trendgeraden für die Anzahl der Ereignisse in der partiellen Serie in Gesamt-NRW ist statistisch signifikant. Das Maximum der Ereignishöhe liegt im Jahr 1951. Die mittlere Höhe der stärksten Ereignisse ist dabei ab 1980 konstant – die davor liegenden Werte genügen nicht, um einen Trend zu berechnen. Wenn, dann wäre ein Trend hier jedoch negativ, d. h. die mittlere Höhe der höchsten Ereignisse war in den 60er Jahren höher als seit 1980.

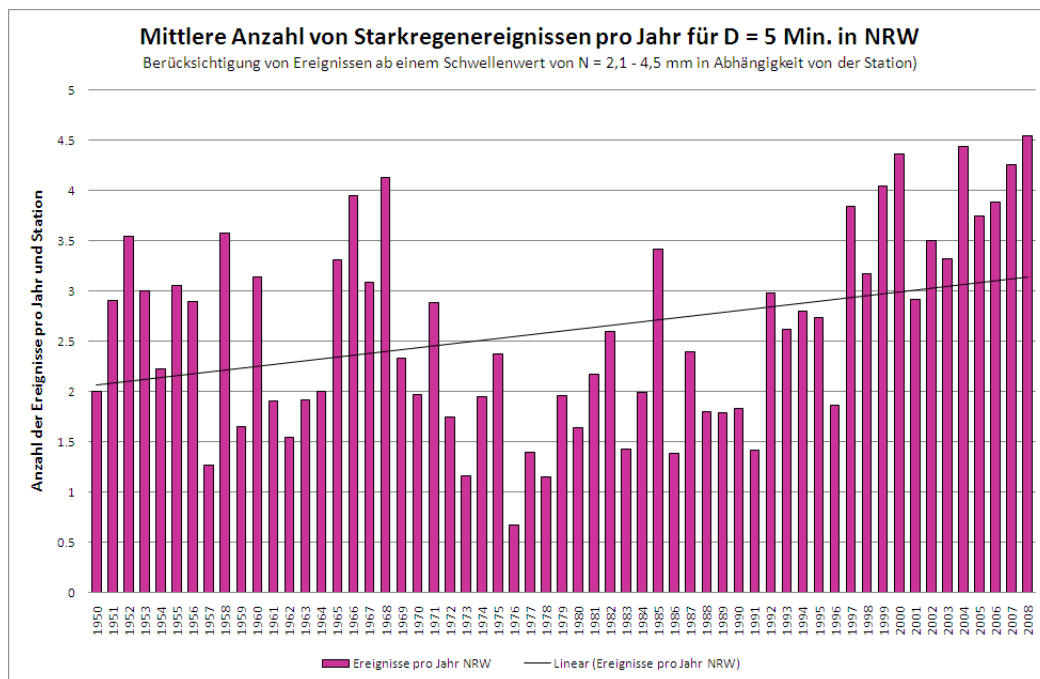


Abbildung 11.4: Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für D=5 Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=2,1-4,5$ mm in Abhängigkeit von der Station)

11.1.2 Dauerstufe 15 Minuten

Die Dauerstufe 15 Minuten ist ebenfalls von kurzen Starkregen geprägt, und die Daten sind auch hier noch sehr empfindlich auf Messverfahren und Datenaufnahme bei Digitalisierung. Die Auswertung zeigt für NRW einen leichten Anstieg der Anzahl der Ereignisse. Auch hier spielt die Umstellung auf Wippen bzw. Wäegeräte sicher eine wichtige Rolle. Das Maximum der Ereignishöhe liegt hierbei ebenfalls im Jahr 1951.

Wie bereits bei der Dauerstufe 5 Minuten ist die mittlere Höhe der stärksten Ereignisse ab 1980 konstant – die davor liegenden Werte genügen nicht, um einen Trend zu berechnen.

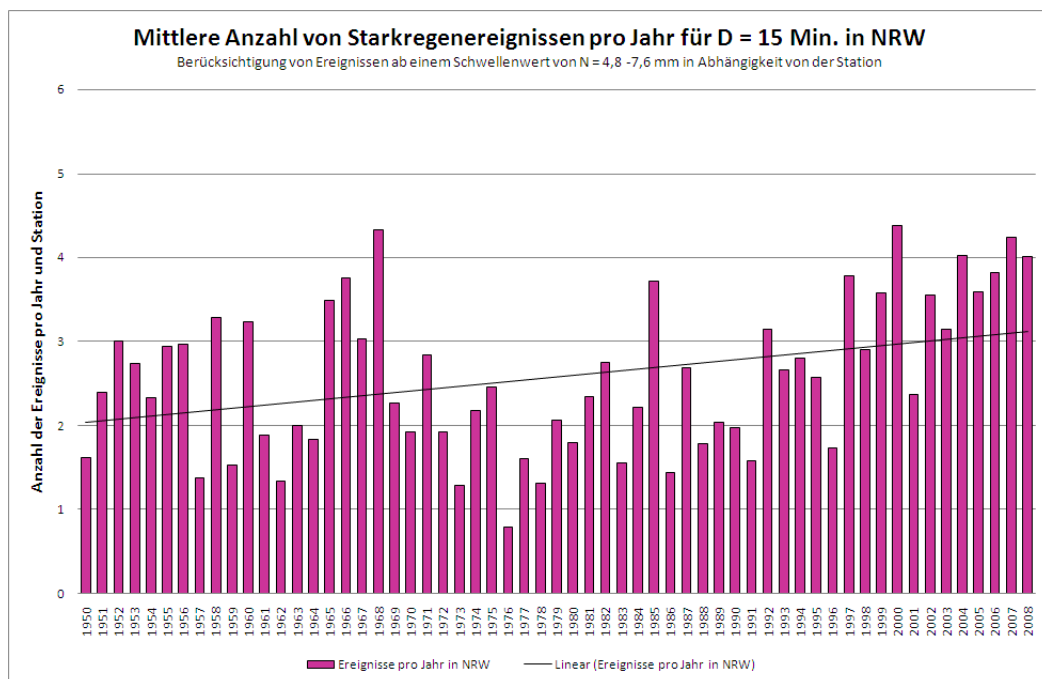


Abbildung 11.5: Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für D=15 Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von N=4,8-7,6 mm in Abhängigkeit von der Station)

11 Auswertung der partiellen Serien

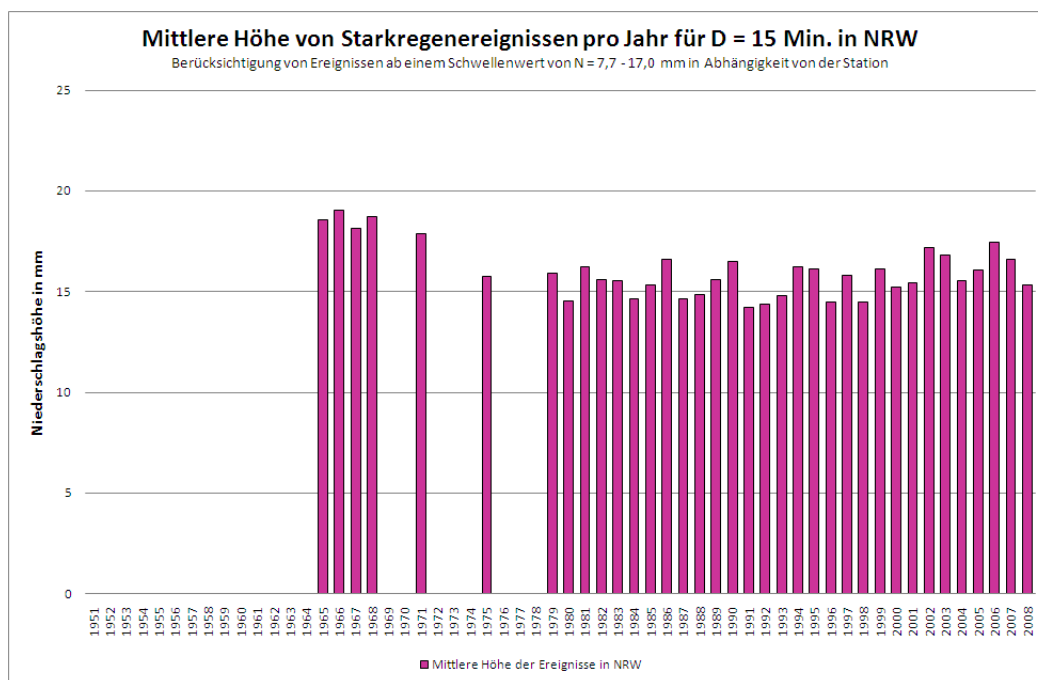


Abbildung 11.6: Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für D=15 Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von N=7,7-17,0 mm in Abhängigkeit von der Station)

11.1.3 Dauerstufe 60 Minuten

Die Dauerstufe 60 Minuten ist zwar auch von kurzen Starkregen geprägt, aber die Daten reagieren fast gar nicht mehr auf unterschiedliche Messverfahren und Datenaufnahme bei Digitalisierung. Die Auswertung zeigt für NRW einen leichten Anstieg der Anzahl der Ereignisse. Hier spielt die Umstellung auf Wägegeräte sicher keine wichtige Rolle mehr. Das Maximum der Ereigniszahl liegt hierbei im Jahr 2007.

Bei der mittleren Höhe der Starkregenereignisse gibt es jetzt nur noch einzelne Jahre (1968, 1986), die etwas herausstechen – alle anderen Jahre weisen eine konstante mittlere Ereignishöhe auf.

11.1 Zeitliche Auflösung der Messdaten...

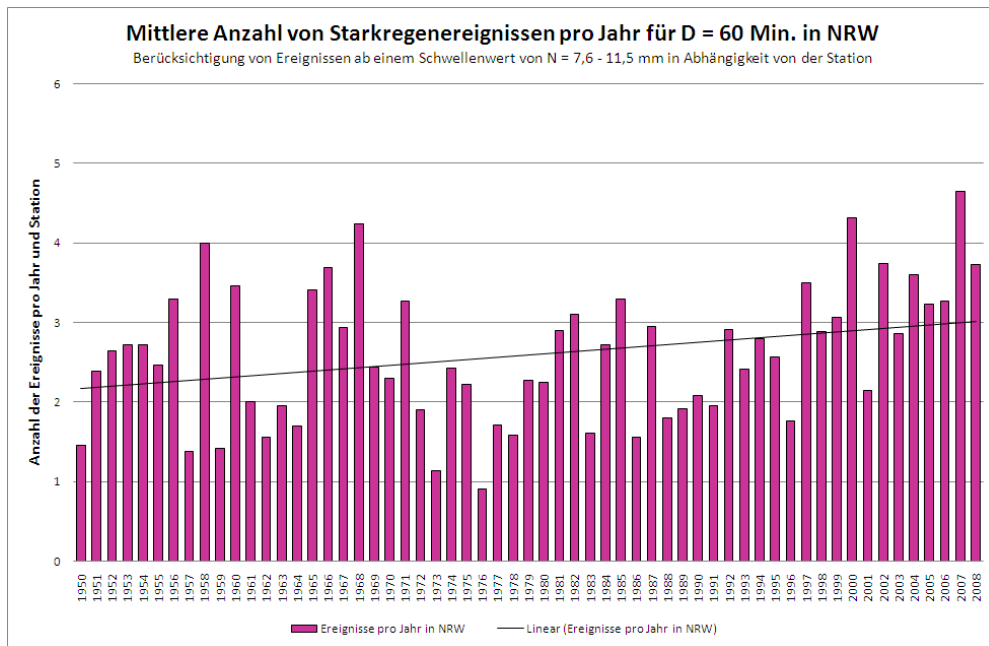


Abbildung 11.7: Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für D=60 Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=7,6-11,5$ mm in Abhängigkeit von der Station)

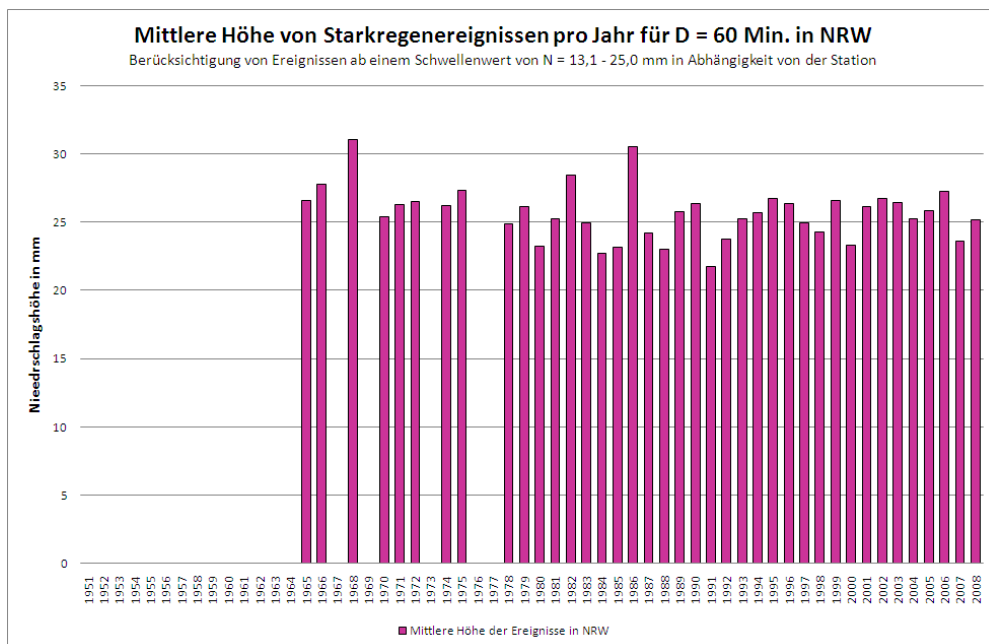


Abbildung 11.8: Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für D=60 Minuten in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=13,1-25,0$ mm in Abhängigkeit von der Station)

11.1.4 Dauerstufe 2 Stunden

Die Dauerstufe 120 Minuten ist nicht mehr wesentlich von kurzen Starkregen geprägt, und so reagieren die Daten nicht mehr auf unterschiedliche Messverfahren und Datenaufnahme bei Digitalisierung. Die Auswertung zeigt für NRW einen leichten Anstieg der Anzahl der Ereignisse. Hier spielt die Umstellung auf Wägegeräte keine Rolle mehr. Das Maximum der Ereigniszahl liegt hierbei im Jahr 2007.

Bei der mittleren Höhe der Starkregenereignisse gibt es wie bei der Dauerstufe 60 Minuten die Jahre 1968 und 1986, die etwas herausstechen – alle anderen Jahre weisen eine konstante mittlere Ereignishöhe auf.

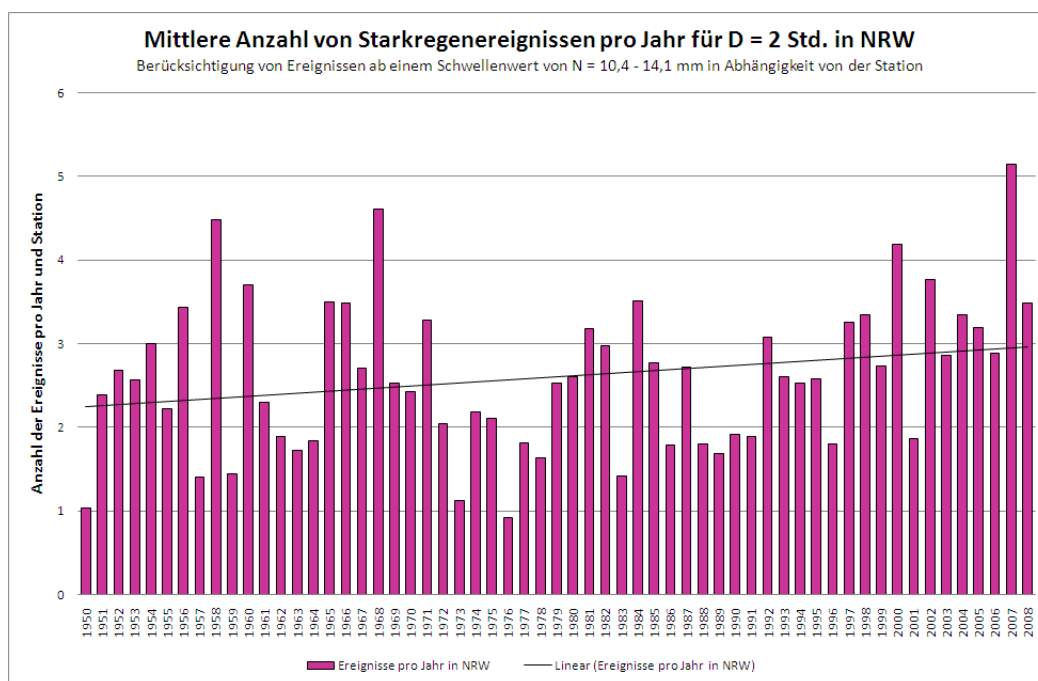


Abbildung 11.9: Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für D=2 Stunden in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=10,4-14,1$ mm in Abhängigkeit von der Station)

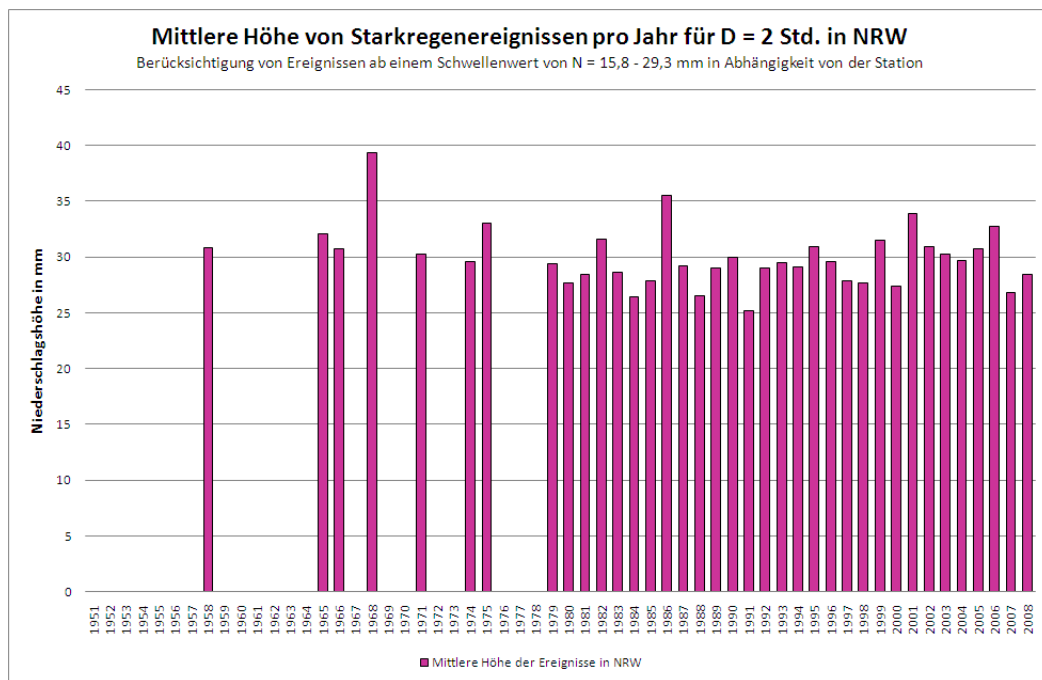


Abbildung 11.10: Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für D=2 Stunden in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von N=15,8-29,3 mm in Abhängigkeit von der Station)

11.1.5 Dauerstufe 4 Stunden

Die Dauerstufe 4 Stunden hängt von länger andauernden Niederschlägen ab. Die Auswertung zeigt für NRW einen leichten Anstieg der Anzahl der Ereignisse. Das Maximum der Ereigniszahl liegt im Jahr 2007. Die Anzahlen steigen und sinken und könnten mit einer Periode von etwa 10-12 Jahren beschrieben werden. Bei der mittleren Höhe der Starkregenereignisse gibt es die Jahre 1954 und 1968, die etwas herausstechen – alle anderen Jahre weisen eine konstante mittlere Ereignishöhe auf.

11 Auswertung der partiellen Serien

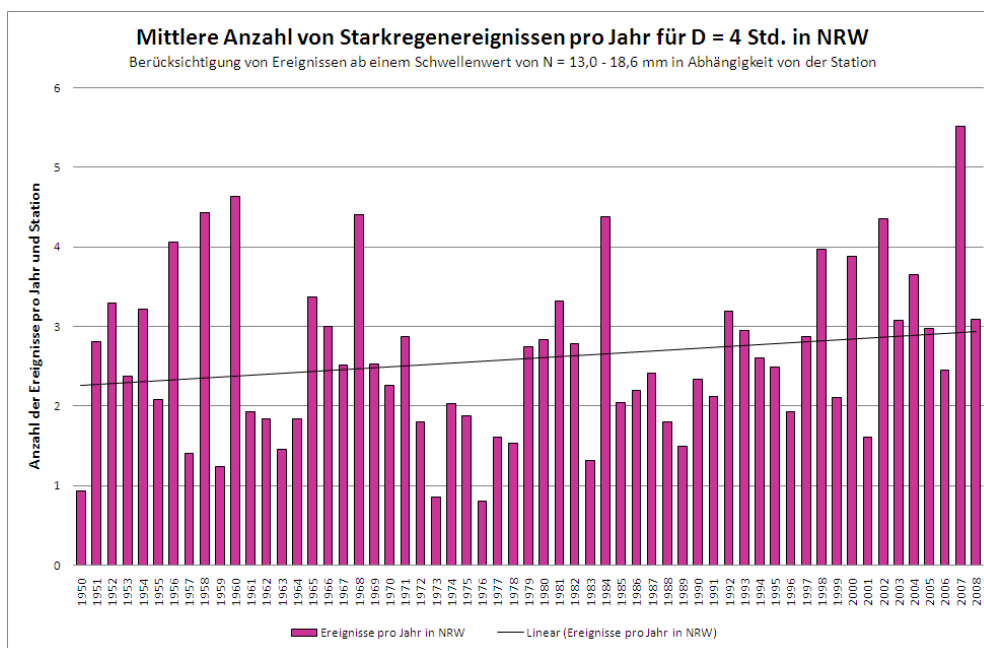


Abbildung 11.11: Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für D=4 Stunden in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=13,0-18,6$ mm in Abhängigkeit von der Station)

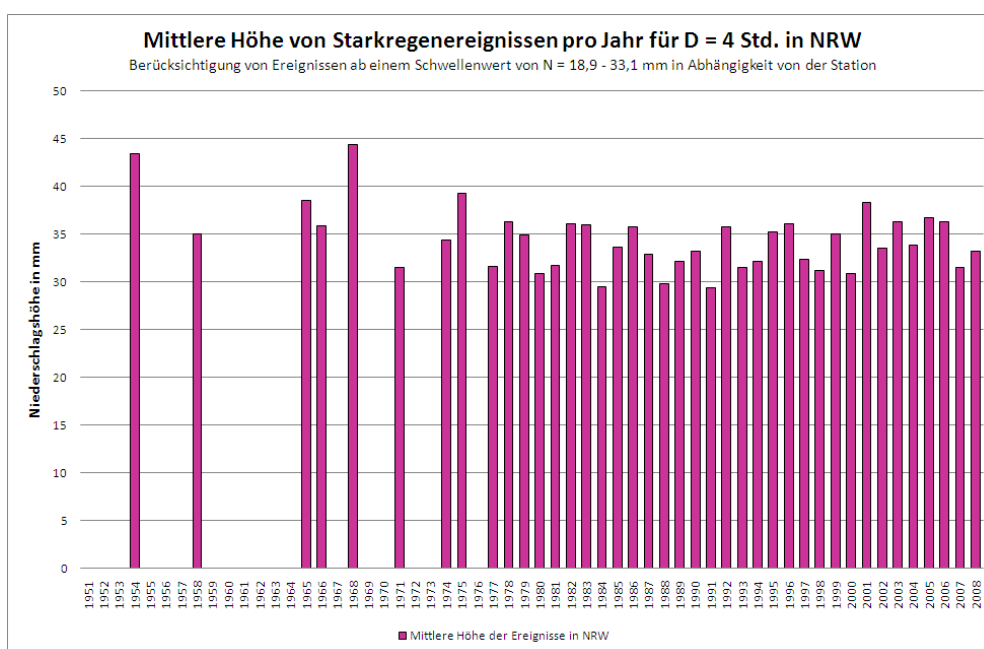


Abbildung 11.12: Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für D=4 Stunden in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=18,9-33,1$ mm in Abhängigkeit von der Station)

11.1.6 Dauerstufe 12 Stunden

Die Dauerstufe 720 Minuten zeigt ein anderes Verhalten als die bisher analysierten. Die Auswertung zeigt für NRW einen leichten Anstieg der Anzahl der Ereignisse, wobei in den Jahren ab 1990 insbesondere die Jahre mit wenigen Ereigniszahlen nicht mehr so wenige Ereignisse aufweisen als dieses in den davorliegenden Zeiträumen war. Das Maximum der Ereigniszahl liegt hierbei im Jahr 1984. Bei der mittleren Höhe der Starkregenereignisse gibt es das Jahr 1954, das deutlich heraussticht – alle anderen Jahre weisen eine konstante mittlere Ereignishöhe auf.

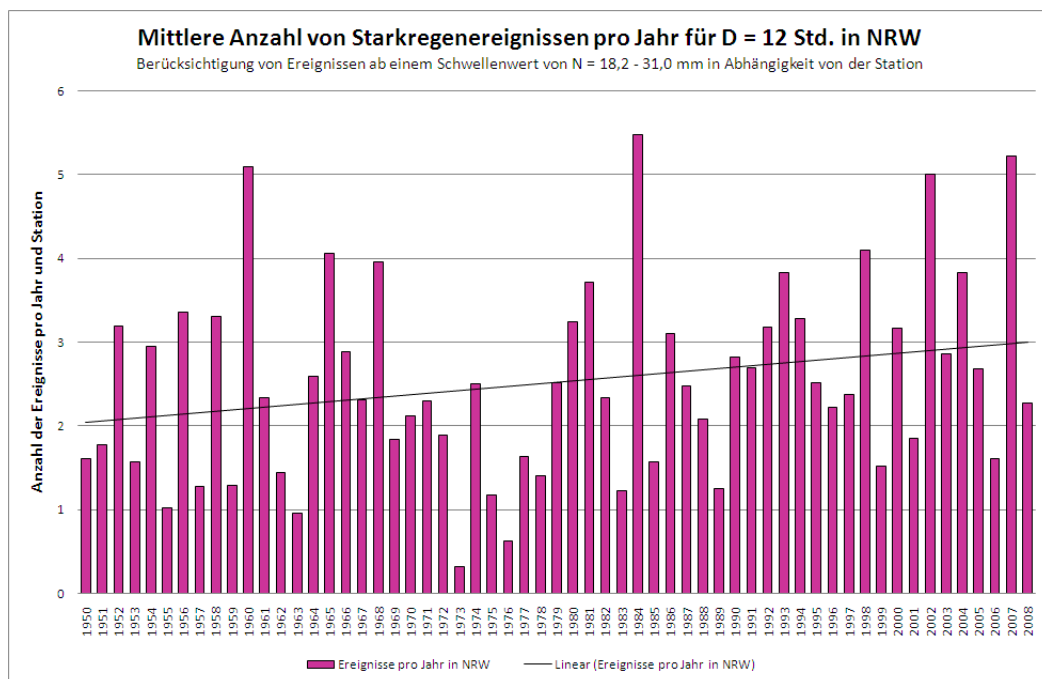


Abbildung 11.13: Mittlere Anzahl von Starkregenereignissen pro Jahr für D=12 Stunden in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=18,2-31,0$ mm in Abhängigkeit von der Station)

11 Auswertung der partiellen Serien

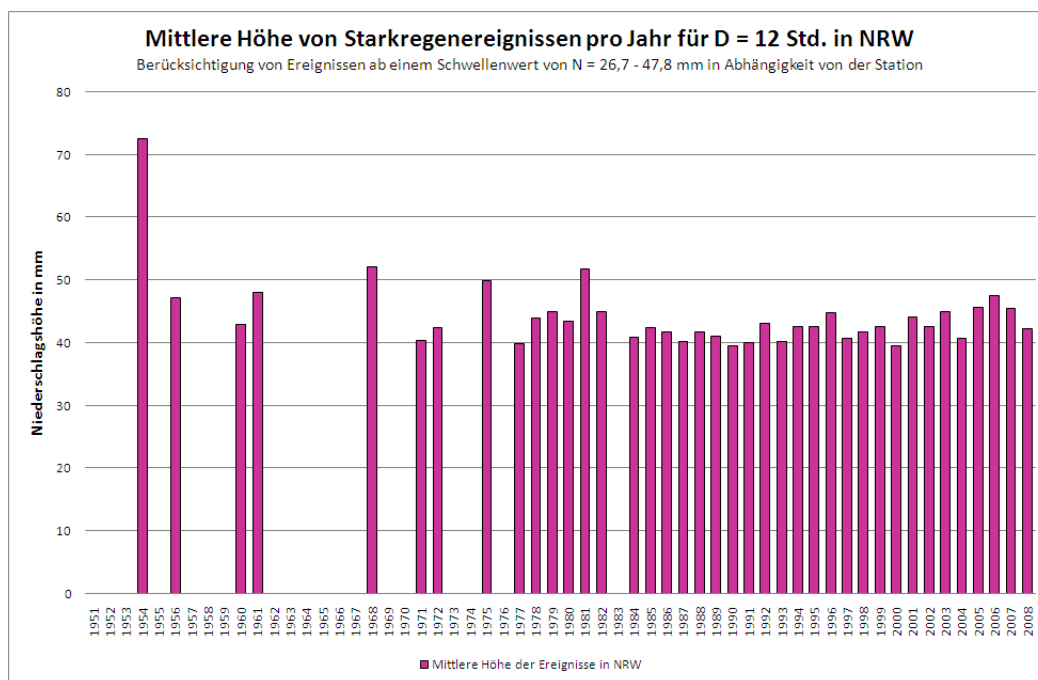


Abbildung 11.14: Mittlere Höhe von Starkregenereignissen pro Jahr für $D=12$ Stunden in NRW (Berücksichtigung von Ereignissen ab einem Schwellenwert von $N=26,7-47,8$ mm in Abhängigkeit von der Station)

11.2 Interpretation der Ereigniszahlen der partiellen Serien für NRW

Aus der Untersuchung der Ereigniszahlen der partiellen Serien über die Dauerstufen lässt sich folgendes folgern: Die mittlere Anzahl von Starkregenereignissen in NRW pro Jahr ist je nach Dauerstufe unterschiedlich. Für die Dauerstufen 5 Minuten, 15 Minuten (abgeschwächt) und – in noch geringerem Maße – 60 Minuten ist aus den Daten erkennbar, dass es ab ca. 1990 einen Bruch in den Ereignisanzahlen gibt. Die Tatsache, dass dieser Bruch in der Dauerstufe 5 Minuten deutlicher auftritt und in den weiteren ab Dauerstufen 2 Stunden nicht mehr erkennbar ist, deutet darauf hin, dass hier die Gerätetechnik wesentliche Ursache ist: die Umstellung auf Wippengeräte und auf Wägegeräte ab 1990 bzw. 2000. Keiner der als Gerade eingezeichneten Trends ist statistisch signifikant. Die mittlere Höhe der Starkregenereignisse kann über die Jahre als konstant eingestuft werden.

11.3 Auswertung der Dauerstufen $D=5$ Minuten bis $D=12$ Stunden nach Großlandschaften

Die Anzahl der Stationen in den acht Großlandschaften in NRW ist sehr unterschiedlich ($\hookrightarrow$ Tab. 11.1). Aus diesem Grund wurde eine weitergehende Auswertung der Anzahlen der Einzelereignisse auf die Großlandschaften beschränkt, die mit mehr als 10 Stationen vertreten waren – das Westfälische Tiefland wurde also nicht ausgewertet.

Tabelle 11.1: Anzahl der Einzelereignisse in den Großlandschaften

Großlandschaften	Anzahl der Einzelereignisse
Bergisches Land	32
Eifel (mit Siebengebirge)	14
Niederrheinische Bucht	28
Niederrheinisches Tiefland	18
Sauer- und Siegerland	22
Weserbergland	8
Westfälische Bucht	53
Westfälisches Tiefland	1

Die mittlere Anzahl der Starkregenereignisse nimmt in allen Großlandschaften für die Dauerstufen 5, 15 und 60 Minuten ab einem Stichtag (1990/1995/2000) zu. Das heißt, dass eine Inhomogenität in der Reihe der Anzahl der Ereignisse klar erkennbar ist. Für längere Dauerstufen verliert sich der Effekt und ein Sprung in den Daten ist nicht mehr erkennbar. Für keine der Großlandschaften gibt es für die längste Dauerstufe einen signifikanten Trend, während ein solcher (auf dem Signifikanzniveau 80 %) für die Dauerstufe 4 Stunden noch für die Großlandschaften Bergisches Land und Niederrheinische Bucht erkennbar ist. Dabei wird deutlich, dass Großlandschaften mit kurzen Reihen schneller einen signifikanten Trend aufweisen als solche mit langen Reihen. Das liegt an dem spät erfolgenden Sprung, der für kurze Reihen, die um 1970 beginnen, den Trend vorgibt, während derselbe Effekt bei langen Reihen zu einem kleineren Bestimmtheitsmaß führt. Details sind aus den Abbildungen im Anhang F ersichtlich.

Es wird durch die Unterschiede zwischen den kurzen und den längeren Dauerstufen deutlich, dass der wesentlich sichtbare Teil der Trends in den Ereignisanzahlen der partiellen Serie aus der Veränderung in der Gerätetechnik stammt.

Die mittleren Regenhöhen der Starkregenereignisse wurden ebenfalls so ausgewertet, dass für jede Großlandschaft mehr als 10% der Stationen Werte beitrugen mussten, um analysiert zu werden. Diese Form der Auswertung führte zusammen mit oft erst spät beginnenden Messungen dazu, dass es für verschiedene Dauerstufen in den Großlandschaften

Niederrheinische Tiefebene, Niederrheinische Bucht, Eifel und Bergisches Land zu Auswertungen kam, die nur die neuere Hälfte des Gesamtuntersuchungszeitraumes abdeckten ($\hookrightarrow$ Abbildungen im Anhang F). Insgesamt lassen sich zwei Aussagen treffen:

- Es gibt keinen Trend bei der Höhe der größten Starkregen in den Großlandschaften. Dieses Ergebnis ist damit identisch zu dem in Gesamt-NRW.
- Die maßgeblichen Ereigniswerte der Großlandschaften Bergisches Land, Sauerland und Westfälische Bucht liegen in fast allen Dauerstufen höher als der Landesdurchschnitt, die Großlandschaften Niederrheinisches Tiefland, Niederrheinische Bucht und Eifel meist niedriger als der Landesdurchschnitt.

Während die erste Aussage prinzipiell auf alle Stationen verallgemeinert werden kann, bezieht sich die zweite auf die Mittelwerte der Großlandschaften – für Einzelstationen kann dieses durchaus anders gelagert sein.

11.4 Untersuchung der partiellen Serien auf Trend

Neben dem Auszählkriterien wurden die partiellen Serien auf Trends untersucht. Die Karten im Anhang E.1 zeigen die Trends der partiellen Serien für $D=5$ Minuten. Für den Gesamtzeitraum 1950-2008 sowie für die Zeitfenster 1950-1979 und 1961-1990 lassen sich keine regionalen Differenzierungen feststellen, da es für diese Zeiträume nur sehr wenige auswertbare Stationen gibt. Diese befinden sich hauptsächlich in der Emscher-Lippe-Region. Bei Betrachtung des Gesamtzeitraumes, für den 32 Stationen für die Auswertung zur Verfügung standen, sind bei 2/3 der Stationen fallende Trends festzustellen ($\hookrightarrow$ Abb. E.1 und E.2).

Im Zeitbereich 1979-2008 ist bei 60 % der Stationen ein steigender Trend festzustellen ($\hookrightarrow$ Abb. E.25 und E.26). Hier konnte die Untersuchung mit 125 Stationen durchgeführt werden, was eine regionale Differenzierung auch nur schwer möglich macht, zumal die Stationen regional nicht gleichmäßig verteilt liegen.

Bei Betrachtung der Trends der partiellen Serien für $D=15$ Minuten, die in den Karten im Anhang E.2 zu finden sind, fällt auf, dass das Bild für alle untersuchten Zeitfenster sehr heterogen ist. Das Verhältnis zwischen Zu- und Abnahme der Trends ist ausgeglichen. Es lassen sich keine großräumigen Differenzierungen feststellen.

Für die Zeitbereiche, die frühe Jahre enthalten (1950-1959), stehen nur wenige Stationen (32) zur Auswertung zur Verfügung. Diese Tatsache macht regionale Aussagen zu den Dauerstufen $D=60$ Minuten, $D=2$ Stunden, $D=4$ Stunden und $D=12$ Stunden kaum möglich. Die Karten in den Anhängen E.3, E.4, E.5 und E.6 zeigen die Trends der partiellen Serien der entsprechenden Dauerstufen. Selbst für die anderen Zeiträume stehen nur maximal 138 Stationen zur Verfügung, auch hierfür lassen sich keine eindeutigen Aussagen für die einzelnen Großlandschaften treffen.

Für die Dauerstufen $D=1$ Tag und $D=3$ Tage lassen sich im Gegensatz zu den kurzen Dauerstufen einige regionale Differenzierungen erkennen. Im Zeitbereich 1950-2008 sind

für $D=1$ Tag 44 von 184 Stationen signifikant. Es lässt sich feststellen, dass in der Eifel sowie im Ruhrgebiet fallende Trends, im Bergischen Land steigende Trends zu verzeichnen sind. Im Weserbergland überwiegen die steigenden Trends ($\leftrightarrow$ Anhang E.7).

Für die letzten 30 Jahre (1979-2008) wurden für $D=3$ Tage 425 Stationen ausgewertet, davon sind 82 Stationen signifikant. Auffällig ist hier, dass westlich des Rheins fast ausschließlich fallende Trends zu verzeichnen sind. Auch im Sieger- und Sauerland überwiegen die fallenden Trends deutlich, wogegen das Verhältnis zwischen zu- und abnehmenden Trends in den übrigen Landesteilen ausgeglichener ist ($\leftrightarrow$ Abb. E.235 und Abb. E.236). Es lassen sich beim Vergleich der Sommer- und Winterhalbjahre bemerkenswerte regionale Unterschiede feststellen. In beiden Halbjahren sind für die Eifel deutliche fallende Trends erkennbar. In den Winterhalbjahren gibt es auch in der nord-östlichen Hälfte NRWs fast ausschließlich fallende Trends. Nur in einem Streifen von Gummersbach bis Kleve sind steigende Trends zu verzeichnen ($\leftrightarrow$ Abb. E.237 und Abb. E.238).

In den Sommerhalbjahren finden sich zusätzlich zur Eifel auch im Ruhrgebiet viele fallende Trends. Im Weserbergland und im Bergischen Land überwiegen deutlich steigende Trends, die übrigen Landesteile sind heterogen ($\leftrightarrow$ Abb. E.239 und Abb. E.240).

Bei dieser Untersuchung wurden Trends aus dem Gesamtzeitraum und aus 30-Jahres-Fenstern ermittelt. Es zeigte sich, dass ein Trend aus nur 30 Jahren recht instabil und sehr von der Lage im klimatologischen Zyklus abhängig ist. Auch sind besonders die partiellen Serien von Einzelereignissen an den einzelnen Stationen beeinflusst, was sich auf den Trend auswirkt und somit das Erkennen regionaler Gemeinsamkeiten erschwert.

11 Auswertung der partiellen Serien

12 Entwicklung der statistischen Regenhöhen

Ob die Starkregen in ihren Intensitäten zunehmen, wurde in diesem Kapitel nicht anhand einzelner Ereignisse, sondern anhand der statistischen Regenhöhen aus den partiellen Serien nach ATV-A 121 beurteilt. Die Entwicklung der Regenhöhen wurde analysiert, indem die Ergebnisse aus unterschiedlichen Zeitfenstern gegenübergestellt wurden. Die Untersuchung wurde differenziert nach Dauerstufe und Jährlichkeit. Räumlich wurde in Großlandschaften unterschieden.

Regenhöhen und ihre Entwicklungen lassen sich quantifizieren. Daraus können Empfehlungen für die Bemessungspraxis abgeleitet werden.

Die statistische Überprüfung der Signifikanz einer Entwicklung war nicht möglich. Dafür ist der Umfang der Stichproben zu gering, nämlich die Anzahl der Regenhöhen aus den unterschiedlichen Zeitfenstern. Zudem überschneiden sich die Zeitfenster, die Stichprobenelemente sind also nicht unabhängig voneinander.

Die Ergebnisse gewinnen aber an Gewicht, je mehr Stationen in einem Zeitfenster für eine Großlandschaft gemittelt werden können. Die Zufälligkeit kleinräumiger Ereignisse an einzelnen Stationen treten damit in den Hintergrund.

Zur Beurteilung der Entwicklung in der Zeit kommen zwei Methoden von Zeitfenstern zum Einsatz, deren Zweck und Verfahrensweise im Folgenden beschrieben sind.

Mit den **gleitenden Zeitfenstern** wird die Entwicklung der Regenhöhen über den Gesamtzeitraum (1950-2008) beurteilt.

Es wurden immer 30 Jahre ausgewertet ($\leftrightarrow$ Kap. 6, Abb. 6.2). 30 Jahre produzieren nach den anerkannten Regeln der Technik belastbare statistische Regenhöhen. Aussagen über einen Trend lassen sie nicht zu. Dieser wurde aus dem Vergleich unterschiedlicher 30-Jahres-Zeitfenster abgeleitet.

Die Einzelergebnisse sind vergleichbar, weil jeweils die gleiche Zeitspanne zugrunde liegt. Zur Beurteilung der Gesamtentwicklung wurde für die gleitenden Zeitfenster als Bezugszeitraum 1950-2008 gewählt und die Entwicklung auf den Wert des ersten Zeitfensters bezogen.

Eine flächendifferenzierte Aussage für NRW und die Großlandschaften ist nur bedingt möglich. Nur relativ wenige Stationen verfügen über eine hinreichend lange Laufzeit, um alle Zeitfenster belegen zu können. Diese Stationen konzentrieren sich im Emscher-Lippegebiet.

Die Methode der **wachsenden Zeitfenster** soll eine größere Differenzierung in der Fläche NRWs erlauben. Um für diesen Zweck möglichst viele Stationen vergleichen zu können,

wurde der Bezugszeitraum auf die letzten 30 Jahre (1979-2008) beschränkt. Die Zeitfenster davor werden zwar ausgewertet und dargestellt, haben aber nur informellen Charakter. Der berechnete Trend gibt Auskunft über die letzten 30 Jahre. Darüber hinaus liefert er keine belastbaren Aussagen, die die Ergebnisse der gleitenden Zeitfenster in Frage stellen. Allerdings verstärkt ein Widerspruch in den Ergebnissen dieser zwei Methoden von Zeitfenstern den Bedarf, die Niederschlagsmessungen im bestehenden Umfang fortzusetzen und keinesfalls zurückzufahren.

Die Anzahl der ausgewerteten Jahre ändert sich stark, beträgt längstens 59, mindestens aber 20 Jahre. Die letzten 20 Jahre sind in allen wachsenden Zeitfenstern enthalten ($\hookrightarrow$ Kap. 6, Abb. 6.3). Die Entwicklung vom Gesamtzeitraum zur jüngeren Vergangenheit bildet demnach ab, wie sich die Regenhöhen verändern, wenn die weiter zurückliegenden Jahre schrittweise nicht berücksichtigt werden. Im Umkehrschluss kann abgeleitet werden, wie sich die Ergebnisse ändern würden, wenn man an einer Station bzw. in einer Region den Gesamtzeitraum (1950-2008) zur Verfügung hätte.

Bei der Untersuchung der Entwicklung der statistischen Regenhöhen wurden im Einzelnen die folgenden Schritte durchgeführt:

- An jeder Station wurde für jedes Zeitfenster, in dem sie maximal 3 % Lückenanteil besitzt, die partielle Serie gebildet und die Starkregenauswertung durchgeführt.
- Aus der Starkregenauswertung wurden die Regenhöhen für die Dauerstufen $D=5$ Minuten, $D=15$ Minuten, $D=60$ Minuten, $D=2$ Stunden, $D=4$ Stunden, $D=12$ Stunden, $D=1$ Tag und $D=3$ Tage und die Wiederkehrzeiten $T=1$ Jahr, $T=2$ Jahre, $T=3.3$ Jahre, $T=5$ Jahre, $T=10$ Jahre und $T=20$ Jahre herausgezogen und getrennt untersucht.
- Je Zeitfenster, Dauerstufe, Jährlichkeit und Großlandschaft bzw. Gesamt-NRW wurden die Regenhöhen aller Stationen gemittelt, für die ein Ergebnis berechnet werden konnte.
- Die gemittelten Regenhöhen wurden dem Anfangsjahr ihres jeweiligen Zeitfensters zugeordnet und mit den Ergebnissen der folgenden Zeitfenster zu einer Zeitreihe verbunden.
- Hat die so entstandene Zeitreihe einen positiven Trend, so nimmt die Regenhöhe mit einer Fokussierung auf die jüngeren Jahre zu. Der berechnete Trend beschreibt
 - bei den gleitenden Zeitfenstern den Zuwachs der Regenhöhe, wie er sich im Laufe der Zeit ergibt
 - bei den wachsenden Zeitfenstern die Entwicklung innerhalb der letzten 30 Jahre mit einem Ausblick auf den Gesamtzeitraum.

- Die so entstandenen Zeitreihen von den Großlandschaften und Gesamt-NRW wurden je Dauerstufe und Jährlichkeit in einer grafischen Darstellung visualisiert. In der Grafik wird zusätzlich angegeben:
 - der Bezugszeitraum (gelb hinterlegt)
 - die maximale Anzahl der gemittelten Stationen (aus dem Zeitfenster, für das die meisten Stationen ausgewertet werden konnten)
 - das Minimum bzw. Maximum der Regenhöhe
 - * bei gleitenden Zeitfenstern
bezogen auf das Ergebnis des frühesten Auswertungszeitraums 1950-1979
 - * bei wachsenden Zeitfenstern
bezogen auf das Ergebnis des Auswertungszeitraums 1979-2008
 - der Trend der gemittelten Regenhöhen im Bezugszeitraum (positive Werte bedeuten eine Zunahme, negative Werte eine Abnahme der Regenhöhe)
- Um die Entwicklung an den einzelnen Stationen in NRW und in den Großlandschaften differenzieren zu können, wurde in jede zeitlich-grafische Darstellung eine Karte eingeblendet, in der folgende Parameter dargestellt sind:
 - die Lage der ausgewerteten Stationen
 - die Regenhöhenänderungen [mm/a] für die ausgewertete Dauerstufe und Wiederkehrzeit (blau bedeutet Zu-, orange Abnahme)
 - der Variationskoeffizient [%] liefert einen Hinweis auf die Signifikanz (ist er betragsmäßig groß, variiert die Ganglinie stark, die Signifikanz ist demnach gering $\Rightarrow$ das Symbol wird also klein dargestellt)

12.1 Gleitende Zeitfenster

Für die zusammengefassten Gebiete stehen bei den gleitenden Zeitfenstern für die Dauerstufen unterschiedliche Anzahlen von Stationen zur Verfügung, die in einzelnen Dauerstufen nur leicht variieren.

Gesamtgebiet bzw. Großlandschaft	Anzahl Stationen in den Dauerstufen		
	$D = 5min,$ $15min$	$D = 60min,$ $2h, 4h \text{ und } 12h$	$D = 1d$ $\text{und } 3d$
Gesamt-NRW	49	54	321
Niederrheinisches Tiefland	5	5	36
Niederrheinische Bucht	3	4	30
Westfälische Bucht	35	35	74
Westfälisches Tiefland	0	0	6
Weserbergland	1	1	38
Eifel (mit Siebengebirge)	2	6	26
Bergisches Land	2	2	40
Sauer- und Siegerland	1	1	63

Von den Tageswertstationen liegen 8 Stationen knapp außerhalb von NRW. Diese wurden bei Gesamt-NRW mitgezählt, bei den Großlandschaften nicht.

Aufgrund der Anzahl von Stationen, die in einem Gebiet gemittelt wurden, gibt es für Dauerstufen <1 Tag keine Aussagen für das Westfälisches Tiefland und keine aussagestarken Ergebnisse für das Weserbergland sowie das Sauer- und Siegerland.

Stellvertretend für die Auswertetechnik und die Fälle mit den stärksten Änderungen werden in diesem Kapitel dargestellt:

- Entwicklung der Regenhöhen: $D=15$ Minuten, $T=1$ Jahr (Gleitende Zeitfenster) ($\hookrightarrow$ Abb. 12.1)
- Entwicklung der Regenhöhen: $D=60$ Minuten, $T=20$ Jahre (Gleitende Zeitfenster) ($\hookrightarrow$ Abb. 12.2)
- Entwicklung der Regenhöhen: $D=12$ Stunden, $T=20$ Jahre (Gleitende Zeitfenster) ($\hookrightarrow$ Abb. 12.3)
- Entwicklung der Regenhöhen: $D=1$ Tag, $T=20$ Jahre (Gleitende Zeitfenster) ($\hookrightarrow$ Abb. 12.4)
- Entwicklung der Regenhöhen: $D=3$ Tage, $T=1$ Jahr (Gleitende Zeitfenster) ($\hookrightarrow$ Abb. 12.5)

Die Dokumentation der vollständigen Untersuchung für alle Dauerstufen und Jährlichkeiten findet sich im Anhang G.1 ($\hookrightarrow$ Abb. G.21 bis G.68).

Zur Beurteilung der Entwicklung in den Großlandschaften wurden für die gleitenden Zeitfenster in der Tabelle 12.1 je Großlandschaft bzw. Gesamt-NRW die Ergebnisse für die Änderung der Regenhöhe [%] im Bezugszeitraum 1950-2008 für alle betrachteten Dauerstufen und Jährlichkeiten zusammengetragen. Die Änderungen wurden aus den Trends berechnet, die sich in den Zeitreihen mit den Regenhöhen der vier Zeitfenster darstellen. Bezogen wurden die Änderungen auf die Regenhöhen des ersten Zeitfensters. Als Zeitspanne, in der sich die Änderungen ergaben, wurden die 29 Jahre angesetzt, die zwischen dem Zeitfenster 1950-1979 und 1979-2008 liegen. In Einzelfällen konnten für das erste Zeitfenster 1950-1979 keine Regenhöhen berechnet werden. In diesen Fällen wurde die Änderung zwischen den Zeitfenstern 1961-1990 und 1979-2008 bestimmt. Diese Fälle besitzen eine Änderungszeitspanne von 18 Jahren und haben nur eingeschränkte Vergleichbarkeit. In der Tabelle wurde dies durch Nennung des Anfangsjahres kenntlich gemacht. Die Angabe der Anzahl gemittelter Stationen dient zur Einschätzung des Gewichtes der Aussage. Für jede Großlandschaft wurde die Dauerstufe mit dem größten Zuwachs blau hinterlegt. Findet die stärkste Zunahme in einer Dauerstufe ≤ 60 Minuten statt, so wurde zusätzlich die Dauerstufe >60 Minuten mit der größten Zunahme blau gekennzeichnet. Dauerstufen mit der stärksten Abnahme wurden orange eingefärbt. Großlandschaften, bei denen in keiner Dauerstufe und Jährlichkeit eine Abnahme der Regenhöhe festzustellen war, bleiben ohne entsprechende Markierung.

Aus dieser Tabelle wurden je Großlandschaft die Dauerstufen mit den stärksten Veränderungen herausgezogen und in eigenen Tabellen zusammengestellt, um die Änderungen nach Dauerstufe und Gebiet aussagestärker abschätzen zu können.

- Tabelle 12.2: Dauerstufen mit den höchsten Steigerungen der Regenhöhen [%] aus allen Dauerstufen
- Tabelle 12.3: Dauerstufen >60 Minuten mit den stärksten Steigerungen der Regenhöhen [%]
- Tabelle 12.4: Dauerstufen mit den stärksten Abnahmen der Regenhöhen [%] aus allen Dauerstufen

Die Dauerstufen ≤ 60 Minuten wurden hier gesondert betrachtet, weil bei Ihnen ein starker Einfluss der geänderten Messtechnik erwartet wird und dieser schwer quantifiziert werden kann.

In der Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse aus den **gleitenden Zeitfenstern** wird die Entwicklung der Regenhöhen über den Gesamtzeitraum (1950-2008) wie folgt beurteilt.

- Die größten **Zunahmen der statistischen Regenhöhen** für Dauerstufen >60 Minuten treten im ganzen Land in der Dauerstufe 3 Tage auf ($\leftrightarrow$ Tab. 12.3). Einzige Ausnahme bildet die Niederrheinische Bucht mit der stärksten Zunahme in der 12-Stunden-Dauerstufe. Allerdings beginnt diese Auswertung erst mit dem Zeitfenster 1961-1990.
- Die Steigerungsraten betragen für die 1-jährliche Regenhöhe zwischen 8 und 17 %. Ausnahmen bilden das Westfälische Tiefland mit 0,4 % und die Eifel mit 5,5 %. Die größte Zunahme verzeichnet das Bergische Land, in dem 40 Stationen gemittelt wurden, mit knapp 17 %.
- Mit höheren Jährlichkeiten nehmen die Steigerungsraten i. d. R. ab. Ausnahmen bilden das Westfälische Tiefland und die Eifel, hier steigen die Steigerungsraten stetig mit zunehmender Jährlichkeit. In der Niederrheinischen Bucht bzw. dem Sieger- und Sauerland sind die Steigerungsraten mit ca. 12 bzw. 13 % über die Jährlichkeiten nahezu konstant.
- Bezieht man die Dauerstufen ≤ 60 Minuten mit ein ($\leftrightarrow$ Tab. 12.2), so zeigen sich die höchsten Steigerungsraten in der 5-Minuten-Dauerstufe. Die Steigerungsraten sind allerdings sehr unterschiedlich. Niederrheinisches Tiefland und Bergisches Land sind hier ab dem Zeitfenster 1950-1979 vertreten. Niederrheinische Bucht, Weserbergland, Eifel und Sauer- und Siegerland verfügen erst ab dem Zeitfenster 1961-1990 über Regenhöhen.
- Für Gesamt-NRW, Westfälische Bucht und Westfälisches Tiefland ergeben sich auch bei Einbeziehung aller Dauerstufen die größten Steigerungsraten in der Dauerstufe 3 Tage.
- Auf der Suche nach den **stärksten Abnahmen der Regenhöhen** wurde die gesonderte Betrachtung der Dauerstufen ≤ 60 Minuten nicht durchgeführt, da der Einfluss der Messtechnik nicht abnehmend wirkt.
- Abnahmen treten, wenn überhaupt eher in kürzeren Dauerstufen und in höheren Jährlichkeiten auf ($\leftrightarrow$ Tab. 12.4).
- Für Gesamt-NRW existiert für die 1-jährlichen Regenhöhen keine Abnahme. Für höhere Jährlichkeiten findet sich das Maximum in der Dauerstufe 15 Minuten, gestaltet sich mit -2 bis -4 % aber recht gering.
- Für das Niederrheinische Tiefland, das Westfälische Tiefland und die Eifel konnten Abnahmen in keiner Dauerstufe und keiner Jährlichkeit gefunden werden.

- Für das Weserbergland und das Sauer- und Siegerland stand jeweils nur eine Station zur Verfügung und die auch erst ab dem Zeitfenster 1961-1990. Aussagen über Abnahmen sind hier also nicht belastbar.
- Die stärkste Abnahme findet sich in der Westfälischen Bucht, belegt mit 35 Stationen, für die Dauerstufe 60 Minuten. Die 1-jährliche Regenhöhe bleibt mit einer Abnahme von -0,3 % nahezu konstant. Mit höheren Jährlichkeiten steigert sich die Abnahme auf ca. -7 % für die 20-jährliche Regenhöhe.
- In der Niederrheinischen Bucht findet die Abnahme in der Dauerstufe 1 Tag ihr Maximum. Die 1-jährliche Regenhöhe nimmt hier noch um 4 % zu. Mit höheren Jährlichkeiten steigert sich die Abnahme bis auf 7 % bei der 20-jährlichen Aussage.

Tabelle 12.1: Gleitende Zeitfenster: Änderung der Regenhöhen seit angegebenem Anfangsjahr, berechnet aus Trend [%] je Großlandschaft für alle Dauerstufen und Jährlichkeiten

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1,0a	2,0a	3,3a	5,0a	10,0a	20,0a
Gesamt-NRW									
49 Stationen	5min	1950	6,4	0,2	0,0	-0,4	-1,6	-1,8	-1,5
	15min	1950	9,2	0,9	-2,0	-2,9	-2,9	-4,0	-4,5
54 Stationen	60min	1950	14,8	1,4	-0,6	-2,2	-2,6	-3,8	-4,5
	2h	1950	17,7	3,2	0,4	-1,4	-2,0	-3,1	-4,0
	4h	1950	21,1	4,5	1,2	-0,4	-1,7	-3,3	-4,2
	12h	1950	27,6	8,1	4,6	2,5	0,6	-0,9	-2,7
321 Stationen	1d	1950	36,5	7,9	5,5	4,2	3,2	1,9	0,8
	3d	1950	52,8	10,7	9,9	9,3	9,2	8,8	8,5
Niederrheinisches Tiefland									
5 Stationen	5min	1950	5,8	11,6	13,3	11,8	12,2	12,0	13,3
5 Stationen	15min	1950	8,6	10,2	9,2	8,1	7,9	6,0	5,9
	60min	1950	13,9	11,8	8,5	5,9	5,3	4,1	3,1
	2h	1950	16,9	8,0	5,2	4,7	3,8	2,9	2,0
	4h	1950	20,1	7,2	5,3	4,8	3,7	3,1	2,3
	12h	1950	26,1	9,0	9,1	8,5	8,5	7,9	7,8
36 Stationen	1d	1950	32,3	5,1	3,4	2,5	2,0	1,2	0,8
	3d	1950	44,8	8,3	6,9	6,1	5,7	4,9	4,3

12 Entwicklung der statistischen Regenhöhen

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1,0a	2,0a	3,3a	5,0a	10,0a	20,0a
Niederrheinische Bucht									
3 Stationen	5min	1961	5,3	27,2	30,0	28,4	27,8	27,4	27,1
4 Stationen	15min	1961	8,4	17,8	9,5	7,0	4,2	1,8	-0,8
	60min	1961	14,2	9,5	6,6	4,3	1,9	1,1	-0,5
	2h	1961	16,8	9,8	7,2	6,2	5,2	4,5	4,0
	4h	1961	19,5	10,8	10,3	9,1	8,9	8,3	7,8
	12h	1961	25,1	11,9	12,4	12,1	11,7	11,3	11,2
30 Stationen	1d	1950	33,8	4,4	0,3	-2,1	-3,6	-5,4	-7,0
	3d	1950	46,4	5,3	1,1	-0,9	-2,5	-4,5	-6,0
Westfälische Bucht									
35 Stationen	5min	1950	6,4	-0,2	-1,5	-1,3	-1,2	-1,7	-1,5
	15min	1950	9,3	0,4	-2,7	-2,9	-3,6	-4,4	-5,4
35 Stationen	60min	1950	14,8	-0,3	-2,6	-4,4	-4,6	-5,8	-6,7
	2h	1950	17,8	0,9	-1,1	-2,8	-3,6	-4,8	-5,7
	4h	1950	21,1	4,0	0,0	-1,3	-2,3	-3,6	-4,8
	12h	1950	27,6	7,8	4,0	1,8	0,7	-0,9	-2,3
	1d	1950	33,0	9,7	5,8	3,5	2,2	0,4	-1,0
	3d	1950	45,6	12,6	9,5	7,6	6,6	4,7	3,6
Westfälisches Tiefeland									
0 Stationen	5min		0,0						
	15min		0,0						
0 Stationen	60min		0,0						
	2h		0,0						
	4h		0,0						
	12h		0,0						
6 Stationen	1d	1950	32,4	1,0	1,1	1,0	0,8	1,1	1,1
	3d	1950	44,5	0,4	1,5	1,7	2,2	2,6	3,0
Weserbergland									
1 Station	5min	1961	6,4	-2,3	14,4	22,5	27,9	36,3	42,8
	15min	1961	9,1	-1,6	-1,3	0,0	0,0	0,9	1,6
1 Station	60min	1961	14,3	-4,2	-9,8	-12,0	-13,4	-15,3	-16,7
	2h	1961	17,7	-4,2	-10,1	-12,8	-14,8	-17,7	-19,9
	4h	1961	21,3	-0,7	-7,4	-11,4	-14,0	-17,2	-19,7
	12h	1961	29,2	3,6	-3,4	-6,7	-8,9	-12,2	-14,8
	1d	1950	34,4	10,2	7,9	6,5	5,9	4,5	3,6
	3d	1950	49,7	11,7	9,2	7,5	6,6	5,2	4,0

12.1 Gleitende Zeitfenster

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1, 0a	2, 0a	3, 3a	5, 0a	10, 0a	20, 0a
Eifel (mit Sieben- gebirge)									
2 Stationen	5min	1961	4,5	8,3	8,5	5,0	6,9	6,1	3,7
	15min	1961	7,0	10,7	6,7	8,7	9,2	7,8	8,9
6 Stationen	60min	1961	13,7	15,3	17,5	19,1	20,2	21,1	22,2
	2h	1961	17,5	12,0	13,2	14,2	15,1	15,6	15,9
	4h	1961	21,7	8,3	9,2	9,1	8,8	9,4	9,1
	12h	1961	30,3	4,0	3,8	3,0	2,8	2,5	2,2
26 Stationen	1d	1950	40,4	0,7	1,9	2,5	2,9	3,4	3,8
	3d	1950	57,0	5,5	7,3	8,4	9,0	10,0	10,9
Bergisches Land									
2 Stationen	5min	1950	5,0	33,6	32,2	34,3	33,7	35,4	35,5
	15min	1950	8,5	15,0	22,4	26,6	28,2	30,7	32,9
2 Stationen	60min	1950	16,3	-3,2	7,0	12,4	15,5	20,5	24,1
	2h	1950	19,0	0,8	5,0	6,5	8,5	10,0	11,5
	4h	1950	22,1	4,7	4,1	3,9	3,5	3,3	2,6
	12h	1950	28,6	10,8	4,4	1,6	-0,5	-3,0	-5,2
40 Stationen	1d	1950	41,5	16,1	15,7	15,7	15,5	15,6	15,3
	3d	1950	63,0	16,8	18,5	19,5	20,3	21,3	22,0
Sauer- und Sieger- land									
1 Station	5min	1961	4,6	68,4	92,7	99,9	108,0	117,2	124,4
	15min	1961	7,1	48,6	45,6	44,8	47,0	45,3	45,3
1 Station	60min	1961	12,5	24,0	16,0	13,0	11,1	8,2	6,7
	2h	1961	16,6	11,7	5,8	1,9	0,6	-3,0	-4,8
	4h	1961	21,8	6,9	1,7	-2,0	-4,1	-6,7	-8,8
	12h	1961	32,6	12,0	6,1	3,4	1,2	-1,4	-3,7
63 Stationen	1d	1950	40,3	8,7	3,6	0,5	-1,5	-4,2	-6,2
	3d	1950	61,4	13,2	13,4	13,4	13,4	13,5	13,6

Tabelle 12.2: Gleitende Zeitfenster: Dauerstufen mit den höchsten Steigerungen der Regenhöhen [%] aus allen Dauerstufen

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1, 0a	2, 0a	3, 3a	5, 0a	10, 0a	20, 0a
Gesamt-NRW 321 Stationen	3d	1950	52,8	10,7	9,9	9,3	9,2	8,8	8,5
Niederrheinisches Tiefland 5 Stationen	5min	1950	5,8	11,6	13,3	11,8	12,2	12,0	13,3
Niederrheinische Bucht 3 Stationen	5min	1961	5,3	27,2	30,0	28,4	27,8	27,4	27,1
Westfälische Bucht 74 Stationen	3d	1950	45,6	12,6	9,5	7,6	6,6	4,7	3,6
Westfälisches Tiefland 6 Stationen	3d	1950	44,5	0,4	1,5	1,7	2,2	2,6	3,0
Weserbergland 1 Station	5min	1961	6,4	-2,3	14,4	22,5	27,9	36,3	42,8
Eifel (mit Sieben- gebirge) 6 Stationen	60min	1961	13,7	15,3	17,5	19,1	20,2	21,1	22,2
Bergisches Land 2 Stationen	5min	1950	5,0	33,6	32,2	34,3	33,7	35,4	35,5
Sauer- und Sieger- land 1 Station	5min	1961	4,6	68,4	92,7	99,9	108,0	117,2	124,4

Tabelle 12.3: Gleitende Zeitfenster: Dauerstufen $> 60min$ mit den stärksten Steigerungen der Regenhöhen [%]

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1, 0a	2, 0a	3, 3a	5, 0a	10, 0a	20, 0a
Gesamt-NRW 321 Stationen	3d	1950	52,8	10,7	9,9	9,3	9,2	8,8	8,5
Niederrheinisches Tiefland 36 Stationen	3d	1950	44,8	8,3	6,9	6,1	5,7	4,9	4,3
Niederrheinische Bucht 4 Stationen	12h	1961	25,1	11,9	12,4	12,1	11,7	11,3	11,2
Westfälische Bucht 74 Stationen	3d	1950	45,6	12,6	9,5	7,6	6,6	4,7	3,6
Westfälisches Tiefland 6 Stationen	3d	1950	44,5	0,4	1,5	1,7	2,2	2,6	3,0
Weserbergland 38 Stationen	3d	1950	49,7	11,7	9,2	7,5	6,6	5,2	4,0
Eifel (mit Sieben- gebirge) 26 Stationen	3d	1950	57,0	5,5	7,3	8,4	9,0	10,0	10,9
Bergisches Land 40 Stationen	3d	1950	63,0	16,8	18,5	19,5	20,3	21,3	22,0
Sauer- und Sieger- land 63 Stationen	3d	1950	61,4	13,2	13,4	13,4	13,4	13,5	13,6

Tabelle 12.4: Gleitende Zeitfenster: Dauerstufen mit den stärksten Abnahmen der Regenhöhen [%] aus allen Dauerstufen

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1, 0a	2, 0a	3, 3a	5, 0a	10, 0a	20, 0a
Gesamt-NRW 54 Stationen	15min	1950	9,2	0,9	-2,0	-2,9	-2,9	-4,0	-4,5
Niederrheinisches Tiefland	In keiner Dauerstufe Abnahme der Regenhöhen								
Niederrheinische Bucht 30 Stationen	1d	1950	33,8	4,4	0,3	-2,1	-3,6	-5,4	-7,0
Westfälische Bucht 35 Stationen	60min	1950	14,8	-0,3	-2,6	-4,4	-4,6	-5,8	-6,7
Westfälisches Tiefland	In keiner Dauerstufe Abnahme der Regenhöhen								
Weserbergland 1 Station	2h	1961	17,7	-4,2	-10,1	-12,8	-14,8	-17,7	-19,9
Eifel (mit Sieben- gebirge)	In keiner Dauerstufe Abnahme der Regenhöhen								
Bergisches Land 2 Stationen	12h	1950	28,6	10,8	4,4	1,6	-0,5	-3,0	-5,2
Sauer- und Sieger- land 1 Station	4h	1961	21,8	6,9	1,7	-2,0	-4,1	-6,7	-8,8

Entwicklung der Regenhöhen im Bezugszeitraum: 1950 - 2008

Gleitende Zeitfenster

Mittlere Regenhöhen: 15min, T=1.0a

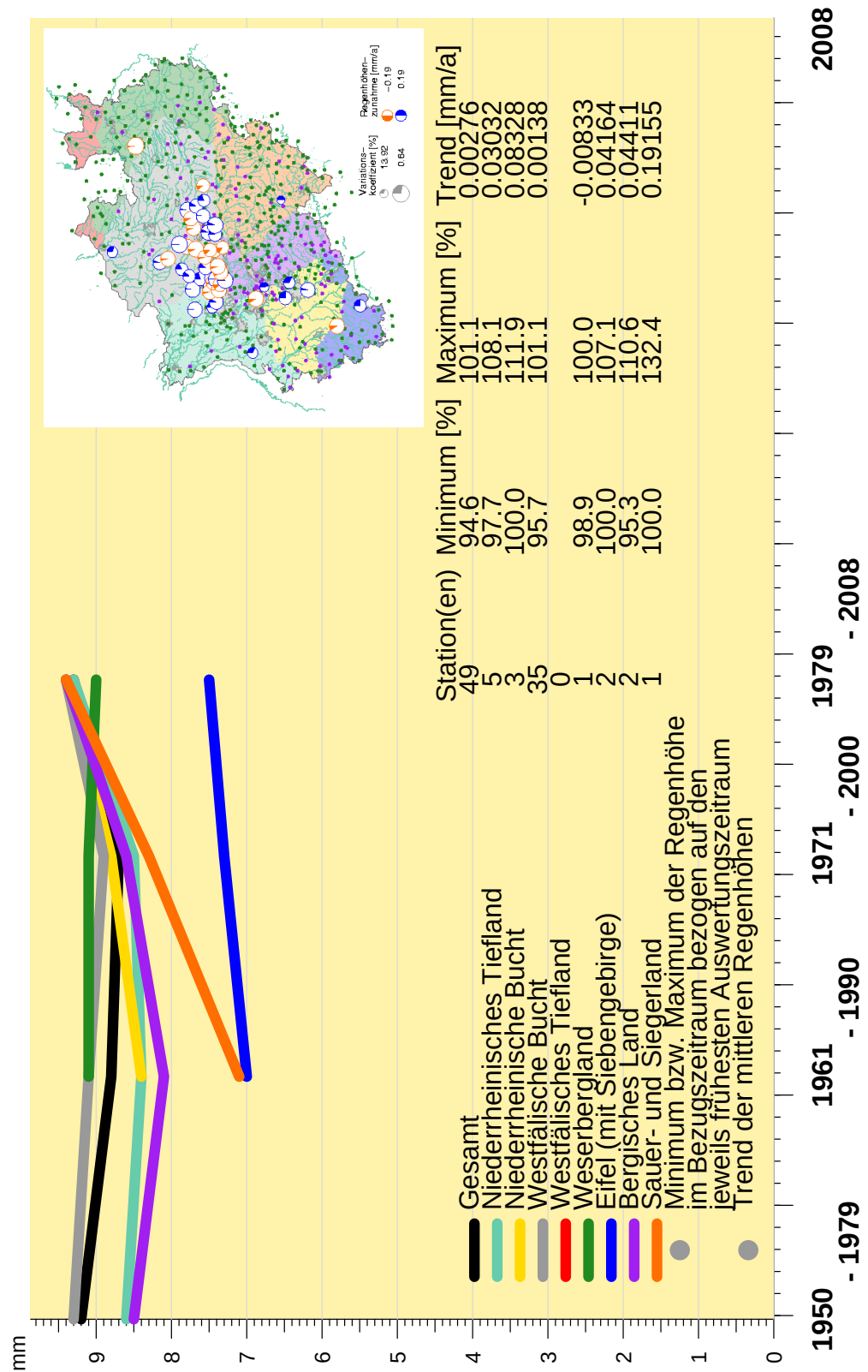


Abbildung 12.1: Entwicklung der Regenhöhen: D=15 Minuten, T=1 Jahr (Gleitende Zeitfenster)

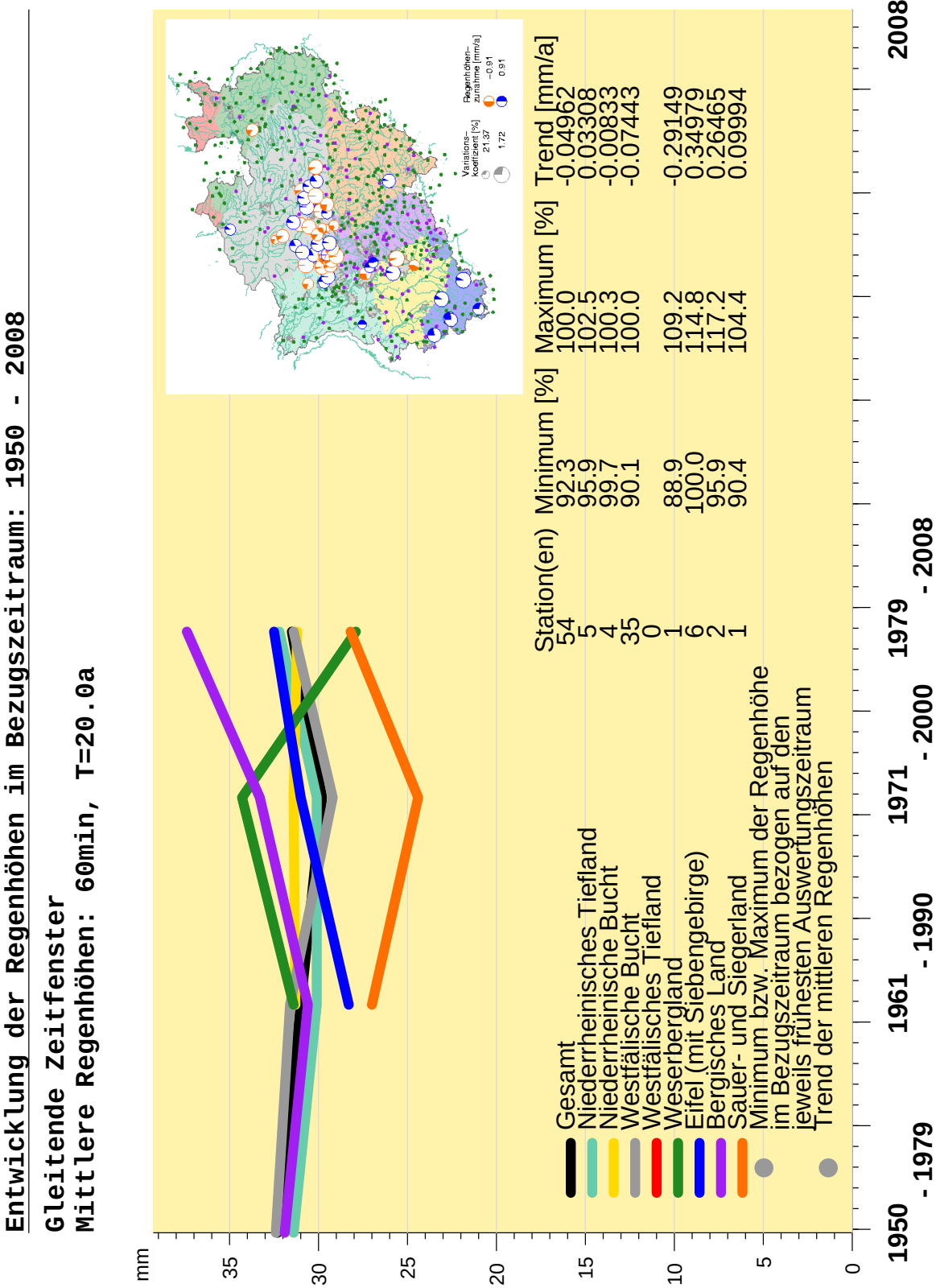


Abbildung 12.2: Entwicklung der Regenhöhen: D=60 Minuten, T=20 Jahre (Gleitende Zeitfenster)

Entwicklung der Regenhöhen im Bezugszeitraum: 1950 - 2008

Gleitende Zeitfenster

Mittlere Regenhöhen: 12h, T=20.0a

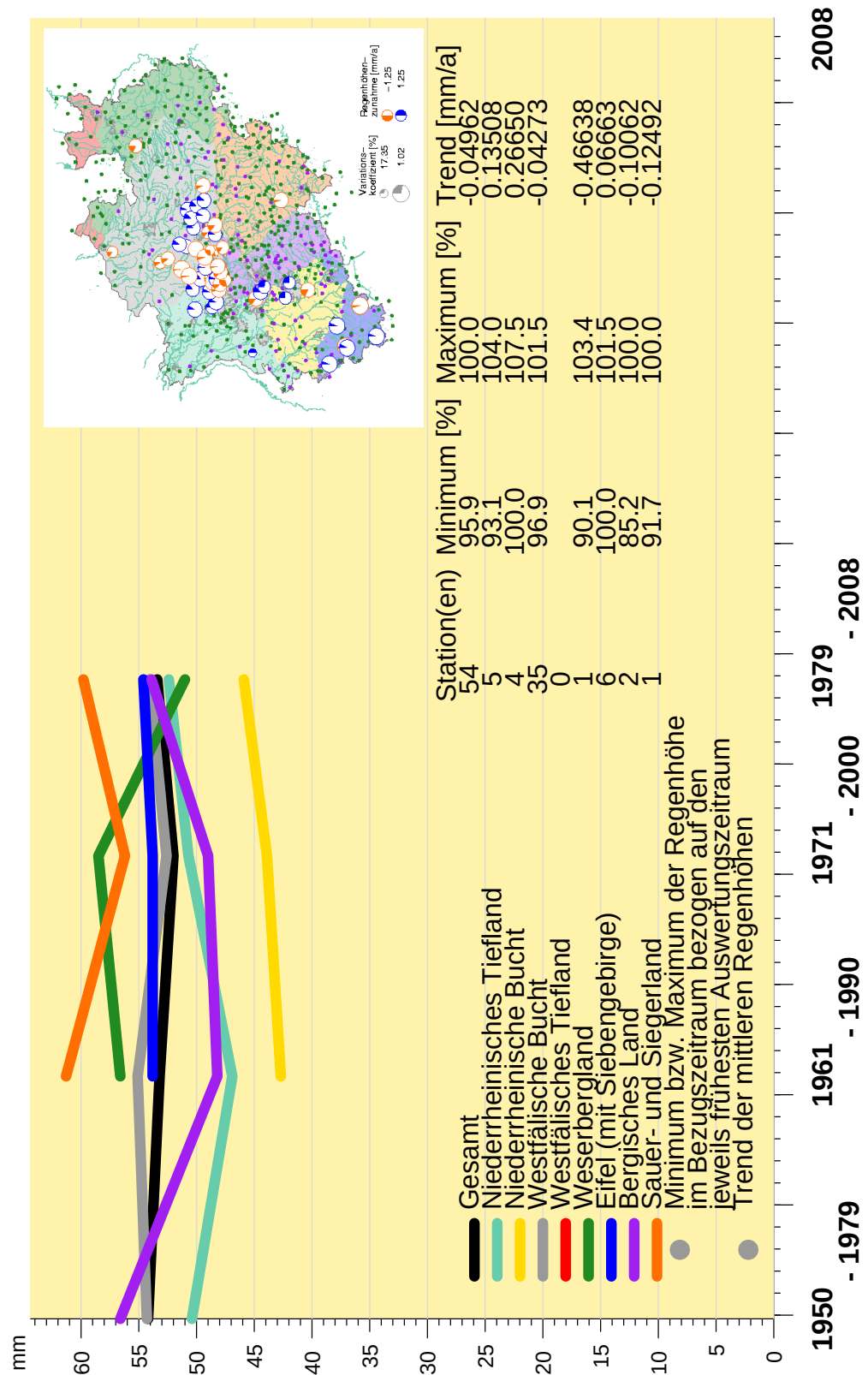


Abbildung 12.3: Entwicklung der Regenhöhen: D=12 Stunden, T=20 Jahre (Gleitende Zeitfenster)

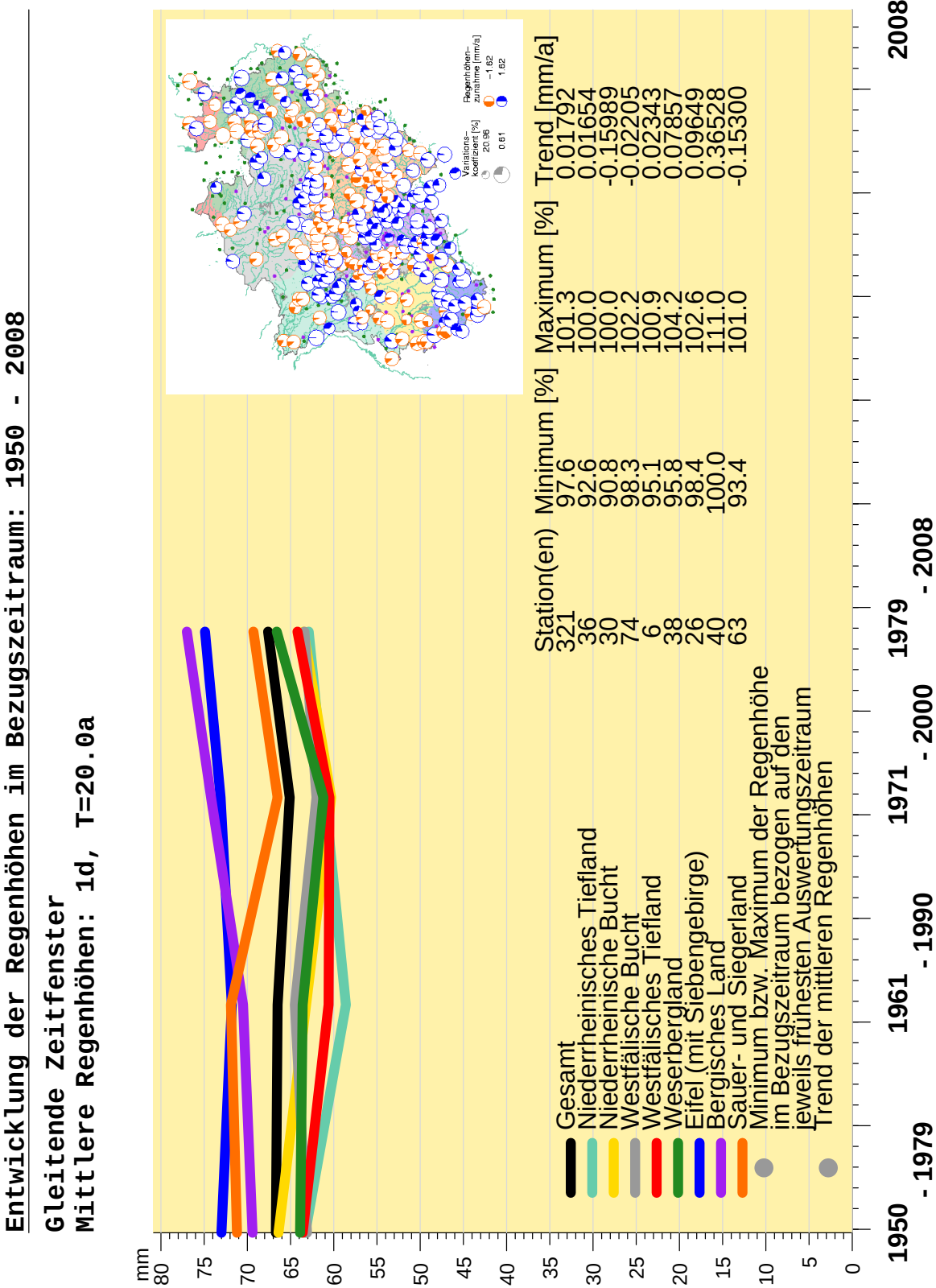


Abbildung 12.4: Entwicklung der Regenhöhen: D=1 Tag, T=20 Jahre (Gleitende Zeitfenster)

Entwicklung der Regenhöhen im Bezugszeitraum: 1950 - 2008

Gleitende Zeitfenster

Mittlere Regenhöhen: 3d, T=1.0a

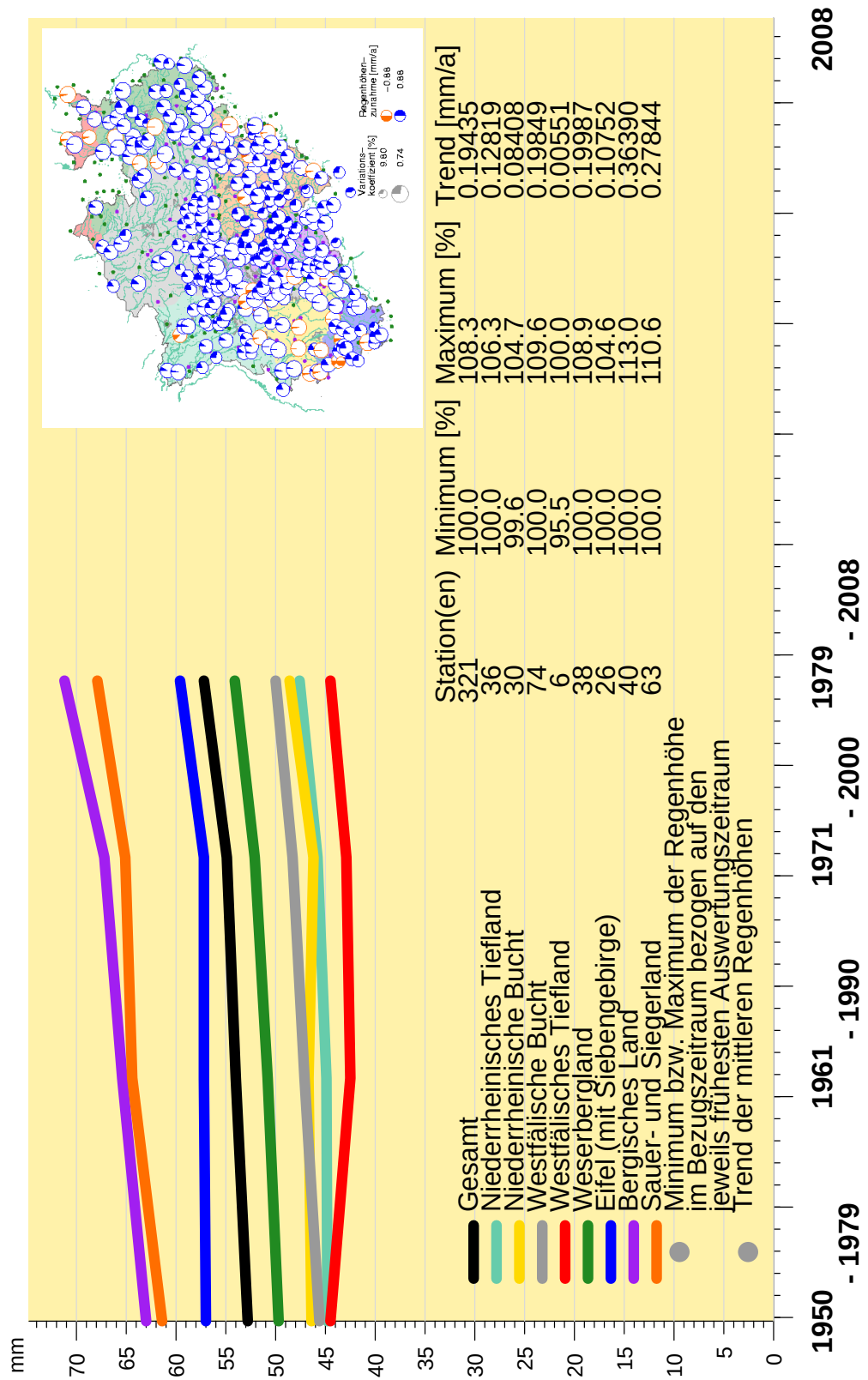


Abbildung 12.5: Entwicklung der Regenhöhen: D=3 Tage, T=1 Jahr (Gleitende Zeitfenster)

12.2 Wachsende Zeitfenster

Für die zusammengefassten Gebiete steht bei den wachsenden Zeitfenstern für die Dauerstufen eine unterschiedliche Anzahl von Stationen zur Verfügung. Je nach Dauerstufen variieren die Zahlen leicht.

Gesamtgebiet bzw. Großlandschaft	Anzahl Stationen in den Dauerstufen		
	$D = 5min,$ $15min$	$D = 60min,$ $2h, 4h \text{ und } 12h$	$D = 1d$ $\text{und } 3d$
Gesamt-NRW	75	82	225
Niederrheinisches Tiefland	11	12	32
Niederrheinische Bucht	7	10	26
Westfälische Bucht	39	40	57
Westfälisches Tiefland	1	1	5
Weserbergland	2	3	27
Eifel (mit Siebengebirge)	4	4	19
Bergisches Land	6	6	25
Sauer- und Siegerland	5	6	34

Die Anzahl der Stationen, die in einem Gebiet gemittelt werden, hat starken Einfluss auf die Aussagekraft der Entwicklung. Somit gibt es für Dauerstufen $< 1d$ keine aussagestarken Ergebnisse für das Westfälisches Tiefland und das Weserbergland.

Stellvertretend für die Auswertetechnik und die Fälle mit den stärksten Änderungen werden in diesem Kapitel dargestellt:

- Entwicklung der Regenhöhen: $D=5$ Minuten, $T=1$ Jahr (Wachsende Zeitfenster) ($\hookrightarrow$ Abb. 12.6)
- Entwicklung der Regenhöhen: $D=60$ Minuten, $T=1$ Jahr (Wachsende Zeitfenster) ($\hookrightarrow$ Abb. 12.7)
- Entwicklung der Regenhöhen: $D=2$ Stunden, $T=1$ Jahr (Wachsende Zeitfenster) ($\hookrightarrow$ Abb. 12.8)
- Entwicklung der Regenhöhen: $D=1$ Tag, $T=1$ Jahr (Wachsende Zeitfenster) ($\hookrightarrow$ Abb. 12.9)
- Entwicklung der Regenhöhen: $D=3$ Tage, $T=1$ Jahr (Wachsende Zeitfenster) ($\hookrightarrow$ Abb. 12.10)

Die Dokumentation der vollständigen Untersuchung für alle Dauerstufen und Jährlichkeiten findet sich im Anhang ($\hookrightarrow$ Kap. G.2, Abb. G.69 bis G.116).

Zur Beurteilung der Entwicklung in den Großlandschaften wurden für die wachsenden Zeitfenster in der Tabelle 12.5 je Großlandschaft bzw. Gesamt-NRW die Ergebnisse für

die Änderung der Regenhöhe [%] im Bezugszeitraum 1979-2008 für alle betrachteten Dauerstufen und Jährlichkeiten zusammengetragen. Die Änderungen wurden aus den Trends berechnet, die sich in den Zeitreihen mit den Regenhöhen der drei Zeitfenster darstellen. Bezogen wurden die Änderungen auf die Regenhöhen des ersten Zeitfensters 1979-2008. Als Zeitspanne in denen sich die Änderungen ergaben, wurden die 10 Jahre angesetzt, die zwischen dem Zeitfenster 1979-2008 und 1989-2008 liegen. Die Angabe der Anzahl gemittelter Stationen dient zur Einschätzung des Gewichtes der Aussage.

Für jede Großlandschaft wurde die Dauerstufe mit dem größten Zuwachs blau hinterlegt. Findet die stärkste Zunahme in einer Dauerstufe ≤ 60 Minuten statt, wurde zusätzlich die Dauerstufe >60 Minuten mit der größten Zunahme blau gekennzeichnet. Dauerstufen mit der stärksten Abnahme wurden orange eingefärbt. Großlandschaften, bei denen in keiner Dauerstufe und Jährlichkeit eine Abnahme der Regenhöhe festzustellen war, bleiben ohne entsprechende Markierung.

Aus dieser Tabelle 12.5 wurden je Großlandschaft die Dauerstufen mit den stärksten Veränderungen herausgezogen und in eigenen Tabellen zusammengestellt, um die Änderungen nach Dauerstufe und Gebiet aussagestärker abschätzen zu können.

- Tabelle 12.6: Dauerstufen mit den höchsten Steigerungen der Regenhöhen [%] aus allen Dauerstufen
- Tabelle 12.7: Dauerstufen >60 Minuten mit den höchsten Steigerungen der Regenhöhen [%]
- Tabelle 12.8: Dauerstufen mit den stärksten Abnahmen der Regenhöhen [%] aus allen Dauerstufen

Die Dauerstufen ≤ 60 Minuten wurden hier gesondert betrachtet, weil bei ihnen eine starker Einfluss der geänderten Messtechnik erwartet wird und dieser schwer quantifiziert werden kann.

In der Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse aus den **wachsenden Zeitfenstern** wird die Entwicklung der Regenhöhen in den 10 Jahren, die zwischen dem Zeitfenster 1979-2008 und 1989-2008 liegen, wie folgt beurteilt. Wie in diesem Kapitel einleitend beschrieben, dient die Methode der **wachsenden Zeitfenster** einer größeren Differenzierung in der Fläche NRWs. Der berechnete Trend gibt Auskunft über die letzten 30 Jahre. Darüber hinaus liefert er keine belastbaren Aussagen, die die Ergebnisse der gleitenden Zeitfenster in Frage stellen.

Allerdings verstärkt ein Widerspruch in den Ergebnissen dieser zwei Methoden von Zeitfenstern den Bedarf, die Niederschlagsmessungen im bestehenden Umfang fortzusetzen und keinesfalls zurückzufahren.

- Die größten **Zunahmen der statistischen Regenhöhen** treten in den kürzeren Dauerstufen auf ($\leftrightarrow$ Tab. 12.6, Tab. 12.7).
- Bezieht man die Dauerstufen ≤ 60 Minuten mit ein, stellt sich die stärkste Zunahme in der Dauerstufe 5min dar. Für die 1-jährliche Regenhöhe beträgt sie zwischen 7 und 12 %. Einzige Ausnahme ist die Westfälische Bucht, bei der sich die maximale Steigerung mit 3 % in der 60-Minuten-Dauerstufe findet.
- Konzentriert man sich auf die Dauerstufen > 60 Minuten, steigt die Regenhöhe am stärksten in der 2-Stunden-Dauerstufe. Ausnahmen bilden das Westfälische Tiefland und das Bergische Land mit einem Maximum in die Dauerstufe 1 Tag.
- Die Zunahmen bewegen sich zwischen 1,5 und 8 % für die 1-jährliche Regenhöhe. Mit höheren Jährlichkeit nehmen die Zuwachsraten ab oder bleiben nahezu konstant. Ausnahmen bilden die Niederrheinische Bucht, die Eifel und das Bergische Land mit geringfügig steigenden Zuwachsraten.
- Auf der Suche nach den stärksten **Abnahmen der Regenhöhen** war auch hier die gesonderte Betrachtung der Dauerstufen ≤ 60 Minuten nicht erforderlich.
- Die stärksten Abnahmen stellen sich in der Dauerstufe 3 Tage dar ($\leftrightarrow$ Tab. 12.8). Für die 1-jährliche Regenhöhe beträgt sie zwischen -1 und -5 %. Ausnahmen bilden bei gleichen Abnahmeraten die Westfälische Bucht (1 Tag), das Westfälische Tiefland (60 Minuten) und das Bergische Land (12 Stunden).
- Die Abnahmen nehmen für Gesamt-NRW in höheren Jährlichkeiten von -1 auf -2 % für die 20-jährliche 3-Tages-Regenhöhe leicht zu.
- Für das Niederrheinische Tiefland (3 Tage), die Niederrheinische Bucht (3 Tage) und das Bergische Land (12 Stunden) kehrt sich die Abnahme bei niedrigen Jährlichkeiten in eine Zunahme in höheren Jährlichkeiten um.
- Für die Westfälische Bucht (1 Tag), das Westfälische Tiefland (60 Minuten) und das Weserbergland (3 Tage) verstärkt sich die Abnahme mit höheren Jährlichkeiten.
- In der Eifel (3 Tage) und im Sauer- und Siegerland (3 Tage) bleibt die Abnahme mit -5 % und -0,3 % von der Jährlichkeit unabhängig konstant.

Tabelle 12.5: Wachsende Zeitfenster: Änderung der Regenhöhen [%] zwischen 1979-2008 und 1989-2008, berechnet aus Trend je Großlandschaft für alle Dauerstufen und Jährlichkeiten

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1,0a	2,0a	3,3a	5,0a	10,0a	20,0a
Gesamt-NRW									
75 Stationen	5min	1979	6,3	7,1	5,8	6,8	4,6	5,4	4,8
82 Stationen	15min	1979	9,3	4,8	3,8	3,3	2,9	3,4	2,9
	60min	1979	15,1	4,0	3,1	3,4	3,1	3,2	2,8
	2h	1979	18,3	3,3	2,6	2,3	2,1	1,8	1,2
225 Stationen	4h	1979	22,1	2,0	1,1	1,0	0,9	0,4	0,0
	12h	1979	29,7	0,5	-0,4	-0,8	-1,4	-1,8	-2,2
	1d	1979	38,3	0,0	-0,3	-0,6	-0,8	-1,0	-1,3
	3d	1979	55,5	-1,1	-1,4	-1,5	-1,6	-1,6	-1,8
Niederrheinisches Tiefland									
11 Stationen	5min	1979	6,0	7,5	10,6	11,2	12,2	12,2	13,8
12 Stationen	15min	1979	8,9	6,7	6,6	6,9	8,3	8,9	8,5
	60min	1979	14,6	5,1	5,6	4,9	5,6	5,9	5,6
	2h	1979	17,7	4,2	4,1	3,5	4,3	3,7	4,0
32 Stationen	4h	1979	21,1	2,8	2,3	2,5	1,9	2,0	1,8
	12h	1979	27,8	1,1	0,9	0,4	0,4	0,3	0,0
	1d	1979	33,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	0,2
	3d	1979	47,2	-1,6	-0,8	-0,5	-0,2	0,4	0,6
Niederrheinische Bucht									
7 Stationen	5min	1979	6,1	9,8	8,0	10,7	11,4	11,3	11,2
10 Stationen	15min	1979	9,1	8,2	7,8	7,9	8,2	7,0	7,6
	60min	1979	15,0	9,0	8,0	8,3	7,5	7,6	7,6
	2h	1979	18,0	7,5	8,1	7,6	8,0	8,4	8,6
26 Stationen	4h	1979	21,2	5,7	6,4	6,7	7,1	7,5	7,8
	12h	1979	27,5	3,8	4,2	5,0	5,4	5,8	6,5
	1d	1979	34,5	0,4	1,8	2,7	3,1	3,8	4,2
	3d	1979	47,9	-1,3	-0,3	0,0	0,0	0,4	0,6

12 Entwicklung der statistischen Regenhöhen

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1,0a	2,0a	3,3a	5,0a	10,0a	20,0a
Westfälische Bucht									
39 Stationen	5min	1979	6,5	2,3	3,8	1,6	1,5	1,3	1,2
	15min	1979	9,3	3,2	2,5	2,2	1,0	1,7	0,7
40 Stationen	60min	1979	14,9	3,0	2,4	2,1	2,5	2,2	1,9
	2h	1979	18,2	1,6	0,7	0,6	0,0	-0,5	-0,8
	4h	1979	21,9	0,7	0,0	-1,0	-1,8	-2,4	-2,8
	12h	1979	29,5	-0,5	-2,5	-3,4	-4,2	-5,2	-6,0
57 Stationen	1d	1979	35,9	-1,3	-3,2	-4,4	-5,3	-6,5	-7,2
	3d	1979	50,2	-1,2	-2,1	-2,8	-3,3	-3,7	-4,3
Westfälisches Tiefeland									
1 Station	5min	1979	6,4	11,7	22,5	27,7	29,4	34,3	36,6
	15min	1979	9,5	4,7	4,9	5,3	6,7	6,5	7,1
1 Station	60min	1979	15,6	-3,8	-6,1	-8,0	-9,0	-10,3	-11,4
	2h	1979	18,2	-2,5	-5,3	-7,5	-8,4	-9,5	-10,7
	4h	1979	21,3	-1,4	-4,6	-6,5	-7,3	-9,1	-10,1
	12h	1979	27,5	0,0	-3,6	-5,9	-6,8	-8,8	-10,3
	1d	1979	32,8	4,1	1,5	0,0	-1,2	-2,3	-3,2
	3d	1979	44,7	2,3	-1,4	-3,5	-5,0	-6,6	-8,2
Weserbergland									
2 Stationen	5min	1979	7,0	10,7	14,4	11,2	14,8	14,3	13,9
3 Stationen	15min	1979	10,2	10,3	9,1	8,7	7,8	6,6	6,4
	60min	1979	15,6	8,6	5,9	5,7	4,6	4,4	3,4
	2h	1979	19,0	7,9	6,8	6,4	5,8	4,9	5,0
	4h	1979	23,2	7,1	6,7	6,3	6,1	6,0	5,8
	12h	1979	31,7	5,7	5,9	5,5	5,4	5,5	5,4
27 Stationen	1d	1979	37,6	2,4	1,7	1,2	1,1	0,5	0,2
	3d	1979	54,2	0,3	-1,0	-1,7	-2,2	-3,1	-3,6
Eifel (mit Sieben- gebirge)									
4 Stationen	5min	1979	5,3	11,3	11,7	10,4	11,5	11,9	10,6
4 Stationen	15min	1979	8,8	8,5	7,9	6,8	7,1	6,0	6,0
	60min	1979	16,1	4,7	5,1	4,4	3,9	4,3	4,2
	2h	1979	19,6	1,5	1,8	2,1	1,9	2,5	2,5
	4h	1979	23,4	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,3
	12h	1979	31,3	-2,4	-2,8	-2,5	-2,6	-2,3	-2,3
19 Stationen	1d	1979	41,5	-4,0	-4,5	-4,6	-4,5	-4,8	-4,9
	3d	1979	60,4	-5,0	-5,2	-5,1	-5,1	-5,1	-5,1

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1,0a	2,0a	3,3a	5,0a	10,0a	20,0a
Bergisches Land									
6 Stationen	5min	1979	6,5	9,2	7,7	6,8	7,8	6,9	7,4
6 Stationen	15min	1979	9,8	4,6	2,3	2,0	1,8	0,8	0,0
	60min	1979	16,6	1,8	0,7	0,6	0,5	0,0	-0,4
	2h	1979	20,3	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,3
	4h	1979	24,3	-0,6	-0,5	0,0	0,0	0,0	0,3
	12h	1979	32,4	-1,4	-0,4	0,3	0,6	1,4	1,7
25 Stationen	1d	1979	45,4	1,0	2,0	2,6	3,2	3,5	4,1
	3d	1979	68,1	-1,1	-0,2	0,3	0,7	1,2	1,7
Sauer- und Sieger- land									
5 Stationen	5min	1979	6,5	6,9	6,9	7,3	7,8	6,6	6,6
6 Stationen	15min	1979	9,3	6,4	6,1	4,2	3,7	3,1	2,7
	60min	1979	14,7	5,1	4,0	2,8	2,5	2,7	2,4
	2h	1979	18,4	4,1	3,3	2,9	2,1	1,8	1,6
34 Stationen	4h	1979	23,3	3,2	2,1	2,3	1,3	0,8	0,7
	12h	1979	34,2	2,6	1,1	0,3	0,3	-0,3	-0,8
	1d	1979	44,2	1,7	1,2	0,8	0,8	0,2	0,2
	3d	1979	68,8	-0,2	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4

Tabelle 12.6: Wachsende Zeitfenster: Dauerstufen mit den höchsten Steigerungen der Regenhöhen [%] aus allen Dauerstufen

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1,0a	2,0a	3,3a	5,0a	10,0a	20,0a
Gesamt-NRW 75 Stationen	5min	1979	6,3	7,1	5,8	6,8	4,6	5,4	4,8
Niederrheinisches Tiefland 11 Stationen	5min	1979	6,0	7,5	10,6	11,2	12,2	12,2	13,8
Niederrheinische Bucht 7 Stationen	5min	1979	6,1	9,8	8,0	10,7	11,4	11,3	11,2
Westfälische Bucht 40 Stationen	60min	1979	14,9	3,0	2,4	2,1	2,5	2,2	1,9
Westfälisches Tiefland 1 Station	5min	1979	6,4	11,7	22,5	27,7	29,4	34,3	36,6
Weserbergland 2 Stationen	5min	1979	7,0	10,7	14,4	11,2	14,8	14,3	13,9
Eifel (mit Sieben- gebirge) 4 Stationen	5min	1979	5,3	11,3	11,7	10,4	11,5	11,9	10,6
Bergisches Land 6 Stationen	5min	1979	6,5	9,2	7,7	6,8	7,8	6,9	7,4
Sauer- und Sieger- land 5 Stationen	5min	1979	6,5	6,9	6,9	7,3	7,8	6,6	6,6

Tabelle 12.7: Wachsende Zeitfenster: Dauerstufen $> 60min$ mit den höchsten Steigerungen der Regenhöhen [%]

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1,0a	2,0a	3,3a	5,0a	10,0a	20,0a
Gesamt-NRW 82 Stationen	2h	1979	18,3	3,3	2,6	2,3	2,1	1,8	1,2
Niederrheinisches Tiefland 12 Stationen	2h	1979	17,7	4,2	4,1	3,5	4,3	3,7	4,0
Niederrheinische Bucht 10 Stationen	2h	1979	18,0	7,5	8,1	7,6	8,0	8,4	8,6
Westfälische Bucht 40 Stationen	2h	1979	18,2	1,6	0,7	0,6	0,0	-0,5	-0,8
Westfälisches Tiefland 5 Stationen	1d	1979	32,8	4,1	1,5	0,0	-1,2	-2,3	-3,2
Weserbergland 3 Stationen	2h	1979	19,0	7,9	6,8	6,4	5,8	4,9	5,0
Eifel (mit Sieben- gebirge) 4 Stationen	2h	1979	19,6	1,5	1,8	2,1	1,9	2,5	2,5
Bergisches Land 25 Stationen	1d	1979	45,4	1,0	2,0	2,6	3,2	3,5	4,1
Sauer- und Sieger- land 6 Stationen	2h	1979	18,4	4,1	3,3	2,9	2,1	1,8	1,6

Tabelle 12.8: Wachsende Zeitfenster: Dauerstufen mit den stärksten Abnahmen der Regenhöhen [%] aus allen Dauerstufen

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1, 0a	2, 0a	3, 3a	5, 0a	10, 0a	20, 0a
Gesamt-NRW 225 Stationen	3d	1979	55,5	-1,1	-1,4	-1,5	-1,6	-1,6	-1,8
Niederrheinisches Tiefland 32 Stationen	3d	1979	47,2	-1,6	-0,8	-0,5	-0,2	0,4	0,6
Niederrheinische Bucht 26 Stationen	3d	1979	47,9	-1,3	-0,3	0,0	0,0	0,4	0,6
Westfälische Bucht 57 Stationen	1d	1979	35,9	-1,3	-3,2	-4,4	-5,3	-6,5	-7,2
Westfälisches Tiefland 1 Station	60min	1979	15,6	-3,8	-6,1	-8,0	-9,0	-10,3	-11,4
Weserbergland 27 Stationen	3d	1979	54,2	0,3	-1,0	-1,7	-2,2	-3,1	-3,6
Eifel (mit Sieben- gebirge) 19 Stationen	3d	1979	60,4	-5,0	-5,2	-5,1	-5,1	-5,1	-5,1
Bergisches Land 6 Stationen	12h	1979	32,4	-1,4	-0,4	0,3	0,6	1,4	1,7
Sauer- und Sieger- land 34 Stationen	3d	1979	68,8	-0,2	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4

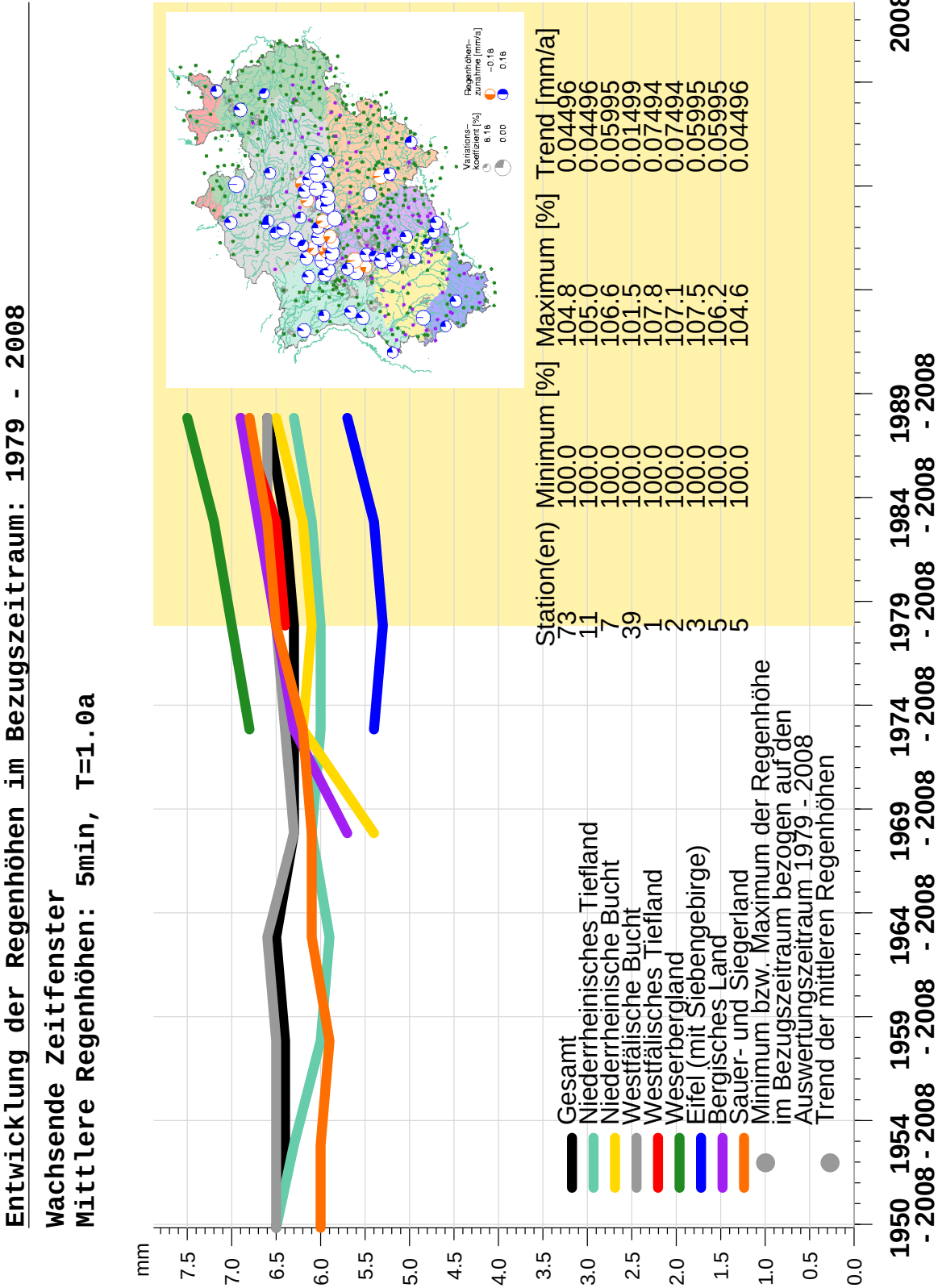


Abbildung 12.6: Entwicklung der Regenhöhen: D=5 Minuten, T=1 Jahr (Wachsende Zeitfenster)

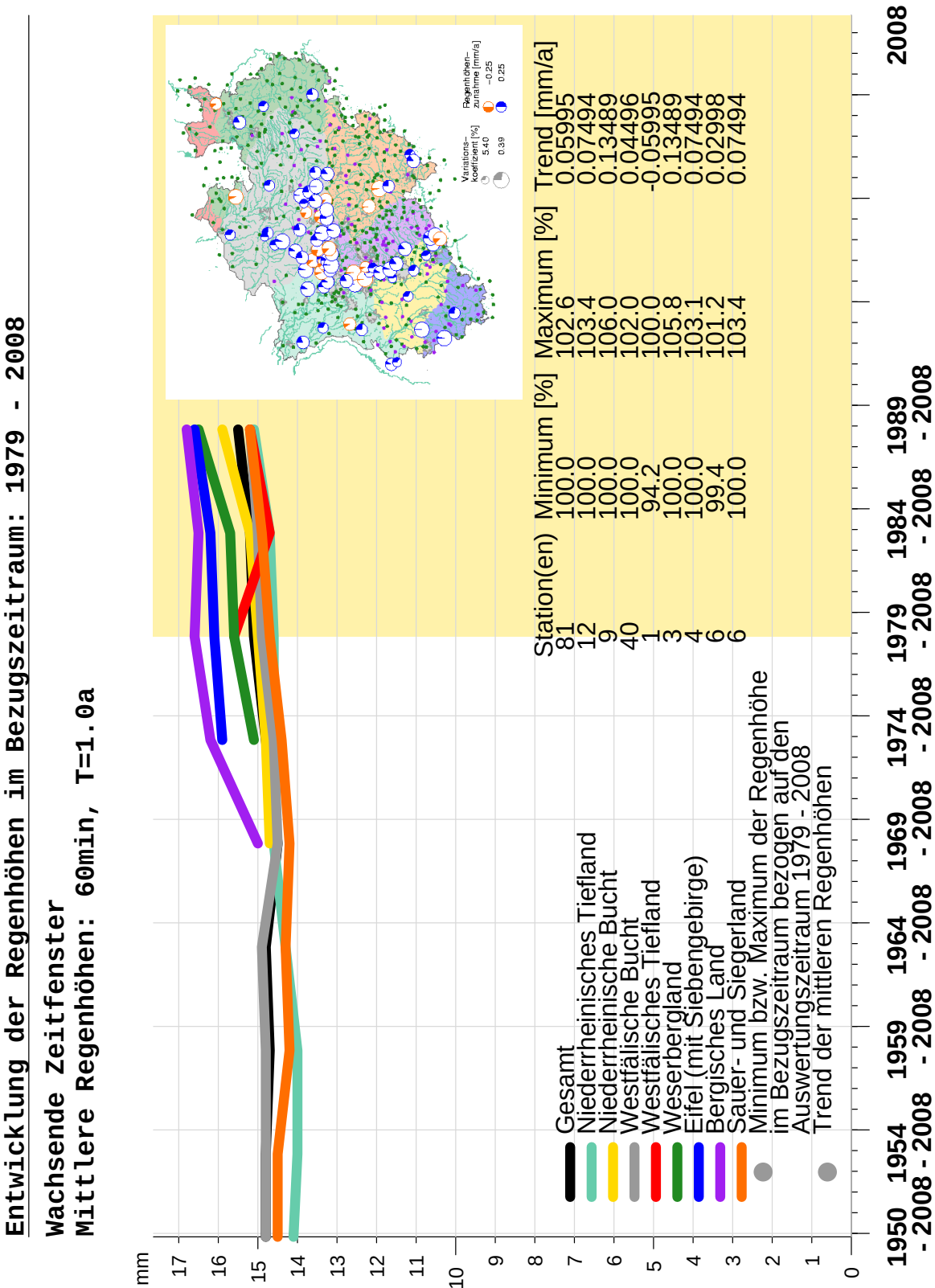


Abbildung 12.7: Entwicklung der Regenhöhen: D=60 Minuten, T=1 Jahr (Wachsende Zeitfenster)

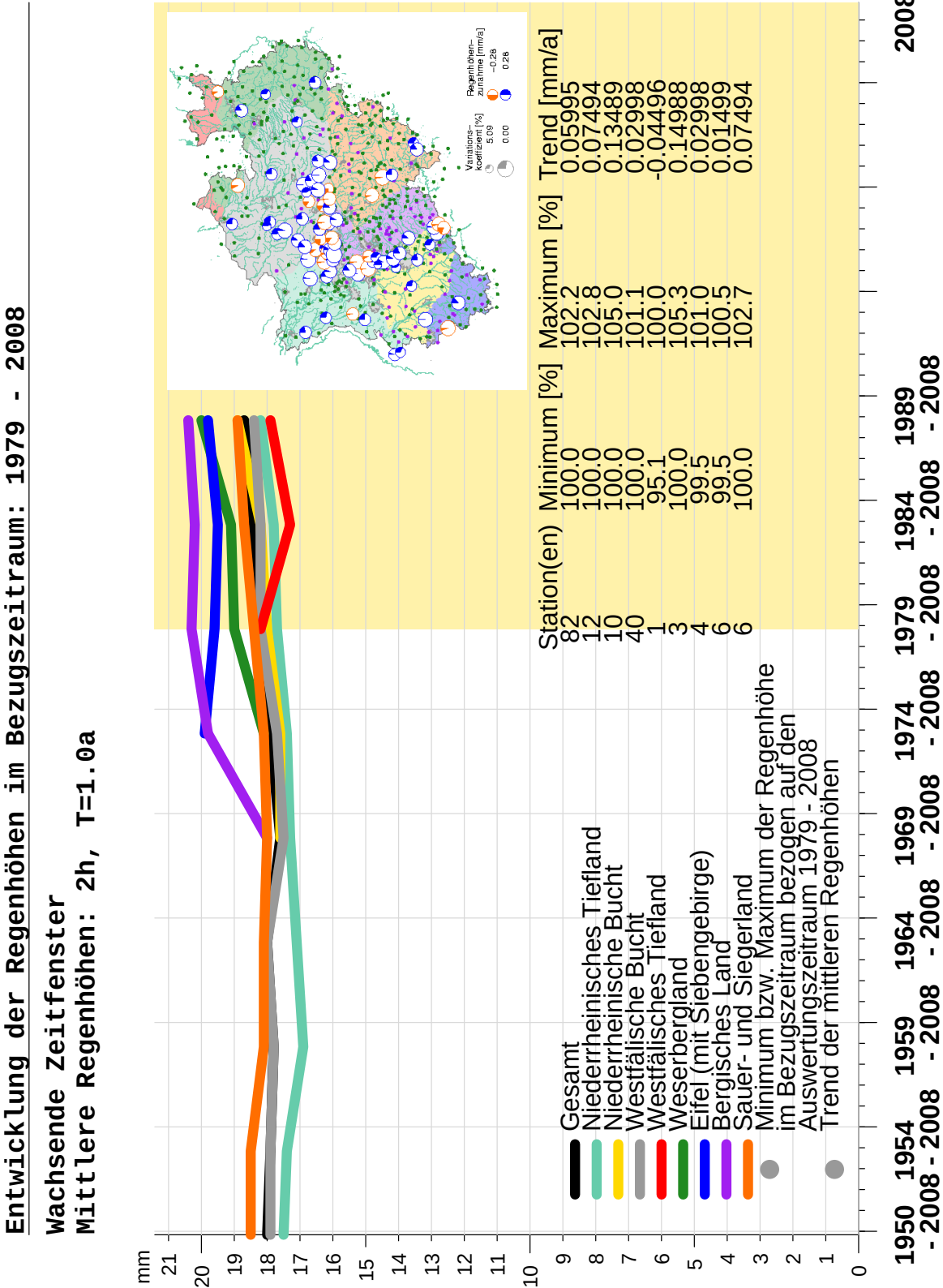


Abbildung 12.8: Entwicklung der Regenhöhen: D=2 Stunden, T=1 Jahr (Wachsende Zeitfenster)

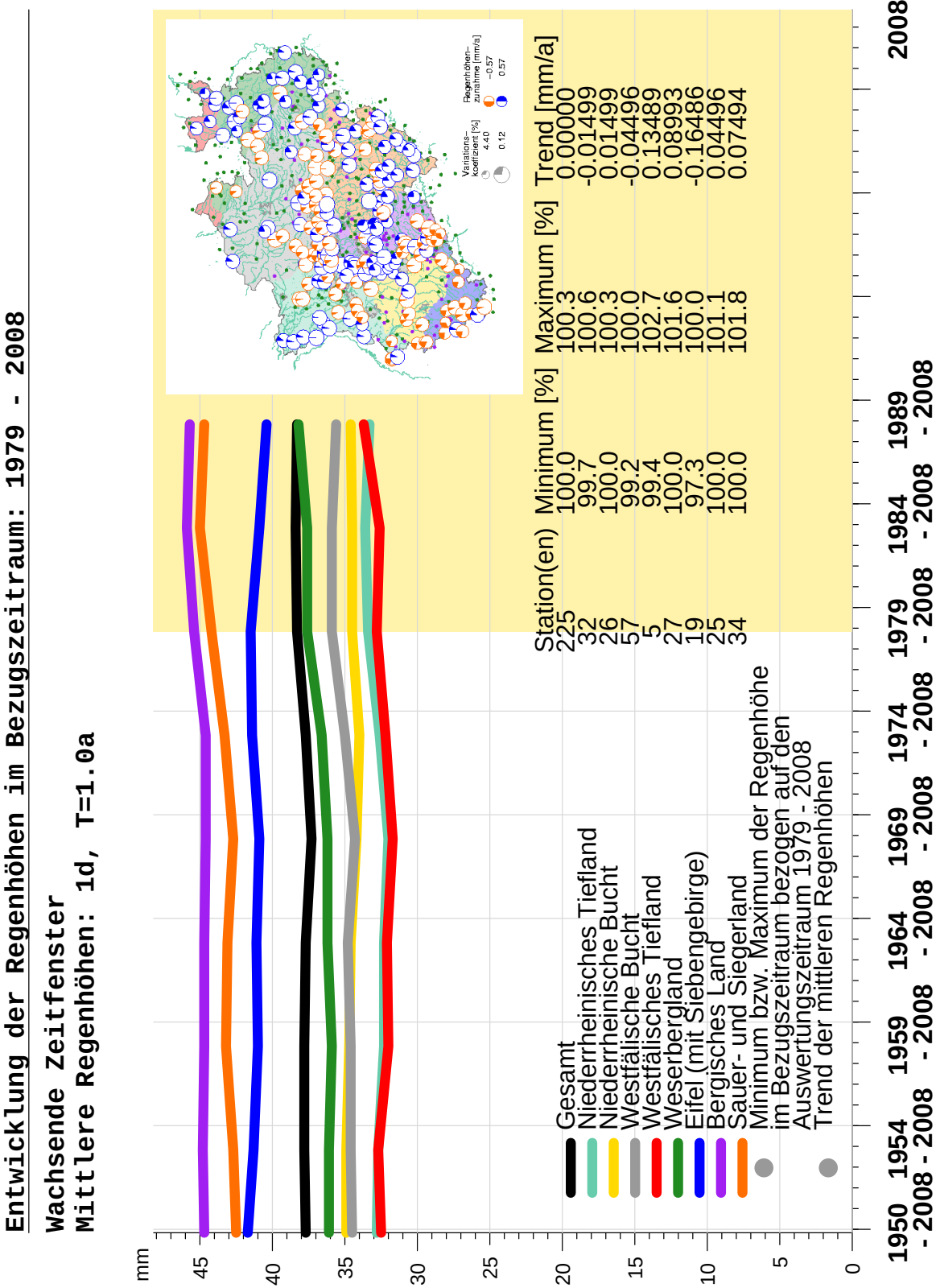


Abbildung 12.9: Entwicklung der Regenhöhen: D=1 Tag, T=1 Jahr (Wachsende Zeitfenster)

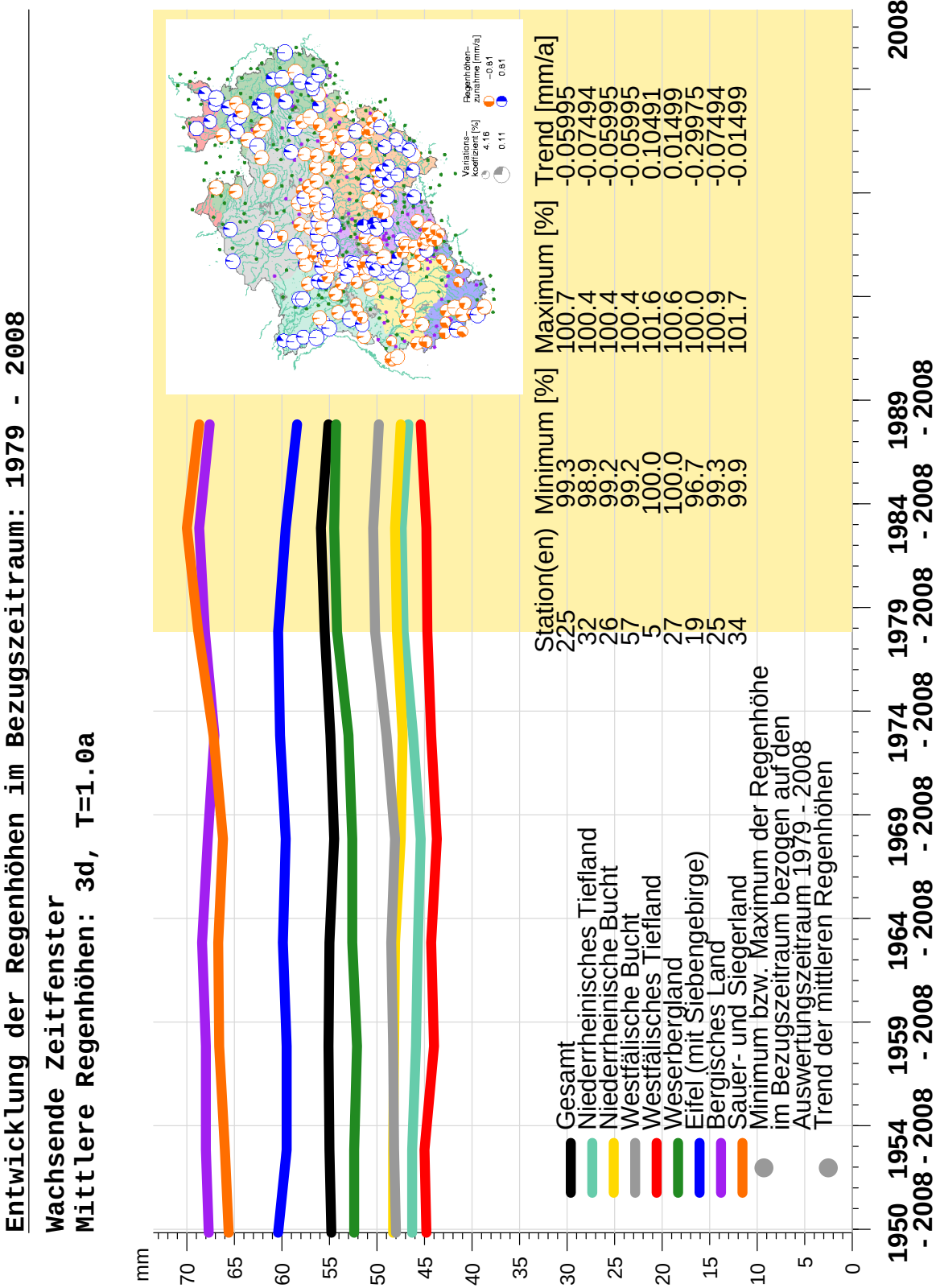


Abbildung 12.10: Entwicklung der Regenhöhen: D=3 Tage, T=1 Jahr (Wachsende Zeitfenster)

12 Entwicklung der statistischen Regenhöhen

Um den Zusammenhang zwischen dem Gesamtzeitraum und den letzten 30 Jahren beschreiben zu können, wird der Trend für die wachsenden Zeitfenster von 1950-2008 bis 1979-2008 analysiert. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Tabelle 12.9 dokumentiert.

Die Unterschiede sind i.d.R. gering. Für Gesamt-NRW überschätzen die Regenhöhen der Dauerstufe 60 Minuten die Werte aus dem Gesamtzeitraum am stärksten, bleiben aber mit einem Betrag bis zu 2 % über alle Jährlichkeiten gering. Einzige Ausnahme stellt die 5-Minuten-Dauerstufe mit ca. 5 % Unterschätzung für alle Jährlichkeiten dar.

Im Niederrheinischen Tiefland werden die Dauerstufen 60min und 2h überschätzt, die übrigen Dauerstufen mit steigender Tendenz in den höheren Jährlichkeiten unterschätzt. Für die Westfälische Bucht werden die kürzeren Dauerstufen und höhere Jährlichkeiten bis zu 2 % unterschätzt. Mit steigender Dauerstufe werden die Regenhöhen überschätzt, bei 3 Tagen mit 4 %, mit zunehmender Jährlichkeit unterschätzt.

Im Sauer- und Siegerland werden die Regenhöhen für 2 und 4 Stunden bis zu 3 % unterschätzt, für kürzere und längere Dauerstufen werden sie überschätzt.

Für die übrigen Großlandschaften kann dieser Zusammenhang für Dauerstufen <1 Tag mangels hinreichend langer Zeitreihen nicht hergestellt werden.

Für Gesamt-NRW bedeutet dies z.B., dass die Regenhöhe

$$h_{N,1950-2008}(T = 1a, D = 60min) = 14,8mm$$

im Zeitfenster 1979-2008 um 1,2% zugenommen hat, also

$$h_{N,1979-2008}(T = 1a, D = 60min) = 14,8mm * 1,012 = 15,0mm.$$

Im Umkehrschluss würden aus einer

$$h_{N,1979-2008}(T = 1a, D = 60min) = 15,1mm$$

in der Projektion auf den Gesamtzeitraum

$$h_{N,1950-2008}(T = 1a, D = 60min) = 15,1mm / 1,012 = 14,9mm.$$

Positive Zahlen in der folgenden Tabelle bedeuten also, dass eine Regenhöhe aus dem Zeitfenster 1979-2008 die Regenhöhe für den Gesamtzeitraum 1950-2008 überschätzt, negative Werte bedeuten eine Unterschätzung.

Tabelle 12.9: Wachsende Zeitfenster: Änderung der Regenhöhen [%] vom Zeitfenster 1950-2008 zu dem von 1979-2008, berechnet aus Trend je Großlandschaft bezogen auf den Gesamtzeitraum

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1,0a	2,0a	3,3a	5,0a	10,0a	20,0a
Gesamt-NRW									
75 Stationen	5min	1950	6,5	-3,5	-4,4	-4,9	-5,7	-6,2	-5,9
	15min	1950	9,3	-1,3	-0,8	-0,7	-1,1	-1,4	-1,2
81 Stationen	60min	1950	14,8	1,2	1,7	1,7	2,1	2,1	2,5
225 Stationen	2h	1950	18,0	1,0	1,3	1,4	1,2	1,1	1,3
	4h	1950	21,6	1,4	0,6	-0,0	-0,2	-0,5	-0,7
	12h	1950	28,8	2,4	0,4	-0,6	-1,1	-1,9	-2,6
	1d	1950	37,7	0,7	-0,2	-0,9	-1,4	-1,9	-2,3
	3d	1950	54,8	0,6	-0,2	-0,6	-1,0	-1,4	-1,8

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1, 0a	2, 0a	3, 3a	5, 0a	10, 0a	20, 0a
Niederrheinisches Tiefland									
11 Stationen	5min	1950	6,5	-7,7	-13,4	-14,8	-17,0	-18,5	-20,0
	15min	1950	9,1	-2,2	-2,8	-3,7	-4,0	-3,8	-4,4
12 Stationen	60min	1950	14,1	5,8	6,1	6,6	6,2	6,3	6,3
	2h	1950	17,5	1,4	0,6	0,8	0,2	0,2	0,0
	4h	1950	21,3	-2,6	-3,9	-5,2	-5,6	-6,5	-7,0
	12h	1950	28,0	-2,9	-6,2	-7,8	-8,8	-10,4	-11,3
32 Stationen	1d	1950	32,8	1,0	0,1	-0,3	-0,7	-1,1	-1,5
	3d	1950	46,3	1,1	0,5	0,1	-0,1	-0,5	-0,8
Niederrheinische Bucht									
7 Stationen	5min	1969	5,4						
	15min	1969	8,6						
9 Stationen	60min	1969	14,7						
	2h	1969	17,6						
	4h	1969	20,7						
	12h	1969	27,0						
26 Stationen	1d	1950	34,9	-2,5	-6,0	-7,9	-9,0	-10,8	-11,9
	3d	1950	48,3	-2,0	-4,9	-6,4	-7,4	-8,8	-9,9
Westfälische Bucht									
39 Stationen	5min	1950	6,5	-1,5	-2,2	-1,6	-1,2	-1,9	-2,1
	15min	1950	9,4	-1,9	-2,1	-1,8	-1,8	-2,4	-2,2
40 Stationen	60min	1950	14,8	-0,7	-1,3	-1,5	-1,7	-2,1	-2,1
	2h	1950	17,9	0,3	-0,8	-1,1	-1,4	-1,5	-2,0
	4h	1950	21,5	0,5	-0,4	-0,7	-1,0	-1,5	-2,1
	12h	1950	28,6	2,3	0,8	-0,1	-0,5	-1,2	-1,9
57 Stationen	1d	1950	34,5	3,4	1,8	1,0	0,6	-0,3	-1,0
	3d	1950	48,0	4,2	2,7	1,9	1,3	0,6	-0,0
Westfälisches Tiefland									
1 Station	5min	1979	6,4						
	15min	1979	9,5						
1 Station	60min	1979	15,6						
	2h	1979	18,2						
	4h	1979	21,3						
	12h	1979	27,5						
5 Stationen	1d	1950	32,5	-0,3	-0,7	-0,7	-0,6	-0,7	-0,7
	3d	1950	44,8	-1,1	-0,7	-0,5	-0,3	-0,1	0,2

12 Entwicklung der statistischen Regenhöhen

Großlandschaft Anzahl Stationen	Dauer- stufe	An- fangs- jahr	h_N $T = 1a$ [mm]	Änderung der Regenhöhen [%] je Jährlichkeit T					
				1, 0a	2, 0a	3, 3a	5, 0a	10, 0a	20, 0a
Weserbergland									
2 Stationen	5min	1974	6,8						
	15min	1974	10,2						
3 Stationen	60min	1974	15,1						
	2h	1974	18,1						
	4h	1974	21,8						
	12h	1974	29,4						
27 Stationen	1d	1950	36,1	4,0	2,9	2,5	2,0	1,6	1,2
	3d	1950	52,4	3,4	2,0	1,3	0,7	0,0	-0,5
Eifel (mit Sieben- gebirge)									
4 Stationen	5min	1974	5,4						
	15min	1974	8,7						
4 Stationen	60min	1974	15,9						
	2h	1974	19,9						
	4h	1974	24,0						
	12h	1974	32,6						
19 Stationen	1d	1950	41,7	-0,3	0,6	0,9	1,1	1,6	1,9
	3d	1950	60,4	0,6	1,4	1,7	2,0	2,4	2,6
Bergisches Land									
6 Stationen	5min	1969	5,7						
	15min	1969	8,7						
6 Stationen	60min	1969	15,0						
	2h	1969	18,0						
	4h	1969	21,7						
	12h	1969	29,5						
25 Stationen	1d	1950	44,7	0,9	0,6	0,0	-0,0	-0,4	-0,8
	3d	1950	67,7	-0,3	-0,7	-0,8	-1,0	-1,1	-1,3
Sauer- und Sieger- land									
5 Stationen	5min	1950	6,0	8,7	8,3	11,0	8,8	10,8	10,5
	15min	1950	8,9	4,5	3,2	4,0	3,5	3,5	3,3
6 Stationen	60min	1950	14,5	0,7	-0,1	-0,5	-0,8	-1,3	-1,5
	2h	1950	18,5	-1,6	-2,5	-2,6	-2,3	-2,7	-2,9
	4h	1950	23,4	-1,8	-2,2	-3,2	-3,2	-3,7	-4,1
	12h	1950	32,9	3,9	1,2	-0,2	-1,4	-2,5	-3,8
34 Stationen	1d	1950	42,5	3,4	1,5	0,5	-0,5	-1,3	-2,4
	3d	1950	65,6	4,4	4,0	3,7	3,4	3,1	2,7

12.3 Zusammenfassung zur Entwicklung der statistischen Regenhöhen

Mit den **gleitenden Zeitfenstern** wird die Entwicklung der Regenhöhen für mehrere 30-Jahres-Fenster über den Gesamtzeitraum (1950-2008) beurteilt. Für die sich überlappenden 30-Jahres-Fenster wurden gemäß Regelblatt A121 nach den anerkannten Regeln der Technik belastbare statistische Regenhöhen berechnet. Der Trend wurde aus dem chronologischen Vergleich dieser Regenhöhen abgeleitet.

Eine statistische Überprüfung der Signifikanz einer Entwicklung ist nicht möglich, weil der Stichprobenumfang mit je einem Element aus den vier Zeitfenstern zu gering ist. Zudem überschneiden sich die Zeitfenster, die Stichprobenelemente sind also nicht unabhängig voneinander. Die Ergebnisse beinhalten dennoch eine hohe Aussagekraft, weil der Gesamtzeitraum (1950-2008) entsprechend lang ist und je Gebiet die Statistiken vieler Stationen in einem Zeitfenster gemittelt wurden. Die Zufälligkeit kleinräumiger Ereignisse an einzelnen Stationen tritt damit in den Hintergrund.

Bei den 54 Stationen, die für Gesamt-NRW gemittelt wurden, ist ein generelles Muster in den gleitenden Zeitfenstern im Gesamtzeitraum (1950-2008) zu erkennen: Die 1-jährlichen Regenhöhen nehmen tendenziell von den kurzen zu den langen Dauerstufen zu. Bleibt die Regenhöhe für die Dauerstufe 5 Minuten noch nahezu konstant, so verstärkt sich der zunehmende Trend bei den längeren Dauerstufen: 15 Minuten $\approx 1\%$, 60 Minuten $\approx 1,5\%$, 2 Stunden $\approx 3\%$, 4 Stunden $\approx 4,5\%$, 12 Stunden und 1 Tag $\approx 8\%$, 3 Tage $\approx 11\%$. In höheren Jährlichkeiten schwächt sich dieser Trend durchgängig ab und schlägt, je kürzer die Dauerstufe, desto früher und stärker, in einen abnehmenden Trend um.

Ausnahmen bilden das Westfälische Tiefland mit $0,5\%$ und die Eifel mit 5% . Die größte Zunahme verzeichnet das Bergische Land mit knapp 17% .

Mit höheren Jährlichkeiten nehmen die Steigerungsraten i. d. R. ab. Ausnahmen bilden das Westfälische Tiefland und die Eifel, hier steigen die Steigerungsraten stetig mit zunehmender Jährlichkeit. In der Niederrheinischen Bucht bzw. dem Sieger- und Sauerland sind die Steigerungsraten mit ca. 12% bzw. 13% über die Jährlichkeiten nahezu konstant. Die stärkste Abnahme findet sich in der Westfälischen Bucht, belegt mit 35 Stationen, für die Dauerstufe 60 Minuten. Die 1-jährliche Regenhöhe bleibt mit einer Abnahme von $-0,3\%$ nahezu konstant. Mit höheren Jährlichkeiten steigert sich die Abnahme auf ca. -7% für die 20-jährliche Regenhöhe.

Für die Großlandschaften Westfälisches Tiefland, bzw. Weserbergland konnten für Dauerstufen <1 Tag mangels verfügbarer Stationen keine bzw. keine belastbaren Aussagen gemacht werden. Für alle anderen Großlandschaften gilt, dass die Auswertung der letzten 30 Jahre die höchsten Ergebnisse lieferte.

Aussagen für Dauerstufen ≤ 60 Minuten sind kritisch zu betrachten, weil der Einfluss der geänderten Messtechnik schwer zu quantifizieren ist. Mit der Fortführung der Messtätigkeit und Fortschreibung der Zeitreihen wird dieser Einfluss in Zukunft aber an Gewicht verlieren.

Die Projektion der Regenhöhen vom 1979-2008-Zeitfenster auf den Gesamtzeitraum 1950-2008 wurde aus dem Trend der wachsenden Zeitfenster abgeleitet. Die Unterschiede sind

in der Regel. gering. Für Gesamt-NRW überschätzen die Regenhöhen der Dauerstufe 60 Minuten die Werte aus dem Gesamtzeitraum am stärksten, bleiben aber mit einem Betrag bis zu 2 % über alle Jährlichkeiten gering. Einzige Ausnahme stellt die 5-Minuten-Dauerstufe mit ca. 5 % Unterschätzung für alle Jährlichkeiten dar.

Die Entwicklung der Regenhöhen in den letzten 30 Jahren wurde mit den **wachsenden Zeitfenster** untersucht. Interessant ist, dass hier die größten Zunahmen der Regenhöhen in den kürzeren Dauerstufen und die stärksten Abnahmen in den langen Dauerstufen auftreten. Die Zunahmen bewegen sich zwischen 1,5 % und 8 % für die 1-jährliche Regenhöhe. Die stärksten Abnahmen der Regenhöhen stellen sich in der Dauerstufe 3 Tage dar. Für die 1-jährliche Regenhöhe beträgt sie zwischen -1 % und -5 %.

Mit höheren Jährlichkeiten nehmen die Zuwachsraten ab oder bleiben nahezu konstant. Ausnahmen bilden die Niederrheinische Bucht, die Eifel und das Bergische Land mit geringfügig steigenden Zuwachsraten.

Bei der Untersuchung der partiellen Serien, der Anzahl und der mittleren Höhe der Ereignisse ($\leftrightarrow$ Kap. 11.1, 11.2 und 11.3) und der Regenhöhen werden gegenläufige Entwicklungen beobachtet. Wie sind diese vermeintlichen Widersprüche zu erklären?

- Partielle Serien haben ggf. einen Trend, der sich aus der chronologischen Reihenfolge der Ereignisse berechnet. Die chronologische Reihenfolge geht aber beim Übergang in die Statistik verloren und der Vergleich von Regenhöhen aus unterschiedlichen Zeitfenstern hat gar nichts mit einem Trend in einer partiellen Serie zu tun.
- Die beobachtete Zunahme der Ereignishäufigkeit bei etwa gleichbleibender mittlerer Ereignishöhe führt dazu, dass in die partiellen Serien höhere Ereignisse eingehen. Damit steigt der Mittelwert, aber die Dichtefunktion der empirischen Verteilung der Serie wird gestaucht.
- Plausibel ist, dass die Statistik mit einer Steigerung der 1-jährlichen Regenhöhe und einer Abnahme in den höheren Jährlichkeiten reagiert. Dies bestätigt die Statistik.
- In der Ereignisbetrachtung wurde besonders eine Zunahme der Ereignisse für die Dauerstufen 5 und 15 Minuten festgestellt, die hier eine besonders hohe Steigerung der Regenhöhen in diesen Dauerstufen erwarten lassen. Für die gleitenden Zeitfenster wird dies von der Statistik aber nicht wiedergegeben. Entscheidenden Einfluss hat hierauf der verfahrensspezifische Ausgleich über die Dauerstufen und an den Bereichsgrenzen. Die optimale Bereichsgrenze I/II wurde überwiegend bei 60 Minuten gefunden. Führt der Ausgleich dazu, dass die Ausgleichsgerade der Verteilungsparameter im Bereich I an dieser Grenze angehoben wird, so werden die ausgeglichenen Verteilungsparameter für die Dauerstufen 5 und 15 Minuten automatisch kleiner und damit auch die Regenhöhen.

13 Trendanalysen von Niederschlagszeitreihen regionaler Klimamodelle

Beim LANUV NRW stehen über das Interaktive Diagnose- und Präsentationstool (IDP) der Firma Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC) Zeitreihen zu hydrologischen und meteorologischen Parametern auf Tagessummenbasis zur Verfügung. Im Rahmen von ExUS wurden für den Parameter Niederschlag ausgewählte Trendanalysen zu möglichen zukünftigen Entwicklungen durchgeführt. Die zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten von Szenarien, regionalen Klimamodellen, Untersuchungszeiträumen und Dauerstufen bieten ein umfangreiches Forschungs- und Analysegebiet, das im Rahmen von ExUS nicht vollständig bearbeitet werden konnte. Die im Folgenden beschriebene Auswahl erfolgte in enger Abstimmung mit dem LANUV NRW.

Hinweis zu den Datenquellen der im Folgenden dargestellten Ergebnisse

- Die CLM-Läufe wurden durchgeführt von der Gruppe Modelle & Daten, angesiedelt am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, in enger Zusammenarbeit mit den CLM-Entwicklern:
 - Brandenburgische Technische Universität Cottbus (BTU),
 - GKSS Forschungszentrum in Geesthacht,
 - Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK).

Die Finanzierung erfolgte durch das BMBF im Rahmen des Förderschwerpunktes klimazwei.

- Die WETTREG-Daten stammen von Meteo Research/CEC Potsdam GmbH, im Auftrag des Umweltbundesamtes 2006.
- Die STAR2-Daten wurden berechnet von der Gruppe Klimaanalyse/-szenarien des Forschungsbereichs II, angesiedelt am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Die Finanzierung erfolgte durch das BMBF im Rahmen des Projektes GLOWA_Elbe.
- Visualisiert wurden die Klimadaten mit der IDP-Software der Firma Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC).

13.1 Ausgewähltes Szenario und verwendete regionale Klimamodelle

Die Annahmen über die zukünftige gesellschaftliche Entwicklung und die daraus resultierenden zukünftigen Entwicklungen der Treibhausgasemissionen und des Klimas werden in Szenarien beschrieben. Die Szenariorechnungen liefern Spannbreiten für die Klimaänderungen, wobei jede Klimaänderung gleich wahrscheinlich ist. Als „globaler Mittelweg“ wird das Szenario A1B angesehen, das auch im Rahmen von ExUS für die Trendanalysen ausgewählt wurde. Die Annahmen, die dem Szenario A1B zu Grunde liegen, werden im Folgenden kurz beschrieben [40],[36]):

- Starkes Wirtschaftswachstum
- Zunahme der Weltbevölkerung bis 2050, danach Abnahme
- Schnelle Einführungen neuer und effizienter Technologien
- Globalisierung mit Abnahme regionaler Unterschiede (Einkommen, Technologie, kulturelle und soziale Hinsicht)
- Ausgewogene Mischung fossiler und nicht-fossiler Energieträger
- Vorwiegend ökonomische und globale Betrachtungsweise

Für Deutschland stehen Modellläufe von zwei dynamischen (REMO, CLM) und zwei statistischen (WETTREG, STAR2) regionalen Klimamodellen zur Verfügung. Die Eigenschaften der beiden unterschiedlichen Modelltypen werden im Folgenden kurz beschrieben:

- **Dynamische Verfahren:** Bei dynamischen Verfahren werden an ihrer Berandung Antriebsdaten des Globalmodells an das regionale Klimamodell übergeben (Nesting-Strategie). Dort werden die physikalischen Vorgänge mit einer wesentlich höheren räumlichen Auflösung simuliert. Eine Rückkopplung an das Globalmodell (Übergabe von Simulationsergebnissen des Regionalmodells an das Globalmodell) erfolgt nicht ([40], S. 4). Dynamische Verfahren arbeiten rasterorientiert.
- **Statistische Verfahren:** Statistische Verfahren gehen davon aus, dass die globalen Modelle in der Lage sind, die Strukturen der atmosphärischen Zirkulation treffend zu beschreiben. Bei den meisten dieser Verfahren werden statistische Beziehungen zwischen großräumigen Mustern/Wetterlagen und den lokalen Auswirkungen identifiziert. Dabei werden die aus der Vergangenheit gewonnenen statistischen Beziehungen auf die Vorausrechnungen der globalen Modelle angewandt ([40], S. 4f). Die Ergebnisse der statischen Verfahren sind auf vorhandene Klimastationen bezogen.

Durch den globalen Antrieb (ECHAM5) werden an die dynamischen regionalen Klimamodelle etwas zu hohe Feuchtigkeiten übergeben, sodass die Niederschläge in NRW in CLM und REMO überschätzt werden. Zudem fällt der Niederschlag in diesen Modellen senkrecht in einem Rasterfeld zu Boden, sodass räumliche Verlagerungen des Niederschlages durch den Wind nicht berücksichtigt werden.

Insbesondere beim Modell REMO mit seiner relativ hohen räumlichen Auflösung von 10 km x 10 km kommt es in den Luvlagen der Mittelgebirge lokal zu unrealistisch hohen Niederschlägen. Der korrigierte REMO-Datensatz, bei dem die lokal auftretenden hohen Niederschläge nachträglich über die angrenzenden Rasterfelder verteilt wurden, stand zur Zeit der Projektbearbeitung noch nicht zur Verfügung. Es wurde daher auf eine Analyse der REMO-Daten verzichtet.

Für die Trendanalysen wurde daher als dynamisches Modell das Modell CLM ausgewählt. Für das CLM existieren für das Szenario A1B zwei Realisierungen (Modellläufe), die beide bei den Trendanalysen berücksichtigt wurden. Die beiden Realisierungen unterscheiden sich darin, dass aus einem langen prä-industriellen Gleichgewichtslauf (ohne Einfluss von Klimaänderungen) unterschiedliche Startwerte gewählt wurden. Beide Realisierungen liefern gleich wahrscheinliche Projektionen des zukünftigen Klimas auf der Basis des gleichen Szenarios (hier A1B). Im Folgenden werden die beiden Realisierungen kurz CLM1 und CLM2 abgekürzt.

Von den beiden statistischen Modellen wurden primär die Zeitreihen des Modells WETTREG analysiert, da die Modellläufe des Modells STAR2 nur für den Zeitraum 1981-2060 durchgeführt wurden, und somit keine Daten zum Referenzzeitraum (1961-1990) und für die Ferne Zukunft (bis 2100) zur Verfügung stehen. Die Trendanalysen zu den Zeitreihen aus dem STAR2-Modell wurden daher nur für die Bewertung möglicher Klimasignale in der Nahen Zukunft (bis 2050) herangezogen.

13.2 Betrachtete Untersuchungszeiträume und Dauerstufen

Zu den regionalen Klimamodellen CLM und WETTREG liegen Niederschlagzeitreihen im Zeitraum 1961-2100 vor. Für den Vergleich mit Messdaten und für die Trendanalysen möglicher zukünftiger Entwicklungen wurden folgende drei Zeiträume betrachtet:

- **Referenzzeitraum 1961-1990:** Um Vergleiche der Trends in den Modelldaten mit Trends in den historischen Messdaten durchführen zu können, und um mögliche zukünftige Änderungen im Bezug auf die Vergangenheit quantifizieren zu können, wird als Referenzzeitraum die Klimanormalperiode der WMO 1961-1990 gewählt.
- **Nahe Zukunft 2050:** Die Tendaussagen der Hauptwerte für die Nahe Zukunft werden im Zeitraum 2001-2050 ermittelt. Die statistischen Auswertungen (nach ATV-A 121) der Tagessummen beziehen sich auf das Zeitfenster 2021-2050.

- **Ferne Zukunft 2100:** Die Trendaussagen der Hauptwerte für die Ferne Zukunft werden im Zeitraum 2001-2100 ermittelt. Die statistischen Auswertungen (nach ATV-A 121) der Tagessummen beziehen sich auf das Zeitfenster 2071-2100.

Die Trendanalysen in den drei beschriebenen Zeiträumen werden für die Hauptwerte (Jahres-, Halbjahres- und Monatsniederschlagssummen) durchgeführt. Die Starkregenauswertung nach Wiederkehrzeit und Dauer nach ATV-A 121 wird für die Dauerstufen D=1 Tag und D=3 Tage auf Basis eines jeweiligen 30-Jahre-Zeitfensters durchgeführt.

13.3 Auswahl an Stationen und Rasterfeldern für die Trendanalysen

Bei der Auswahl der Stationen und Rasterfelder wurde eine möglichst flächendeckende Berücksichtigung aller Regionen/Großlandschaften in NRW angestrebt. Zudem wurden bei der Auswahl lokale Besonderheiten wie Luv- und Leelagen in den Mittelgebirgen berücksichtigt. Um mögliche extreme Trendentwicklungen in einzelnen Niederschlagszeitreihen der regionalen Klimamodelle nicht falsch zu interpretieren, wurden beim CLM-Modell nicht einzelne Rasterfelder, sondern acht zusammenhängende 4er-Boxen (Packs) aus den Rasterfeldern ausgewählt ($\leftrightarrow$ Abb. 13.1). Eine Ausnahme stellt das Pack 8 (Rasterfelder 29-32, Eifel/Niederrheinische Bucht) dar.

Beim Rasterfeld 30 ($\leftrightarrow$ Abb. 13.1) liegt die korrespondierende Niederschlagsstation mit WETTREG- und STAR2-Daten ($\leftrightarrow$ Abb. 13.2) gerade oberhalb der Grenze der beiden benachbarten Rasterfelder. Zudem gehen mit der getroffenen Auswahl beide Großlandschaften (Eifel und Niederrheinische Bucht) mit je zwei Rasterfeldern/Stationen in die Analyse ein. Korrespondierend zu den 32 Rasterfeldern wurden je Pack drei bis vier Niederschlagsstationen mit WETTREG- und STAR2-Daten ausgewählt. Zu drei Rasterfeldern liegen keine korrespondierenden Niederschlagsstationen vor, sodass für die Trendanalysen zu den beiden statistischen regionalen Klimamodellen 29 Niederschlagszeitreihen berücksichtigt wurden ($\leftrightarrow$ Abb. 13.2).

Die Auswahl der acht Packs erfolgte in Absprache mit dem ExUS-Begleitkreis aus Vertretern des Auftraggebers, der Auftragnehmer, des DWD und der DWA-Niederschlagsgruppe. Fünf der acht Großlandschaften werden durch je ein repräsentatives Pack berücksichtigt. Die Westfälische Bucht wird durch drei Packs repräsentiert. Ein Pack deckt je zur Hälfte die Eifel und die Niederrheinische Bucht ab. Lediglich das Westfälische Tiefland, zu dem auch nur wenige Stationsdaten vorliegen ($\leftrightarrow$ Kap. 3), blieb unberücksichtigt.

In Tabelle 13.1 werden die berücksichtigten Rasterfelder und Niederschlagsstationen zusammengefasst. Die Bezeichnung in der Spalte „Raster CLM“ entspricht der Rasterfeldbezeichnung im IDP. Die Angaben zur Höhe, den Koordinaten und zum mittleren Jahresniederschlag aus den DWD Originaldaten für NRW für den Zeitraum 1971-2000 (1961-1970 liegen in IDP nicht vor) wurden aus der IDP-Darstellung übernommen und beziehen sich auf die in der Spalte „Station WETTREG/STAR2“ angegebene Niederschlagsstation. In

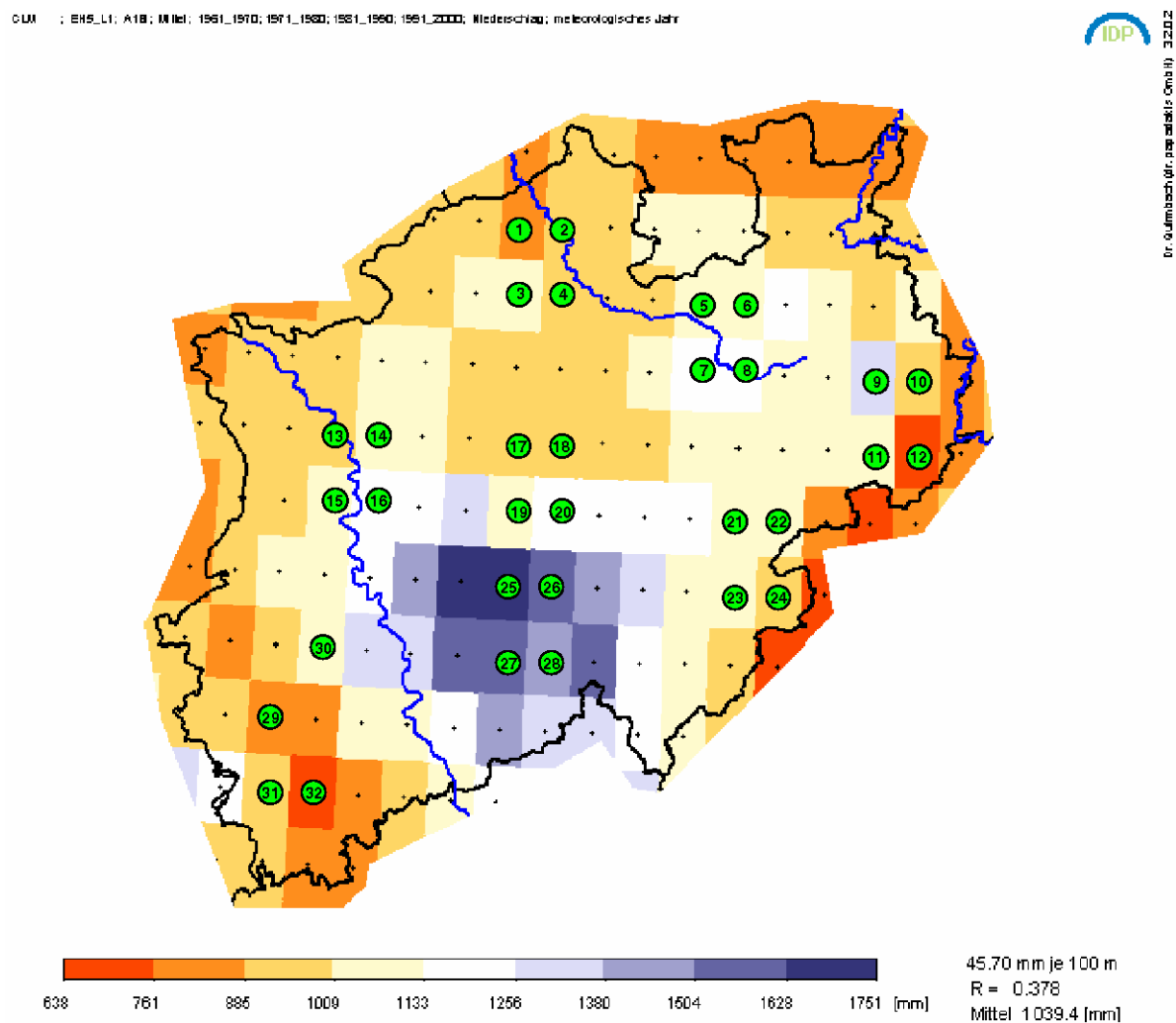


Abbildung 13.2: Ausgewählte Stationen für die Trendanalysen mit Niederschlagsdaten der regionalen Klimamodelle WETTREG und STAR2

13.3 Auswahl an Stationen und Rasterfeldern für die Trendanalysen

Tabelle 13.1: In den Trendanalysen berücksichtigte Rasterfelder und Niederschlagsstationen

Rasterfelder und Niederschlagsstationen der regionalen Klimamodelle								
Pack	Geogr. Lage	Nr.	Raster CLM	Station WETT-REG/STAR2	Höhe [mNN]	Koordinaten	Mittl. N [mm] NRW_ori (1971-2000)	Station AquaZIS
1	nordwestliche Westfälische Bucht	1	GP_089.091					St. Arnold
	nordwestliche Westfälische Bucht	2	GP_089.092	Hörstel DWD	47	7,59°/52,27°	742	Hoerstel DWD
	nordwestliche Westfälische Bucht	3	GP_088.091	Altenberge DWD	69	7,49°/52,04°	736	Altenberge DWD
	nordwestliche Westfälische Bucht	4	GP_088.092	Muenster (Schleuse) DWD	55	7,67°/51,98°	728	Münster Schleuse DWD
2	östliche Westfälische Bucht	5	GP_088.095	Harsewinkel DWD	65	8,24°/51,96°	717	Harsewinkel DWD
	östliche Westfälische Bucht	6	GP_088.096	Steinhagen-Brockhagen DWD	83	8,35°/51,99°	776	Steinhagen-Brockhagen DWD
	östliche Westfälische Bucht	7	GP_087.095	Wadersloh DWD	90	8,28°/51,76°	748	Wadersloh DWD
	östliche Westfälische Bucht	8	GP_087.096	Rietberg DWD	79	8,44°/51,83°	760	Rietberg DWD
3	Weserbergland	9	GP_087.099	Bad Horn Meinberg (Feldrom) DWD	370	8,94°/51,82°	1163	Bad Horn Meinberg (Feldrom) DWD
	Weserbergland	10	GP_087.100	Marienmünster-Voerden DWD	243	9,24°/51,81°	876	Marienmünster-Voerden DWD
	Weserbergland	11	GP_086.099	Lichtenau i.W.-Blankenrode DWD	329	8,94°/51,52°	846	Lichtenau i.W.-Blankenrode DWD
	Weserbergland	12	GP_086.100	Warburg-Hohenwepel DWD	231	9,14°/51,53°	708	Warburg-Hohenwepel DWD
4	Niederrheinisches Tiefland	13	GP_086.087	Voerde-Mehrums DWD	23	6,64°/51,58°	746	Voerde-Mehrums DWD

Rasterfelder und Niederschlagsstationen der regionalen Klimamodelle								
Pack	Geogr. Lage	Nr.	Raster CLM	Station WETT-REG/STAR2	Höhe [mNN]	Koordinaten	Mittl. N [mm] NRW_ori (1971-2000)	Station AquaZIS
	Niederrheinisches Tiefland	14	GP_086.088					Dinslaken DWD
	Niederrheinisches Tiefland	15	GP_085.087	Moers DWD	26	6,65°/51,44°	748	Moers DWD
	Niederrheinisches Tiefland	16	GP_085.088	Duisburg-Hochfeld DWD	33	6,76°/51,42°	745	Duisburg-Hochfeld DWD
5	südliche Westfälische Bucht/Ruhrgebiet	17	GP_086.091	Waltrop DWD	60	7,40°/51,62°	786	Waltrop DWD
	südliche Westfälische Bucht/Ruhrgebiet	18	GP_086.092	Kamen DWD	62	7,66°/51,58°	672	Kamen DWD
	südliche Westfälische Bucht/Ruhrgebiet	19	GP_085.091	Witten-Stockum DWD	136	7,36°/51,46°	865	Witten-Stockum DWD
	südliche Westfälische Bucht/Ruhrgebiet	20	GP_085.092					Unna-Billmerich
6	östliches Sauer- und Siegerland	21	GP_085.096	Warstein DWD	321	8,36°/51,44°	975	Warstein DWD
	östliches Sauer- und Siegerland	22	GP_085.097	Brilon-Niederalme DWD	355	8,65°/51,45°	911	Brilon-Niederalme DWD
	östliches Sauer- und Siegerland	23	GP_084.096	Winterberg-Altastenberg DWD	705	8,49°/51,19	1222	Winterberg-Altastenberg DWD
	östliches Sauer- und Siegerland	24	GP_084.097	Winterberg-Zuesschen DWD	597	8,60°/51,14°	1059	Winterberg-Zuesschen DWD
7	Bergisches Land	25	GP_084.091	Hückeswagen (Bevertalsperre) DWD	296	7,38°/51,14°	1337	Hückeswagen (Bevertalsperre) DWD
	Bergisches Land	26	GP_084.092	Kierspe-Hoeckinghausen DWD	434	7,57°/51,11°	1427	Kierspe-Hoeckinghausen DWD

Rasterfelder und Niederschlagsstationen der regionalen Klimamodelle								
Pack	Geogr. Lage	Nr.	Raster CLM	Station WETT-REG/STAR2	Höhe [mNN]	Koordinaten	Mittl. N [mm] NRW_ori (1971-2000)	Station AquaZIS
	Bergisches Land	27	GP_083.091	Engelskirchen DWD	193	7,43°/50,97	1195	Engelskirchen DWD
	Bergisches Land	28	GP_083.092	Wiehl DWD	239	7,55°/50,94°	1194	Wiehl DWD
8	Niederrheinische Bucht	29	GP_082.086	Eschweiler-Weisweiler DWD	149	6,33°/50,80°	800	Eschweiler-Weisweiler DWD
	Niederrheinische Bucht	30	GP_083.087	Elsdorf DWD	84	6,56°/50,92°	696	Elsdorf DWD
	Eifel	31	GP_081.086	Simmerath (Kalltalsperre) DWD	410	6,33°/50,64°	1089	Simmerath (Kalltalsperre) DWD
	Eifel	32	GP_081.087	Heimbach-Duettling DWD	351	6,56°/50,59°	764	Heimbach-Duettling DWD

13.4 Jahresniederschlagssummen

Die Trendanalysen der Jahresniederschlagssummen werden wie bei den Messwerten ($\hookrightarrow$ Kap. 7.1 und 7.2) mit dem Mann-Kendall-Test und dem Verfahren der linearen Regression (Bestimmung der Signifikanz über t-Test) durchgeführt. Die Normalverteilung der Jahresniederschlagssummen zur Berechtigung der Durchführung des t-Tests wurde im Kapitel 7.4.3.1 anhand von Messwerten nachgewiesen.

13.4.1 Dekadenweise Betrachtung der Jahresniederschlagssummen

Wie die später in diesem Kapitel beschriebenen Ergebnisse der Trendanalysen zeigen, können für die einzelnen betrachteten Zeitfenster je nach Modell sehr unterschiedliche Trendaussagen getroffen werden. Um die Ursache für die zum Teil sehr großen Unterschiede in den Aussagen der Trendanalysen zu ergründen, wurden wie bereits bei den Messwerten die mittleren Jahresniederschlagssummen in den einzelnen Dekaden bestimmt. Abbildung 13.3 zeigt die prozentuale Abweichung der mittleren Jahresniederschlagssumme einer Dekade gegenüber dem Mittelwert über den Gesamtzeitraum für das jeweilige Modell. Da für das Modell STAR2 nur Daten für den Zeitraum 1981-2060 vorliegen, sind für dieses Modell in den Zeiträumen bis 1980 und ab 2061 keine Aussagen möglich.

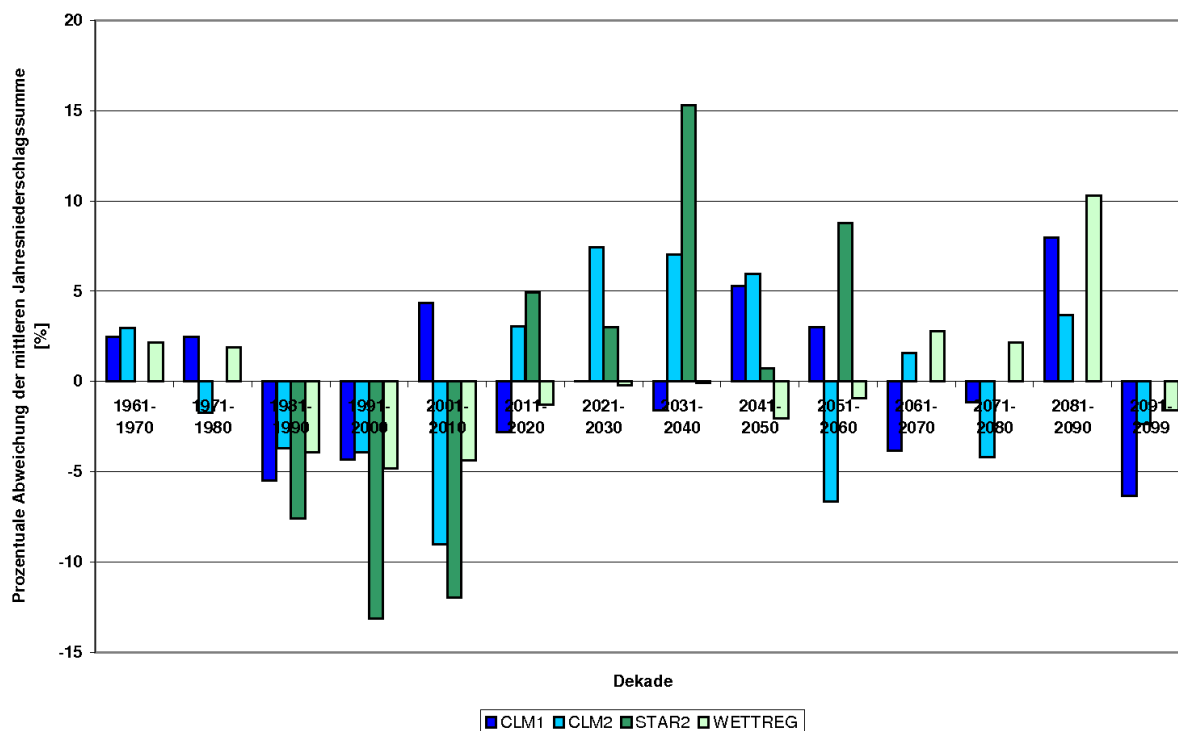


Abbildung 13.3: Prozentuale Abweichungen der mittleren Jahresniederschlagssummen in den einzelnen Dekaden (Mittelwert über alle 8 Packs) gegenüber dem Mittelwert über den Gesamtzeitraum

Anhand der Abbildung 13.3 lassen sich bereits Tendenzen und Eigenschaften in den Niederschlagsdaten der regionalen Klimamodelle erkennen, die sich auch in den folgenden Trendanalysen wiederfinden werden:

- Im Zeitraum 1981-2010, und damit auch am Ende der Klimanormalperiode 1961-1990, werden mit allen Modellen (CLM1 nur 1981-2000) sehr trockene Dekaden modelliert.
- Die Modelle/Modellläufe CLM2 und STAR2 besitzen bis auf die Dekade 2051-2060 qualitativ ähnliche Niederschlagsverläufe.
- Der mittleren Jahresniederschläge beim Modelllauf CLM1 entwickeln sich am wenigsten stark in eine eindeutig positive oder eindeutig negative Richtung. Es treten verstärkt gegenläufige Entwicklungen in direkt aufeinander folgenden Dekaden auf. Bei den anderen drei Modellen/Modellläufen treten dagegen auch über mehrere aufeinander folgende Dekaden trockene oder feuchte Perioden auf.
- Bei den Modellen/Modellläufen CLM2 und STAR2 tritt solch eine feuchte Periode in der Nahen Zukunft, beim Modell WETTREG in der Fernen Zukunft auf.

- Die beschriebenen moderaten Änderungen der mittleren Jahresniederschlagssummen beim Modelllauf CLM1 und die stärker ausgeprägten Zunahmen in der Mitte (CLM2) bzw. am Ende (WETTREG) des 21. Jahrhunderts spiegeln sich auch im Vergleich der 30-Jahres Zeitfenster für den Referenzzeitraum, die Nahe und die Ferne Zukunft wider (↔ Abb. 13.4).

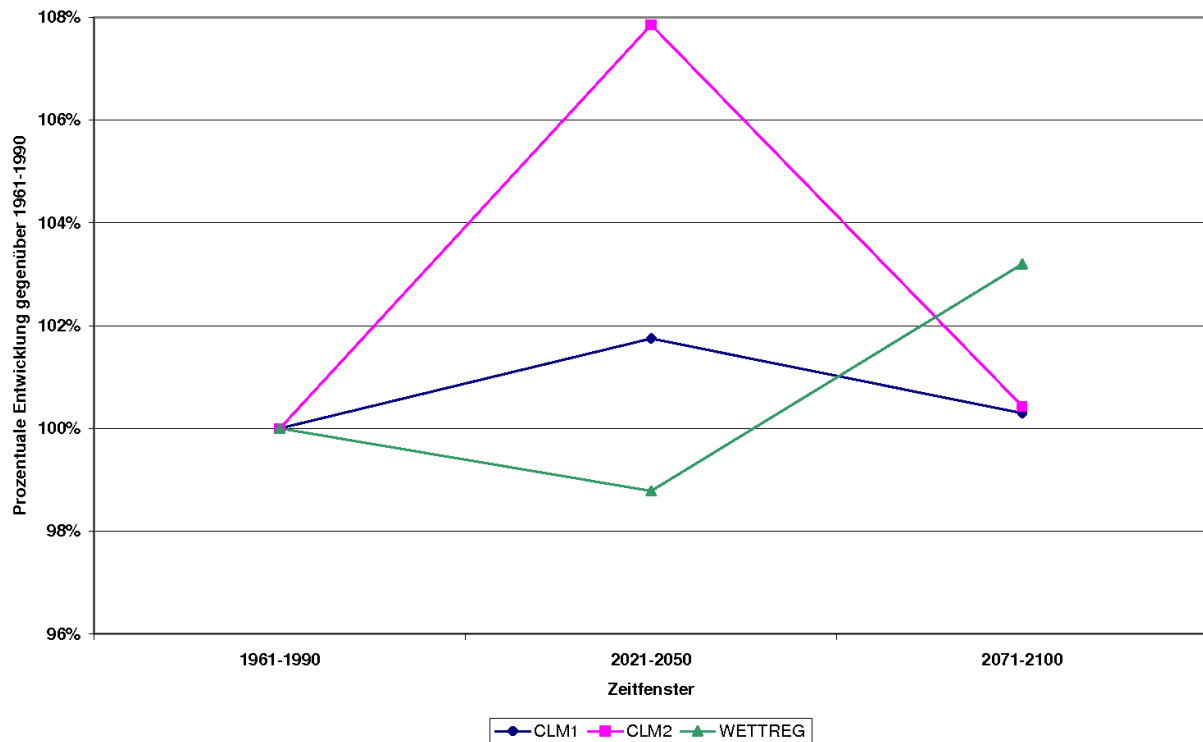


Abbildung 13.4: Prozentuale Änderung der mittleren Jahresniederschlagssummen in der Nahen und Fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum (Mittelwert über alle 8 Packs)

13.4.2 Ergebnisinterpretation für Gesamt-NRW

Die Bewertung der Trendanalysen der Niederschlagszeitreihen aus den regionalen Klimamodellen erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird durch Vergleiche der Trends in den Modelldaten mit Trends in den historischen Messdaten überprüft, inwieweit die Modelldaten die tatsächliche Niederschlagsentwicklung in der Vergangenheit abbilden. Hierzu werden die Trends in den Jahres- und Halbjahressummen im Referenzzeitraum 1961-1990 untersucht. In einem zweiten Schritt werden die Trendanalysen für die Hauptwerte und die statistischen Auswertungen der Tagessummen entsprechend dem in Kapitel 13.2 beschriebenen Vorgehen durchgeführt.

13.4.2.1 Vergleich der Trends in den Modelldaten mit denen der historischen Messdaten im Referenzzeitraum 1961-1990

Wie bereits Abbildung 13.3 ($\hookrightarrow$ Kap. 13.4.1) erkennen lässt, treten am Ende des 20. Jahrhunderts in den Modelldaten aller Modelle zwei aufeinander folgende trockene Dekaden auf. Bereits aus den Trendanalysen der Jahresniederschlagssummen ($\hookrightarrow$ Kap. 9.2) ist bekannt, dass sich solche trockenen Dekaden signifikant auf Trendanalysen über Zeitfenster von 30 Jahren auswirken. Aufgrund der langen Trockenphase am Ende des 20. Jahrhunderts würde die Vergrößerung des Zeitfensters auf 1961-2000 keine wesentlich anderen Ergebnisse liefern. Stattdessen werden die Trendanalysen der Modelldaten im Zeitraum 1961-1990 nicht nur mit den Trendanalysen der Messdaten im Zeitraum 1961-1990, sondern auch mit den Trendanalysen der Messdaten im Zeitraum 1950-1979 verglichen. Im Zeitraum 1950-1979 wurden die Messdaten ebenfalls durch eine trockene Dekade (1971-1980) am Ende des untersuchten Zeitfensters beeinflusst.

Da für das Modell STAR2 erst Daten ab 1981 vorliegen, erfolgt der Vergleich mit Trends in den Messdaten nur für die beiden Modellen CLM (CLM1 und CLM2) und WETTREG. Die Ergebnisse der Trendanalysen ($\hookrightarrow$ Tab. 13.2, Abb. 13.5 und 13.6 sowie Tab. 13.3) zeigen, dass die Modelldaten aller drei Modelle/Modellläufe nicht das Trendverhalten der Messwerte im exakt gleichen Zeitraum (1961-1990) widerspiegeln. Vergleicht man aber die Trends der Modelldaten (1961-1990) mit den Trends der Messdaten eines um 10 Jahre nach vorne verschobenen Zeitfensters (1950-1979), so zeigen sich sowohl in der Verteilung, als auch in der Spanne der Trends große Übereinstimmungen. Die Modelle sind somit in der Lage, ein real in der Vergangenheit aufgetretenes Trendverhalten realitätsnah abzubilden, jedoch unter Berücksichtigung eines gewissen Zeitverzuges.

In Tabelle 13.3 wird die Spannbreite der Trends an allen berücksichtigten Stationen/Rasterfeldern für die Jahresniederschlagssummen zusammengefasst. Beim Verfahren der linearen Regression wird die Spannbreite für die Steigungen der Trendgeraden angegeben, beim Mann-Kendall-Test die Spannbreite für den Parameter Tau ($\hookrightarrow$ Kap. 7). Extreme Trends an einzelnen Stationen können in den Messdaten durch lokal begrenzte Besonderheiten oder eventuell nicht erkannte Fehler in der Datenbasis zurückzuführen sein und können somit Aussagen zu generellen mittleren Entwicklungen verfälschen. In Tabelle 13.3 wird daher zusätzlich eine 90 %-Spanne ohne Berücksichtigung der 5 % größten und der 5 % kleinsten Werte angegeben. Analog dazu werden bei der 90 %-Spanne der Modelldaten die jeweils beiden größten und kleinsten Werte nicht berücksichtigt. Die Unterschiede in der Gesamt- und in der 90 %-Spanne sind bei den Modelldaten allerdings wesentlich geringer als bei den Messdaten, da die Werte an den Rändern nur durch lokale Besonderheiten und nicht durch mögliche Fehler in der Datenbasis beeinflusst werden. Auf eine detaillierte Darstellung der Gesamt- und der 90 %-Spanne wird in den weitergehenden Untersuchungen zur Nahen und Fernen Zukunft daher verzichtet. Besonderheiten (starke Abweichungen zwischen Gesamt- und 90 %-Spanne) werden explizit angegeben.

Die räumliche Verteilung der Trends in den Jahresniederschlagssummen der Modelldaten für die Lineare Regression (Steigung der Trendgeraden) wird exemplarisch in Abbildung 13.7 für CLM1 dargestellt. Die Größe der Uhr an jeder Station gibt neben dem Trend auch

das jeweilige Signifikanzniveau und somit die Verteilung signifikanter Trends im Raum an. Die Darstellungen für die anderen Modelle/Modellläufe und die räumlich interpolierten Verteilungen können dem Anhang H entnommen werden.

Tabelle 13.2: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den Messdaten in den Zeitfenstern 1961-1990 (415 Stationen) und 1950-1979 (344 Stationen) und in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in Messdaten vs. Daten aus regionalen Klimamodellen					
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl Messdaten 1961-1990 [%]	Anzahl Messdaten 1950-1979 [%]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]
< -10	0	2	0	0	0
-10 bis -8	0	5	0	0	0
-8 bis -6	0	10	6	3	3
-6 bis -4	5	22	28	19	17
-4 bis -2	10	33	50	53	41
-2 bis 0	21	17	16	22	34
0 bis 2	30	8	0	3	3
2 bis 4	17	1	0	0	0
4 bis 6	7	1	0	0	0
6 bis 8	6	0	0	0	0
8 bis 10	3	0	0	0	0
> 10	2	0	0	0	0

13 Trendanalysen von Niederschlagszeitreihen regionaler Klimamodelle

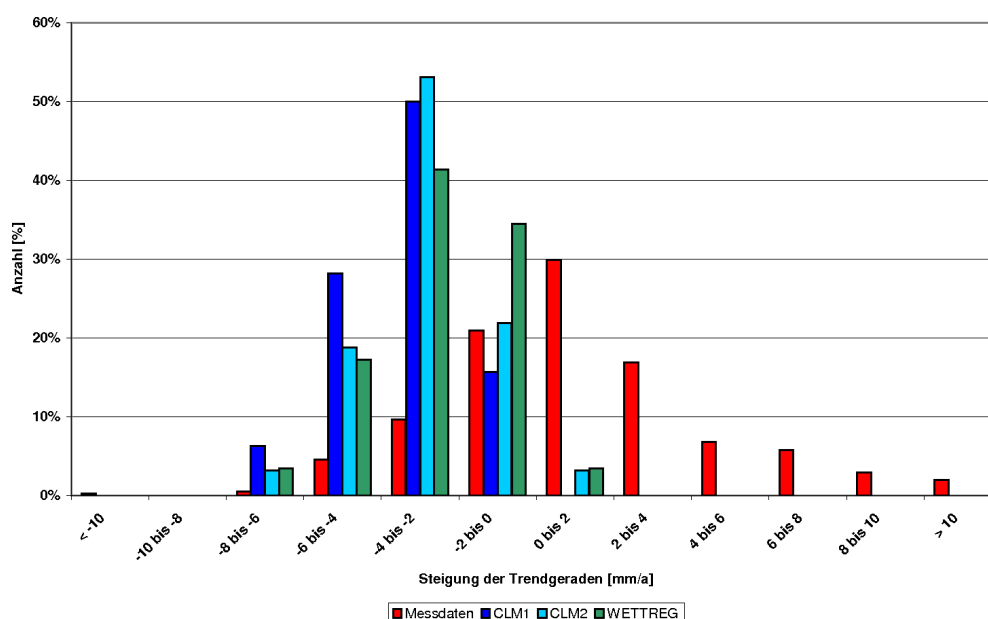


Abbildung 13.5: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den Messdaten (415 Stationen) und in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach dem Verfahren der linearen Regression

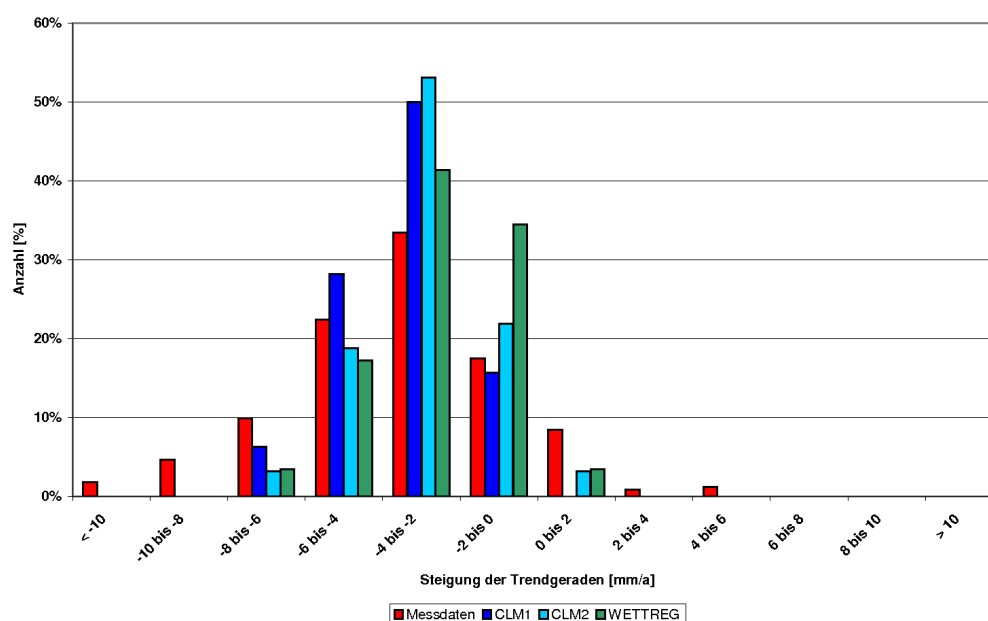


Abbildung 13.6: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den Messdaten (344 Stationen) für das Zeitfenster 1950-1979 und in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach dem Verfahren der linearen Regression

Tabelle 13.3: Spannbreite der Trends der Jahresniederschlagssummen in den Messdaten in den Zeitfenstern 1961-1990 (415 Stationen) und 1950-1979 (344 Stationen) und in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach dem Verfahren der linearen Regression (Steigung der Trendgeraden) und dem Mann-Kendall-Test (Tau)

Spannbreite der Trends für die Jahresniederschlagssummen in den Messdaten und Daten der regionalen Klimamodelle		
Lineare Regression		
Steigung der Trendgeraden [mm/a]	Minimum	Maximum
Gesamtspanne, Messdaten 1961-1990	-10,0	+15,9
90-%-Spanne, Messdaten 1961-1990	-4,1	+7,7
Gesamtspanne, Messdaten 1950-1979	-18,2	+5,2
90-%-Spanne, Messdaten 1950-1979	-8,9	+0,9
Gesamtspanne, CLM1	-6,3	-0,7
90-%-Spanne, CLM1	-5,0	-1,6
Gesamtspanne, CLM2	-6,2	+0,2
90-%-Spanne, CLM2	-5,0	-0,5
Gesamtspanne, WETTREG	-6,2	0,0
90-%-Spanne, WETTREG	-4,8	-0,3
Mann-Kendall-Test		
Tau [-]	Minimum	Maximum
Gesamtspanne, Messdaten 1961-1990	-0,23	+0,50
90-%-Spanne, Messdaten 1961-1990	-0,10	+0,23
Gesamtspanne, Messdaten 1950-1979	-0,43	+0,16
90-%-Spanne, Messdaten 1950-1979	-0,26	+0,03
Gesamtspanne, CLM1	-0,19	-0,05
90-%-Spanne, CLM1	-0,16	-0,09
Gesamtspanne, CLM2	-0,28	-0,02
90-%-Spanne, CLM2	-0,23	-0,07
Gesamtspanne, WETTREG	-0,36	+0,03
90-%-Spanne, WETTREG	-0,21	-0,01

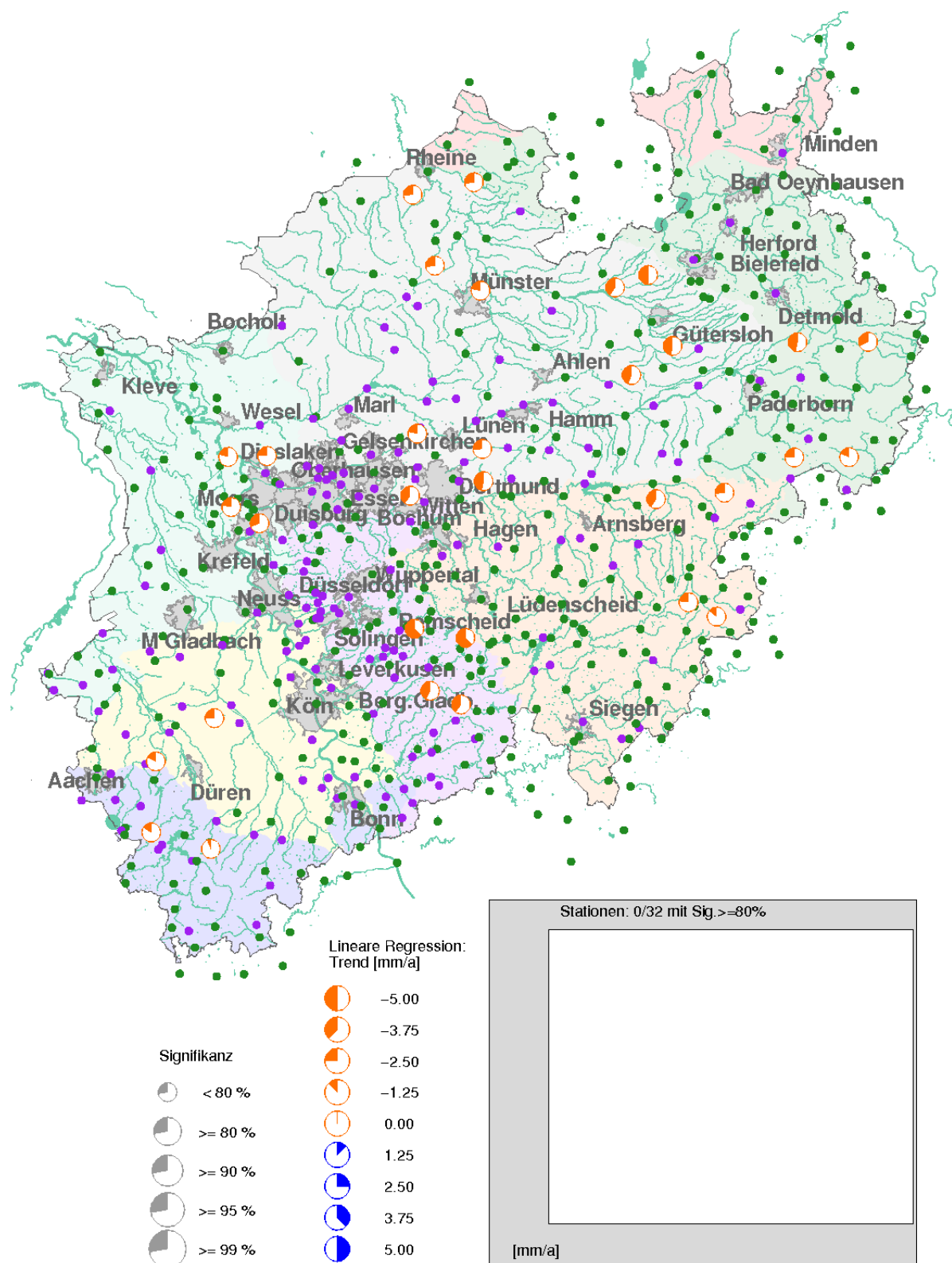


Abbildung 13.7: Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM1 nach dem Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für den Referenzzeitraum 1961-1990

13.4.2.2 Bewertung der Trendanalysen für die Nahe Zukunft 2050

Bei den Trendanalysen für die Nahe Zukunft (2001-2050) zeigen sich in allen Modellen/Modellläufen fast ausschließlich positive Trends ($\hookrightarrow$ Tab. 13.4). Wie bereits im Kapitel 13.4.1 angedeutet, liefern die Trendanalysen für CLM1 und WETTREG auf der einen Seite und CLM2 und STAR2 auf der anderen Seite jeweils untereinander ähnliche Ergebnisse. In Abbildung 13.8 ist die für CLM1/WETTREG typische Verteilung dargestellt, in Abbildung 13.9 die für CLM2/STAR2 typische Verteilung. Die räumliche Verteilung der Trends in den Jahresniederschlagssummen (Lineare Regression, Steigung der Trendgeraden) für die Nahe Zukunft sind für die beiden Realisierungen im Modell CLM in Abbildung 13.10 (CLM1) und Abbildung 13.11 (CLM2) exemplarisch dargestellt. Die Bewertung regionaler Unterschiede erfolgt im Kapitel 13.4.3. Die räumlichen Darstellungen der anderen Modelle und für die Trendanalyse nach dem Mann-Kendall-Test befinden sich im Anhang H. Die Steigungen der Trendgeraden liegen für die Modelle/Modellläufe CLM1 und WETTREG beim Verfahren der linearen Regression zwischen -0,1 mm/Jahr und +1,1 mm/Jahr (CLM1) bzw. 0,0 mm/Jahr und +1,9 mm/Jahr (WETTREG). In den Modellen/Modellläufen CLM2 und STAR2 sind die Spannen zwischen +1,4 mm/Jahr und +4,9 mm/Jahr (CLM2) bzw. +1,7 mm/Jahr und +6,1 mm/Jahr (STAR2) stärker positiv ausgeprägt und wesentlich größer.

Tabelle 13.4: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG/STAR2: 29 Stationen) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten Jahresniederschlagssummen – Nahe Zukunft 2001-2050				
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]	Anzahl STAR2 [%]
< -10	0	0	0	0
-10 bis -8	0	0	0	0
-8 bis -6	0	0	0	0
-6 bis -4	0	0	0	0
-4 bis -2	0	0	0	0
-2 bis 0	3	0	0	0
0 bis 2	97	13	100	10
2 bis 4	0	66	0	69
4 bis 6	0	22	0	17
6 bis 8	0	0	0	3
8 bis 10	0	0	0	0
> 10	0	0	0	0

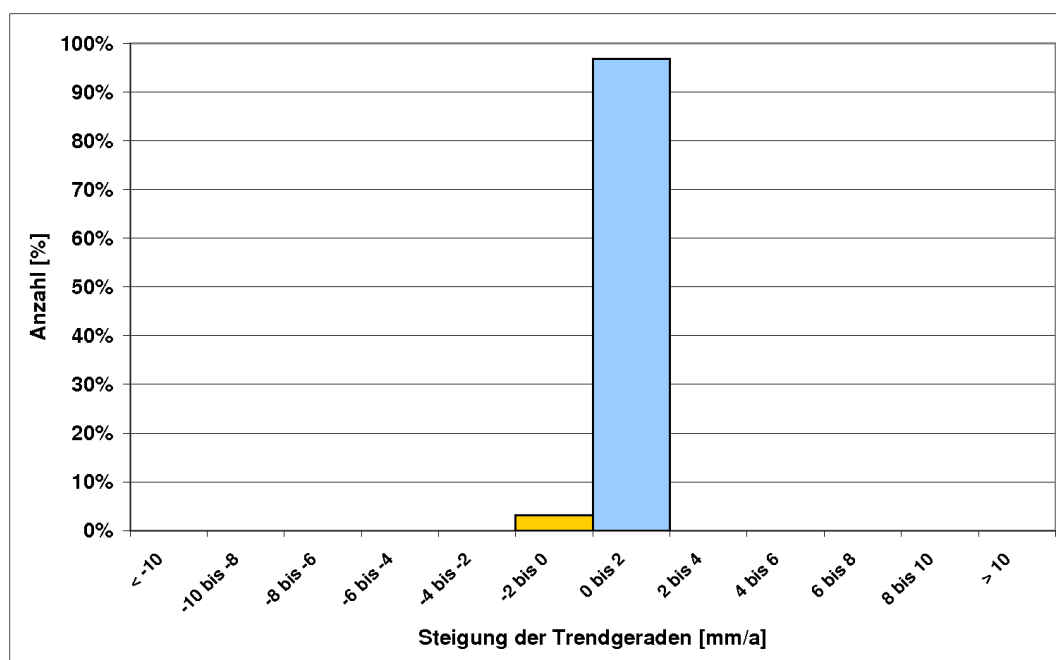


Abbildung 13.8: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den CLM1-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression

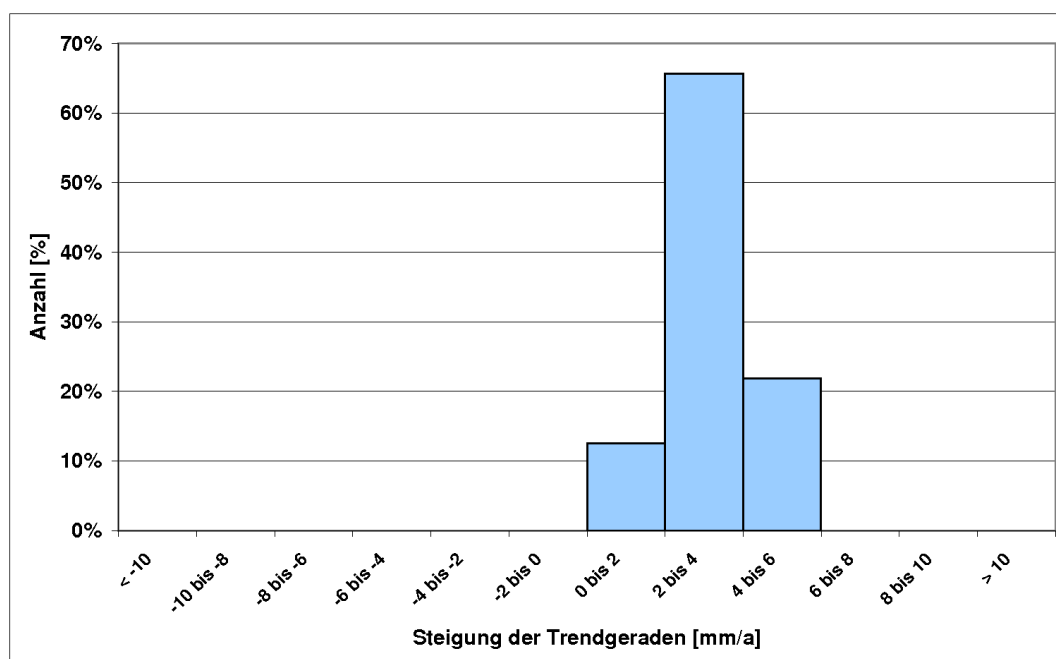


Abbildung 13.9: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den CLM2-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression

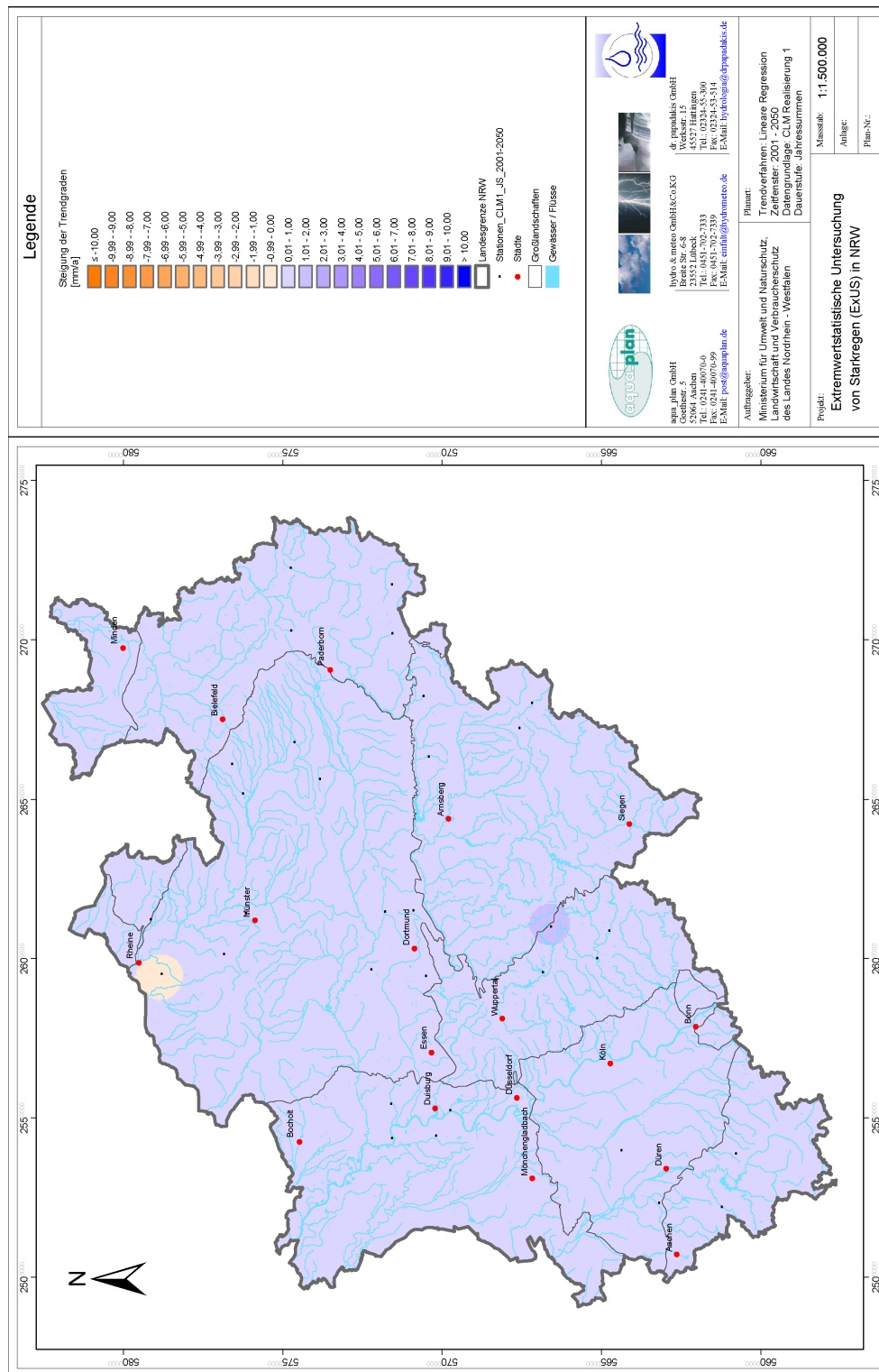


Abbildung 13.10: Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression für die Nahe Zukunft 2001-2050

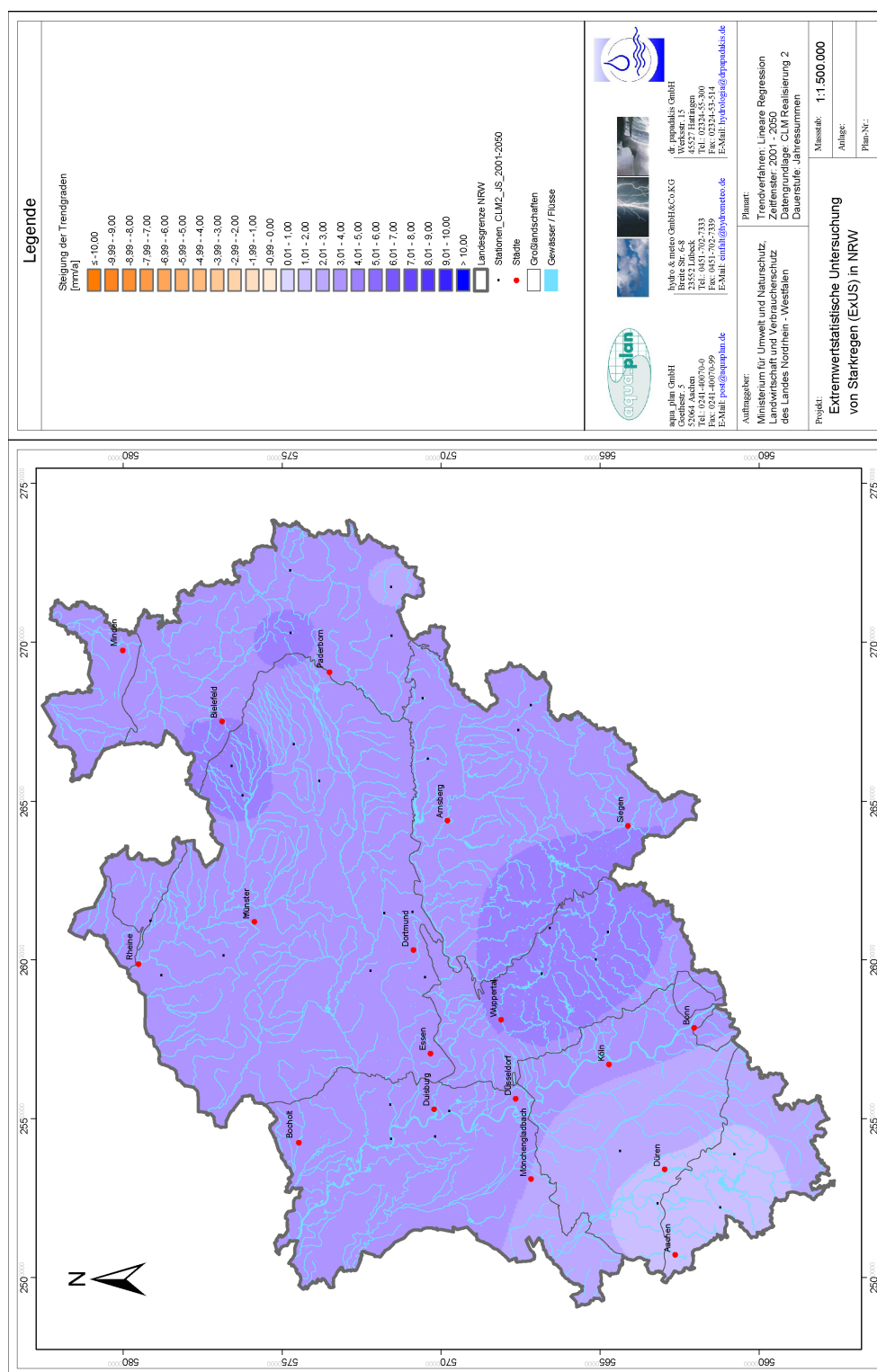


Abbildung 13.11: Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression für die Nahe Zukunft 2001-2050

Die Signifikanz der positiven Trendentwicklungen ist entsprechend den Ausprägungen der Steigungen der Trendgeraden gering (CLM1/WETTREG) oder hoch (CLM2/STAR2). Tabelle 13.5 (Lineare Regression) und Tabelle 13.6 (Mann-Kendall-Test) zeigen, dass bei beiden Trendverfahren in den Modellen/Modellläufen CLM1/WETTREG der Anteil signifikanter Trends unter 10 % liegt. Bei den Modellen/Modellläufen CLM2/STAR2 streuen die Einzelwerte je nach Trendverfahren und Modell etwas stärker, die signifikant positive Trendentwicklung wird aber durch beide Verfahren in beiden Modellen nachgewiesen.

Tabelle 13.5: Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Jahresniederschlagssummen in den Modelldaten (Nahe Zukunft 2001-2050)

Signifikanzniveaus der Trends (LR) – Nahe Zukunft								
	CLM1 Trends [%]		CLM2 Trends [%]		WETTREG Trends [%]		STAR2 Trends [%]	
Signifikanz- niveau [%]	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
< 80	97	3	0	0	93	0	7	0
80	0	0	6	0	7	0	14	0
90	0	0	9	0	0	0	21	0
95	0	0	38	0	0	0	38	0
99	0	0	47	0	0	0	21	0

Tabelle 13.6: Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Jahresniederschlagssummen in den Modelldaten (Nahe Zukunft 2001-2050)

Signifikanzniveaus der Trends (MKT) – Nahe Zukunft								
	CLM1 Trends [%]		CLM2 Trends [%]		WETTREG Trends [%]		STAR2 Trends [%]	
Signifikanz- niveau [%]	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
< 80	100	0	0	0	79	14	24	0
80	0	0	16	0	7	0	17	0
90	0	0	13	0	0	0	28	0
95	0	0	47	0	0	0	28	0
99	0	0	25	0	0	0	3	0

In Tabelle 13.7 werden die wesentlichen Eigenschaften der Trends für die Nahe Zukunft in den vier Modellen/Modellläufen zusammengefasst. Detaillierte Informationen zu den vier Modellen/Modellläufen und beiden Trendverfahren, wie sie in den vorangegangenen

Tabellen und Abbildungen exemplarisch dargestellt wurden, werden im Anhang H zusammengefasst.

In Abbildung 13.12 (Lineare Regression, CLM1) und Abbildung 13.13 (Lineare Regression, CLM2) werden durch die Größe der Uhr an jeder Station neben dem Trend auch das jeweilige Signifikanzniveau und somit die Verteilung signifikanter Trends im Raum dargestellt. Die räumlichen Darstellungen der anderen Modelle und für die Trendanalyse nach dem Mann-Kendall-Test befinden sich im Anhang H.

Tabelle 13.7: Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Jahressummen in den vier Modellen/Modellläufen; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), Gesamtspanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test

Trendeigenschaften der vier Modelle/Modellläufe – Jahressummen, Nahe Zukunft				
Modell/ Modelllauf	Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden)	Gesamtspanne [mm/a]	Signifikanz	Unterschiede MKT/LR
CLM1	überwiegend positiv, 97 % der Trends liegen in der Klasse zwischen 0 mm/a und +2 mm/a	-0,1 bis +1,1	0 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	keine
CLM2	ausschließlich positiv, 66 % der Trends liegen in der Klasse zwischen +2 mm/a und +4 mm/a	+1,4 bis +4,9	100 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 94 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	treten an 50 % der Stationen auf, ohne die Gesamtaussagen zu verfälschen
WETTREG	ausschließlich positiv, 100 % der Trends liegen in der Klasse zwischen 0 mm/a und +2 mm/a	0,0 bis +1,9	nur 7 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	gering
STAR2	ausschließlich positiv, 69 % der Trends liegen in der Klasse zwischen +2 mm/a und +4 mm/a	+1,7 bis +6,1	93 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 79 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	treten an 76 % der Stationen auf; Signifikanz bei LR auf einem insgesamt höheren Niveau als bei MKT

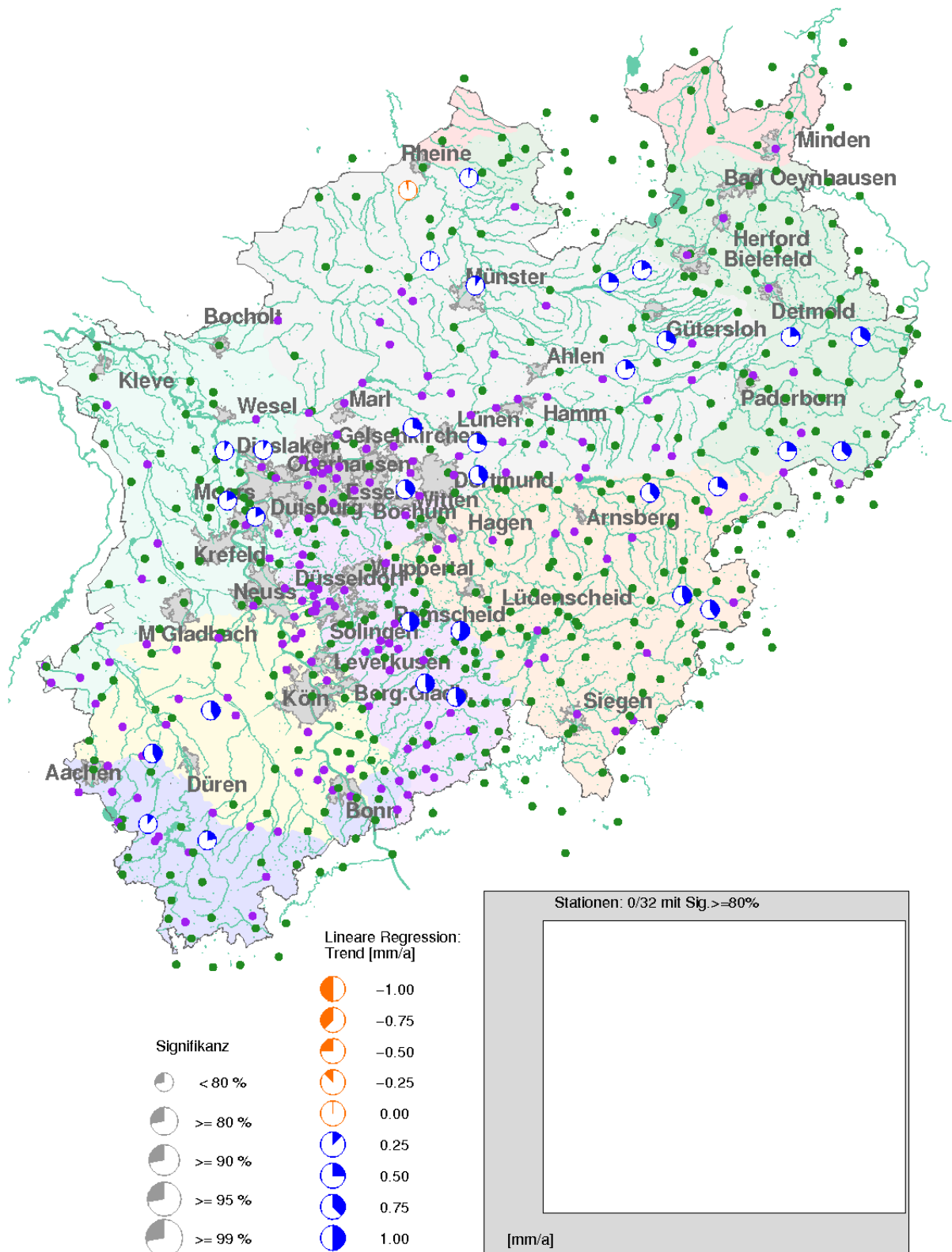


Abbildung 13.12: Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Nahe Zukunft 2001-2050

13.4.2.3 Bewertung der Trendanalysen für die Ferne Zukunft 2100

Bei den Trendanalysen für die Ferne Zukunft (2001-2100) zeigt sich, dass die Trendaussagen in den beiden Realisierungen beim Modell CLM konvergieren ($\leftrightarrow$ Tab. 13.8, Abb.13.14 und Abb. 13.15) und nur noch in einzelnen Regionen geringe Unterschiede aufweisen ($\leftrightarrow$ Abb. 13.16 und 13.17). Das Signal einer Änderung der Jahresniederschlagssummen ist beim Modell CLM nur gering ausgeprägt und bewegt sich nur in einer kleinen Spanne um Null. Die Steigungen der Trendgeraden liegen zwischen -1,1 mm/Jahr und +0,5 mm/Jahr (CLM1) bzw. -0,5 mm/Jahr und +0,3 mm/Jahr (CLM2).

Das Änderungssignal beim Modell WETTREG ist dagegen stärker positiv ausgeprägt ($\leftrightarrow$ Tab. 13.8, Abb. 13.18 und 13.19). Die Steigungen der Trendgeraden liegen zwischen +0,2 mm/Jahr und +1,5 mm/Jahr.

Die Bewertung regionaler Unterschiede erfolgt im Kapitel 13.4.3. Die räumlichen Darstellungen für die Trendanalyse nach dem Mann-Kendall-Test befinden sich im Anhang H.

Tabelle 13.8: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten Jahresniederschlagssummen – Ferne Zukunft 2001-2100			
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]
< -10	0	0	0
-10 bis -8	0	0	0
-8 bis -6	0	0	0
-6 bis -4	0	0	0
-4 bis -2	0	0	0
-2 bis 0	75	59	0
0 bis 2	25	41	100
2 bis 4	0	0	0
4 bis 6	0	0	0
6 bis 8	0	0	0
8 bis 10	0	0	0
> 10	0	0	0

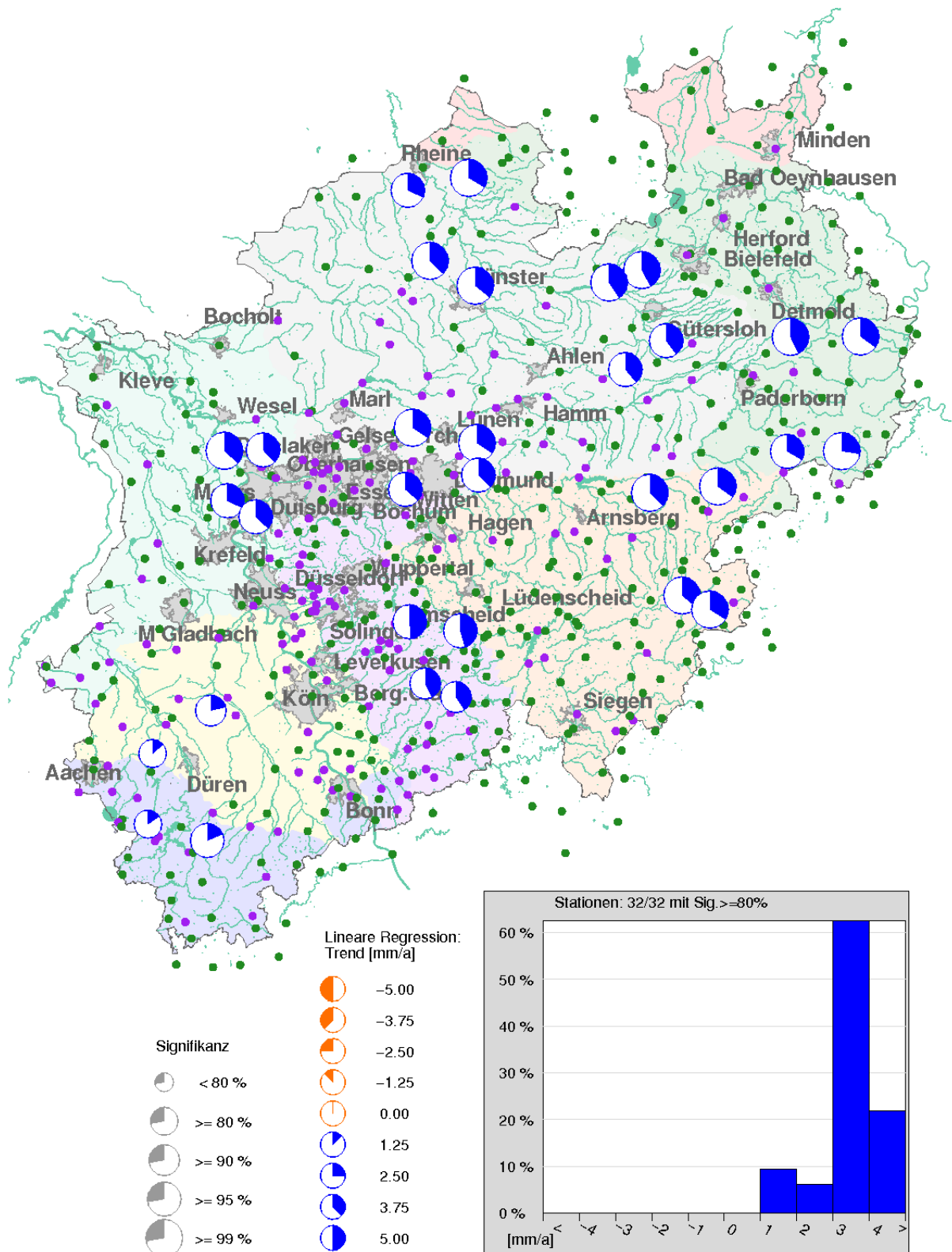


Abbildung 13.13: Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Nahe Zukunft 2001-2050

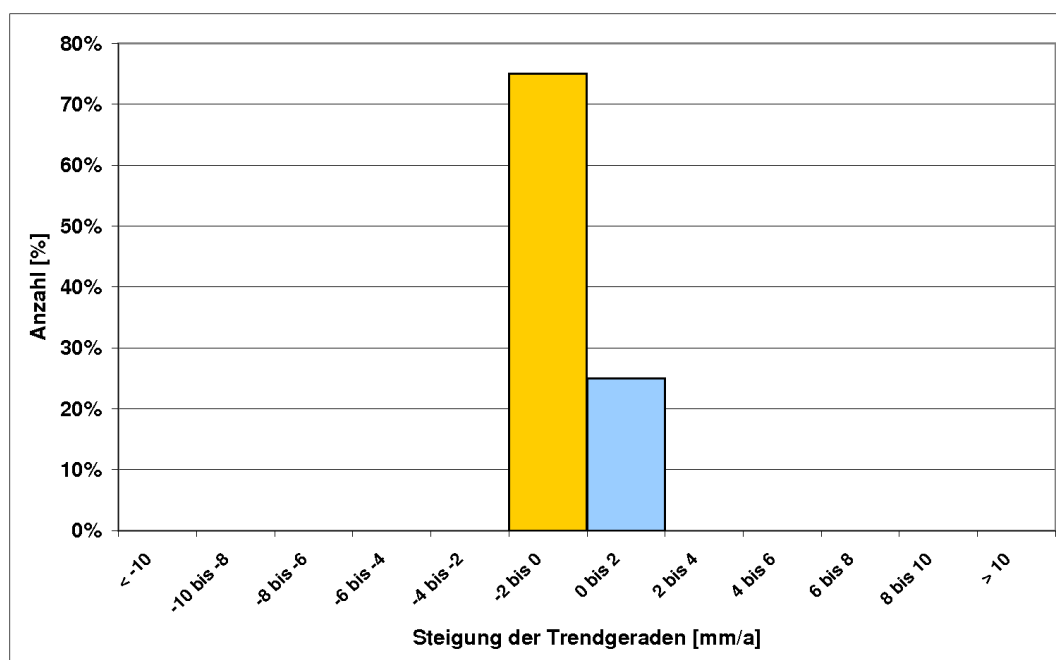


Abbildung 13.14: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den CLM1-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression

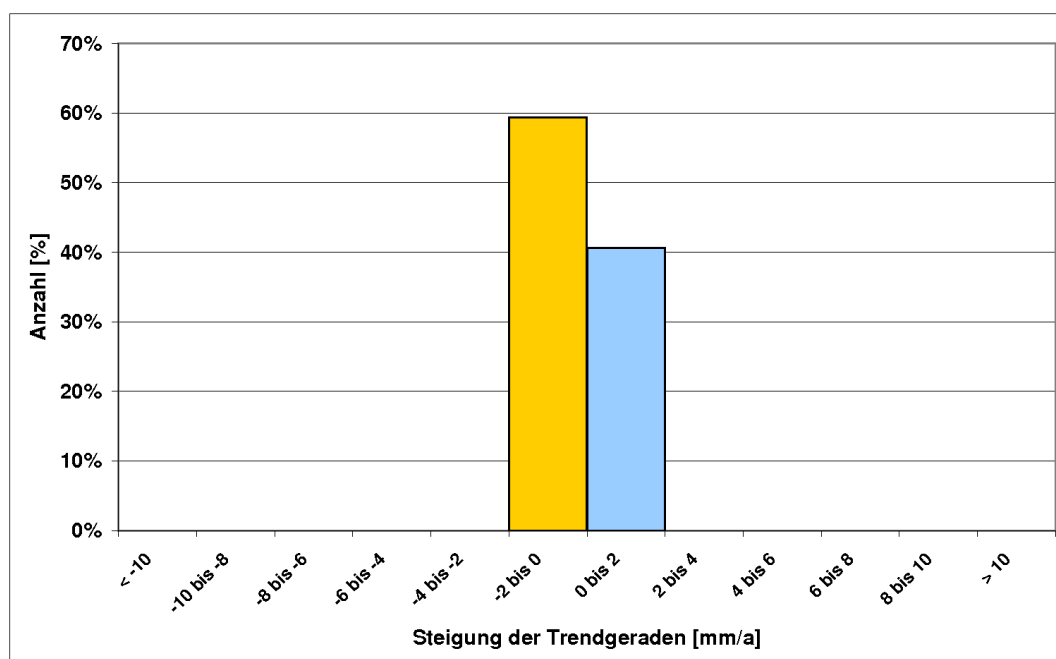


Abbildung 13.15: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den CLM2-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression

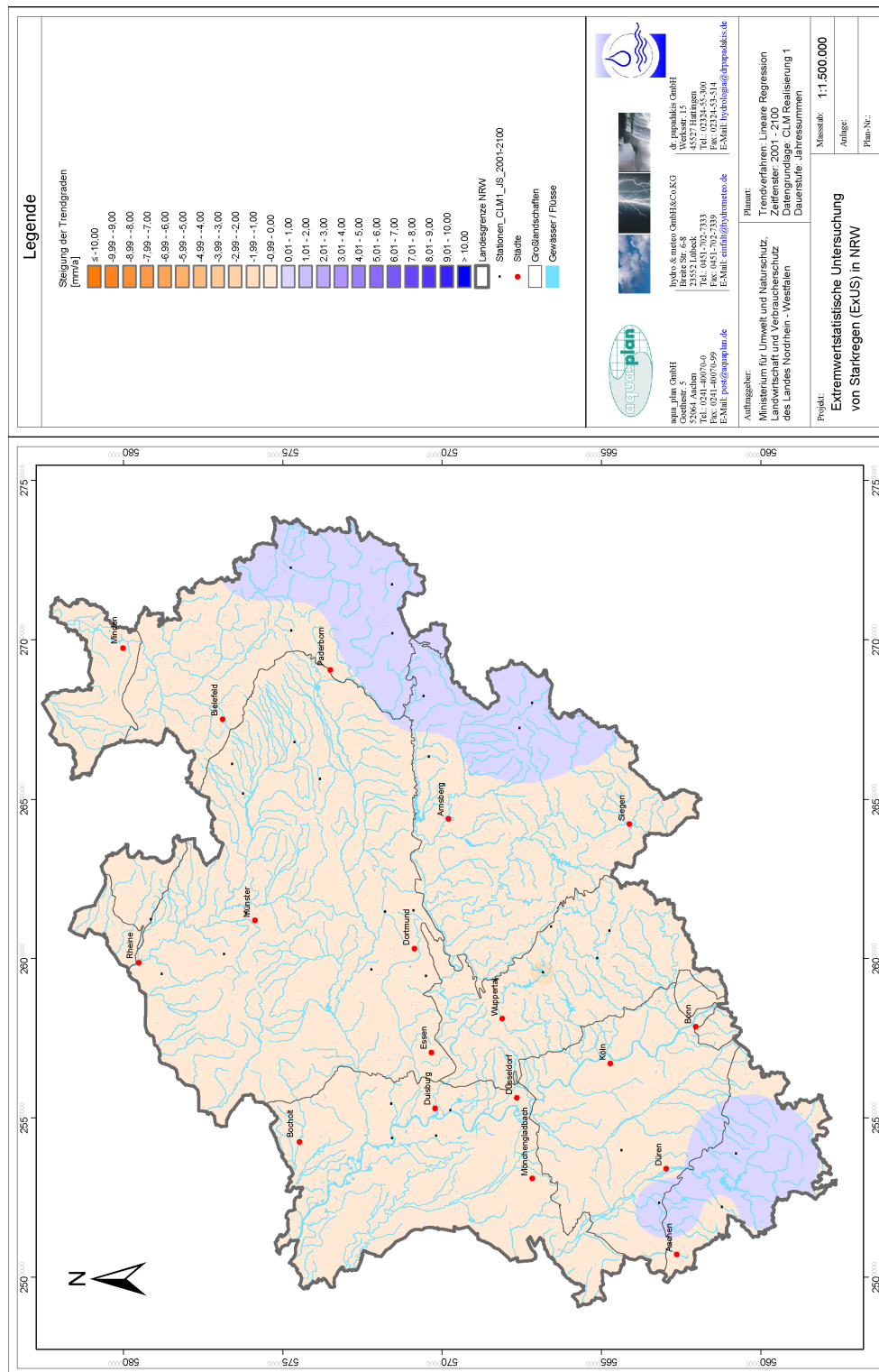


Abbildung 13.16: Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100

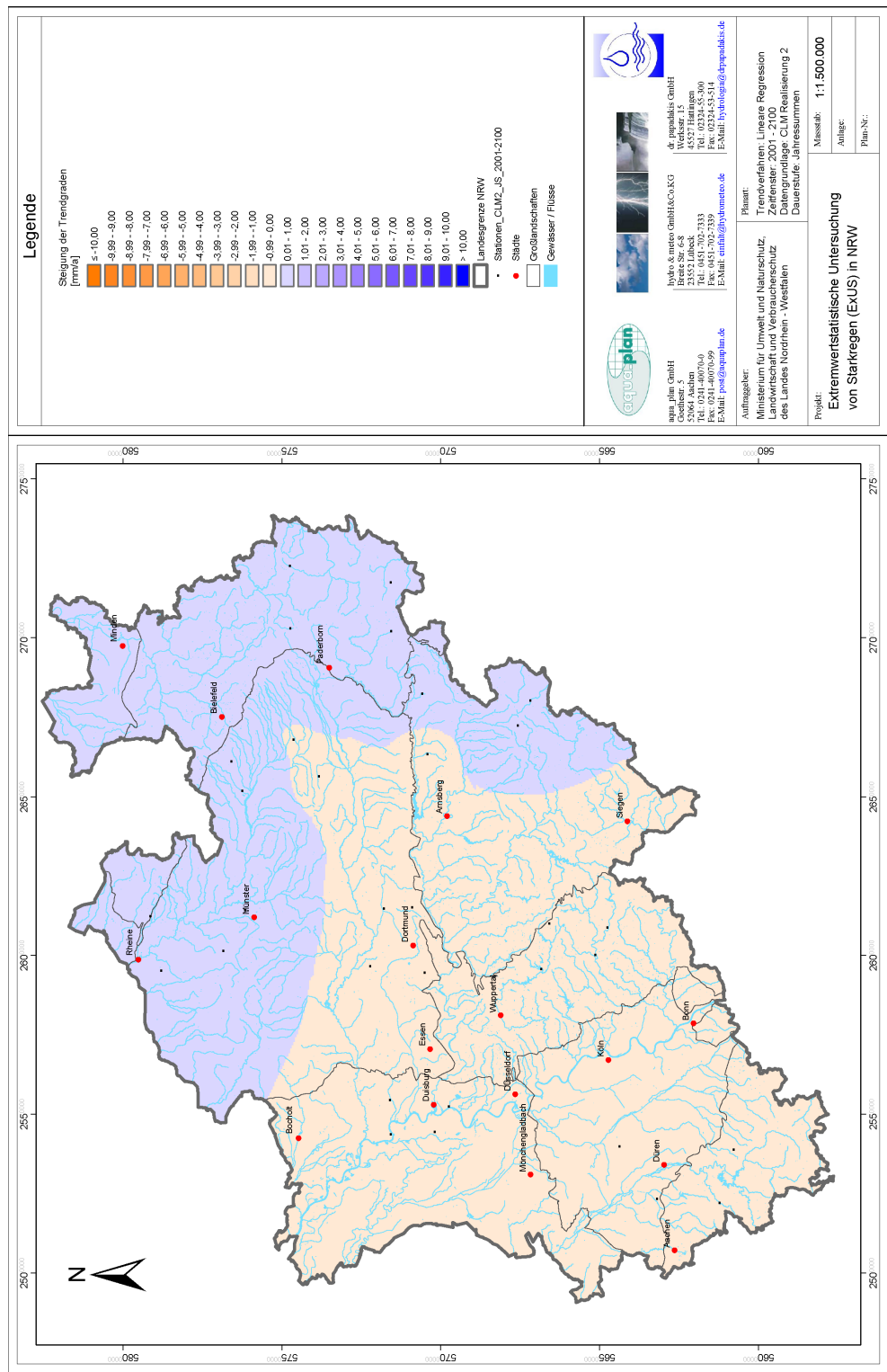


Abbildung 13.17: Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100

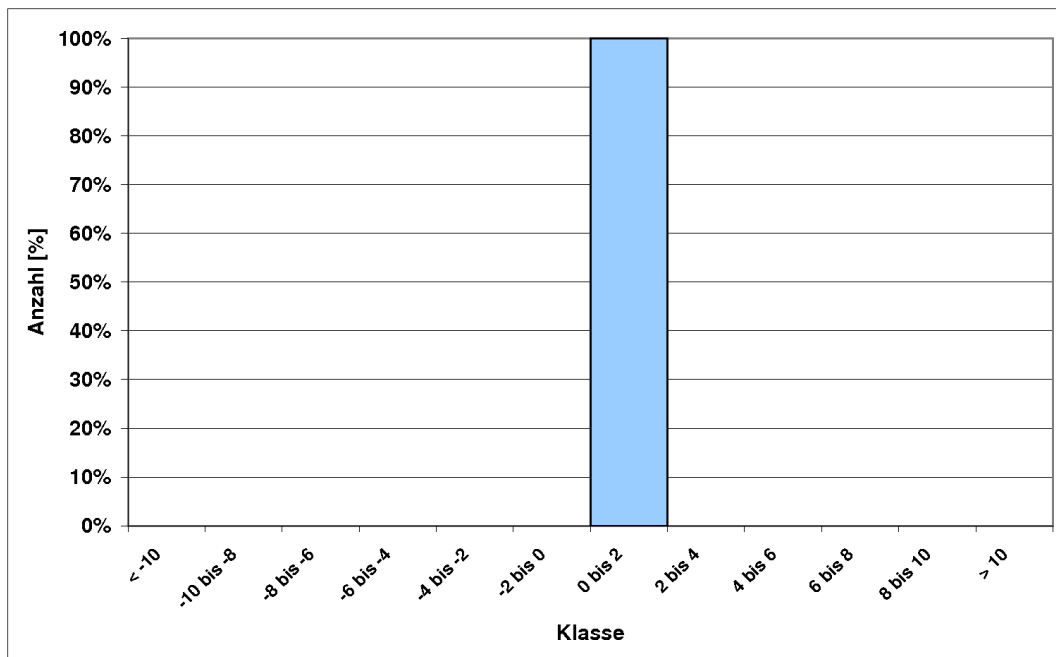


Abbildung 13.18: Trendverhalten der Jahresniederschlagssummen in den WETTREG-Modelldaten (29 Stationen) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression

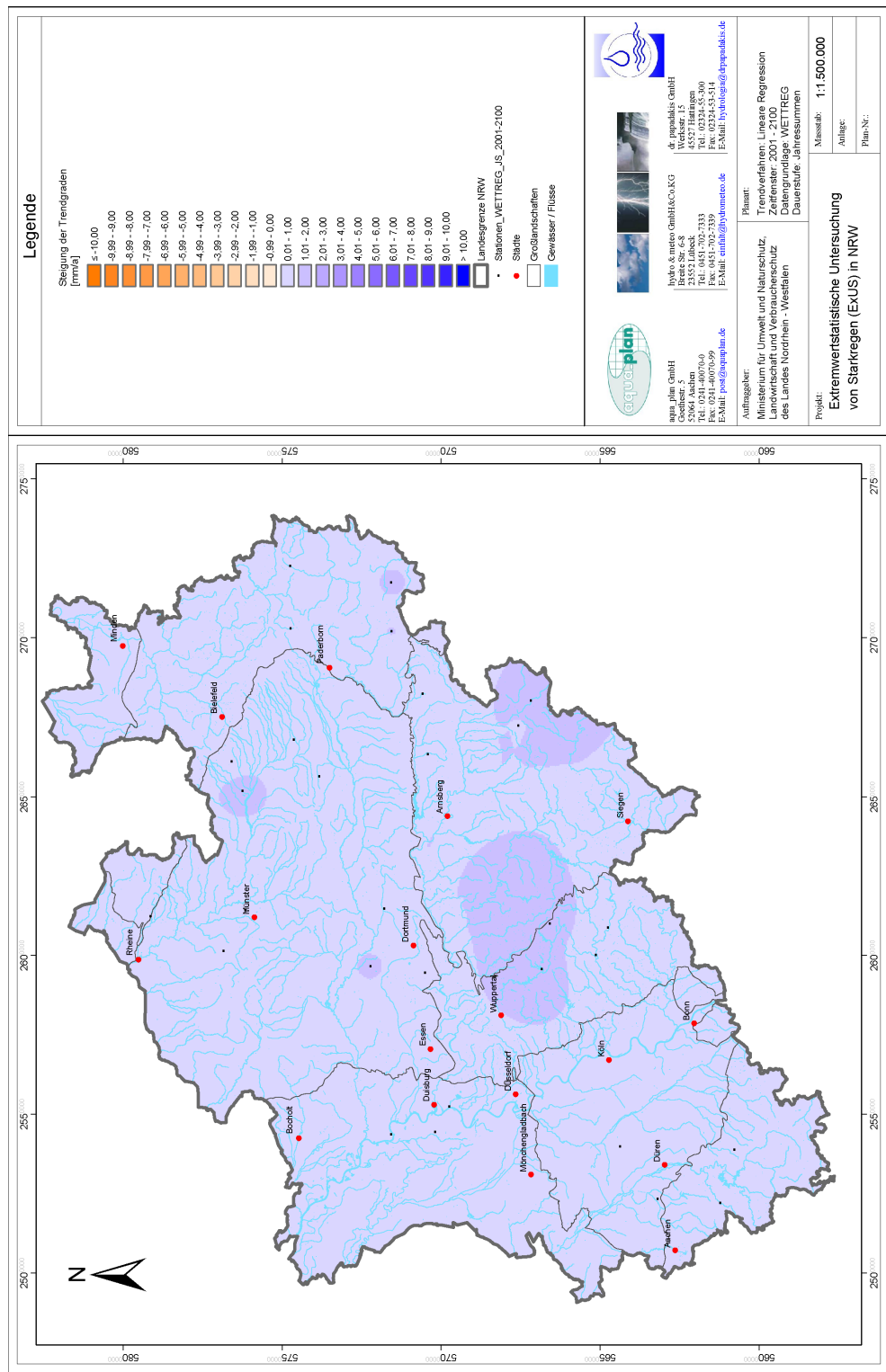


Abbildung 13.19: Räumliche Darstellung der Trends der Jahresniederschlagssummen für das Modell WETTREG aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100

Die Signifikanz der Trendentwicklungen ist entsprechend den Ausprägungen der Steigungen der Trendgeraden gering (CLM1/CLM2) oder hoch (WETTREG). Tabelle 13.9 (Lineare Regression) und Tabelle 13.10 (Mann-Kendall-Test) zeigen, dass beim Modell CLM der Anteil signifikanter Trends grundsätzlich gering ist. Nur beim Modellauf CLM1 weist der Mann-Kendall-Test mit 22 % einen etwas höheren Anteil an signifikant negativen Trends (auf einem Signifikanzniveau von 80 %) aus. Beim Modell WETTREG treten dagegen überwiegend signifikant positive Trends auf, an ca. der Hälfte der Stationen sogar mit einem Signifikanzniveau von mindestens 95 %.

Tabelle 13.9: Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Jahresniederschlagssummen in den Modelldaten (Ferne Zukunft 2001-2100)

Signifikanzniveaus der Trends (LR) – Jahressummen 2001-2100						
	CLM1 Trends [%]		CLM2 Trends [%]		WETTREG Trends [%]	
Signifikanz- niveau	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
< 80	22	72	38	63	28	0
80	3	3	0	0	14	0
90	0	0	0	0	10	0
95	0	0	0	0	38	0
99	0	0	0	0	10	0

Tabelle 13.10: Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Jahresniederschlagssummen in den Modelldaten (Ferne Zukunft 2001-2100)

Signifikanzniveaus der Trends (MKT) – Jahressummen 2001-2100						
	CLM1 Trends [%]		CLM2 Trends [%]		WETTREG Trends [%]	
Signifikanz- niveau [%]	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
< 80	25	50	28	72	24	0
80	0	22	0	0	10	0
90	0	3	0	0	17	0
95	0	0	0	0	34	0
99	0	0	0	0	14	0

In den Abbildungen 13.20 (Lineare Regression, CLM1), 13.21 (Lineare Regression, CLM2) und 13.22 (Lineare Regression, WETTREG) wird durch die Größe der Uhr an jeder Station neben dem Trend auch das jeweilige Signifikanzniveau und somit die Verteilung signifikanter Trends im Raum dargestellt. Die räumlichen Darstellungen für die Trendanalyse nach dem Mann-Kendall-Test befinden sich im Anhang H. In Tabelle 13.11 werden die wesentlichen Eigenschaften der Trends für die Ferne Zukunft in den drei Modellen/Modellläufen zusammengefasst. Detaillierte Informationen zu den drei Modellen/Modellläufen und beiden Trendverfahren, wie sie in den vorangegangenen Tabellen und Abbildungen exemplarisch dargestellt wurden, werden im Anhang H zusammengefasst.

Tabelle 13.11: Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Jahressummen in den drei Modellen/Modellläufen; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), Gesamtspanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test

Trendeigenschaften der drei Modelle/Modellläufe – Jahressummen, Ferne Zukunft				
Modell/ Modelllauf	Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden)	Gesamtspanne [mm/a]	Signifikanz	Unterschiede MKT/LR
CLM1	75 % negativ, 25 % positiv, 75 % der Trends liegen in der Klasse zwischen -2 mm/a und 0 mm/a	-1,1 bis +0,5	nur 6 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	treten an 28 % der Stationen auf; Signifikanz bei MKT auf einem insgesamt höheren Niveau als bei LR
CLM2	60 % negativ, 40 % positiv, 100 % der Trends liegen in den Klassen zwischen -2 mm/a und +2 mm/a	-0,5 bis +0,3	0 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	keine
WETTREG	ausschließlich positiv, 100 % der Trends liegen in der Klasse zwischen 0 mm/a und +2 mm/a	+0,2 bis +1,5	72 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 59 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	treten an 21 % der Stationen auf, ohne die Gesamtaussagen zu verfälschen

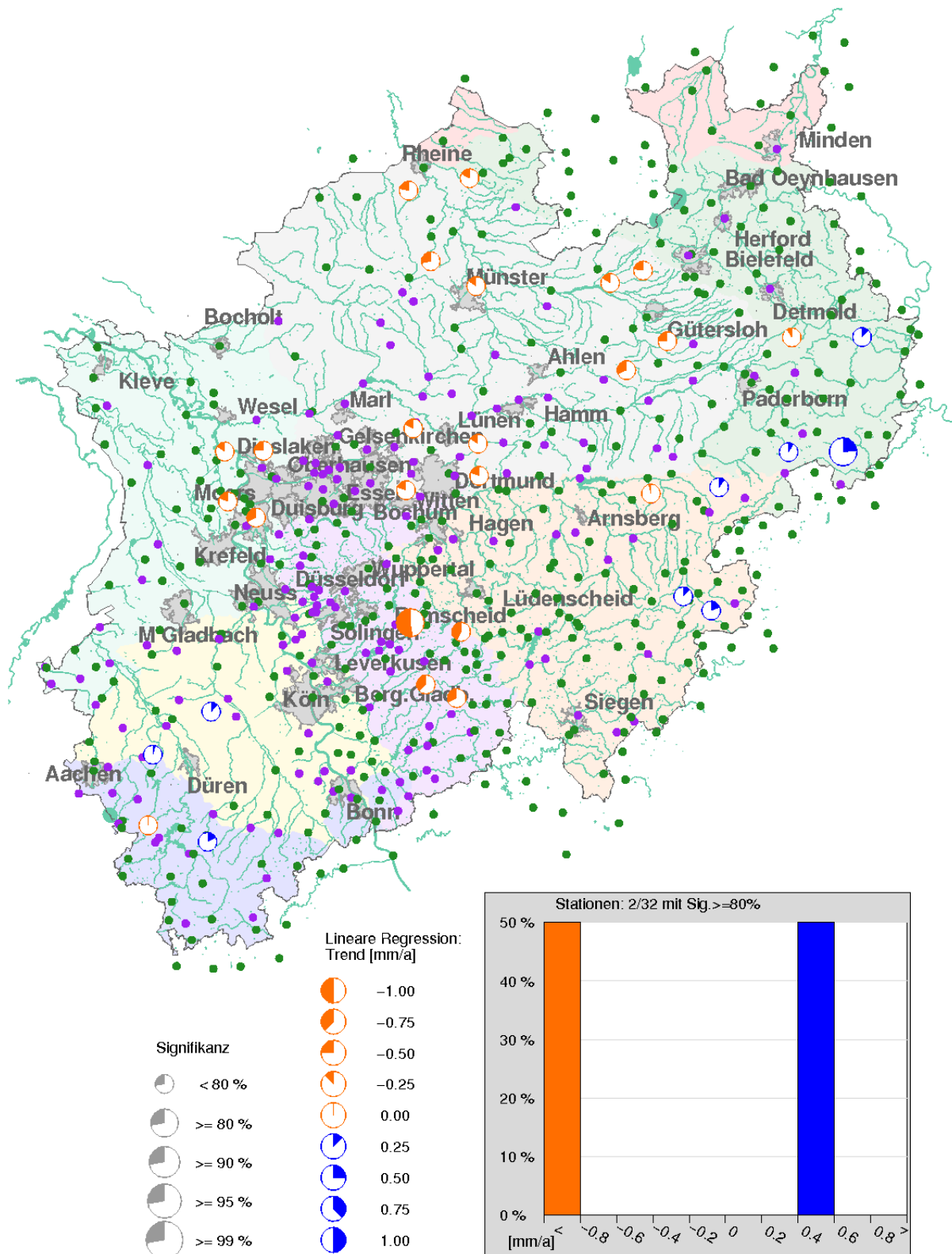


Abbildung 13.20: Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100

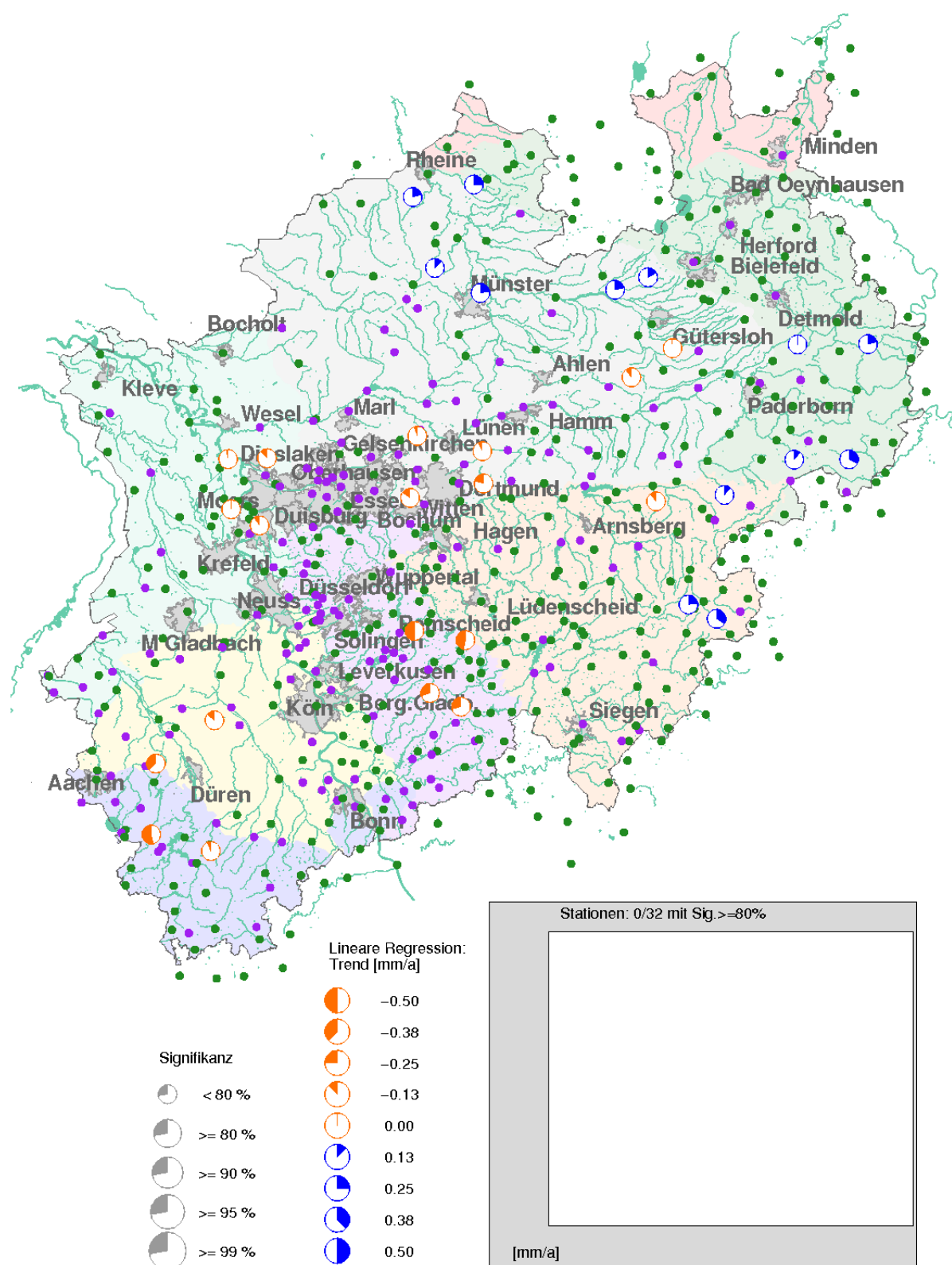


Abbildung 13.21: Trends der Jahresniederschlagssummen für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100

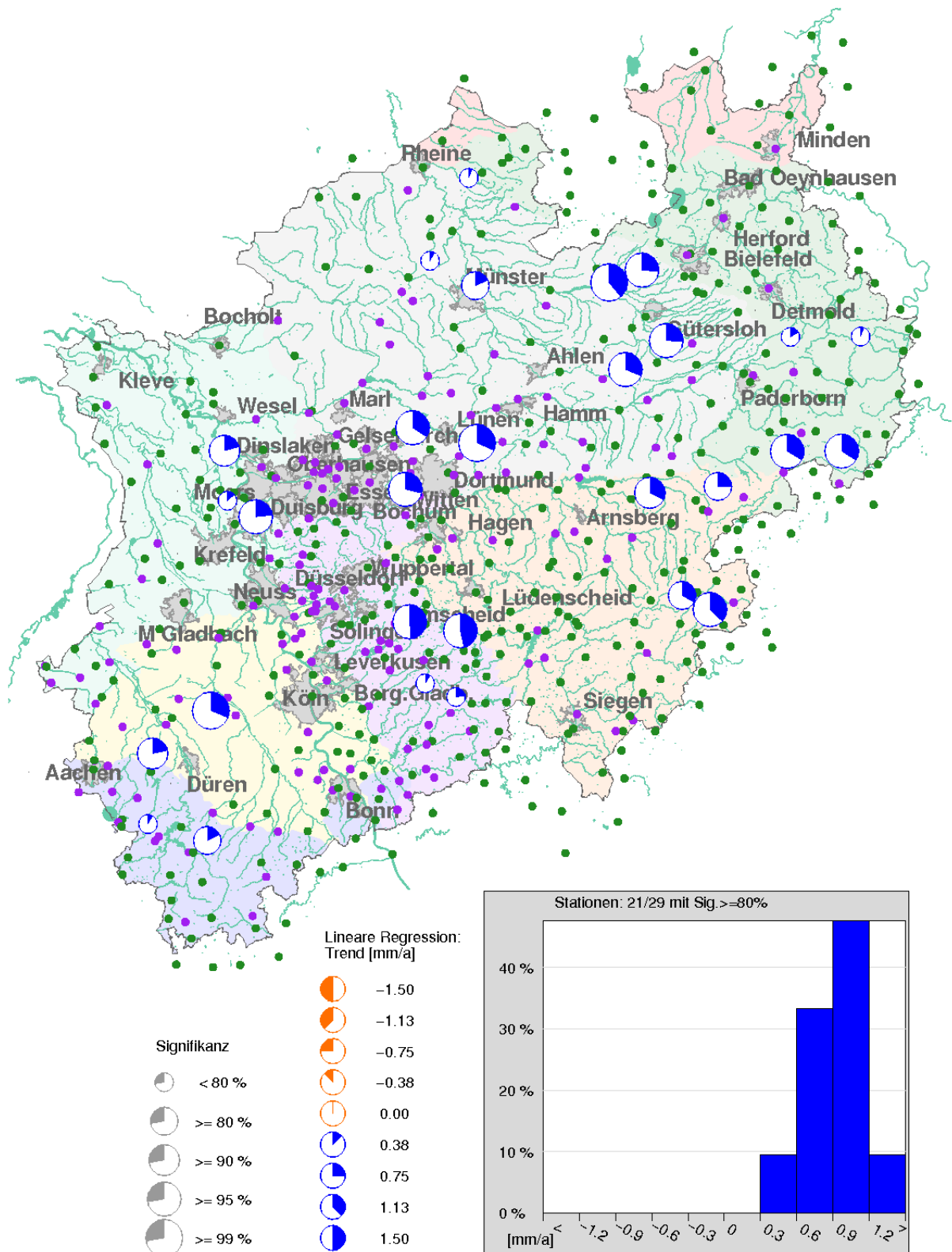


Abbildung 13.22: Trends der Jahresniederschlagssummen für das Modell WETTREG aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100

13.4.3 Regionale Besonderheiten

13.4.3.1 Räumliche Differenzierung der Trendanalysen für die Nahe Zukunft 2050

- **CLM1:** Im Modelllauf CLM1 treten überwiegend räumlich homogene nicht signifikante Zunahmen auf. Regionale Unterschiede können vernachlässigt werden.
- **CLM2:** Das Signifikanzniveau der Zunahmen liegt landesweit auf einem hohen Niveau (mindestens 80 %). Im Pack 8 (Niederrheinische Bucht/Eifel) sind die Zunahmen etwas weniger stark ausgeprägt, im Pack 2 (östliche Westfälische Bucht) und im Pack 7 (Bergisches Land) treten dagegen überdurchschnittliche Zunahmen auf einem hohen Signifikanzniveau auf.
- **WETTREG:** Wie bei CLM1 sind die Zunahmen überwiegend nicht signifikant. Lediglich in der Region an der Grenze des südlichen Pack 5 (südliche Westfälische Bucht/Ruhrgebiet) zum nördlichen Pack 7 (Bergisches Land) und im Pack 2 (östliche Westfälische Bucht) treten etwas größere Zunahmen auf. In beiden Regionen besitzen die Trends an jeweils einer Station ein Signifikanzniveau von 80 %.
- **STAR2:** Bei diesem Modell treten die größten regionalen Unterschiede auf, wobei das Signifikanzniveau überwiegend auf einem hohen Niveau liegt. Die größten Zunahmen auf einem durchweg hohen Signifikanzniveau (mindestens 90 %) treten im Pack 7 (Bergisches Land) auf, etwas unterdurchschnittliche Zunahmen mit einem geringen Signifikanzniveau (kleiner als 80 %) finden sich im südlichen Teil vom Pack 8 (Eifel).
- **Allgemein:** Insgesamt treten keine großen regionalen Unterschiede auf. Über alle vier Modelle/Modellläufe hinweg zeigen die Trends im Pack 7 (Bergisches Land) und im Pack 2 (östliche Westfälische Bucht) die größten und signifikantesten Zunahmen. Im südlichen Teil des Packs 8 (Eifel) treten dagegen überwiegend geringere Zunahmen auf.

13.4.3.2 Räumliche Differenzierung der Trendanalysen für die Ferne Zukunft 2100

- **CLM1:** Die überwiegend negativen Trends schwanken landesweit nur geringfügig um den Wert Null. Im Pack 7 (Bergisches Land) treten die insgesamt größten Abnahmen auf. Die Trends besitzen allerdings nur in einem Rasterfeld ein Signifikanzniveau von 80 %. Geringe, überwiegend nicht signifikante Zunahmen treten nur in den östlichen Landesteilen in den Packs 3 (Weserbergland) und 6 (östliches Sauer- und Siegerland) sowie im Südwesten in zwei Rasterfeldern des Packs 8 (Niederrheinische Bucht/Eifel) auf.
- **CLM2:** Ähnlich wie beim Modelllauf CLM1 schwanken die überwiegend negativen Trends landesweit nur geringfügig um den Wert Null. Das Pack 7 (Bergisches Land) sticht wiederum durch seine landesweit größten Abnahmen hervor. Anders

als im Modelllauf CLM1 treten im Pack 8 (Niederrheinische Bucht/Eifel) negative Trends auf, die sogar in einer vergleichbaren Größenordnung wie beim Pack 7 liegen. Dagegen nehmen neben den Packs 3 (Weserbergland) und 6 (östliches Sauer- und Siegerland) beim Modelllauf CLM2 auch die Trends im Pack 1 (nordwestliche Westfälische Bucht) und die nördlichen Rasterfelder im Pack 2 (östliche Westfälische Bucht) auf einem nicht signifikanten Niveau zu.

- **WETTREG:** Die Trends beim Modell WETTREG liegen auf einem überwiegend signifikant positiven Niveau. Es treten zwar einzelne Stationen auf, die etwas nach oben oder unten herausstechen, die regionalen Unterschiede sind aber gering und nicht auf einzelne Packs/Großlandschaften konzentriert.
- **Allgemein:** In der Fernen Zukunft treten regionale Unterschiede in den Trends in den Hintergrund und sind noch weniger stark ausgeprägt als in der Nahen Zukunft. Auffälliger als die regionalen Unterschiede sind die Unterschiede der Trends in den Modellen CLM und WETTREG.

13.4.4 Zusammenfassung zu den Jahresniederschlagssummen

Aufgrund der trockenen Dekaden in den Modelldaten am Ende des 20. Jahrhunderts besitzen die Modelldaten im Referenzzeitraum 1961-1990 einen ähnlich negativen Trend, wie er in den Messdaten im Zeitraum 1950-1979 festgestellt wurde.

Für die Nahe Zukunft (2050) besitzen die Jahresniederschlagssummen ausschließlich positive Trends. Die Zunahmen und ihre Signifikanz sind in den Modellen/Modellläufen CLM1/WETTREG (geringe Zunahme/Signifikanz) und in den Modellen/Modellläufen CLM2/STAR2 (hohe Zunahme/Signifikanz) unterschiedlich stark ausgeprägt.

In der Fernen Zukunft (2100) liefern die Modelldaten der Modelle CLM und WETTREG unterschiedliche Trendaussagen. Dabei sind die Aussagen in den Modellläufen CLM1 und CLM2 vergleichbar. Während sich in den CLM-Modellläufen die Trends um den Wert Null bewegen und überwiegend nicht signifikant sind (Signifikanzniveau $< 80\%$), treten in WETTREG überwiegend signifikant positive Trends mit Zunahmen bis zu $+1,5$ mm/Jahr auf.

In der Nahen Zukunft werden bei den Trends regionale Unterschiede festgestellt. Über alle vier Modelle/Modellläufe hinweg zeigen die Trends im Pack 7 (Bergisches Land) und im Pack 2 (östliche Westfälische Bucht) die größten und signifikantesten Zunahmen. Im südlichen Teil des Packs 8 (Eifel) treten dagegen überwiegend geringere Zunahmen auf. In der Fernen Zukunft treten die regionalen Unterschiede in den Trends dagegen in den Hintergrund und sind nur noch weniger stark ausgeprägt als in der Nahen Zukunft. Auffälliger als die regionalen Unterschiede sind die Unterschiede der Trends in den Modellen CLM und WETTREG.

13.5 Halbjahresniederschlagssummen

Die Trendanalysen der Halbjahresniederschlagssummen werden wie bei den Messwerten mit dem Mann-Kendall-Test und dem Verfahren der linearen Regression (Bestimmung der Signifikanz über t-Test) durchgeführt ($\hookrightarrow$ Kap. 7.1 und 7.2). Die Normalverteilung der Halbjahresniederschlagssummen zur Berechtigung der Durchführung des t-Tests wurde im Kapitel 7.4.3.2 anhand von Messwerten nachgewiesen.

13.5.1 Ergebnisinterpretation für Gesamt-NRW

13.5.1.1 Vergleich der Trends in den Modelldaten mit denen der historischen Messdaten im Referenzzeitraum 1961-1990

Im Kapitel 13.4.2 wurde gezeigt, dass das Trendverhalten in den Modelldaten im Referenzzeitraum 1961-1990 besser mit den Trends in den Messdaten im Zeitraum 1950-1979 als mit dem zeitgleichen Zeitfenster 1961-1990 übereinstimmt.

Betrachtet man die gemessenen und modellierten Halbjahresniederschlagssummen, so zeigt sich, dass die etwas zeitversetzte Übereinstimmung primär durch die Niederschläge im Sommerhalbjahr beeinflusst wird. Tabelle 13.12 zeigt die relativ gute Übereinstimmung der negativen Trends für das Sommerhalbjahr in den Messdaten im Zeitraum 1950-1979 mit den negativen Trends in den Modelldaten im Zeitraum 1961-1990.

Im Winterhalbjahr stimmen dagegen die Trends in den Modelldaten im Zeitraum 1961-1990 gut mit den Trends in den Messdaten für beide Zeiträume 1950-1979 und 1961-1990 überein ($\hookrightarrow$ Tab. 13.13). Die räumlichen Darstellungen der Trends für das Sommer- und Winterhalbjahr im Referenzzeitraum 1961-1990 können für alle Modelle/Modellläufe dem Anhang H entnommen werden.

Tabelle 13.12: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Messdaten in den Zeitfenstern 1961-1990 (417 Stationen) und 1950-1979 (346 Stationen) und in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in Messdaten vs. Daten aus regionalen Klimamodellen					
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl Messdaten 1961-1990 [%]	Anzahl Messdaten 1950-1979 [%]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]
< -10	0	1	0	0	0
-10 bis -8	0	1	0	0	0
-8 bis -6	0	8	9	0	0
-6 bis -4	1	27	19	0	7
-4 bis -2	0	47	66	3	45
-2 bis 0	10	14	6	84	45
0 bis 2	49	1	0	13	3
2 bis 4	31	0	0	0	0
4 bis 6	8	0	0	0	0
6 bis 8	1	0	0	0	0
8 bis 10	0	0	0	0	0
> 10	0	0	0	0	0

Tabelle 13.13: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Messdaten in den Zeitfenstern 1961-1990 (415 Stationen) und 1950-1979 (344 Stationen) und in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für den Referenzzeitraum 1961-1990 nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in Messdaten vs. Daten aus regionalen Klimamodellen					
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl Messdaten 1961-1990 [%]	Anzahl Messdaten 1950-1979 [%]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]
< -10	0	0	0	0	0
-10 bis -8	0	0	0	0	0
-8 bis -6	0	0	0	0	0
-6 bis -4	0	1	0	9	0
-4 bis -2	5	4	0	44	0
-2 bis 0	20	30	25	41	45
0 bis 2	41	49	66	6	52
2 bis 4	20	13	9	0	3
4 bis 6	8	2	0	0	0
6 bis 8	4	1	0	0	0
8 bis 10	1	0	0	0	0
> 10	0	0	0	0	0

13.5.1.2 Bewertung der Trendanalysen für die Nahe Zukunft 2050, Winterhalbjahr

Bei den Trendanalysen für die Nahe Zukunft (2001-2050) zeigen sich in allen Modellen/Modellläufen ausschließlich positive Trends ($\leftrightarrow$ Tab. 13.14). Die Trendanalysen für CLM1 und WETTREG auf der einen Seite und CLM2 und STAR2 auf der anderen Seite liefern jeweils untereinander ähnliche Ergebnisse. Die Trendentwicklungen im Winterhalbjahr ähneln insgesamt sehr stark den Trends der Jahresniederschlagssummen. In Abbildung 13.23 ist die für CLM1/WETTREG typische Verteilung dargestellt, in Abbildung 13.24 die für CLM2/STAR2 typische Verteilung.

Die räumliche Verteilung der Trends in den Halbjahresniederschlagssummen des Winterhalbjahres (Lineare Regression, Steigung der Trendgeraden) für die Nahe Zukunft sind für die beiden Realisierungen im Modell CLM in Abbildung 13.25 (CLM1) und Abbildung 13.26 (CLM2) exemplarisch dargestellt.

Die Bewertung regionaler Unterschiede erfolgt im Kapitel 13.5.2. Die räumlichen Darstellungen der anderen Modelle und für die Trendanalyse nach dem Mann-Kendall-Test befinden sich im Anhang H.

Die Steigungen der Trendgeraden liegen für die Modelle/Modellläufe CLM1 und WETTREG beim Verfahren der linearen Regression zwischen +0,3 mm/Jahr und +0,9 mm/Jahr (CLM1) bzw. +0,2 mm/Jahr und +1,3 mm/Jahr (WETTREG). In den Modellen/Modellläufen CLM2 und STAR2 sind die Spannen zwischen +0,6 mm/Jahr und +2,7 mm/Jahr (CLM2) bzw. +0,9 mm/Jahr und +3,9 mm/Jahr (STAR2) stärker positiv ausgeprägt und größer.

Tabelle 13.14: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG/STAR2: 29 Stationen) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten Winterhalbjahr – Nahe Zukunft 2001-2050				
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]	Anzahl STAR2 [%]
< -10	0	0	0	0
-10 bis -8	0	0	0	0
-8 bis -6	0	0	0	0
-6 bis -4	0	0	0	0
-4 bis -2	0	0	0	0
-2 bis 0	0	0	0	0
0 bis 2	100	56	100	59
2 bis 4	0	44	0	41
4 bis 6	0	0	0	0
6 bis 8	0	0	0	0
8 bis 10	0	0	0	0
> 10	0	0	0	0

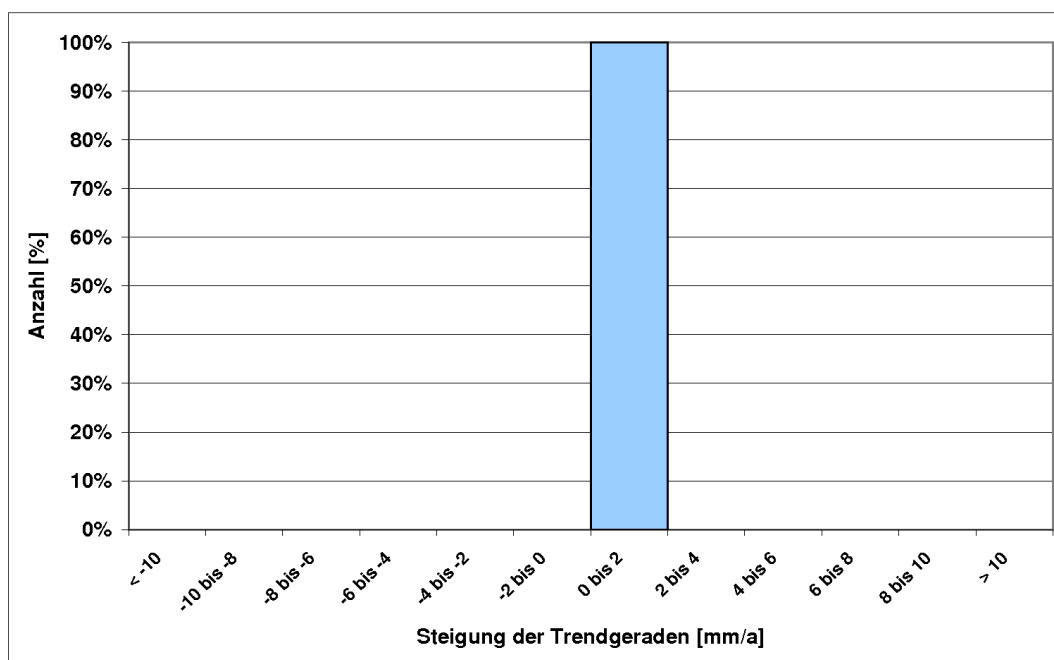


Abbildung 13.23: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den CLM1-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression

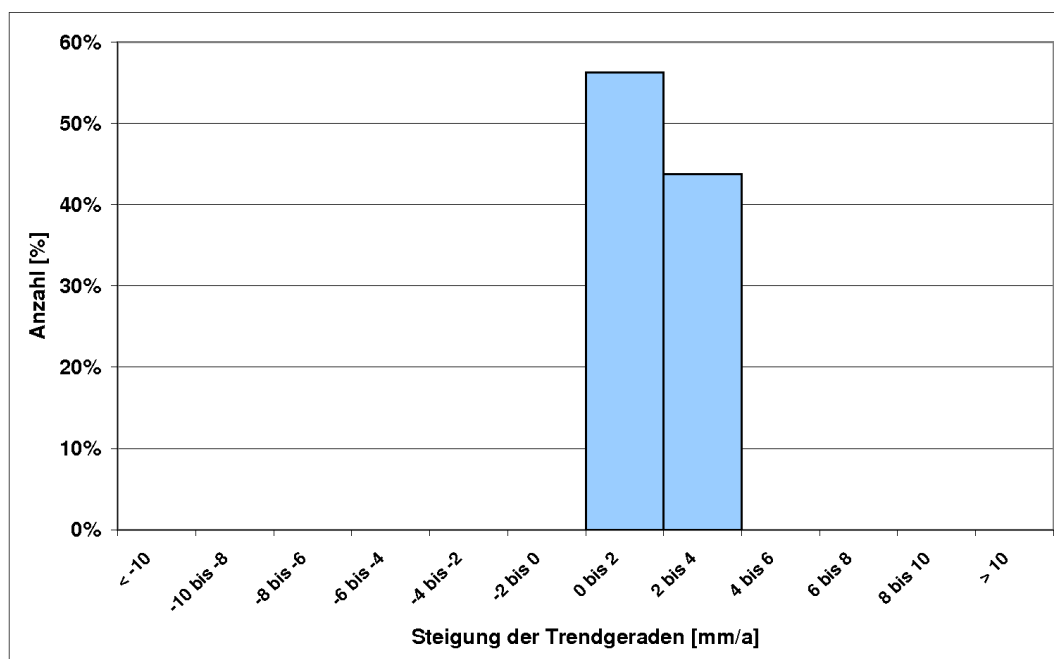


Abbildung 13.24: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den CLM2-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression

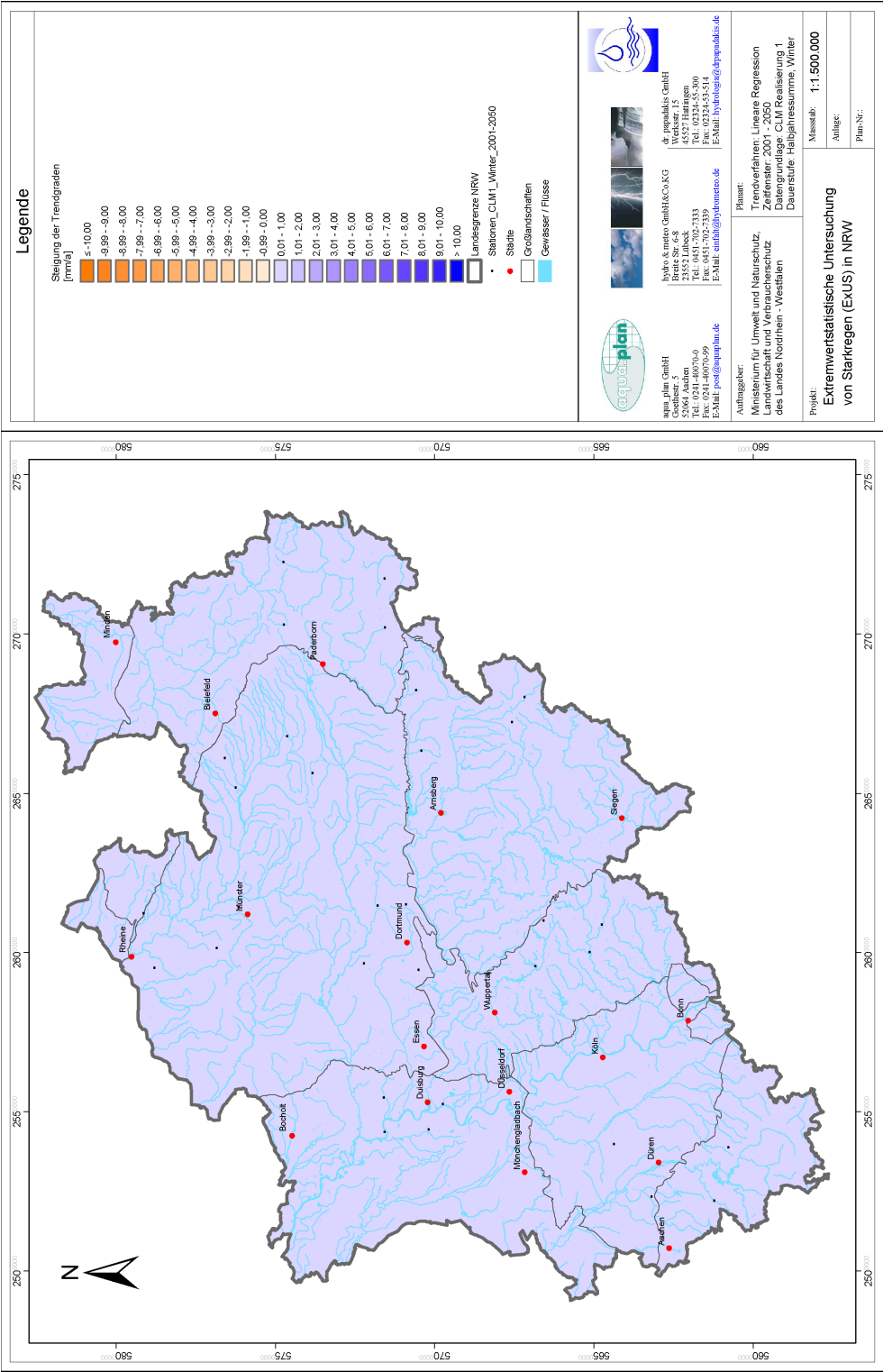


Abbildung 13.25: Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression für die Nahe Zukunft 2001-2050

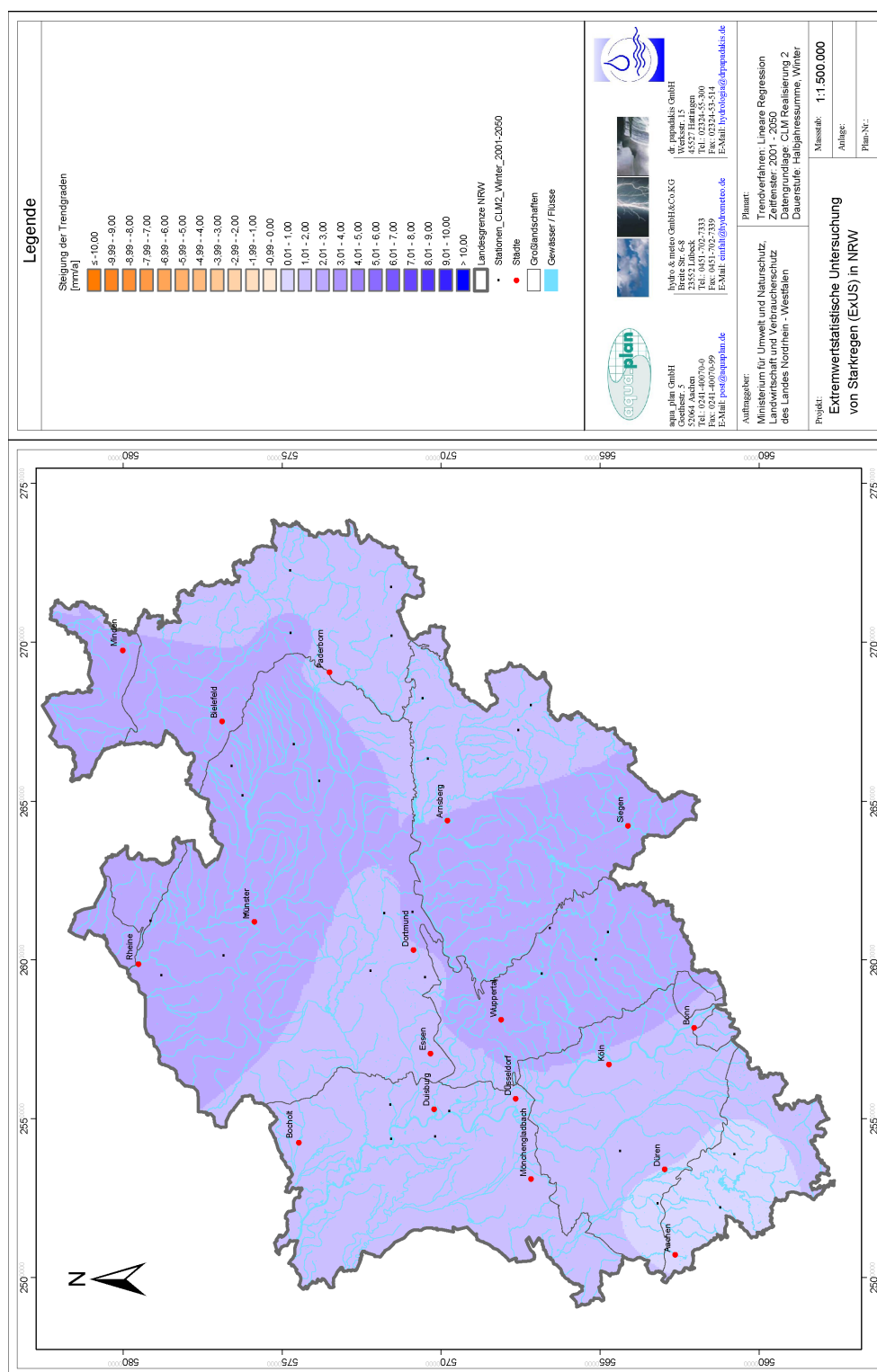


Abbildung 13.26: Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression für die Nahe Zukunft 2001-2050

Die Signifikanz der positiven Trendentwicklungen ist entsprechend den Ausprägungen der Steigungen der Trendgeraden gering (CLM1/WETTREG) oder hoch (CLM2/STAR2). Tabelle 13.15 (Lineare Regression) und Tabelle 13.16 (Mann-Kendall-Test) zeigen, dass bei beiden Trendverfahren in den Modellen/Modellläufen CLM1/WETTREG der Anteil signifikanter Trends bei maximal 10 % liegt. Bei den Modellen/Modellläufen CLM2/STAR2 streuen die Einzelwerte je nach Trendverfahren und Modell etwas stärker, die signifikant positive Trendentwicklung wird aber durch beide Verfahren in beiden Modellen nachgewiesen.

Tabelle 13.15: Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Modelldaten (Nahe Zukunft 2001-2050)

Signifikanzniveaus der Trends (LR) – Winterhalbjahr 2001-2050								
	CLM1 Trends [%]		CLM2 Trends [%]		WETTREG Trends [%]		STAR2 Trends [%]	
Signifikanz- niveau [%]	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
< 80	100	0	3	0	97	0	7	0
80	0	0	13	0	3	0	3	0
90	0	0	22	0	0	0	28	0
95	0	0	50	0	0	0	55	0
99	0	0	13	0	0	0	7	0

Tabelle 13.16: Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Modelldaten (Nahe Zukunft 2001-2050)

Signifikanzniveaus der Trends (MKT) – Winterhalbjahr 2001-2050								
	CLM1 Trends [%]		CLM2 Trends [%]		WETTREG Trends [%]		STAR2 Trends [%]	
Signifikanz- niveau [%]	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
< 80	100	0	6	0	90	0	17	0
80	0	0	16	0	7	0	28	0
90	0	0	31	0	3	0	38	0
95	0	0	47	0	0	0	14	0
99	0	0	0	0	0	0	3	0

In Abbildung 13.27 (Lineare Regression, CLM1) und Abbildung 13.28 (Lineare Regression, CLM2) werden durch die Größe der Uhr an jeder Station neben dem Trend auch

das jeweilige Signifikanzniveau und somit die Verteilung signifikanter Trends im Raum dargestellt. Die räumlichen Darstellungen der anderen Modelle und für die Trendanalyse nach dem Mann-Kendall-Test befinden sich im Anhang H.

In Tabelle 13.17 werden die wesentlichen Eigenschaften der Trends für die Nahe Zukunft in den vier Modellen/Modellläufen zusammengefasst. Die Angaben für das Winterhalbjahr entsprechen im Wesentlichen den Aussagen zu den Jahresniederschlagssummen ($\leftrightarrow$ Tab. 13.7). Detaillierte Informationen zu den vier Modellen/Modellläufen und beiden Trendverfahren, wie sie in den vorangegangenen Tabellen und Abbildungen exemplarisch dargestellt wurden, werden im Anhang H zusammengefasst.

Tabelle 13.17: Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Halbjahressummen (Winterhalbjahr) in den vier Modellen/Modellläufen; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), Gesamtspanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test

Trendeigenschaften der vier Modelle/Modellläufe – Winterhalbjahr, Nahe Zukunft				
Modell/ Modelllauf	Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden)	Gesamtspanne [mm/a]	Signifikanz	Unterschiede MKT/LR
CLM1	ausschließlich positiv, 100 % der Trends liegen in der Klasse zwischen 0 mm/a und +2 mm/a	+0,3 bis +0,9	0 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	keine
CLM2	ausschließlich positiv, 100 % der Trends liegen in den Klassen zwischen 0 mm/a und +4 mm/a	+0,6 bis +2,7	97 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 84 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	treten an 38 % der Stationen auf, ohne die Gesamtaussagen zu verfälschen
WETTREG	ausschließlich positiv, 100 % der Trends liegen in der Klasse zwischen 0 mm/a und +2 mm/a	+0,2 bis +1,3	nur 3 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	gering
STAR2	ausschließlich positiv, 100 % der Trends liegen in den Klassen zwischen 0 mm/a und +4 mm/a	+0,9 bis +3,9	93 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 90 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	treten an 66 % der Stationen auf; Signifikanz bei LR auf einem insgesamt höheren Niveau als bei MKT

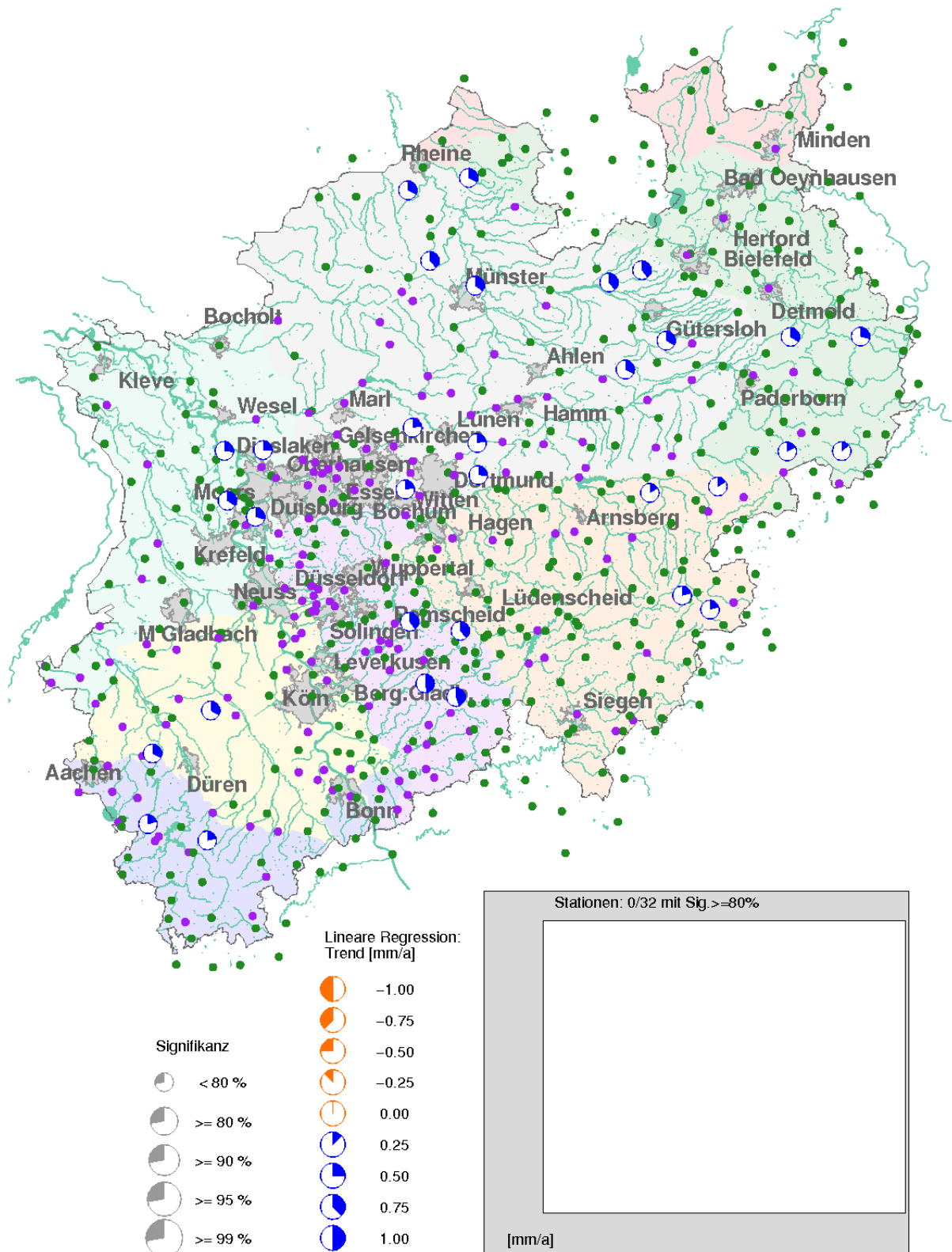


Abbildung 13.27: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Nahe Zukunft 2001-2050

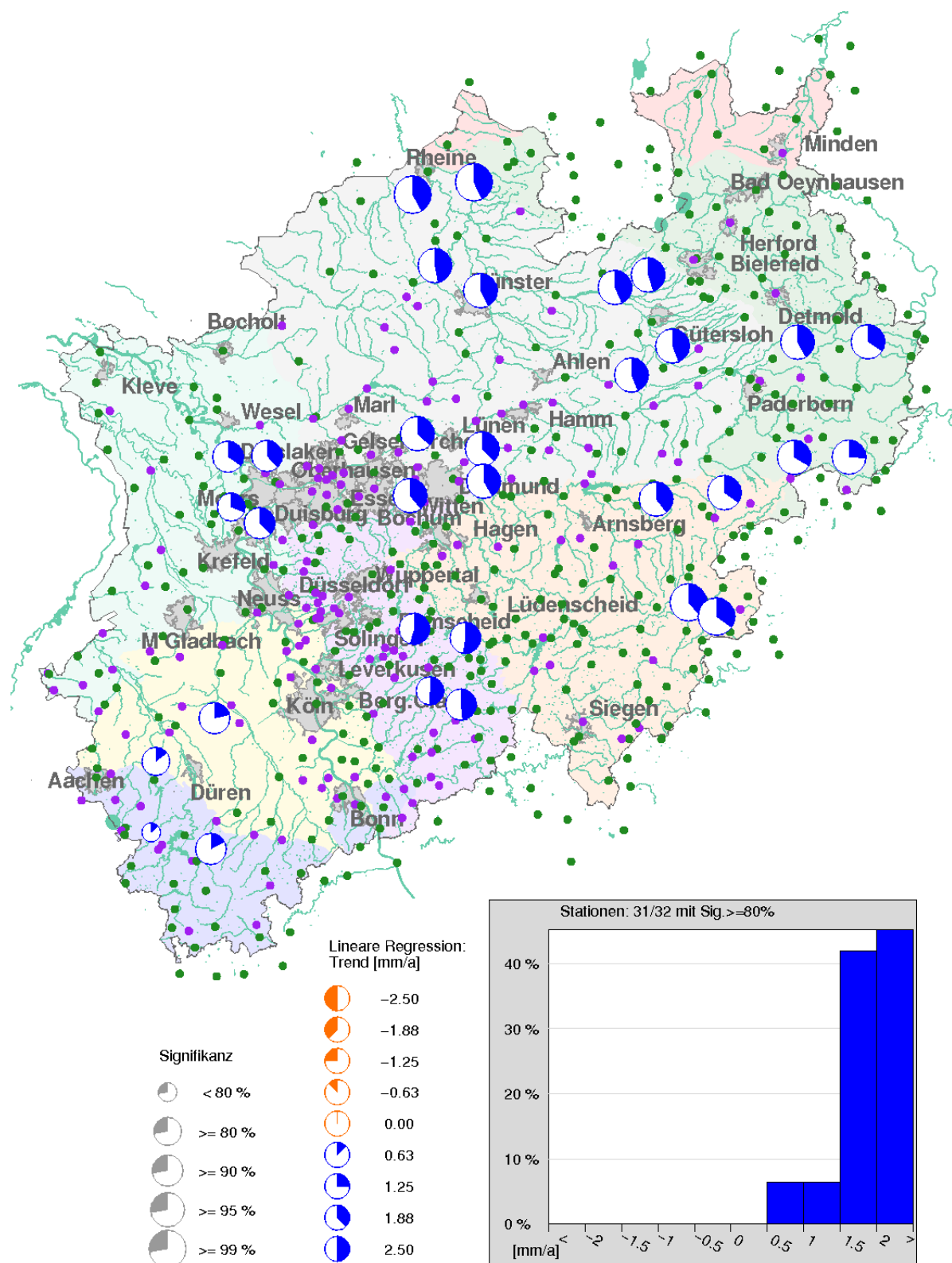


Abbildung 13.28: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Nahe Zukunft 2001-2050

13.5.1.3 Bewertung der Trendanalysen für die Nahe Zukunft 2050, Sommerhalbjahr

Bei den Trendanalysen für die Nahe Zukunft (2001-2050) zeigen sich in den Modellen/Modellläufen CLM1 und WETTREG geringe Trendentwicklungen um den Wert Null. Die Trends in den Modellen/Modellläufen CLM2 und STAR2 liegen in einer insgesamt größeren Spanne und sind überwiegend positiv ($\leftrightarrow$ Tab. 13.18). Die Übereinstimmungen zwischen CLM1/WETTREG bzw. zwischen CLM2/STAR2 sind immer noch gegeben, sie sind aber nicht mehr so stark ausgeprägt wie bei den Jahresniederschlagssummen und wie im Winterhalbjahr. In Abbildung 13.29 ist eine für CLM1/WETTREG typische Verteilung dargestellt, in Abbildung 13.30 eine für CLM2/STAR2 typische Verteilung.

Die räumliche Verteilung der Trends in den Halbjahresniederschlagssummen des Sommerhalbjahres (Lineare Regression, Steigung der Trendgeraden) für die Nahe Zukunft sind für die beiden Realisierungen im Modell CLM in Abbildung 13.31 (CLM1) und Abbildung 13.32 (CLM2) exemplarisch dargestellt. Die Bewertung regionaler Unterschiede erfolgt im Kapitel 13.5.2. Die räumlichen Darstellungen der anderen Modelle und für die Trendanalyse nach dem Mann-Kendall-Test befinden sich im Anhang H.

Die Steigungen der Trendgeraden liegen für die Modelle/Modellläufe CLM1 und WETTREG beim Verfahren der linearen Regression zwischen -0,7 mm/Jahr und +0,5 mm/Jahr (CLM1) bzw. -1,1 mm/Jahr und +1,0 mm/Jahr (WETTREG). In den Modellen/Modellläufen CLM2 und STAR2 sind die Spannen zwischen +0,7 mm/Jahr und +2,2 mm/Jahr (CLM2) bzw. -1,3 mm/Jahr und +2,4 mm/Jahr (STAR2) stärker positiv ausgeprägt und größer.

Tabelle 13.18: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG/STAR2: 29 Stationen) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten Sommerhalbjahr – Nahe Zukunft 2001-2050				
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]	Anzahl STAR2 [%]
< -10	0	0	0	0
-10 bis -8	0	0	0	0
-8 bis -6	0	0	0	0
-6 bis -4	0	0	0	0
-4 bis -2	0	0	0	0
-2 bis 0	50	0	34	10
0 bis 2	50	91	66	76
2 bis 4	0	9	0	41
4 bis 6	0	0	0	0
6 bis 8	0	0	0	0
8 bis 10	0	0	0	0
> 10	0	0	0	0

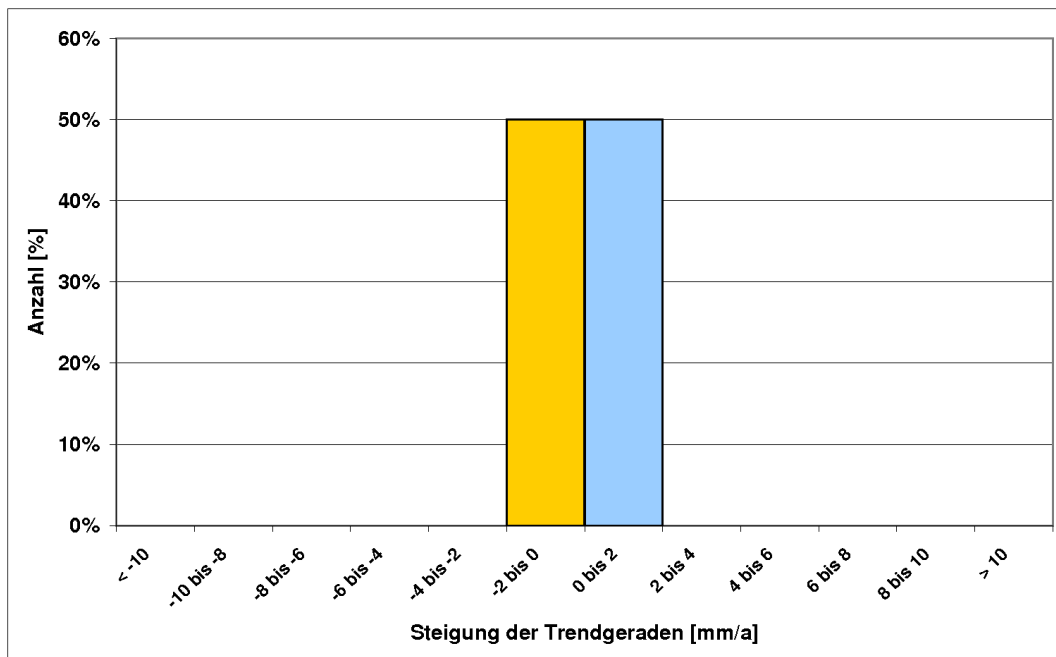


Abbildung 13.29: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den CLM1-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression

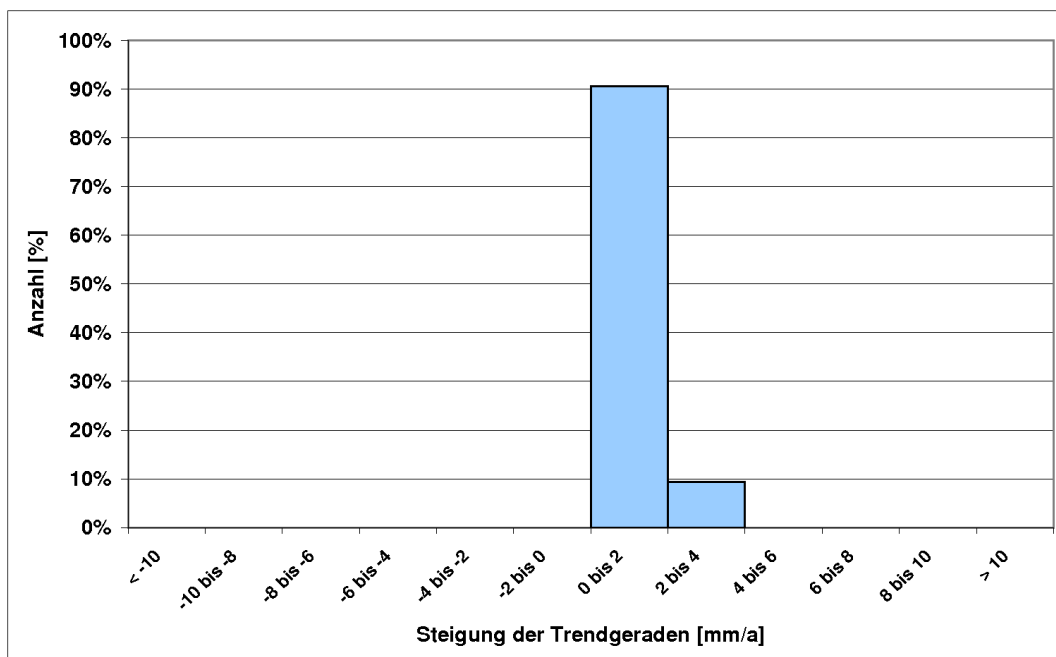


Abbildung 13.30: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den CLM2-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Nahe Zukunft 2001-2050 nach dem Verfahren der linearen Regression

Die Signifikanz der positiven Trendentwicklungen ist entsprechend den Ausprägungen der Steigungen der Trendgeraden nicht vorhanden (CLM1/WETTREG) oder hoch (CLM2/STAR2). Tabelle 13.19 (Lineare Regression) und Tabelle 13.20 (Mann-Kendall-Test) zeigen, dass bei beiden Trendverfahren in den Modellen/Modellläufen CLM1/WETTREG keine signifikanten Trends auftreten. Bei den Modellen/Modellläufen CLM2/STAR2 streuen die Einzelwerte je nach Trendverfahren und Modell etwas stärker, die überwiegend signifikant positive Trendentwicklung wird aber durch beide Verfahren in beiden Modellen nachgewiesen.

Tabelle 13.19: Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Modelldaten (Nahe Zukunft 2001-2050)

Signifikanzniveaus der Trends (LR) – Sommerhalbjahr 2001-2050								
	CLM1 Trends [%]		CLM2 Trends [%]		WETTREG Trends [%]		STAR2 Trends [%]	
Signifikanz- niveau [%]	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
< 80	50	50	22	0	66	34	31	10
80	0	0	31	0	0	0	31	0
90	0	0	34	0	0	0	14	0
95	0	0	13	0	0	0	14	0
99	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 13.20: Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Modelldaten (Nahe Zukunft 2001-2050)

Signifikanzniveaus der Trends (MKT) – Sommerhalbjahr 2001-2050								
	CLM1 Trends [%]		CLM2 Trends [%]		WETTREG Trends [%]		STAR2 Trends [%]	
Signifikanz- niveau [%]	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
< 80	53	47	28	0	62	38	42	10
80	0	0	25	0	0	0	28	0
90	0	0	31	0	0	0	7	0
95	0	0	16	0	0	0	14	0
99	0	0	0	0	0	0	3	0

In Abbildung 13.33 (Lineare Regression, CLM1) und Abbildung 13.34 (Lineare Regression, CLM2) werden durch die Größe der Uhr an jeder Station neben dem Trend auch das jeweilige Signifikanzniveau und somit die Verteilung signifikanter Trends im Raum dargestellt. Die räumlichen Darstellungen der anderen Modelle und für die Trendanalyse nach dem Mann-Kendall-Test befinden sich im Anhang H.

In Tabelle 13.21 werden die wesentlichen Eigenschaften der Trends für die Nahe Zukunft in den vier Modellen Modellläufen zusammengefasst. Detaillierte Informationen zu den vier Modellen/Modellläufen und beiden Trendverfahren, wie sie in den vorangegangenen Tabellen und Abbildungen exemplarisch dargestellt wurden, werden im Anhang H zusammengefasst.

Tabelle 13.21: Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Halbjahressummen (Sommerhalbjahr) in den vier Modellen/Modellläufen; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), Gesamtspanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test

Trendeigenschaften der vier Modelle/Modellläufe – Sommerhalbjahr, Nahe Zukunft				
Modell/ Modelllauf	Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden)	Gesamtspanne [mm/a]	Signifikanz	Unterschiede MKT/LR
CLM1	50 % positiv, 50 % negativ, 100 % der Trends liegen in der Klasse zwischen 0 mm/a und +2 mm/a	-0,7 bis +0,5	0 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	keine
CLM2	ausschließlich positiv, 91 % der Trends liegen in der Klasse zwischen 0 mm/a und +2 mm/a	+0,7 bis +2,2	78 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 47 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	treten an 28 % der Stationen auf, ohne die Gesamtaussagen zu verfälschen
WETTREG	67 % positiv, 33 % negativ, 100 % der Trends liegen in den Klassen zwischen -2 mm/a und +2 mm/a	-1,1 bis +1,0	0 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %	keine
STAR2	überwiegend positiv, 76 % der Trends liegen in der Klasse zwischen 0 mm/a und +2 mm/a	-1,3 bis +2,4	59 % der Trends auf einem Niveau ≥ 80 %; 28 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %	treten an 28 % der Stationen auf; Signifikanz bei LR auf einem insgesamt höheren Niveau als bei MKT

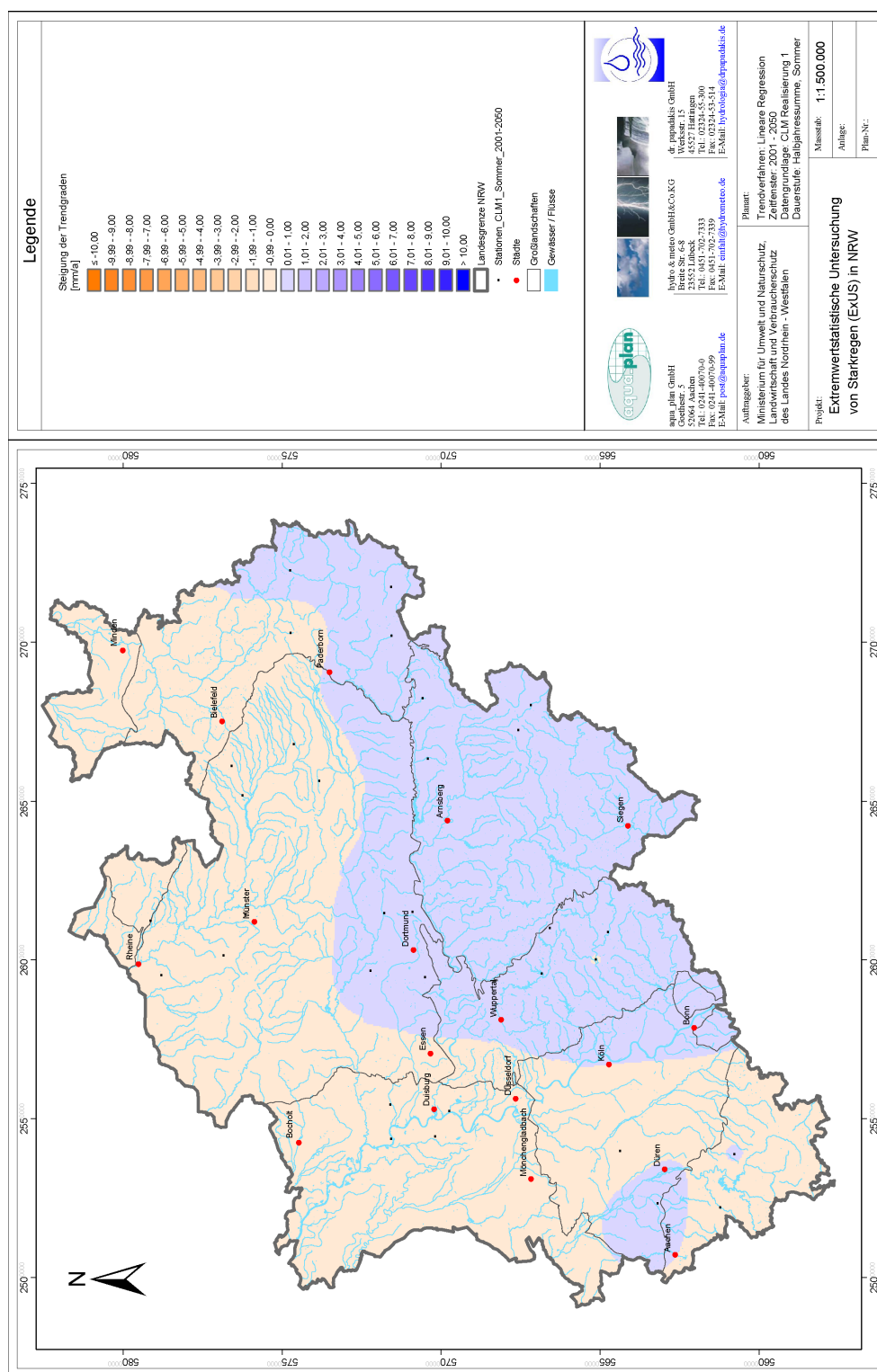


Abbildung 13.31: Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression für die Nahe Zukunft 2001-2050

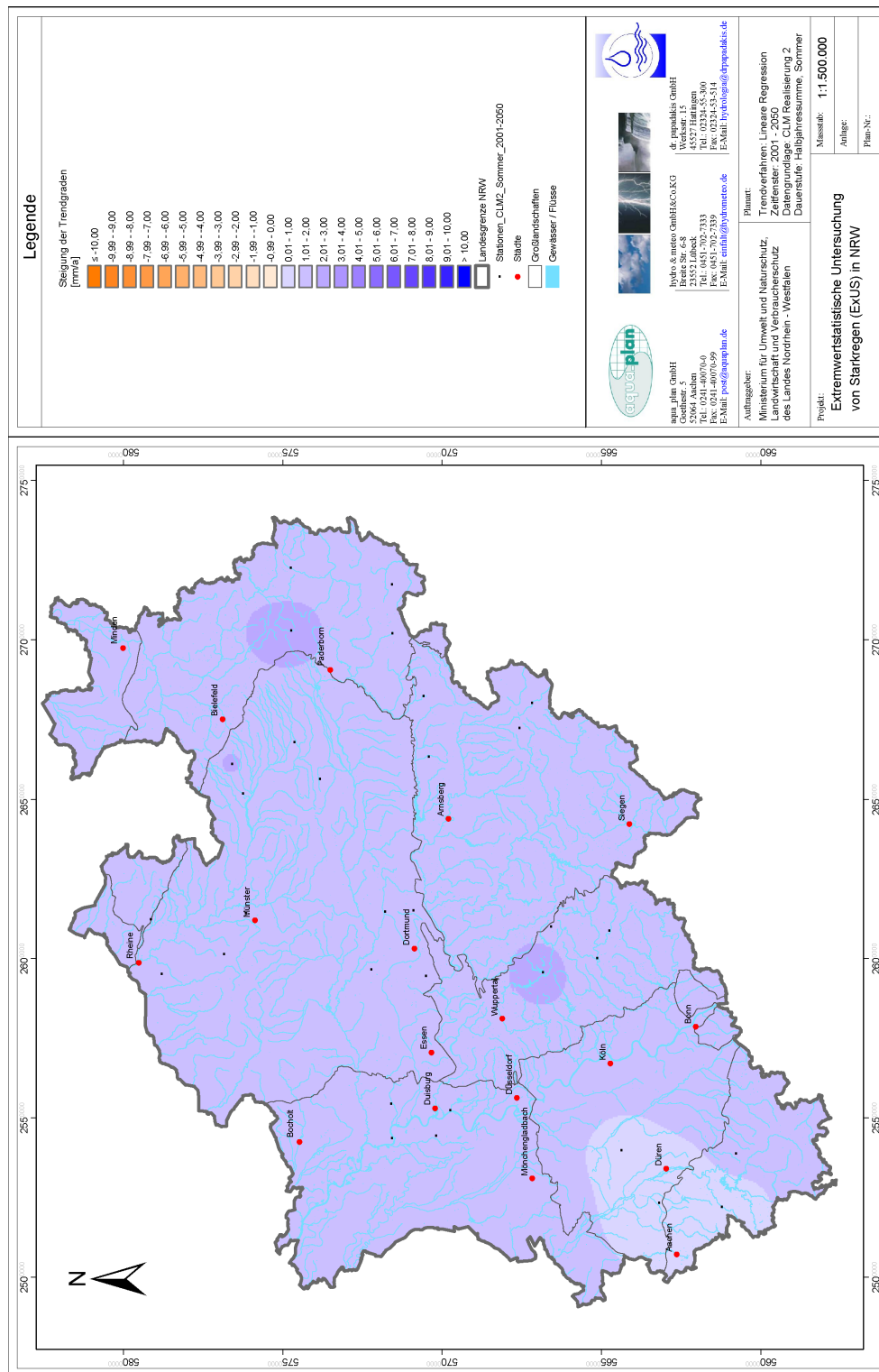


Abbildung 13.32: Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression für die Nahe Zukunft 2001-2050

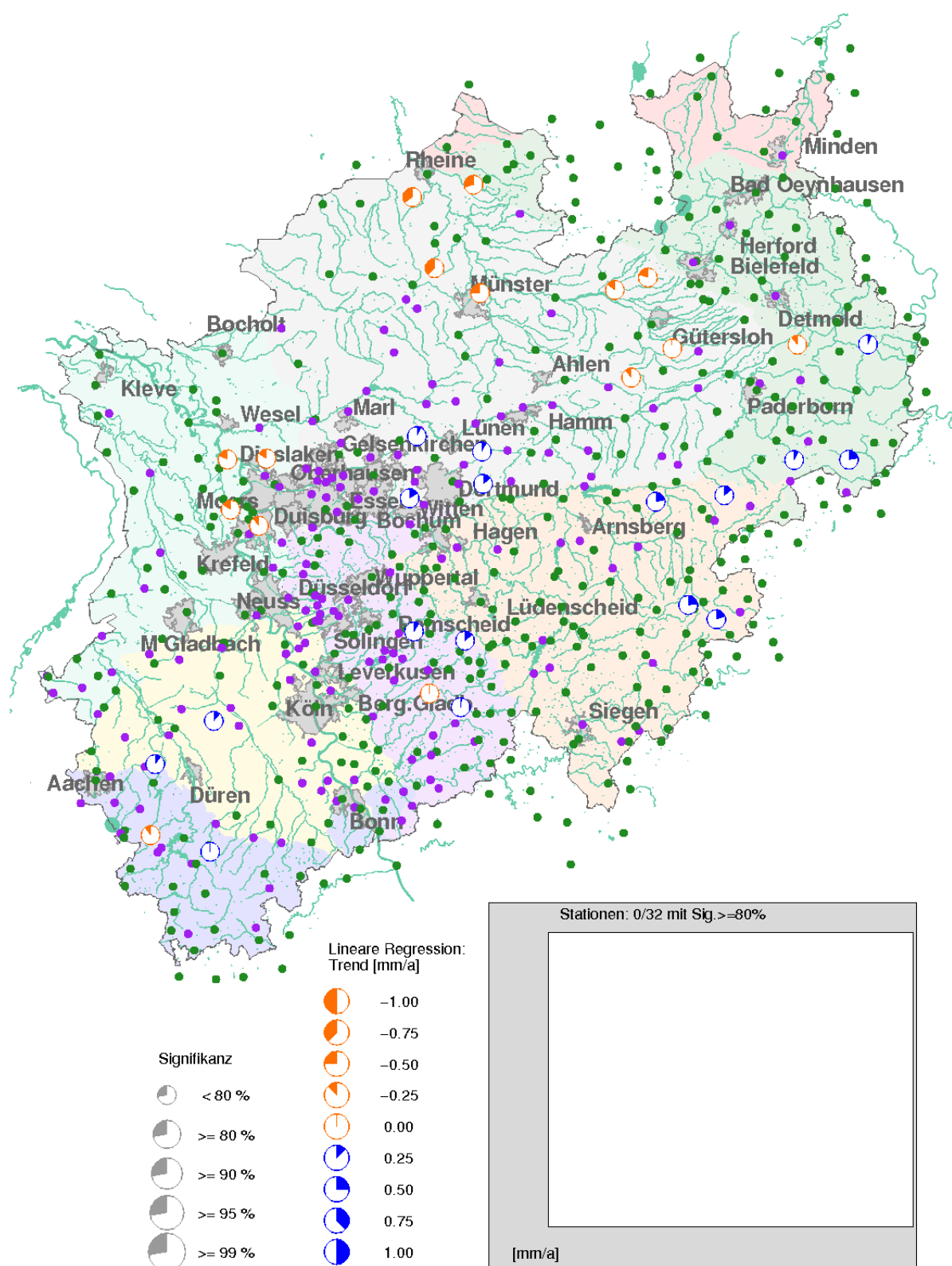


Abbildung 13.33: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Nahe Zukunft 2001-2050

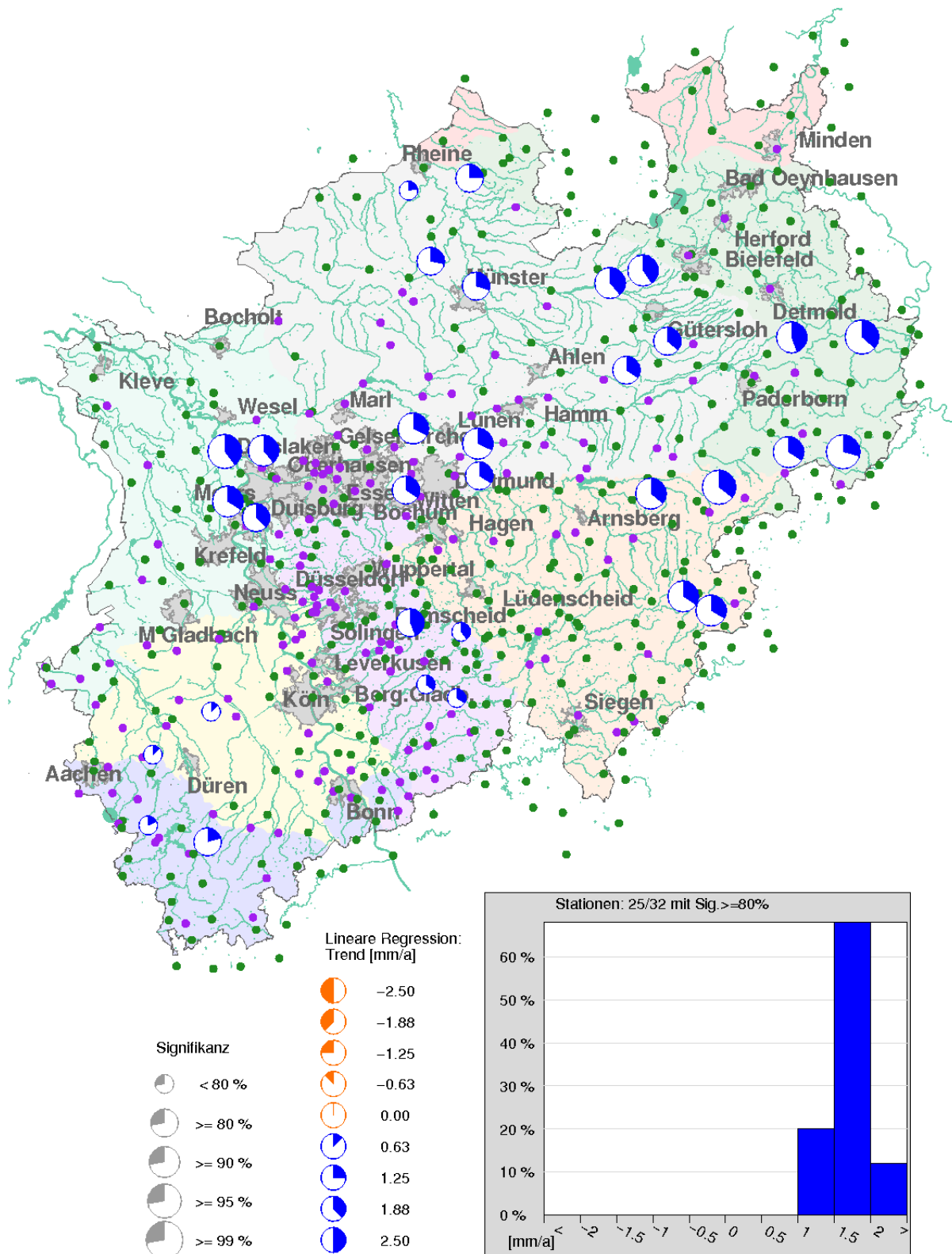


Abbildung 13.34: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für den Modelllauf CLM2 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Nahe Zukunft 2001-2050

13.5.1.4 Bewertung der Trendanalysen für die Ferne Zukunft 2100, Winterhalbjahr

Bei den Trendanalysen für die Ferne Zukunft (2001-2100) zeigen sich in allen Modellen/Modellläufen ausschließlich positive Trends ($\hookrightarrow$ Tab. 13.22). Dabei konvergieren wie bei den Jahresniederschlagssummen die Tendaussagen in den beiden Realisierungen beim Modell CLM. Die Einteilung der Trends in Klassen unterscheidet sich bei CLM und WETTREG nur geringfügig und wird exemplarisch für den Modelllauf CLM1 in Abbildung 13.35 dargestellt.

Das Signal einer Änderung der Niederschläge im Winterhalbjahr ist beim Modell CLM ($\hookrightarrow$ Abb. 13.36) geringer ausgeprägt als beim Modell WETTREG ($\hookrightarrow$ Abb. 13.37). Die Steigungen der Trendgeraden liegen beim Modell CLM zwischen +0,6 mm/Jahr und +1,1 mm/Jahr (CLM1) bzw. +0,4 mm/Jahr und +1,2 mm/Jahr (CLM2).

Das Änderungssignal beim Modell WETTREG ist dagegen stärker positiv ausgeprägt. Die Steigungen der Trendgeraden liegen zwischen +0,7 mm/Jahr und +2,2 mm/Jahr. Die Bewertung regionaler Unterschiede erfolgt im Kapitel 13.5.2. Die räumlichen Darstellungen für die Trendanalyse nach dem Mann-Kendall-Test befinden sich im Anhang H.

Tabelle 13.22: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten Winterhalbjahr – Ferne Zukunft 2001-2100			
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]
< -10	0	0	0
-10 bis -8	0	0	0
-8 bis -6	0	0	0
-6 bis -4	0	0	0
-4 bis -2	0	0	0
-2 bis 0	0	0	0
0 bis 2	100	100	93
2 bis 4	0	0	7
4 bis 6	0	0	0
6 bis 8	0	0	0
8 bis 10	0	0	0
> 10	0	0	0

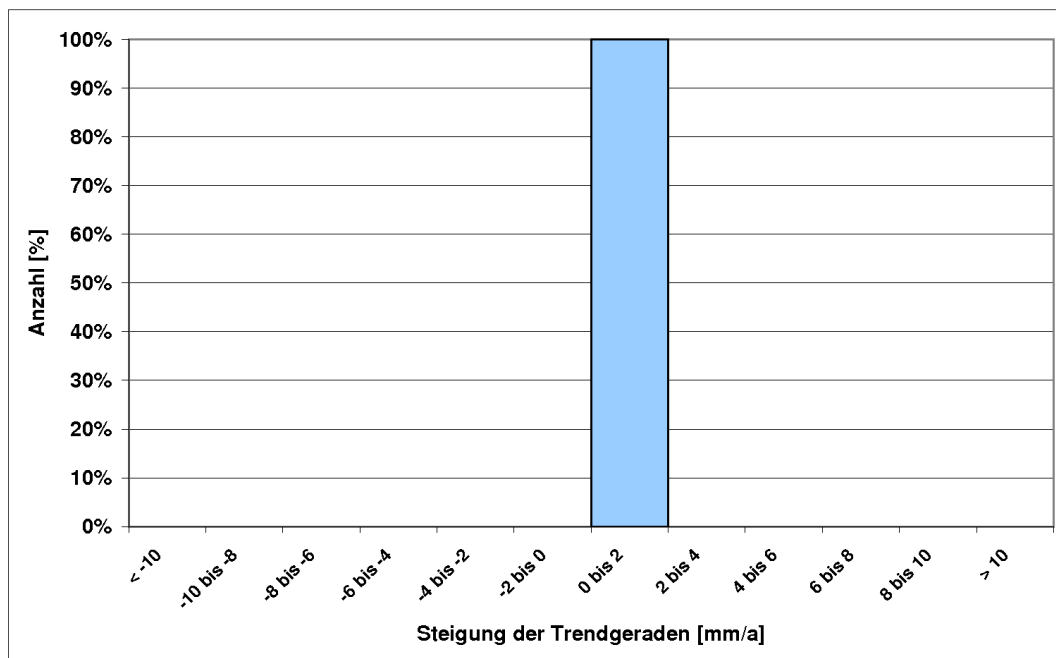


Abbildung 13.35: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den CLM1-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression

Die Signifikanz der positiven Trendentwicklungen ist in allen Modellen/Modellläufen trotz der geringen Zunahmen pro Jahr hoch, was auf den langen Betrachtungszeitraum der Trendanalyse (100 Jahre statt 30 bzw. 50 Jahre) zurückzuführen ist. Tabelle 13.23 (Lineare Regression) und Tabelle 13.24 (Mann-Kendall-Test) zeigen, dass überwiegend sogar ein Signifikanzniveau von 90 % erreicht oder sogar überschritten wird. Bei den Modellläufen CLM1 und CLM2 streuen die Einzelwerte je nach Trendverfahren etwas stärker, die signifikant positive Trendentwicklung wird aber durch beide Verfahren in beiden Modellläufen nachgewiesen.

In Abbildung 13.38 (Lineare Regression, CLM1) und Abbildung 13.39 (Lineare Regression, WETTREG) werden durch die Größe der Uhr an jeder Station neben dem Trend auch das jeweilige Signifikanzniveau und somit die Verteilung signifikanter Trends im Raum dargestellt. Die räumlichen Darstellungen für CLM2 und für die Trendanalyse nach dem Mann-Kendall-Test befinden sich im Anhang H.

In Tabelle 13.25 werden die wesentlichen Eigenschaften der Trends für die Ferne Zukunft in den drei Modellen/Modellläufen zusammengefasst. Detaillierte Informationen zu den drei Modellen/Modellläufen und beiden Trendverfahren, wie sie in den vorangegangenen Tabellen und Abbildungen exemplarisch dargestellt wurden, werden im Anhang H zusammengefasst.

Tabelle 13.23: Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Modelldaten (Ferne Zukunft 2001-2100)

Signifikanzniveaus der Trends (LR) – Winterhalbjahr 2001-2100						
	CLM1 Trends [%]		CLM2 Trends [%]		WETTREG Trends [%]	
Signifikanz- niveau [%]	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
< 80	0	0	0	0	0	0
80	0	0	3	0	0	0
90	13	0	28	0	0	0
95	38	0	25	0	0	0
99	50	0	44	0	100	0

Tabelle 13.24: Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) in den Modelldaten (Ferne Zukunft 2001-2100)

Signifikanzniveaus der Trends (MKT) – Winterhalbjahr 2001-2100						
	CLM1 Trends [%]		CLM2 Trends [%]		WETTREG Trends [%]	
Signifikanz- niveau [%]	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
< 80	0	0	3	0	0	0
80	9	0	25	0	0	0
90	19	0	9	0	0	0
95	31	0	31	0	0	0
99	41	0	31	0	100	0

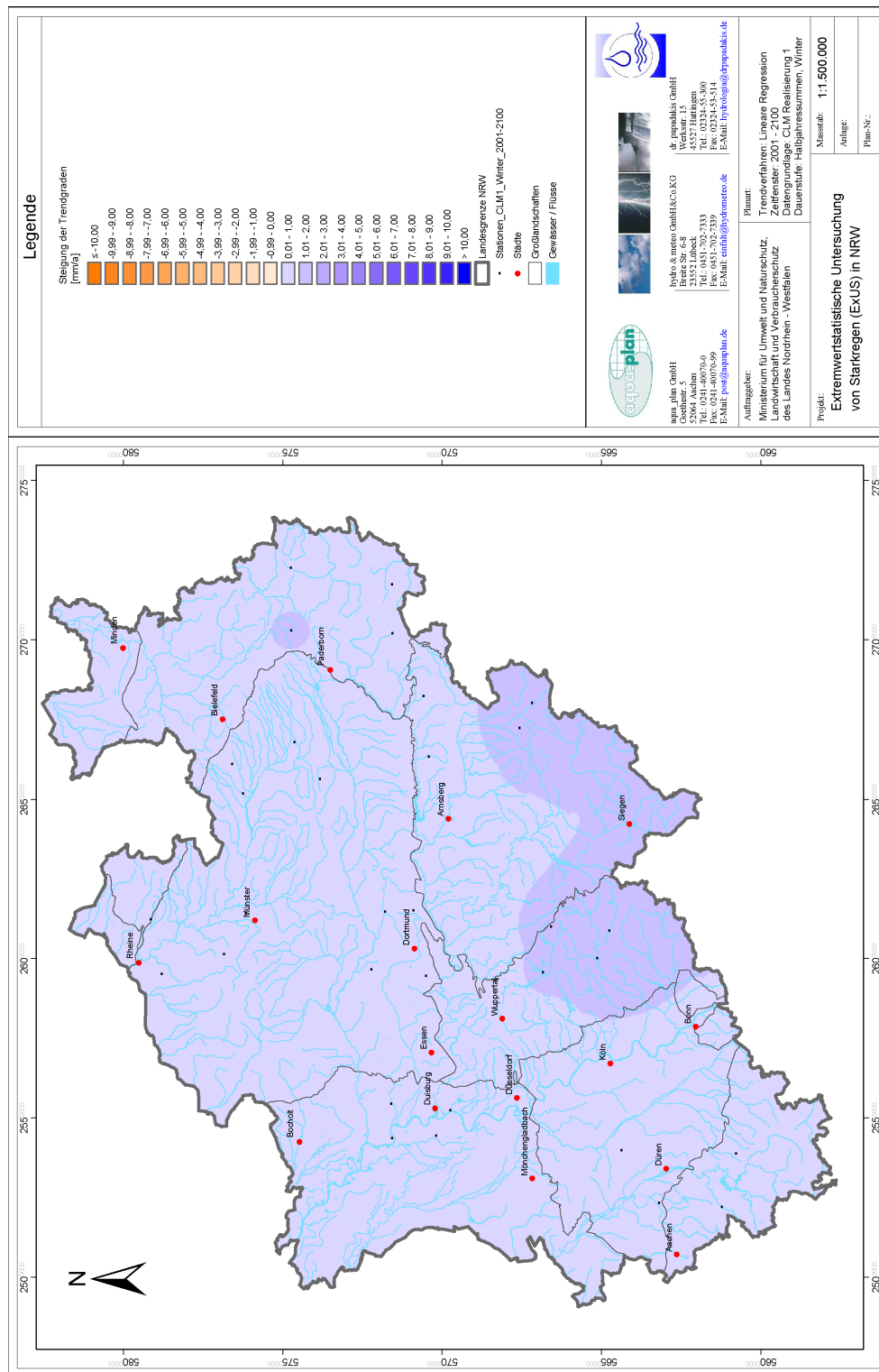


Abbildung 13.36: Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100

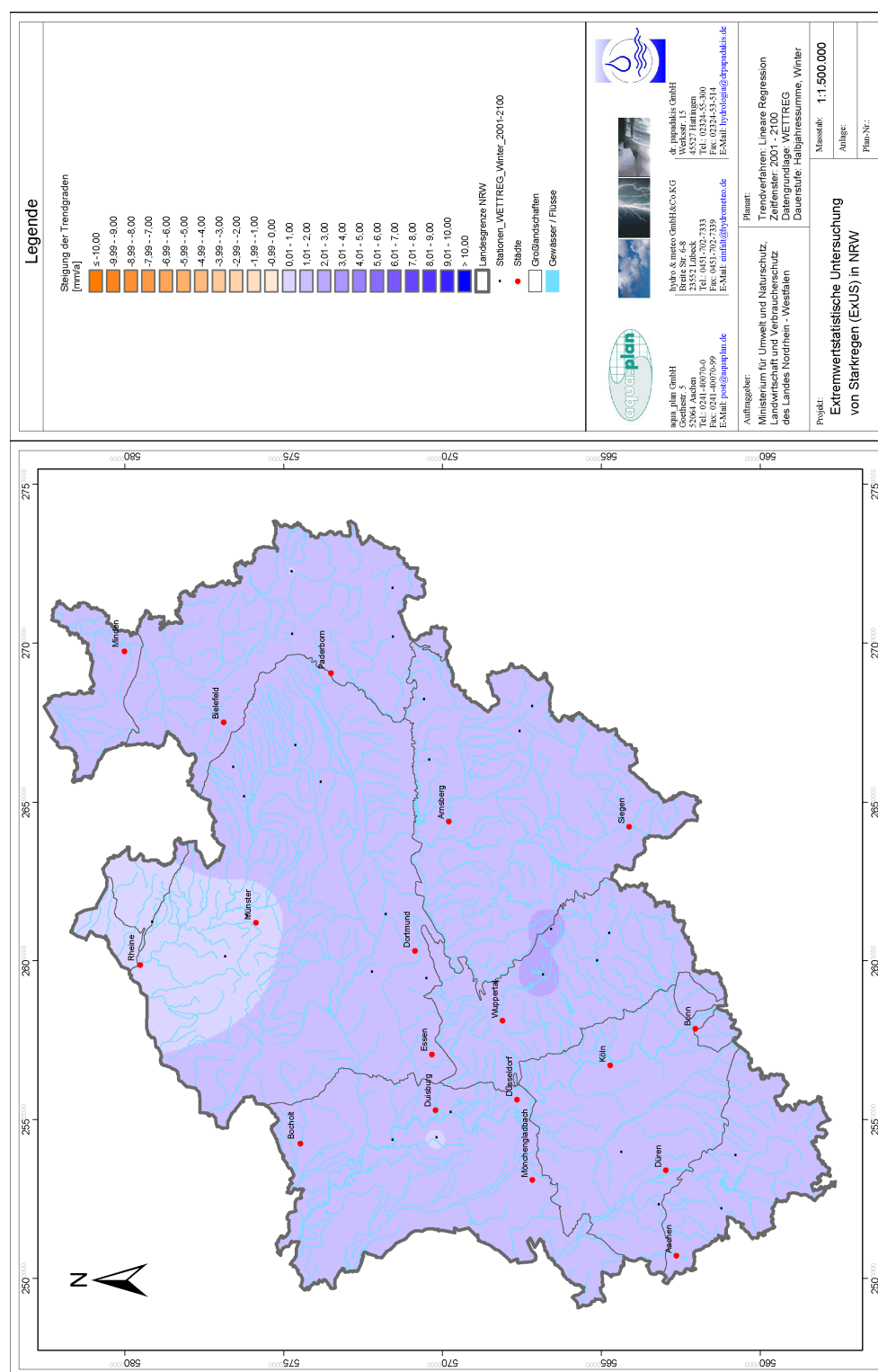


Abbildung 13.37: Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für das Modell WETTREG aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100

Tabelle 13.25: Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Halbjahressummen (Winterhalbjahr) in den drei Modellen/Modellläufen; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), Gesamtspanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test

Trendeigenschaften der drei Modelle/Modellläufe – Winterhalbjahr, Ferne Zukunft				
Modell/ Modelllauf	Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden)	Gesamtspanne [mm/a]	Signifikanz	Unterschiede MKT/LR
CLM1	ausschließlich positiv, 100 % der Trends liegen in der Klasse zwischen 0 mm/a und +2 mm/a	+0,6 bis +1,1	100 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %; 50 % der Trends auf einem Niveau von 99 %	treten an 34 % der Stationen auf; Signifikanz bei LR auf einem insgesamt höheren Niveau als bei MKT
CLM2	ausschließlich positiv, 100 % der Trends liegen in der Klasse zwischen 0 mm/a und +2 mm/a	+0,4 bis +1,2	97 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %; 44 % der Trends auf einem Niveau von 99 %	treten an 47 % der Stationen auf; Signifikanz bei LR auf einem insgesamt höheren Niveau als bei MKT
WETTREG	ausschließlich positiv, 93 % der Trends liegen in der Klasse zwischen 0 mm/a und +2 mm/a	+0,7 bis +2,2	100 % der Trends auf einem Niveau von 99 %	keine

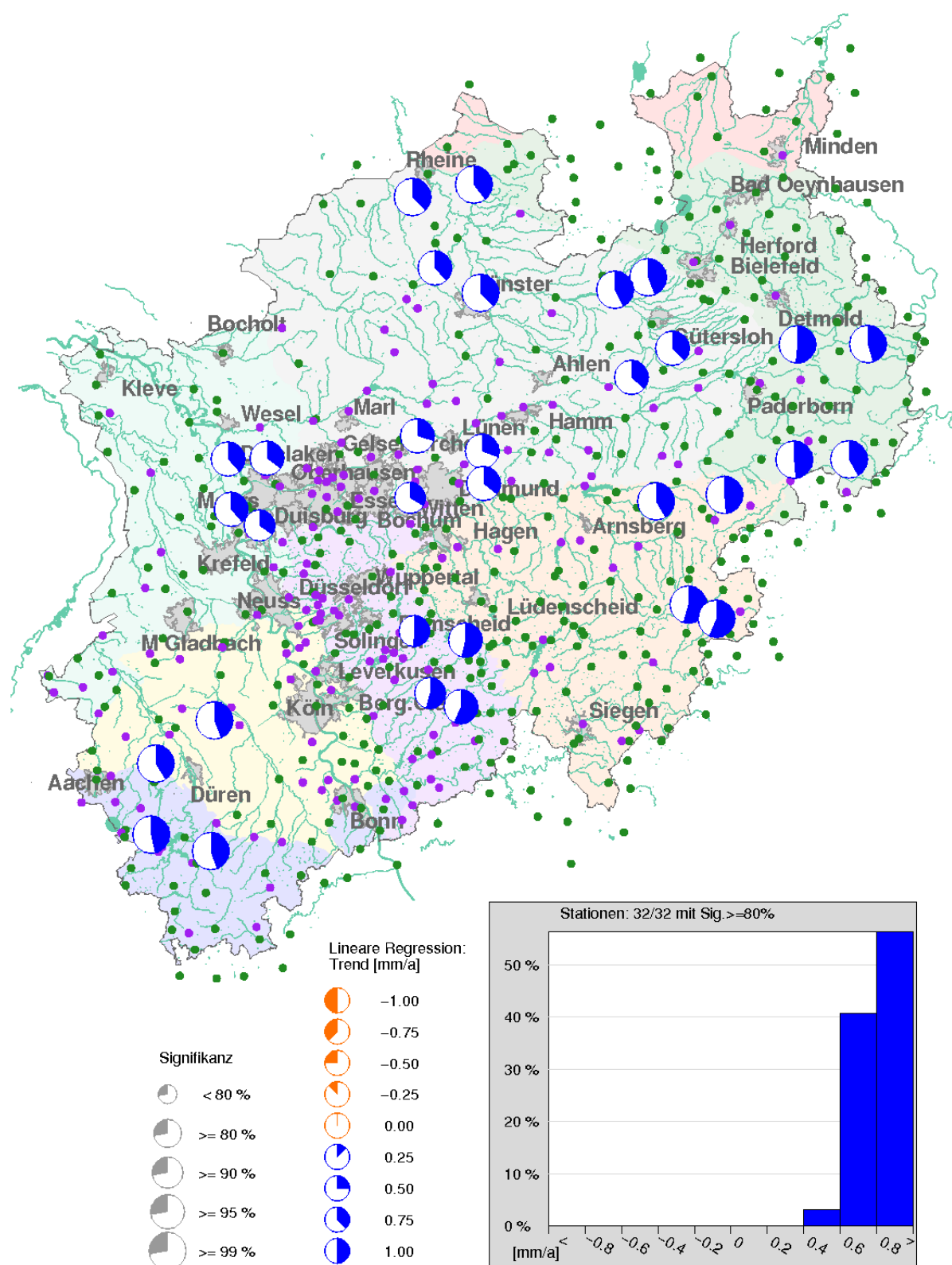


Abbildung 13.38: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100

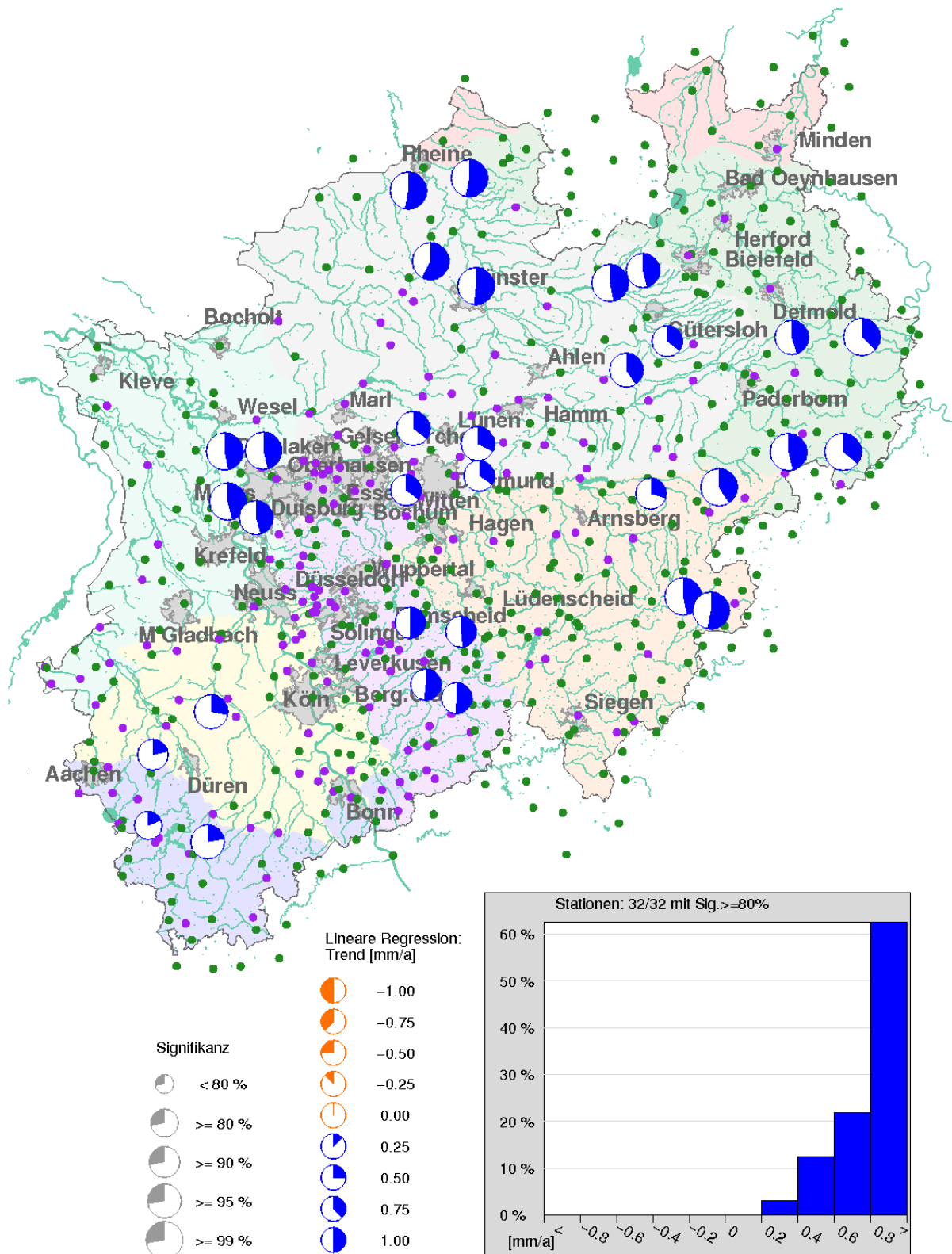


Abbildung 13.39: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Winterhalbjahr) für das Modell WETTREG aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100

13.5.1.5 Bewertung der Trendanalysen für die Ferne Zukunft 2100, Sommerhalbjahr

Bei den Trendanalysen für die Ferne Zukunft (2001-2100) zeigen sich in allen Modellen/Modellläufen ausschließlich negative Trends ($\hookrightarrow$ Tab. 13.26). Die Einteilung der Trends in Klassen unterscheidet sich bei CLM und WETTREG nur geringfügig und wird exemplarisch für den Modelllauf CLM1 in Abbildung 13.40 dargestellt.

Das Signal einer Änderung der Niederschläge im Sommerhalbjahr ist beim Modell CLM ($\hookrightarrow$ Abb. 13.41) im Gegensatz zum Winterhalbjahr etwas stärker ausgeprägt als beim Modell WETTREG ($\hookrightarrow$ Abb. 13.42). Die Steigungen der Trendgeraden liegen beim Modell CLM zwischen -2,1 mm/Jahr und -0,4 mm/Jahr (CLM1) bzw. -1,5 mm/Jahr und -0,4 mm/Jahr (CLM2). Die Steigungen der Trendgeraden bei WETTREG liegen zwischen -1,1 mm/Jahr und -0,2 mm/Jahr.

Die Bewertung regionaler Unterschiede erfolgt im Kapitel 13.5.2. Die räumlichen Darstellungen für die Trendanalyse nach dem Mann-Kendall-Test befinden sich im Anhang H.

Tabelle 13.26: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Modelldaten (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression

Trendverhalten Sommerhalbjahr – Ferne Zukunft 2001-2100			
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]
< -10	0	0	0
-10 bis -8	0	0	0
-8 bis -6	0	0	0
-6 bis -4	0	0	0
-4 bis -2	3	0	0
-2 bis 0	97	100	100
0 bis 2	0	0	0
2 bis 4	0	0	0
4 bis 6	0	0	0
6 bis 8	0	0	0
8 bis 10	0	0	0
> 10	0	0	0

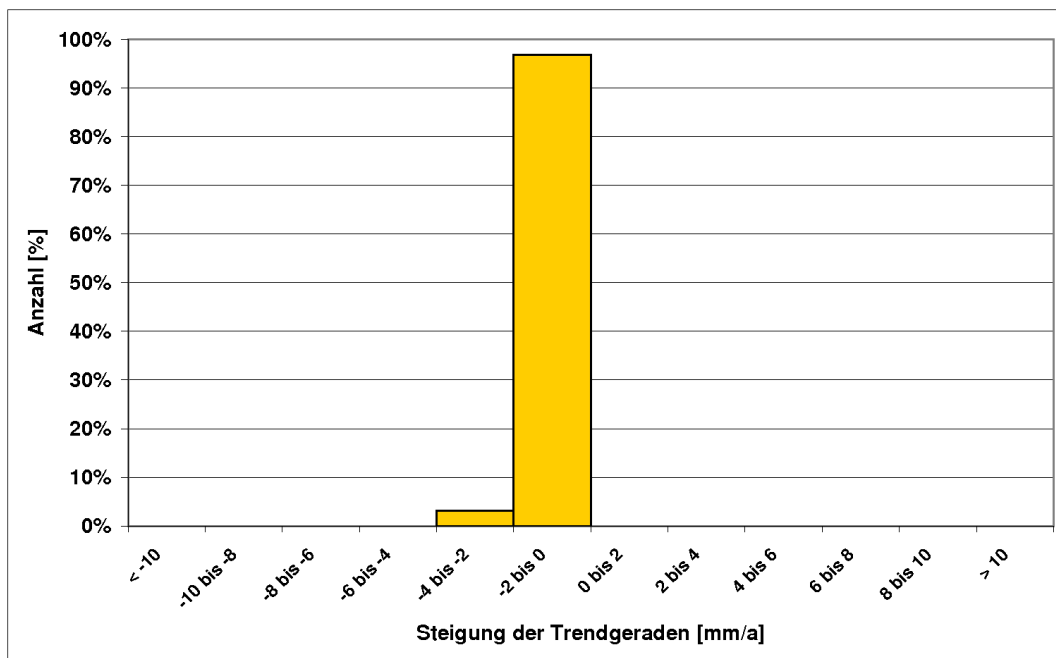


Abbildung 13.40: Trendverhalten der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den CLM1-Modelldaten (32 Rasterfelder) für die Ferne Zukunft 2001-2100 nach dem Verfahren der linearen Regression

Die Signifikanz der negativen Trendentwicklungen ist in allen Modellen/Modellläufen trotz der geringen Abnahmen pro Jahr hoch, was auf den langen Betrachtungszeitraum der Trendanalyse (100 Jahre statt 30 bzw. 50 Jahre) zurückzuführen ist. Tabelle 13.27 (Lineare Regression) und Tabelle 13.28 (Mann-Kendall-Test) zeigen, dass bei CLM überwiegend sogar ein Signifikanzniveau von 95 % erreicht oder sogar überschritten wird. Bei WETTREG streuen die Einzelwerte je nach Trendverfahren etwas stärker und das Signifikanzniveau liegt etwas niedriger als bei CLM.

In Abbildung 13.43 (Lineare Regression, CLM1) und Abbildung 13.44 (Lineare Regression, WETTREG) werden durch die Größe der Uhr an jeder Station neben dem Trend auch das jeweilige Signifikanzniveau und somit die Verteilung signifikanter Trends im Raum dargestellt. Die räumlichen Darstellungen für CLM2 und für die Trendanalyse nach dem Mann-Kendall-Test befinden sich im Anhang H.

In Tabelle 13.29 werden die wesentlichen Eigenschaften der Trends für die Ferne Zukunft in den drei Modellen/Modellläufen zusammengefasst. Detaillierte Informationen zu den drei Modellen/Modellläufen und beiden Trendverfahren, wie sie in den vorangegangenen Tabellen und Abbildungen exemplarisch dargestellt wurden, werden im Anhang H zusammengefasst.

Tabelle 13.27: Anzahl signifikanter Trends beim Verfahren der linearen Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit dem t-Test) für die Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Modelldaten (Ferne Zukunft 2001-2100)

Signifikanzniveaus der Trends (LR) – Sommerhalbjahr, Ferne Zukunft						
	CLM1 Trends [%]		CLM2 Trends [%]		WETTREG Trends [%]	
Signifikanz- niveau [%]	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
< 80	0	0	0	0	0	10
80	0	3	0	3	0	21
90	0	0	0	9	0	14
95	0	22	0	53	0	41
99	0	75	0	34	0	14

13.5.2 Regionale Besonderheiten

13.5.2.1 Räumliche Differenzierung der Trendanalysen für die Nahe Zukunft 2050, Winterhalbjahr

- **CLM1:** Im Modelllauf CLM1 treten überwiegend räumlich homogene nicht signifikante Zunahmen auf. Regionale Unterschiede können vernachlässigt werden. An den Rändern der insgesamt kleinen Spanne liegen die Stationen der Mittelgebirge. Am unteren Rand liegen die Stationen der Packs 3 (Weserbergland), 6 (östliches Sauer- und Siegerland) und 8 (südliche Stationen, Eifel), am oberen Rand die Stationen des Packs 7 (Bergisches Land).
- **CLM2:** Das Signifikanzniveau der Zunahmen liegt wie bei den Jahresniederschlagssummen landesweit auf einem hohen Niveau (fast ausschließlich mindestens 80 %). Im Pack 8 (Niederrheinische Bucht/Eifel) sind die Zunahmen weniger stark ausgeprägt. Auch im Pack 3 (Weserbergland) sind die Zunahmen unterdurchschnittlich. Im Pack 7 (Bergisches Land) sind die Trends wiederum am stärksten ausgeprägt, aber auch in den Packs 1 (nordwestliche Westfälische Bucht) und 2 (östliche Westfälische Bucht) sind die Trends überdurchschnittlich.
- **WETTREG:** Wie bei CLM sind die Zunahmen überwiegend nicht signifikant und überwiegend räumlich homogen. Lediglich einzelne Stationen stechen geringfügig heraus. Die geringfügig stärkeren Ausprägungen in den Packs der Mittelgebirge, wie bei CLM1, sind bei WETTREG nicht zu erkennen.
- **STAR 2:** Das Signifikanzniveau der Zunahmen liegt wie bei den Jahresniederschlagssummen und wie bei CLM2 landesweit auf einem hohen Niveau (fast ausschließlich mindestens 80 %). Im Pack 8 (Niederrheinische Bucht/Eifel) sind die

Tabelle 13.28: Anzahl signifikanter Trends beim Mann-Kendall-Test für die Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) in den Modelldaten (Ferne Zukunft 2001-2100)

Signifikanzniveaus der Trends (MKT) – Sommerhalbjahr, Ferne Zukunft						
	CLM1 Trends [%]		CLM2 Trends [%]		WETTREG Trends [%]	
Signifikanz- niveau [%]	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ	Positiv	Negativ
< 80	0	0	0	0	0	24
80	0	3	0	3	0	24
90	0	3	0	9	0	17
95	0	19	0	56	0	24
99	0	75	0	31	0	10

Zunahmen wie bei CLM2 weniger stark ausgeprägt. Im Pack 7 (Bergisches Land) sind die Trends wiederum am stärksten ausgeprägt, aber auch im Pack 6 (östliches Sauer- und Siegerland) sind die Trends überdurchschnittlich.

- **Allgemein:** Über alle vier Modelle/Modellläufe hinweg zeigen die Trends im Pack 7 (Bergisches Land) die größten und signifikantesten Zunahmen. Im Pack 8 (Niederrheinische Bucht/Eifel) treten dagegen überwiegend geringere Zunahmen auf.

13.5.2.2 Räumliche Differenzierung der Trendanalysen für die Nahe Zukunft 2050, Sommerhalbjahr

- **CLM1:** Im Modelllauf CLM1 treten geringe, nicht signifikante Trends in einer kleinen Spanne um den Wert Null auf. Dabei treten die größten Abnahmen im Pack 1 (nordwestliche Westfälische Bucht) und im Pack 4 (Niederrheinisches Tiefland), die größten Zunahmen im Pack 6 (östliches Sauer- und Siegerland) auf.
- **CLM2:** Das Signifikanzniveau der Zunahmen liegt wie bei den Jahresniederschlagssummen und im Winterhalbjahr landesweit auf einem hohen Niveau (überwiegend mindestens 80 %). Im Pack 8 (Niederrheinische Bucht/Eifel) sind die Zunahmen weniger stark ausgeprägt. Auch im Pack 1 (nordwestliche Westfälische Bucht) sind die Zunahmen unterdurchschnittlich. Die regionale Konzentration der Stationen mit größten Trends ist dagegen weniger stark ausgeprägt, sondern lokal auf einzelne Stationen begrenzt.
- **WETTREG:** Es treten wie beim Modelllauf CLM1 geringe, nicht signifikante Trends in einer kleinen Spanne um den Wert Null auf. Die räumliche Verteilung der leicht negativen und leicht positiven Trends unterscheidet sich aber zu CLM1. Die Stationen mit negativen Trends finden sich insbesondere im Pack 6 (östliches

Tabelle 13.29: Wesentliche Eigenschaften der Trends bei den Halbjahressummen (Sommerhalbjahr) in den drei Modellen/Modellläufen; die Angaben in den Spalten Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden), Gesamtspanne und Signifikanz beziehen sich auf das Verfahren der linearen Regression/t-Test

Trendeigenschaften der drei Modelle/Modellläufe – Sommerhalbjahr, Ferne Zukunft				
Modell/ Modelllauf	Trendverhalten (Steigung der Trendgeraden)	Gesamtspanne [mm/a]	Signifikanz	Unterschiede MKT/LR
CLM1	ausschließlich negativ, 97 % der Trends liegen in der Klasse zwischen -2 mm/a und 0 mm/a	-2,1 bis -0,4	97 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %; 75 % der Trends auf einem Niveau von 99 %	gering
CLM2	ausschließlich negativ, 100 % der Trends liegen in der Klasse zwischen -2 mm/a und 0 mm/a	-1,5 bis -0,4	97 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %; 31 % der Trends auf einem Niveau von 99 %	treten an 28 % der Stationen auf, ohne die Gesamtaussagen zu verfälschen
WETTREG	ausschließlich negativ, 100 % der Trends liegen in der Klasse zwischen -2 mm/a und 0 mm/a	-1,1 bis -0,2	69 % der Trends auf einem Niveau ≥ 90 %; 14 % der Trends auf einem Niveau von 99 %	treten an 45 % der Stationen auf; Signifikanz bei LR auf einem insgesamt höheren Niveau als bei MKT

Sauer- und Siegerland) und im Pack 3 (Weserbergland). Die regionale Konzentration der Stationen mit größten und kleinsten Trends ist bei WETTREG ähnlich wie im Winterhalbjahr, aber weniger stark ausgeprägt als bei CLM1.

- **STAR 2:** Bei diesem Modell treten wie bei den Jahresniederschlagssummen die größten regionalen Unterschiede auf. Die wenigen nicht signifikanten negativen Trends konzentrieren sich auf das Pack 6 (östliches Sauer- und Siegerland). Die größten und signifikantesten positiven Trends treten überwiegend im Pack 7 (Bergisches Land) auf.
- **Allgemein:** Anders als bei den Jahresniederschlagssummen und im Winterhalbjahr treten im Sommerhalbjahr keine Packs/Regionen hervor, in denen über alle Modelle besonders geringe oder besonders starke Trends festgestellt werden können.

13.5.2.3 Räumliche Differenzierung der Trendanalysen für die Ferne Zukunft 2100, Winterhalbjahr

- **CLM1:** Das Signifikanzniveau der Zunahmen liegt landesweit auf einem sehr hohen

Niveau (überwiegend mindestens 95 %). Die räumlichen Unterschiede sind insgesamt gering. Im Pack 5 (südliche Westfälische Bucht) sind die Zunahmen geringfügig schwächer ausgeprägt, in den Packs 7 (Bergisches Land) und 6 (östliches Sauer- und Siegerland) dagegen etwas stärker.

- **CLM2:** Das Signifikanzniveau der Zunahmen liegt landesweit auf einem sehr hohen Niveau (überwiegend mindestens 90 %). Die räumlichen Unterschiede sind insgesamt gering. In den Packs 8 (Niederrheinische Bucht/Eifel) und 5 (südliche Westfälische Bucht) sind die Zunahmen geringfügig schwächer ausgeprägt, in den Packs 7 (Bergisches Land) und 1 (nordwestliche Westfälische Bucht) dagegen etwas stärker.
- **WETTREG:** Die Trends sind landesweit stärker ausgeprägt, als bei den CLM-Modellläufen und liegen ausschließlich auf einem sehr hohen Signifikanzniveau von 99 %. Die räumlichen Unterschiede sind etwas größer als bei CLM, aber immer noch auf einem relativ geringen Niveau. Im Pack 1 (nordwestliche Westfälische Bucht) sind die Zunahmen schwächer ausgeprägt, an den nördlichen Stationen des Packs 7 (Bergisches Land) und auf einem etwas niedrigeren Niveau an den Stationen des Packs 3 (Weserbergland) dagegen stärker.
- **Allgemein:** Über alle drei Modelle/Modellläufe hinweg zeigen die Trends im Pack 7 (Bergisches Land) die größten und signifikantesten Zunahmen. Im Pack 5 (südliche Westfälische Bucht) treten dagegen überwiegend geringere Zunahmen auf.

13.5.2.4 Räumliche Differenzierung der Trendanalysen für die Ferne Zukunft 2100, Sommerhalbjahr

- **CLM1:** Das Signifikanzniveau der Abnahmen liegt landesweit auf einem sehr hohen Niveau (überwiegend mindestens 95 %). In den Packs 3 (Weserbergland), 8 (Niederrheinische Bucht/Eifel) und 6 (östliches Sauer- und Siegerland) sind die Abnahmen schwächer ausgeprägt, im Pack 7 (Bergisches Land) dagegen stärker.
- **CLM2:** Das Signifikanzniveau der Abnahmen liegt landesweit auf einem sehr hohen Niveau (überwiegend mindestens 95 %), die Größe der Abnahmen ist aber etwas geringer als bei CLM1. In den Packs 6 (östliches Sauer- und Siegerland) und 3 (Weserbergland) sind die Abnahmen etwas schwächer ausgeprägt, im Pack 7 (Bergisches Land) dagegen etwas stärker.
- **WETTREG:** Das Signifikanzniveau der Abnahmen liegt landesweit auf einem überwiegend hohen Niveau von mindestens 80 %. Die räumlichen Unterschiede sind insgesamt gering und nicht auf Packs/Regionen konzentriert. Lediglich einzelne Stationen stechen geringfügig heraus.
- **Allgemein:** Zumindest in den beiden CLM-Modellläufe zeigen die Trends im Pack 7 (Bergisches Land) die größten Abnahmen, die Trends im Pack 3 (Weserbergland) dagegen die geringsten.

13.5.3 Zusammenfassung zu den Halbjahresniederschlagssummen

Bei der Betrachtung der Halbjahresniederschlagssummen zeigt sich, dass die trockenen Dekaden am Ende des 20. Jahrhunderts vor allem durch trockene Sommerhalbjahre bestimmt werden. Entsprechend stimmen die negativen Trends der Modelldaten im Referenzzeitraum 1961-1990 gut mit den negativen Trends in den Messdaten im Zeitraum 1950-1979 überein, die durch die trockene Dekade der 1970er-Jahre geprägt waren. Im Winterhalbjahr stimmen dagegen die Trends in den Modelldaten im Zeitraum 1961-1990 gut mit den Trends in den Messdaten für beide Zeiträume 1950-1979 und 1961-1990 überein.

Für die Nahe Zukunft (2050) besitzen die Halbjahresniederschlagssummen des Winterhalbjahres wie die Jahresniederschlagssummen ausschließlich positive Trends. Die Zunahmen und ihre Signifikanz sind ebenfalls wie bei den Jahresniederschlagssummen in den Modellen/Modellläufen CLM1/WETTREG (geringe Zunahme/Signifikanz) und in den Modellen/Modellläufen CLM2/STAR2 (hohe Zunahme/Signifikanz) unterschiedlich stark ausgeprägt. Bei CLM2/STAR2 werden die signifikant hohen Zunahmen des Winterhalbjahres mit ebenfalls signifikant hohen Zunahmen im Sommerhalbjahr überlagert. Bei den Modellen/Modellläufen CLM1/WETTREG überlagern sich dagegen überwiegend nicht signifikante Trends. Im Sommerhalbjahr liegen an den einzelnen Rasterflächen/Stationen relativ ausgewogen negative und positive Trends vor, während im Winterhalbjahr ausschließlich positive Trends auftreten.

In der Fernen Zukunft (2100) zeigen alle Modelle/Modellläufe im Sommer ausschließlich negative und im Winter ausschließlich positive Trends. Insgesamt besitzen die Trends überwiegend hohe Signifikanzniveaus, lediglich bei WETTREG sind die Trends im Sommer etwas weniger stark ausgeprägt. Bei den CLM-Modellläufen führen die gegenläufig ausgerichteten positiven Wintertrends und die negativen Sommertrends zu geringen Änderungen der Jahresniederschlagssummen. Bei WETTREG resultieren aus den stärkeren Zunahmen im Winterhalbjahr gegenüber den geringeren Abnahmen im Sommerhalbjahr insgesamt signifikante Zunahmen der Jahresniederschlagssummen.

13.6 Monatsniederschlagssummen

Ergänzend zu den Halbjahresniederschlagssummen wurde untersucht, ob und in welchem Maße sich Änderungen der Niederschlagssummen auf einzelne Monate bzw. Quartale konzentrieren. Aufgrund der zum Teil erheblichen Unterschiede zwischen den Modellen in den einzelnen Monaten wurde auf eine lokale Bewertung verzichtet, da hier die Unterschiede in den Modellen gegenüber den regionalen Unterschieden überwiegen. Stattdessen wurde neben einer Trendanalyse auch eine Bewertung der Änderungen in den absoluten mittleren monatlichen Niederschlagssummen durchgeführt. Zudem werden Aussagen zu den Änderungen in den absoluten mittleren Quartalsniederschlagssummen gemacht.

13.6.1 Trendanalysen der Monatsniederschlagssummen

In einem ersten Schritt wird untersucht, ob in den Niederschlagszeitreihen der regionalen Klimamodelle signifikante Trends für die Nahe Zukunft (2001-2050) oder für die Ferne Zukunft (2001-2100) festzustellen sind. Da für die Monatsniederschlagssummen keine Normalverteilung nachgewiesen werden konnte ($\hookrightarrow$ Kap. 7.4.3.3), wird die Trendanalyse nur mit dem Mann-Kendall-Test durchgeführt. In der Nahen Zukunft zeigen die einzelnen Modelle/Modellläufe ein insgesamt uneinheitliches Bild in der Entwicklung der Monatsniederschlagssummen ($\hookrightarrow$ Tab. 13.30 und 13.31). In einzelnen Monaten (Juli und November) besitzen die Monatsniederschlagssummen in den Modellen/Modellläufen sogar gegenläufige Trends. Der Modelllauf CLM1 liefert die geringsten signifikanten Änderungen einzelner Monatsniederschlagssummen. Nur im Monat März liegt der Anteil an Rasterfeldern mit signifikanten Trends (Signifikanzniveau mindestens 80 %) über 33 %. Die größten signifikanten Änderungen der Monatsniederschlagssummen besitzen die Niederschlagszeitreihen des Modells STAR2. Hier liegt der Anteil signifikanter Trends in den drei Monaten August, Oktober und November an mehr als einem Drittel der Stationen auf einem Signifikanzniveau von mindestens 90 %. Aufgrund der großen Unterschiede zwischen den Modellen gibt es keinen Monat, für den die Trendanalysen einheitlich eine signifikante Änderung zeigen. Für den Monat Januar werden immerhin in drei der vier Modelle/Modellläufe signifikante Zunahmen erwartet. Im Monat November weisen ebenfalls drei Modelle eine signifikante Änderung aus, die Ausrichtung ist im Modell WETTREG (signifikante negative Trends) aber entgegengesetzt zur Ausrichtung in den Modellen/Modellläufen CLM2 und STAR2 (signifikante positive Trends).

In der Fernen Zukunft stimmen die Aussagen der einzelnen Modelle/Modellläufe besser überein ($\hookrightarrow$ Tab. 13.32 und 13.33). In allen drei Modellen/Modellläufen CLM1, CLM2 und WETTREG treten in etwa der Hälfte der Monate (CLM: 7, WETTREG: 5) signifikante Trends auf. Auch die Übereinstimmung in den einzelnen Monaten ist wesentlich größer als in der Nahen Zukunft. Gegenläufige Trends treten in Monaten mit signifikanten Trends gar nicht mehr auf. In den Monaten Juni und Juli treten in allen drei Modellen/Modellläufen signifikant negative Trends auf, im Monat August zumindest in den beiden CLM-Modellläufen (auf einem sehr hohen Signifikanzniveau). Ähnlich wie in der Nahen Zukunft weist der Monat Januar die signifikantesten Zunahmen auf. Aber auch in den Monaten November (CLM2) und Dezember (CLM1 und WETTREG) ist mit signifikanten Zunahmen zu rechnen. Auch wenn die Trends für die Ferne Zukunft eindeutiger erscheinen, so darf nicht daraus gefolgert werden, dass für die Ferne Zukunft die Klimaänderungssignale eindeutiger und genauer sind. Es sind zwei Dinge bei der Interpretation zu berücksichtigen: Für die Ferne Zukunft wird bei der Trendanalyse ein Zeitraum von 100 Jahren statt von 50 Jahren bei der Nahen Zukunft berücksichtigt, sodass sich in der Fernen Zukunft einzelne trockene oder feuchte Dekaden nicht so stark auf den Trend auswirken. Des Weiteren liegen den Modellrechnungen Szenarien zu Grunde, deren Annahmen immer unsicherer werden, je weiter der Betrachtungszeitraum in der Zukunft liegt.

Tabelle 13.30: Anzahl der Rasterfelder/Stationen mit signifikanten Trends ($\alpha \geq 0,8$) in den Monatsniederschlagssummen in der Nahen Zukunft 2001-2050 (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG/STAR2: 29 Stationen); signifikant positive Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind blau, signifikant negative Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind orange markiert

Trendverhalten Monatssummen – Nahe Zukunft 2001-2050, $\alpha \geq 0,8$				
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]	Anzahl STAR2 [%]
Januar	0	97	45	72
Februar	0	0	83	0
März	50	9	0	10
April	0	0	3	48
Mai	0	0	17	48 ^a
Juni	0	100	17	14
Juli	19	34	3	41
August	0	0	24	79
September	28	0	0	55
Oktober	0	0	24	79
November	0	50	62	93
Dezember	12	0	3	41

^aVon den 48 % signifikanten Trends sind 45 % positiv und 3 % negativ

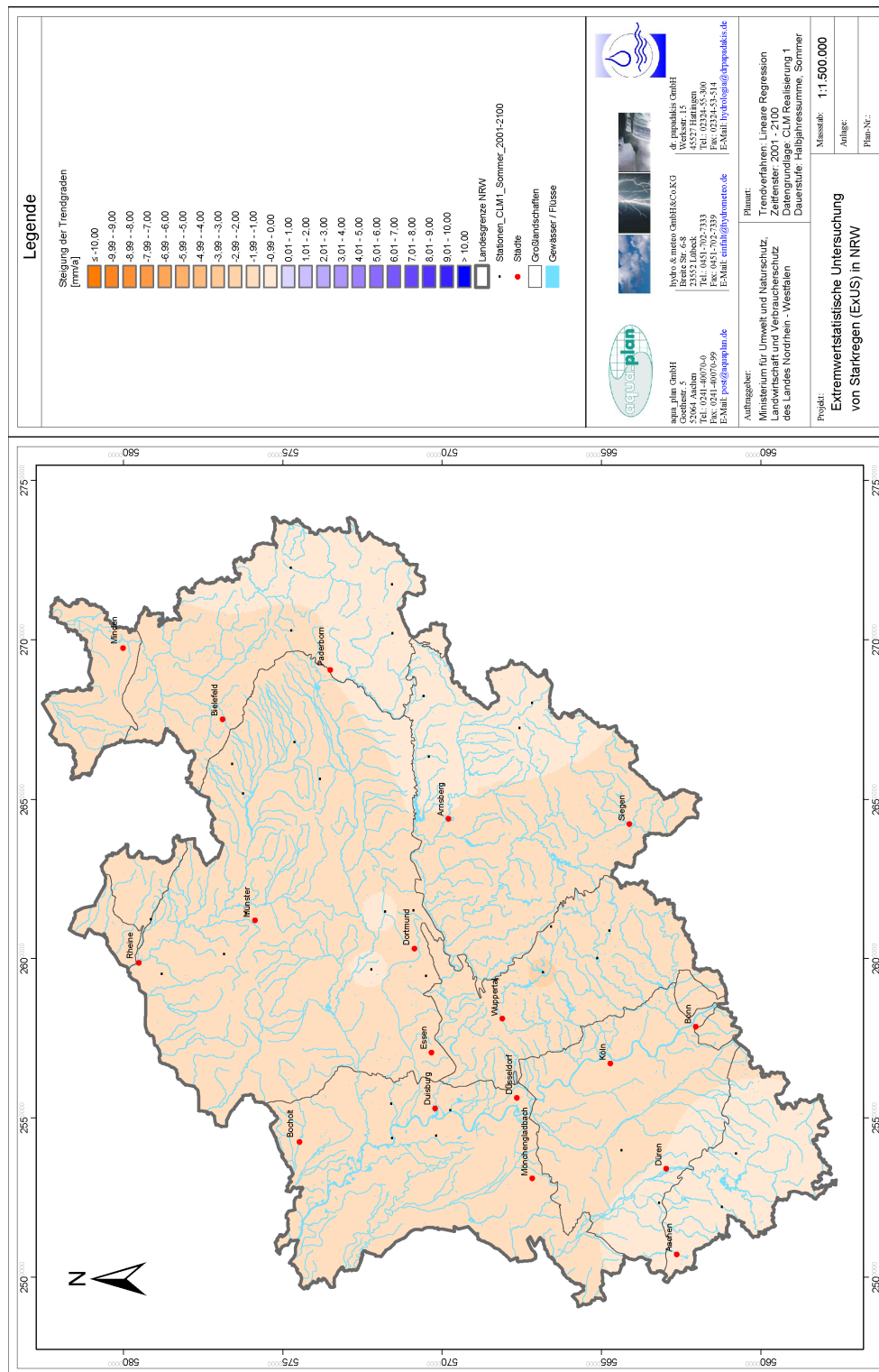


Abbildung 13.41: Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100

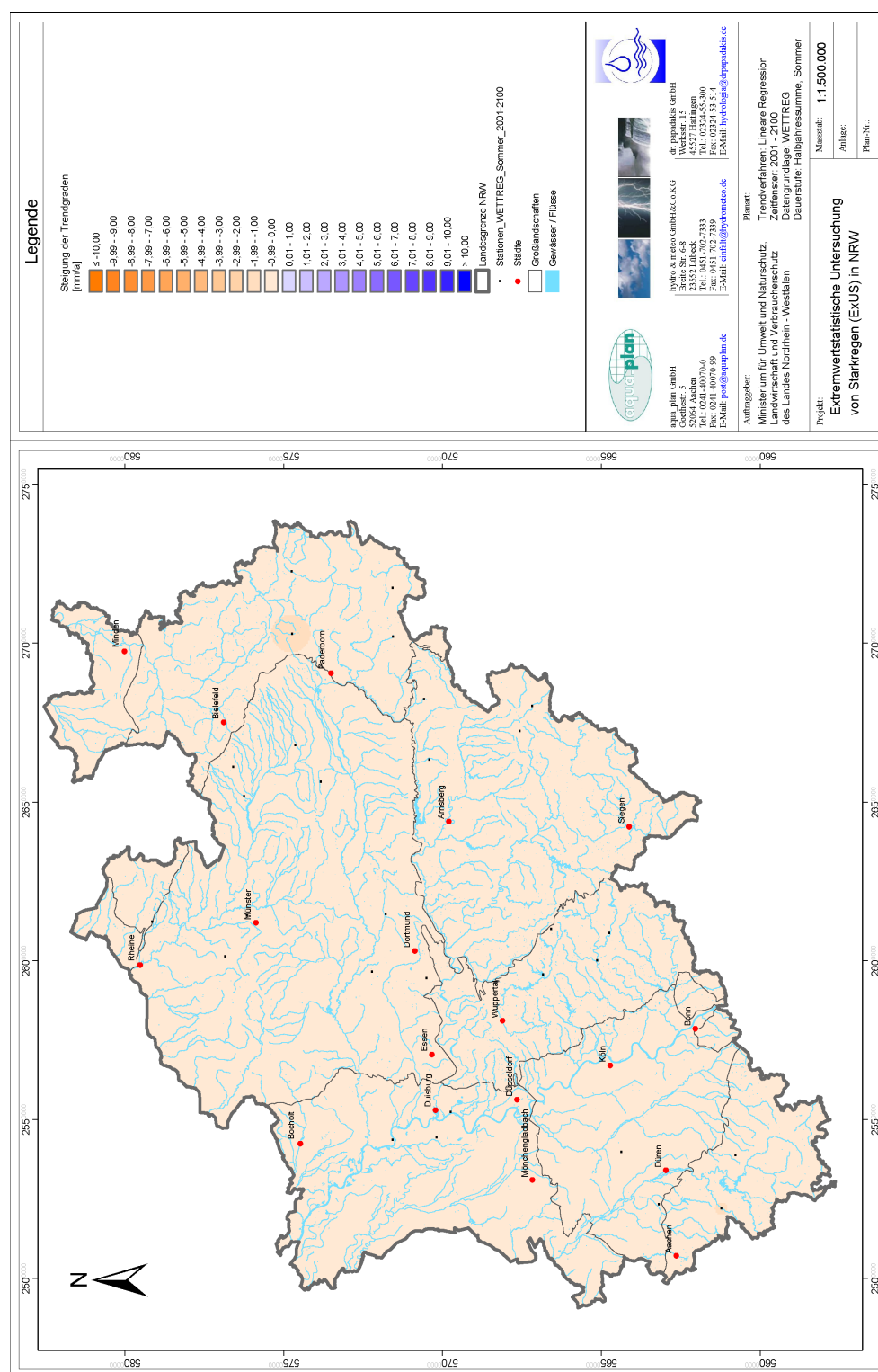


Abbildung 13.42: Räumliche Darstellung der Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für das Modell WETTREG aus linearer Regression für die Ferne Zukunft 2001-2100

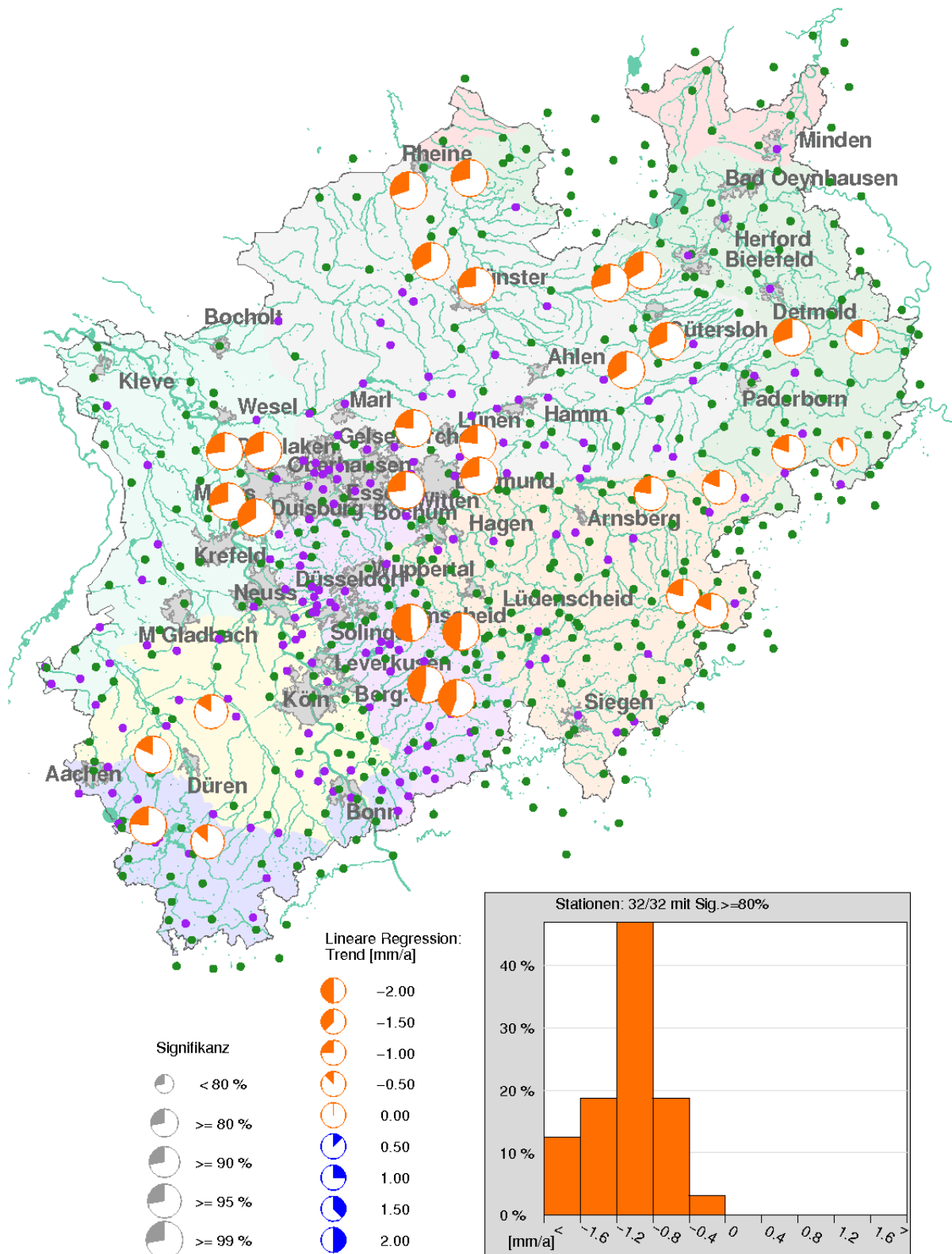


Abbildung 13.43: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für den Modelllauf CLM1 aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100

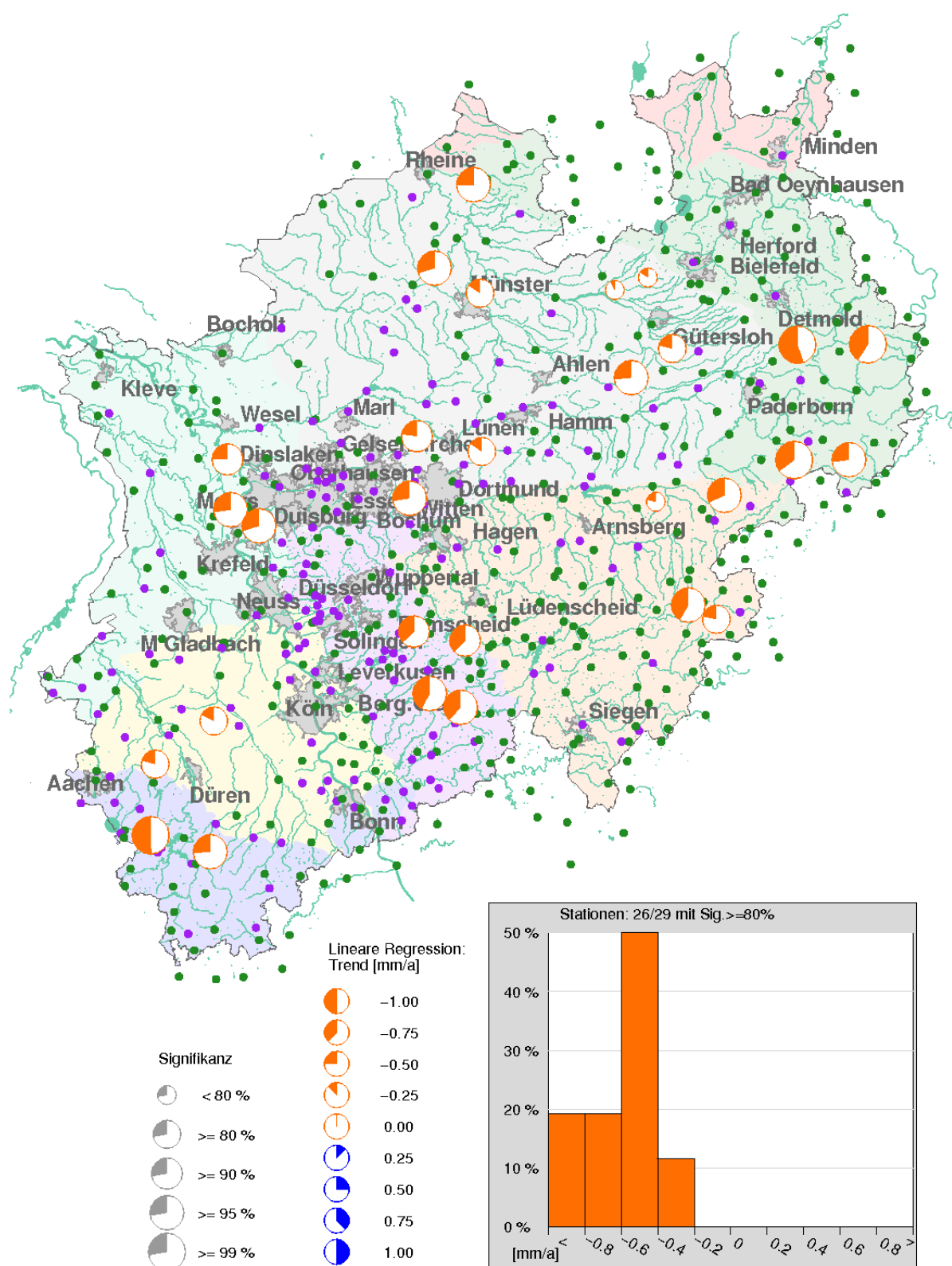


Abbildung 13.44: Trends der Halbjahresniederschlagssummen (Sommerhalbjahr) für das Modell WETTREG aus linearer Regression (Überprüfung des Signifikanzniveaus mit t-Test) für die Ferne Zukunft 2001-2100

Tabelle 13.31: Anzahl der Rasterfelder/Stationen mit signifikanten Trends ($\alpha \geq 0,9$) in den Monatsniederschlagssummen in der Nahen Zukunft 2001-2050 (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG/STAR2: 29 Stationen); signifikant positive Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind blau, signifikant negative Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind orange markiert

Trendverhalten Monatssummen – Nahe Zukunft 2001-2050, $\alpha \geq 0,9$				
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]	Anzahl STAR2 [%]
Januar	0	72	0	28
Februar	0	0	31	0
März	19	0	0	0
April	0	0	0	31
Mai	0	0	0	27
Juni	0	100	7	0
Juli	0	0	3	24
August	0	0	10	45
September	0	0	0	21
Oktober	0	0	10	45
November	0	13	28	59
Dezember	9	0	0	3

Tabelle 13.32: Anzahl der Rasterfelder/Stationen mit signifikanten Trends ($\alpha \geq 0,8$) in den Monatsniederschlagssummen in der Fernen Zukunft 2001-2100 (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen); signifikant positive Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind blau, signifikant negative Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind orange markiert

Trendverhalten Monatssummen – Ferne Zukunft 2001-2100, $\alpha \geq 0,8$			
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]
Januar	88	100	100
Februar	0	3	100
März	0	6	0
April	100	50	3
Mai	0	44	28
Juni	81	34	55
Juli	100	63	93
August	100	100	10
September	38	6	24
Oktober	3	0	0
November	16	53	3
Dezember	100	3	93

Tabelle 13.33: Anzahl der Rasterfelder/Stationen mit signifikanten Trends ($\alpha \geq 0,9$) in den Monatsniederschlagssummen in der Fernen Zukunft 2001-2100 (CLM: 32 Rasterfelder, WETTREG: 29 Stationen); signifikant positive Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind blau, signifikant negative Trends an mindestens einem Drittel der Rasterfelder/Stationen sind orange markiert

Trendverhalten Monatssummen – Ferne Zukunft 2001-2100, $\alpha \geq 0,9$			
Steigung der Trendgeraden aus linearer Regression [mm/a]	Anzahl CLM1 [%]	Anzahl CLM2 [%]	Anzahl WETTREG [%]
Januar	53	100	100
Februar	0	0	100
März	0	0	0
April	84	22	0
Mai	0	16	0
Juni	28	6	24
Juli	94	19	86
August	94	100	7
September	9	0	10
Oktober	0	0	0
November	0	34	0
Dezember	100	0	79

13.6.2 Änderungen der mittleren monatlichen Niederschlagssummen in der Nahen und Fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum

In einem zweiten Schritt wird untersucht, wie stark sich die mittleren Monatsniederschlagssummen über einen 30-Jahre Zeitraum in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) gegenüber dem Referenzzeitraum (1961-1990) ändern. Bei dieser Untersuchung werden keine Trends, sondern mittlere absolute Änderungen der Monatsniederschlagssummen ermittelt. Die Untersuchungen werden nur mit den beiden CLM-Modellläufen ($\leftrightarrow$ Abb. 13.45 und 13.46) und dem Modell WETTREG ($\leftrightarrow$ Abb. 13.47) durchgeführt, da für STAR2 weder Daten in der Fernen Zukunft, noch für den gesamten Referenzzeitraum vorliegen. Zudem werden die mittleren Niederschlagssummen der einzelnen Quartale/Jahreszeiten in den einzelnen Zeitfenstern gegenübergestellt (CLM: $\leftrightarrow$ Abb. 13.48 und Abb. 13.49, WETTREG: $\leftrightarrow$ Abb. 13.50).

Die quartalsweise Betrachtung glättet leichte zeitliche Verschiebungen zwischen den Monaten und lässt dennoch eine Aussage darüber zu, ob sich Änderungen in den Halbjahren (Winterhalbjahr/Sommerhalbjahr) gleichmäßig über das gesamte Halbjahr verteilen, oder sich auf kürzere Zeiträume konzentrieren.

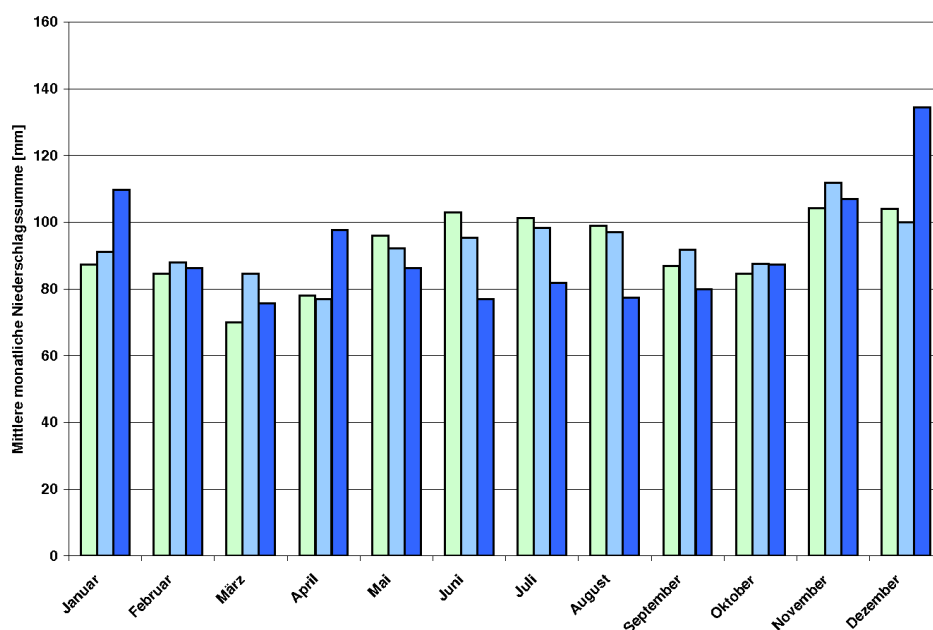


Abbildung 13.45: Entwicklung der mittleren monatlichen Niederschlagssummen im Modelllauf CLM1 für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990; Mittelwerte aus 32 Rasterfeldern aus Gesamt-NRW

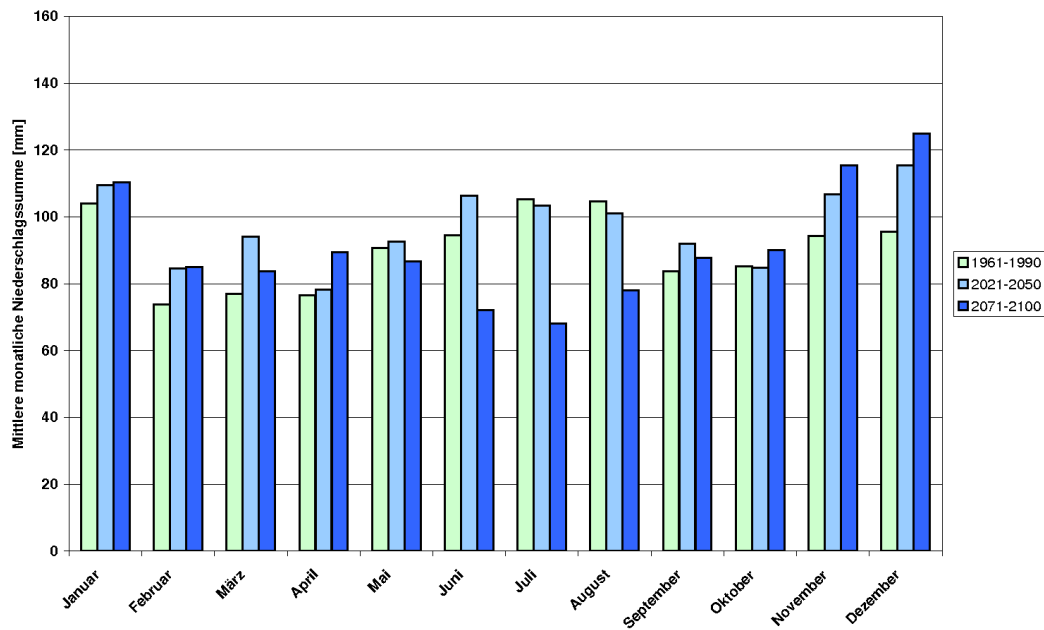


Abbildung 13.46: Entwicklung der mittleren monatlichen Niederschlagssummen im Modelllauf CLM2 für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990; Mittelwerte aus 32 Rasterfeldern aus Gesamt-NRW

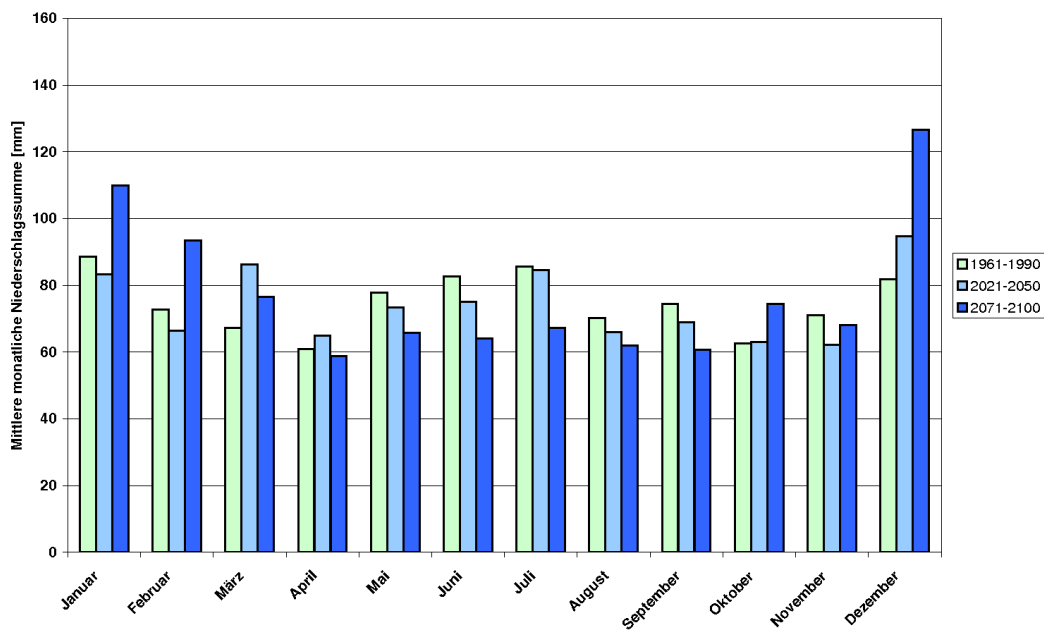


Abbildung 13.47: Entwicklung der mittleren monatlichen Niederschlagssummen im Modell WETTREG für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990; Mittelwerte aus 29 Stationen aus Gesamt-NRW

13 Trendanalysen von Niederschlagszeitreihen regionaler Klimamodelle

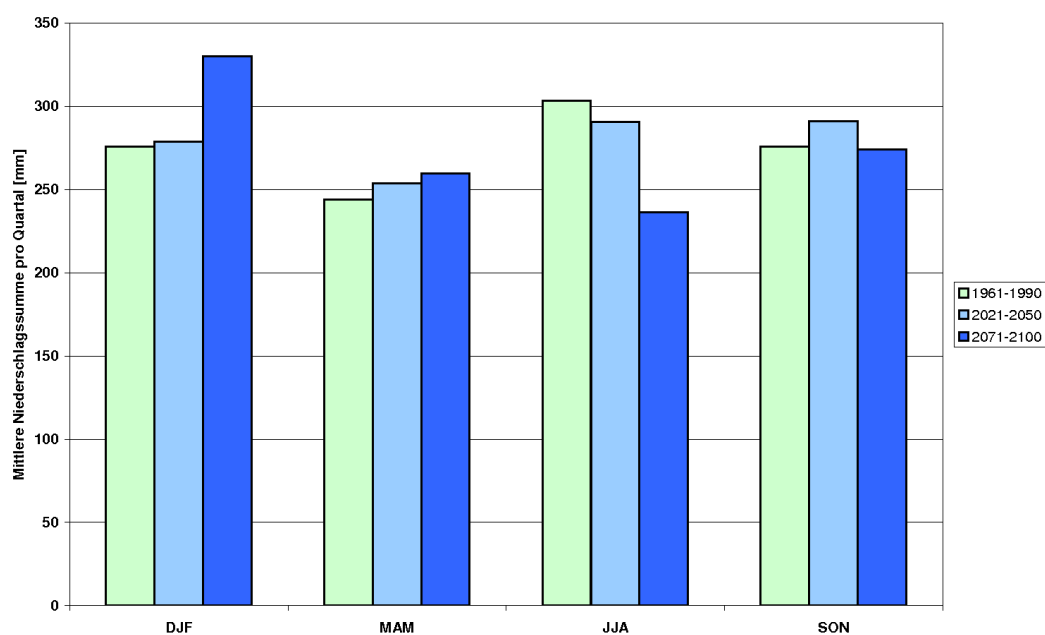


Abbildung 13.48: Entwicklung der mittleren Niederschlagssummen pro Quartal im Modelllauf CLM1 für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990; Mittelwerte aus 32 Rasterfeldern aus Gesamt-NRW

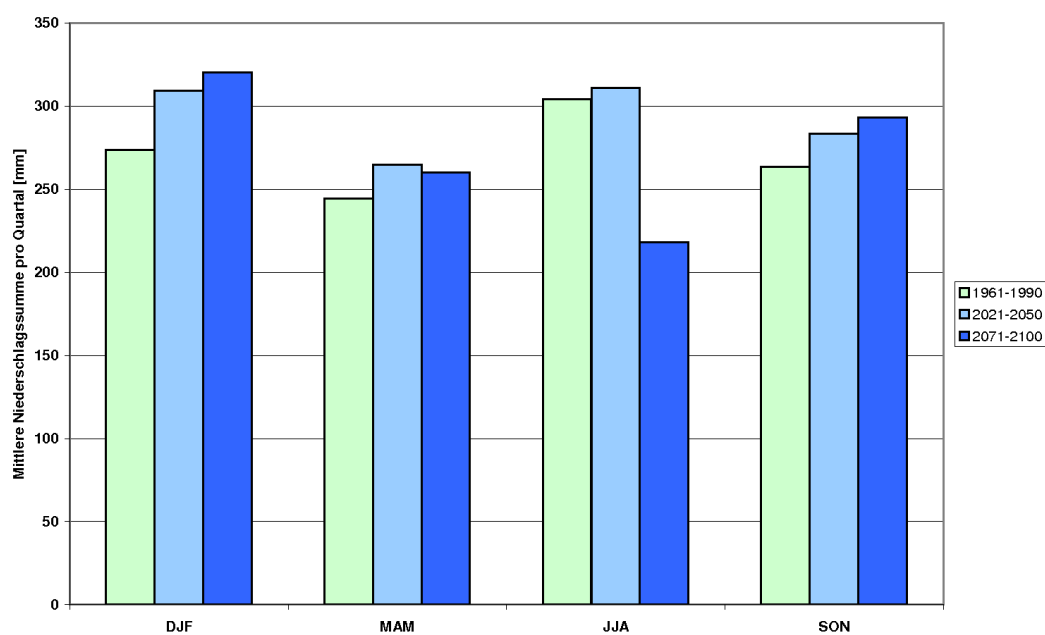


Abbildung 13.49: Entwicklung der mittleren Niederschlagssummen pro Quartal im Modelllauf CLM2 für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990; Mittelwerte aus 32 Rasterfeldern aus Gesamt-NRW

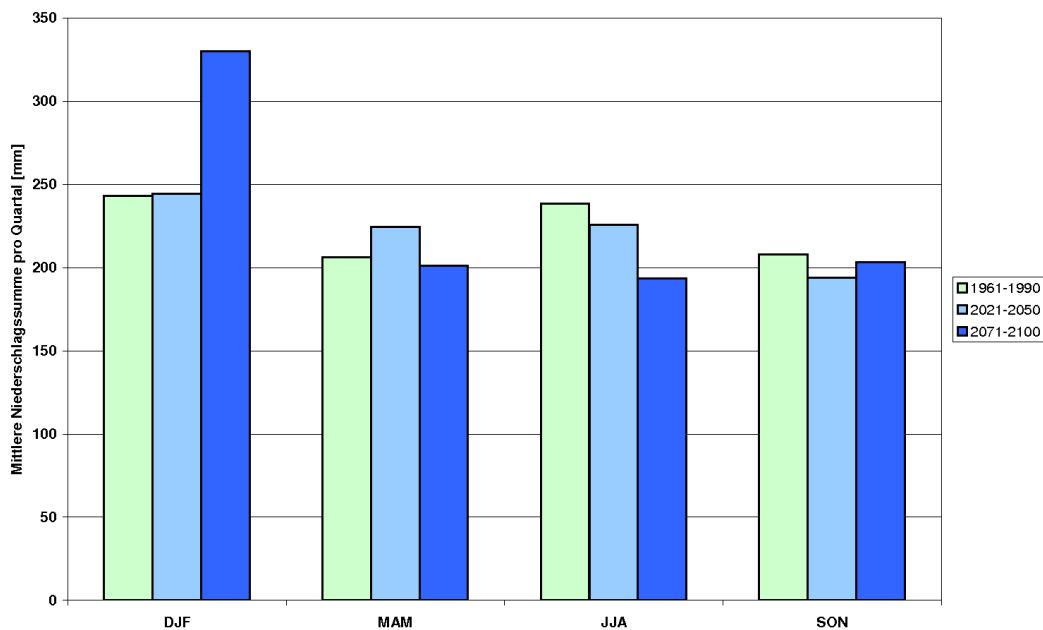


Abbildung 13.50: Entwicklung der mittleren Niederschlagssummen pro Quartal im Modell WETTREG für die Nahe Zukunft (2021-2050) und die Ferne Zukunft (2071-2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990; Mittelwerte aus 29 Stationen aus Gesamt-NRW

13.6.3 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der Änderungen in den mittleren monatlichen Niederschlagssummen unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Trendanalysen

Die Vergleiche der mittleren Monats- und Quartalsniederschlagssummen über Zeitfenster von je 30 Jahren bestätigen im Wesentlichen die Aussage der Trenduntersuchungen, dass für die Nahe Zukunft eher mit moderaten Änderungen der Niederschlagssummen und in der Fernen Zukunft mit ausgeprägten Änderungen zu rechnen ist. Im Folgenden beschriebene Unterschiede zu den Ergebnissen der Trendanalysen resultieren daher, dass der Referenzzeitraum 1961-1990 zeitlich vor dem Startpunkt der Trendanalysen (2001) liegt. Außerdem werden bei Vergleichen von mittleren Werten über 30-Jahre-Zeiträume stationäre Verhältnisse in den 30 Jahren vorausgesetzt, und somit Änderungen über die Zeit in den 30 Jahren nicht berücksichtigt.

In der Nahen Zukunft fallen die Unterschiede der mittleren Monats- und Quartalsniederschlagssummen gegenüber dem Referenzzeitraum moderat aus, sodass auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Modellen/Modellläufen auftreten. Die größten Unterschiede treten in allen drei Modellen/Modellläufen im Monat März auf. Hier ist in allen drei Modellen/Modellläufen mit den größten Zunahmen zu rechnen. Beim Modelllauf

CLM2 nehmen zudem die Niederschlagssummen im Monat Dezember und im entsprechenden Winterquartal (DJF) überdurchschnittlich zu.

In der Fernen Zukunft zeigt sich in allen drei Modellen/Modellläufen, dass die Zunahmen in den Winterhalbjahren und die Abnahmen in den Sommerhalbjahren insbesondere durch das Winterquartal (DJF) und durch das Sommerquartal (JJA) und weniger durch das Frühjahrquartal (MAM) und das Herbstquartal (SON) resultieren.

Bei WETTREG fallen die Zunahmen im Winterquartal etwas höher aus als in den CLM-Läufen und die Abnahmen im Sommerquartal sind etwas moderater, was sich auch in den Trendanalysen der Halbjahresniederschlagssummen widerspiegelt ($\leftrightarrow$ Kap. 13.5.3), ohne aber die Gesamtaussage zu verfälschen. Bei den Monatsniederschlagssummen sind in der Fernen Zukunft die Änderungen in den einzelnen Modellen/Modellläufen etwas größer als in der Nahen Zukunft. Dennoch fällt auf, dass insbesondere die Monate Dezember und Januar (nur CLM1 und WETTREG) zu den hohen Zunahmen im Winterquartal und die Monate Juni, Juli und August (nur CLM1 und CLM2) zu den starken Abnahmen des Sommerquartals führen.

13.7 Niederschlagsstatistik nach dem ATV Arbeitsblatt A 121 für D=1 Tag und D=3 Tage

Für die Abschätzung zukünftiger Entwicklungen von Hochwässern sind weniger mögliche Änderungen in den Hauptwerten, als vielmehr Änderungen von Regenhöhen in kürzeren Dauerstufen von Interesse. Da sämtliche Daten der regionalen Klimamodelle nur als Tagessummen durch die Software IDP zur Verfügung gestellt werden konnten, ist eine Analyse sehr kleiner Dauerstufen ($D < 24$ Stunden) im Rahmen von ExUS nicht möglich. Es wurde daher auf Basis der Tagessummen eine Niederschlagsstatistik nach dem ATV-Arbeitsblatt A 121 durchgeführt, um zumindest die Entwicklung der Regenhöhen für die Dauerstufe D=1 Tag in den Modellrechnungen der regionalen Klimamodelle abschätzen zu können. Zudem wurde untersucht, ob für die Dauerstufe D=3 Tage signifikante Unterschiede zu den Entwicklungen in der Dauerstufe D=1 Tag festzustellen sind.

Die Niederschlagsstatistik wurde sowohl in der Nahen Zukunft (2021-2050) als auch in der Fernen Zukunft (2071-2100) auf Basis einer partiellen Serie in einem Zeitraum von jeweils 30 Jahren durchgeführt. Die Änderungen beziehen sich jeweils auf die Ergebnisse der Niederschlagsstatistik im Referenzzeitraum 1961-1990. Die statistische Auswertung und ihre grafische Darstellung wurden für diverse Wiederkehrzeiten zwischen 1 Jahr und 20 Jahre durchgeführt. Die Abbildungen zu sämtlichen Kombinationen aus den zuvor genannten Dauerstufen und Wiederkehrzeiten sind im Anhang H zusammengefasst. Eine detaillierte Beschreibung wird im Folgenden exemplarisch für die Entwicklung der Regenhöhen der Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre durchgeführt. Auf mögliche Unterschiede zur Dauerstufe D=3 Tage und andere Wiederkehrzeiten wird hingewiesen. Im Folgenden werden die untersuchten Dauerstufen und Wiederkehrzeiten zusammengefasst. Auf die fett markierte Kombination wird im Anschluss detaillierter eingegangen.

13.7 Niederschlagsstatistik nach dem ATV Arbeitsblatt A 121 für D=1 Tag und D=3 Tage

- Dauerstufen D: **1 Tag** und 3 Tage
- Wiederkehrzeiten T: 1 Jahre, 2 Jahre, 3,3 Jahre, **5 Jahre**, 10 Jahre und 20 Jahre

In den folgenden grafischen Darstellungen wurden für die Stationen je Pack (näheres zu den Packs siehe Kapitel 13.3) einheitliche Färbungen verwendet, die in Tabelle 13.34 zusammengefasst werden.

13.7.1 Ergebnisinterpretation für Gesamt-NRW

Bei der Datenauswertung zeigte sich, dass bei den Regenhöhen gerade zwischen den Modellen/Modellläufen unterschiedliche Entwicklungen festzustellen sind. Die Ergebnisinterpretation erfolgt daher zunächst für jedes Modell bzw. für jeden Modelllauf separat. STAR2 wurde aufgrund der zu kurzen Datenreihe nicht analysiert.

13.7.1.1 Entwicklung der Regenhöhen D=1 Tag und D=3 Tage im Modell CLM, Realisierung 1

Bis auf einige regionale Besonderheiten, auf die im Kapitel 13.7.2 eingegangen wird, nehmen im Modelllauf CLM1 die Regenhöhen in der Nahen Zukunft zu. In der Fernen Zukunft bleiben die Regenhöhen je nach Region in etwa auf dem Niveau der Nahen Zukunft oder nehmen weiter zu.

Die Spanne der Änderungen der Regenhöhen nimmt mit größer werdender Wiederkehrzeit stetig zu ($\hookrightarrow$ Abb. 13.51 für T=1 Jahr und Abb.13.52 für T=20 Jahre).

Die Entwicklung der Regenhöhen für die insbesondere im Kapitel 13.7.2 näher untersuchte

Tabelle 13.34: Färbungen der einzelnen Packs in den grafischen Darstellungen zu den Tages- und 3-Tagesniederschlagssummen

Färbungen in grafischen Darstellungen		
Pack	Region/Großlandschaft	Färbung
1	nordwestliche Westfälische Bucht	rot
2	östliche Westfälische Bucht	orange
3	Weserbergland	dunkelblau
4	Niederrheinisches Tiefland	dunkelgrün
5	südliche Westfälische Bucht/Ruhrgebiet	hellgrün
6	östliches Sauer- und Siegerland	hellblau
7	Bergisches Land	violett
8	Niederrheinische Bucht und Eifel	grau

Wiederkehrzeit $T=5$ Jahre ($\hookrightarrow$ Abb.13.53) ist aber repräsentativ für die generelle Entwicklung in der Nahen und in der Fernen Zukunft bei allen untersuchten Wiederkehrzeiten. Auch für die Dauerstufe $D=3$ Tage ist eine ähnliche Entwicklung zu erkennen ($\hookrightarrow$ Abb. 13.54). Die Spanne der Änderungen ist aber geringer als bei den Regenhöhen $D=1$ Tag und auch die Zunahme mit größer werdender Wiederkehrzeit ist moderater.

In Tabelle 13.35 werden die Spannen für die Änderungen der Regenhöhen $D=1$ Tag und $D=3$ Tage in der Nahen und Fernen Zukunft zusammengefasst. Die Abbildung 13.55 ($T=5$ Jahre, Nahe Zukunft) und die Abbildung 13.56 ($T=5$ Jahre, Ferne Zukunft) zeigen exemplarisch die räumlichen Unterschiede in den Änderungen der Regenhöhen im Vergleich zum Referenzzeitraum. Die weiteren grafischen und räumlichen Darstellungen zu den anderen Wiederkehrzeiten werden im Anhang H zusammengefasst.

Tabelle 13.35: Spanne der Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) in den Dauerstufen $D=1$ Tag und $D=3$ Tage für die Wiederkehrzeiten $T=1$ Jahr, 5 Jahre und 20 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM1

Spanne der Änderung der Regenhöhen nach A 121, CLM1						
Wiederkehrzeit/ Dauerstufe	Änderung 2071-2100 vs. 1961-1990			Änderung 2021-2050 vs. 1961-1990		
	Min [%]	Max [%]	Mittel [%]	Min [%]	Max [%]	Mittel [%]
$T=1$ Jahr/ $D=1$ Tag	0	+29	+13	+6	+22	+19
$T=5$ Jahre/ $D=1$ Tag	-9	+60	+21	+5	+49	+28
$T=20$ Jahre/ $D=1$ Tag	-12	+75	+25	+4	+62	+32
$T=1$ Jahr/ $D=3$ Tage	-4	+19	+8	+2	+14	+11
$T=5$ Jahre/ $D=3$ Tage	-10	+37	+13	-5	+27	+17
$T=20$ Jahre/ $D=3$ Tage	-13	+47	+15	-9	+34	+20

13.7 Niederschlagsstatistik nach dem ATV Arbeitsblatt A 121 für $D=1$ Tag und $D=3$ Tage

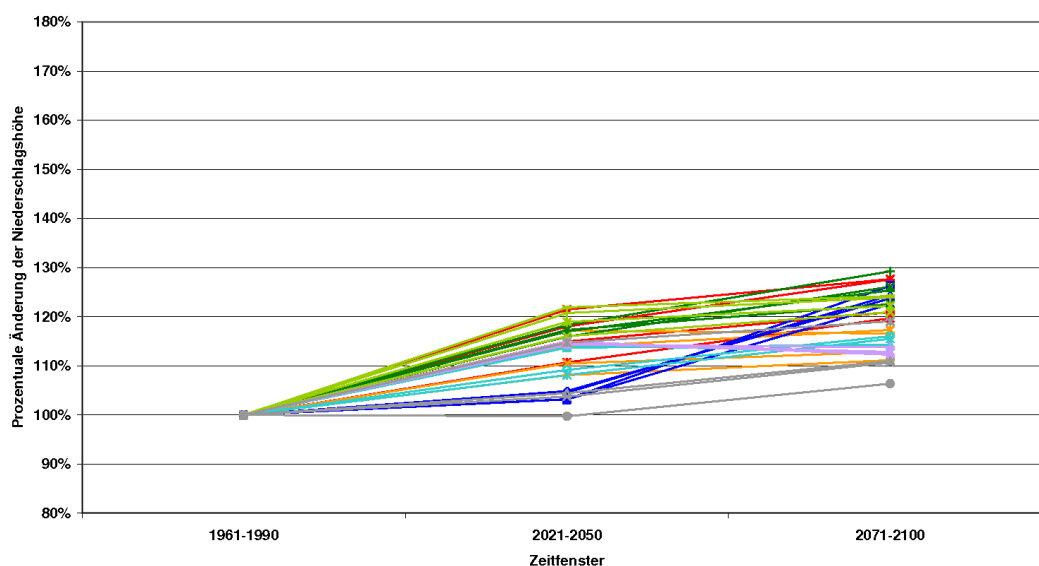


Abbildung 13.51: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe $D=1$ Tag und die Wiederkehrzeit $T=1$ Jahr in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM1

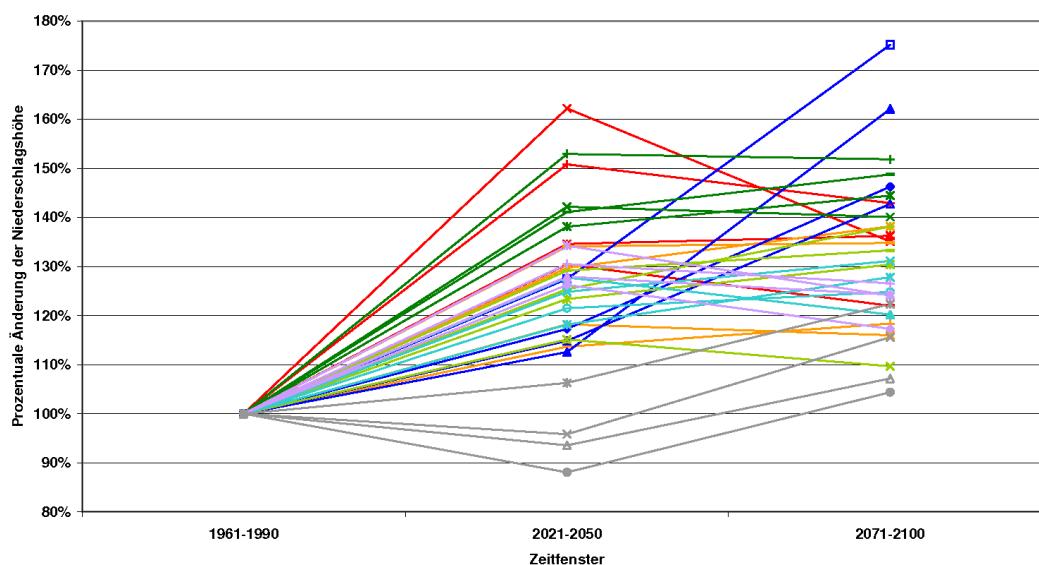


Abbildung 13.52: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe $D=1$ Tag und die Wiederkehrzeit $T=20$ Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM1

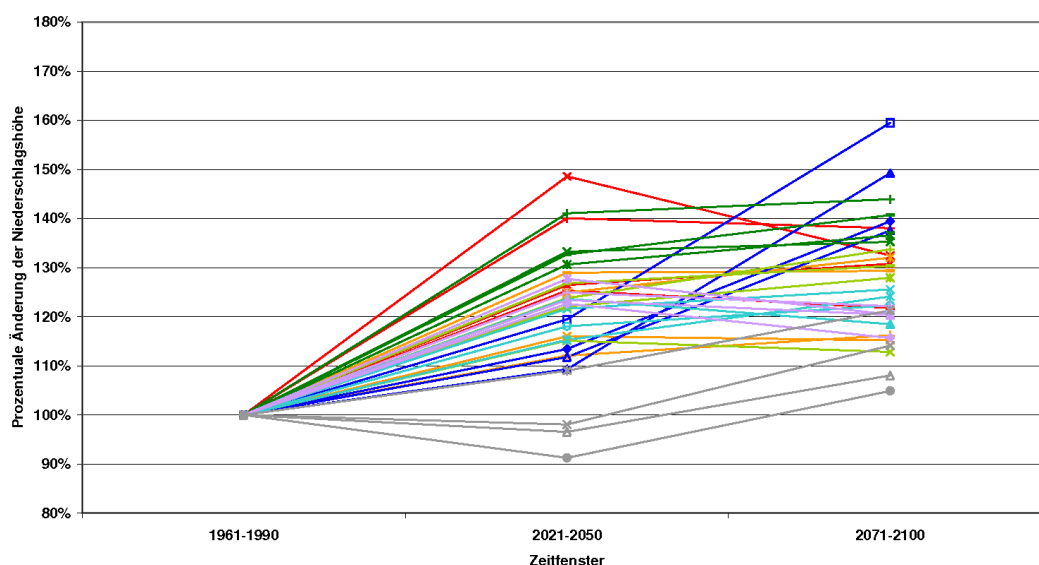


Abbildung 13.53: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM1

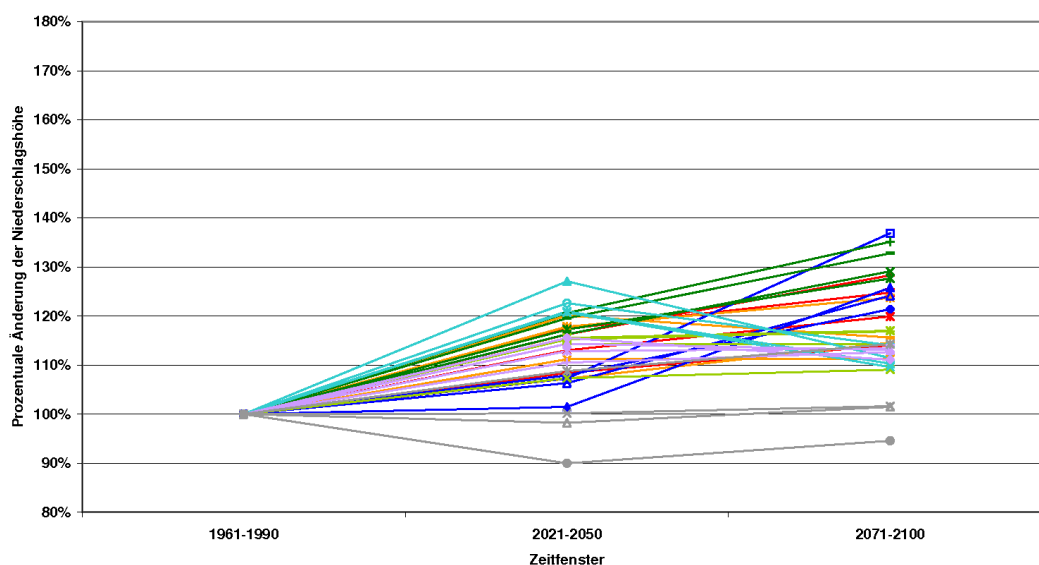


Abbildung 13.54: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=3 Tage und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM1

13.7 Niederschlagsstatistik nach dem ATV Arbeitsblatt A 121 für D=1 Tag und D=3 Tage

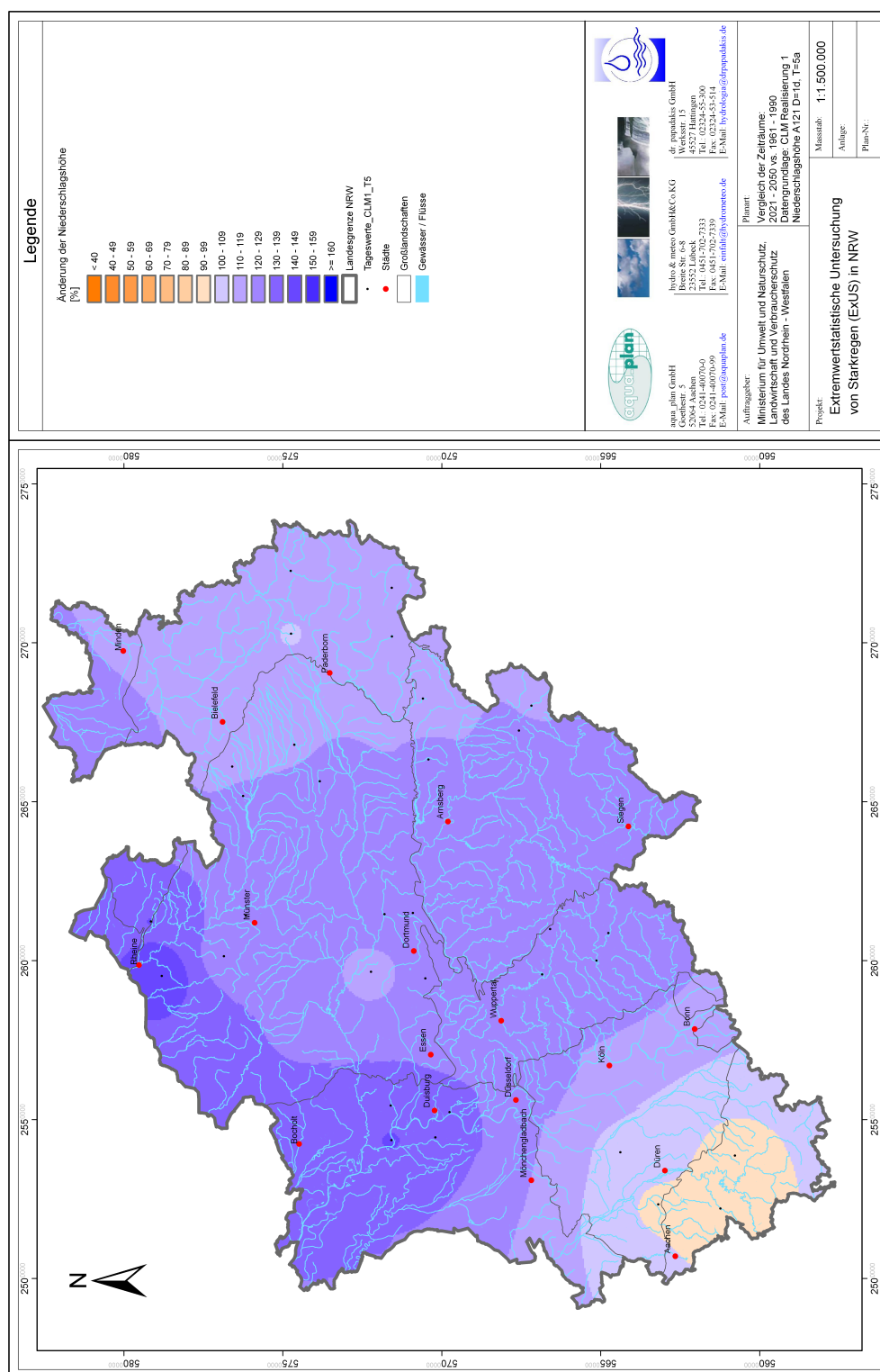


Abbildung 13.55: Räumliche Darstellung der Änderungen der Regenhöhen in der Nahe Zukunft (2021-2050) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM1

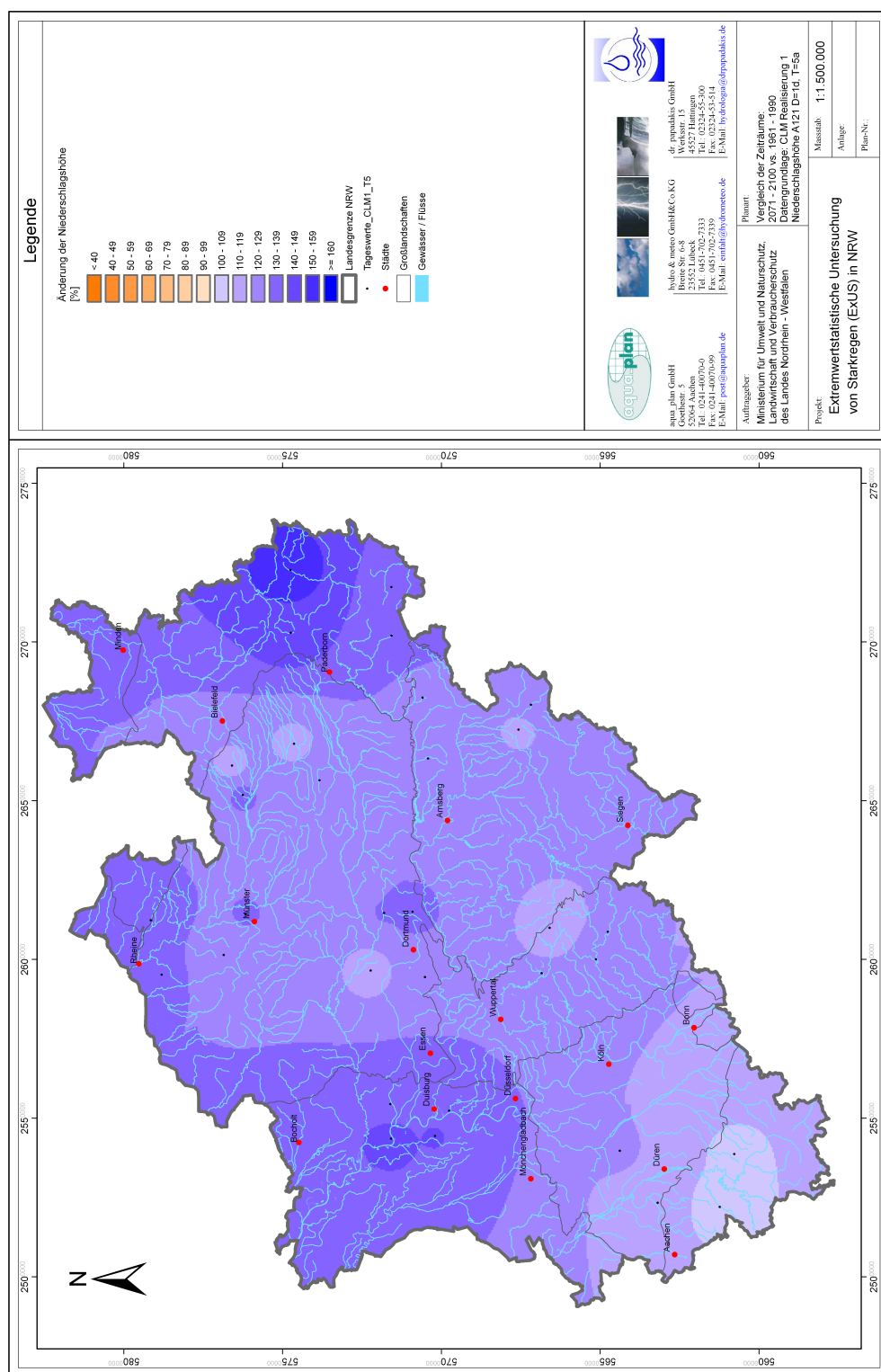


Abbildung 13.56: Räumliche Darstellung der Änderungen der Regenhöhen in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM1

13.7.1.2 Entwicklung der Regenhöhen $D=1$ Tag und $D=3$ Tage im Modell CLM, Realisierung 2

Im Modelllauf CLM2 besitzen die Änderungen der Regenhöhen $D=1$ Tag in der Nahen Zukunft ein insgesamt geringeres Niveau als im Modelllauf CLM1. Überwiegend nehmen die Regenhöhen $D=1$ Tag zu, die Stationen mit moderaten Abnahmen sind aber im Gegensatz zu CLM1 nicht mehr auf eine Region begrenzt.

Die Spanne der Änderungen der Regenhöhen $D=1$ Tag nimmt insbesondere in der Nahen Zukunft mit größer werdender Wiederkehrzeit stetig zu ($\hookrightarrow$ Abb. 13.57 für $T=1$ Jahr und Abb. 13.58 für $T=20$ Jahre). Die Entwicklung der Regenhöhen $D=1$ Tag für die insbesondere im Kapitel 13.7.2 näher untersuchte Wiederkehrzeit $T=5$ Jahre ($\hookrightarrow$ Abb. 13.59) ist aber repräsentativ für die generelle Entwicklung in der Nahen und in der Fernen Zukunft bei allen untersuchten Wiederkehrzeiten. Auch für die Dauerstufe $D=3$ Tage ist eine ähnliche Entwicklung zu erkennen ($\hookrightarrow$ Abb. 13.60). Die Spanne der Änderungen ist aber geringer als bei den Regenhöhen $D=1$ Tag. In Tabelle 13.36 werden die Spannen für die Änderungen der Regenhöhen $D=1$ Tag und $D=3$ Tage in der Nahen und Fernen Zukunft zusammengefasst. Die Abbildung 13.61 ($T=5$ Jahre, Nahe Zukunft) und die Abbildung 13.62 ($T=5$ Jahre, Ferne Zukunft) zeigen exemplarisch die räumlichen Unterschiede in den Änderungen der Regenhöhen im Vergleich zum Referenzzeitraum. Die weiteren grafischen und räumlichen Darstellungen zu den anderen Wiederkehrzeiten werden im Anhang H zusammengefasst.

Auffällig ist, dass die Regenhöhen $D=1$ Tag in der Fernen Zukunft an den einzelnen Stationen ein überwiegend gegenläufiges Verhalten gegenüber der Nahen Zukunft aufweisen ($\hookrightarrow$ Abb. 13.59). Nach starken Zunahmen in der Nahen Zukunft folgen überwiegend ähnlich starke Abnahmen in der Fernen Zukunft und auf moderate Abnahmen in der Nahen Zukunft folgen moderate Zunahmen in der Fernen Zukunft. Als Folge liegen bis auf regionale Besonderheiten, auf die im Kapitel 13.7.2 eingegangen wird, in der Fernen Zukunft die Änderungen der Regenhöhen $D=1$ Tag überwiegend nur noch im Intervall zwischen -10 % und +10 %. Dies gilt für alle untersuchten Wiederkehrzeiten.

Tabelle 13.36: Spanne der Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) in den Dauerstufen D=1 Tag und D=3 Tage für die Wiederkehrzeiten T=1 Jahr, 5 Jahre und 20 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2

Spanne der Änderung der Regenhöhen nach A 121, CLM2						
Wiederkehrzeit/ Dauerstufe	Änderung 2071-2100 vs. 1961-1990			Änderung 2021-2050 vs. 1961-1990		
	Min [%]	Max [%]	Mittel [%]	Min [%]	Max [%]	Mittel [%]
T=1 Jahr/D=1 Tag	0	+20	+10	-3	+15	+6
T=5 Jahre/D=1 Tag	-8	+41	+13	-10	+28	+3
T=20 Jahre/D=1 Tag	-13	+49	+15	-14	+35	+2
T=1 Jahr/D=3 Tage	+6	+19	+11	-1	+12	+5
T=5 Jahre/D=3 Tage	0	+32	+12	-8	+18	+3
T=20 Jahre/D=3 Tage	-4	+39	+13	-12	+21	+3

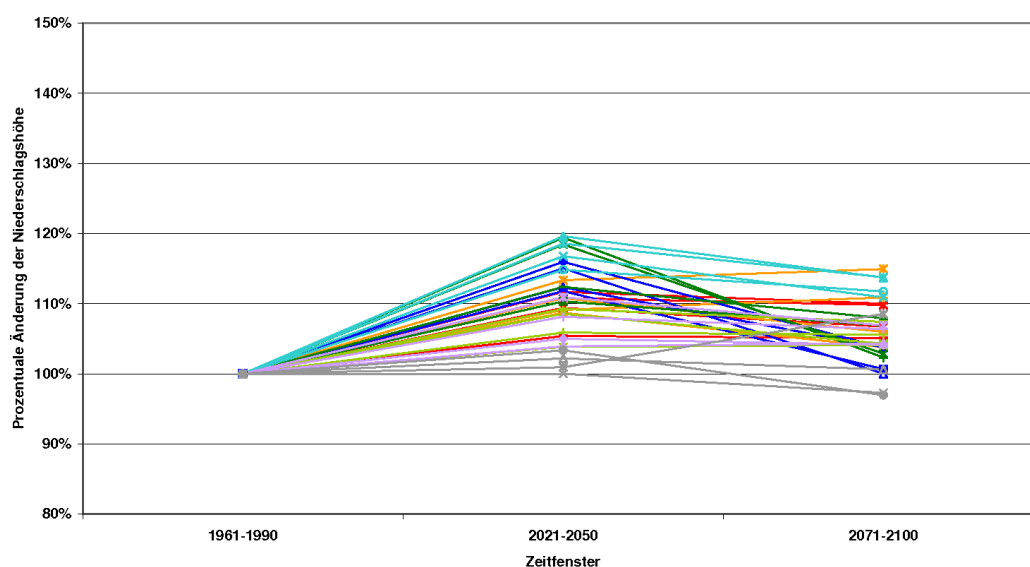


Abbildung 13.57: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=1 Jahr in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2

13.7 Niederschlagsstatistik nach dem ATV Arbeitsblatt A 121 für $D=1$ Tag und $D=3$ Tage

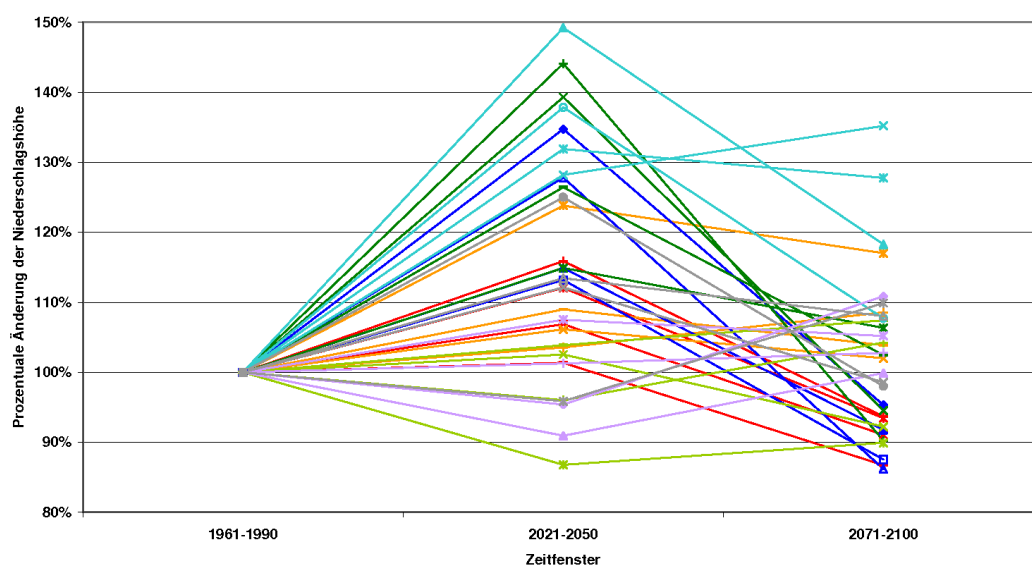


Abbildung 13.58: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe $D=1$ Tag und die Wiederkehrzeit $T=20$ Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2

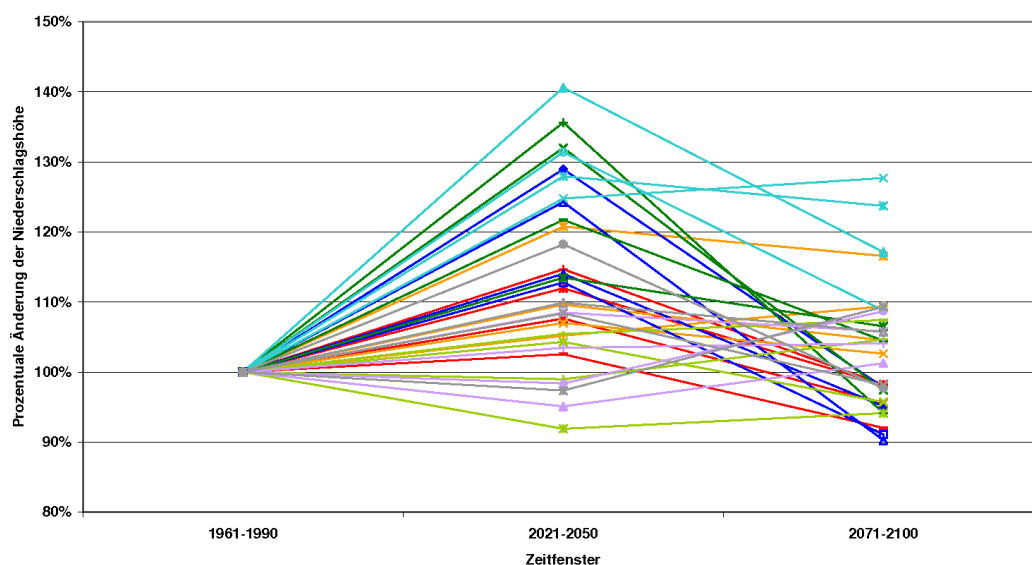


Abbildung 13.59: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe $D=1$ Tag und die Wiederkehrzeit $T=5$ Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2

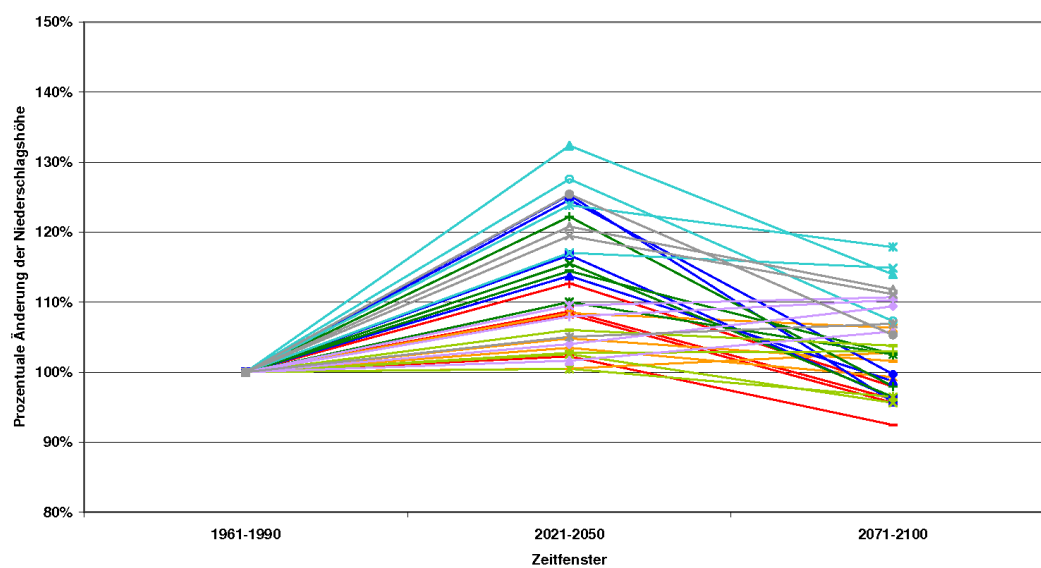


Abbildung 13.60: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=3 Tage und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2

13.7 Niederschlagsstatistik nach dem ATV Arbeitsblatt A 121 für $D=1$ Tag und $D=3$ Tage

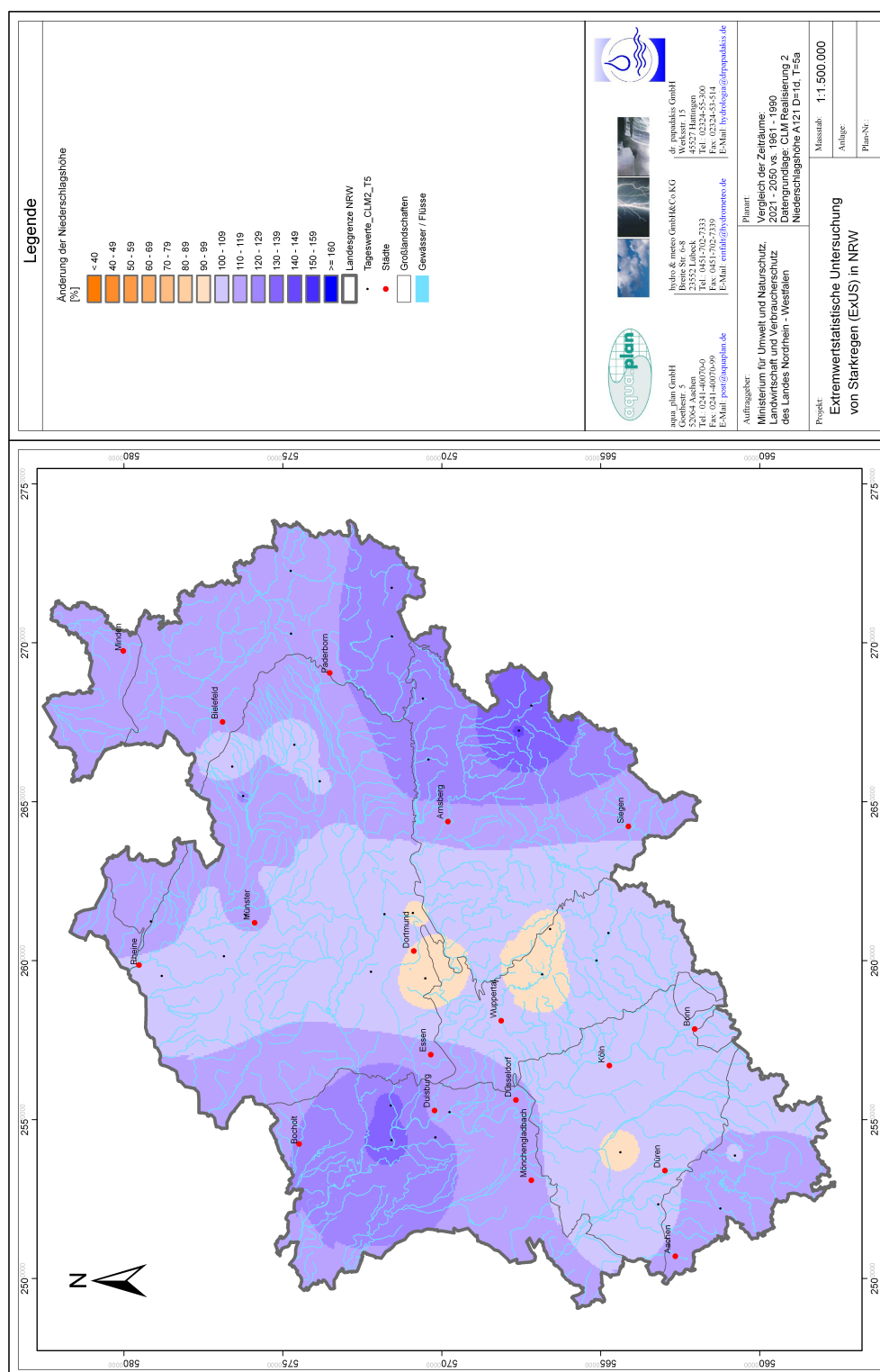


Abbildung 13.61: Räumliche Darstellung der Änderungen der Regenhöhen in der Nahe Zukunft (2021-2050) für die Dauerstufe $D=1$ Tag und die Wiederkehrzeit $T=5$ Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2

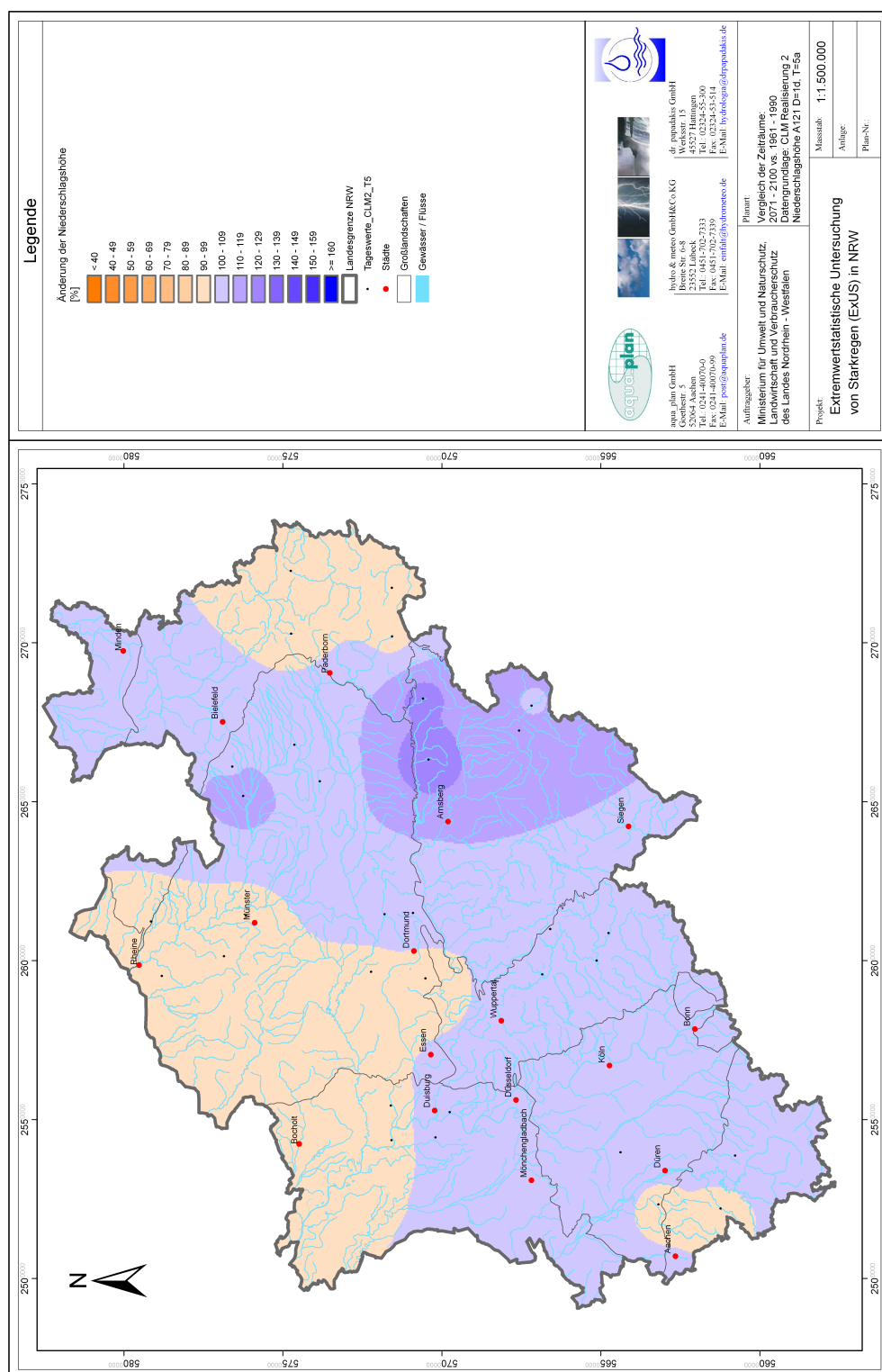


Abbildung 13.62: Räumliche Darstellung der Änderungen der Regenhöhen in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM2

13.7.1.3 Entwicklung der Regenhöhen $D=1$ Tag und $D=3$ Tage im Modell WETTREG

Beim Modell WETTREG fallen die Änderungen der Regenhöhen in der Nahen und Fernen Zukunft überwiegend moderat aus. Der Anteil an Stationen mit Zunahmen und Abnahmen ist ausgewogen. Es treten alle Facetten in den Entwicklungen der Regenhöhen auf: stetige Zu- und Abnahmen, gegenläufiges Verhalten in der Nahen und Fernen Zukunft, keine signifikanten Änderungen in der Fernen gegenüber der Nahen Zukunft. Aber, anders als bei den CLM-Läufen, bei denen die Ausreißer ganze Regionen betreffen, fallen beim Modell WETTREG zwei einzelne Stationen durch ihre starken Zunahmen heraus.

Die Spanne der Änderungen der Regenhöhen $D=1$ Tag nimmt mit größer werdender Wiederkehrzeit stetig, aber bis auf die beiden Ausreißer gering zu ($\hookrightarrow$ Abb. 13.63 für $T=1$ Jahr und Abb. 13.64 für $T=20$ Jahre).

Die Entwicklung der Regenhöhen $D=1$ Tag für die insbesondere im Kapitel 13.7.2 näher untersuchte Wiederkehrzeit $T=5$ Jahre ($\hookrightarrow$ Abb. 13.65) ist aber repräsentativ für die generelle Entwicklung in der Nahen und in der Fernen Zukunft bei allen untersuchten Wiederkehrzeiten. Auch für die Dauerstufe $D=3$ Tage ist eine ähnliche Entwicklung zu erkennen ($\hookrightarrow$ Abb. 13.66). Die Spanne der Änderungen ist aber geringer als bei den Regenhöhen $D=1$ Tag und auch kleiner als bei den CLM-Läufen. Auch die Ausreißer werden durch die Betrachtung von drei aufeinander folgenden Tagen sehr stark gedämpft. In Tabelle 13.37 werden die Spannen für die Änderungen der Regenhöhe $D=1$ Tag und $D=3$ Tage in der Nahen und Fernen Zukunft zusammengefasst. Die Abbildung 13.67 ($T=5$ Jahre, Nahe Zukunft) und die Abbildung 13.68 ($T=5$ Jahre, Ferne Zukunft) zeigen exemplarisch die räumlichen Unterschiede in den Änderungen der Regenhöhen im Vergleich zum Referenzzeitraum. Die weiteren grafischen und räumlichen Darstellungen zu den anderen Wiederkehrzeiten werden im Anhang H zusammengefasst.

Tabelle 13.37: Spanne der Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) in den Dauerstufen D=1 Tag und D=3 Tage für die Wiederkehrzeiten T=1 Jahr, 5 Jahre und 20 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG

Spanne der Änderung der Regenhöhen nach A 121, WETTREG						
Wiederkehrzeit/ Dauerstufe	Änderung 2071-2100 vs. 1961-1990			Änderung 2021-2050 vs. 1961-1990		
	Min [%]	Max [%]	Mittel [%]	Min [%]	Max [%]	Mittel [%]
T=1 Jahr/D=1 Tag	-12	+12	-2	-12	+24	+2
T=5 Jahre/D=1 Tag	-16	+43	+2	-17	+70	+8
T=20 Jahre/D=1 Tag	-19	+61	+5	-20	+96	+11
T=1 Jahr/D=3 Tage	-11	+5	-3	-11	+14	-1
T=5 Jahre/D=3 Tage	-20	+13	-4	-14	+21	-3
T=20 Jahre/D=3 Tage	-24	+18	-5	-17	+26	-3

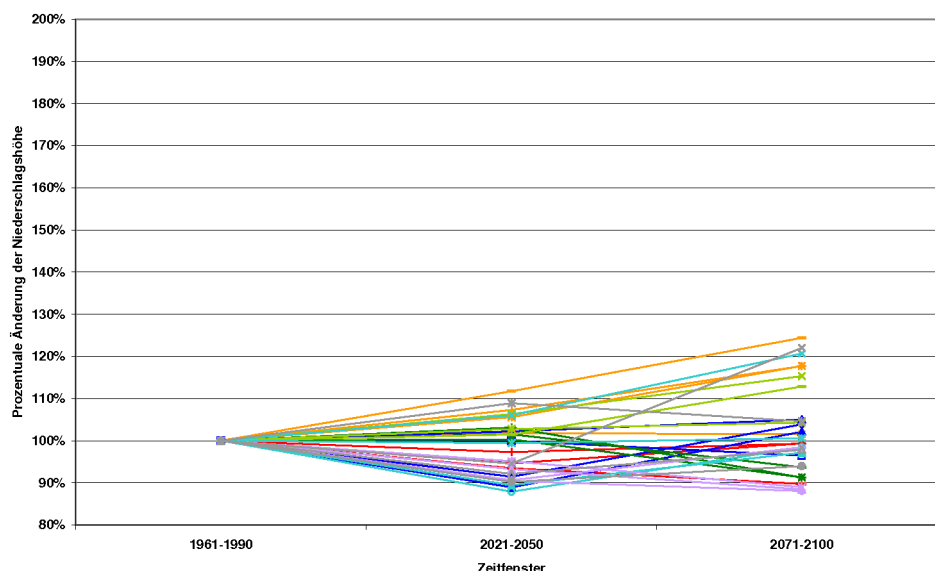


Abbildung 13.63: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=1 Jahr in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG

13.7 Niederschlagsstatistik nach dem ATV Arbeitsblatt A 121 für $D=1$ Tag und $D=3$ Tage

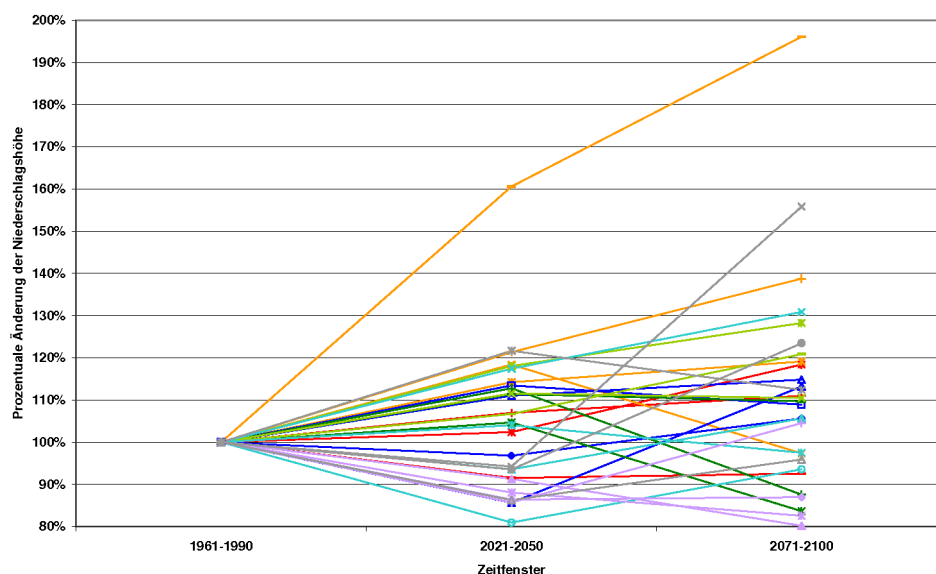


Abbildung 13.64: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe $D=1$ Tag und die Wiederkehrzeit $T=20$ Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG

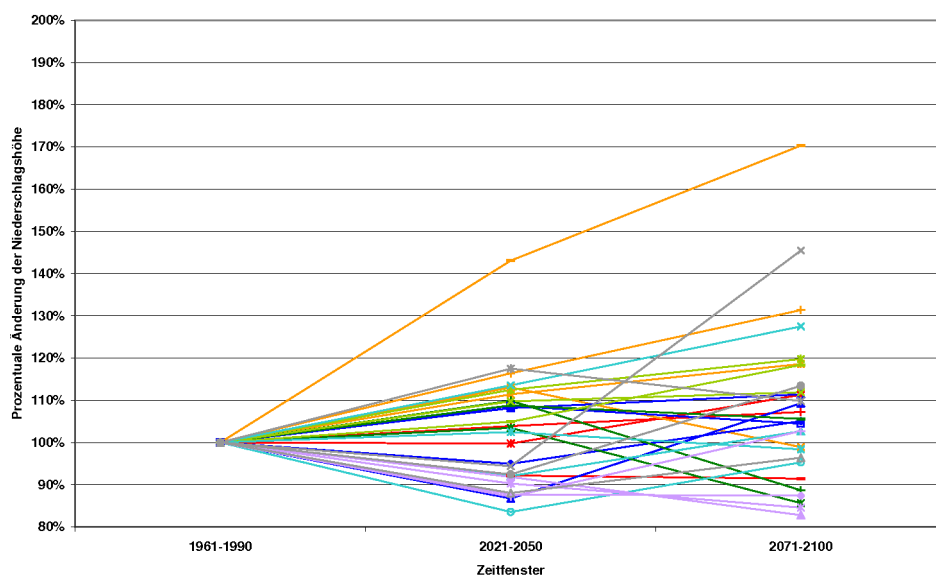


Abbildung 13.65: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe $D=1$ Tag und die Wiederkehrzeit $T=5$ Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG

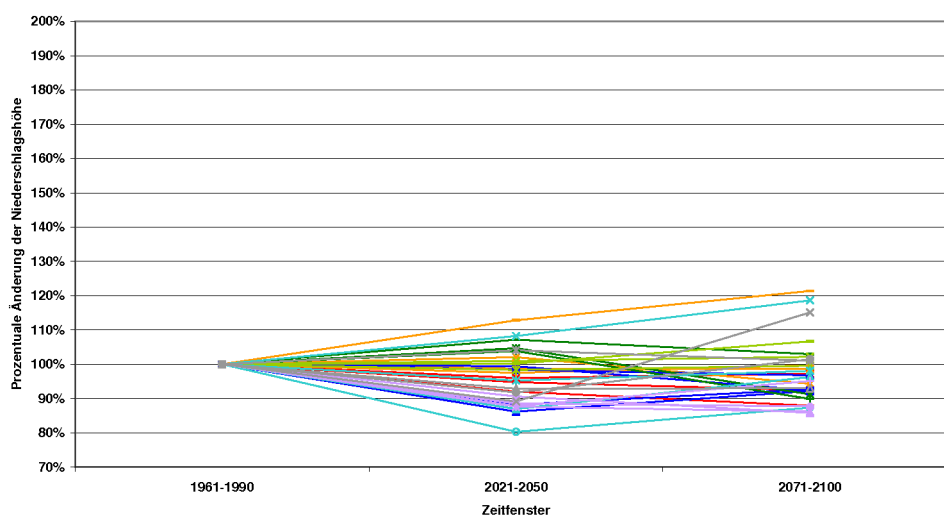


Abbildung 13.66: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=3 Tage und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG

13.7.2 Regionale Besonderheiten

Die regionalen Besonderheiten werden am Beispiel der Dauerstufe $D=1$ Tag und der Wiederkehrzeit $T=5$ Jahre beschrieben.

13.7.2.1 Räumliche Differenzierung der Entwicklungen der Regenhöhen $D=1$ Tag im Modell CLM, Realisierung 1

Die für den Modelllauf CLM1 typische Entwicklung der Regenhöhen ist die relativ starke Zunahme in der Nahen Zukunft und das dann annähernd konstant bleibende Niveau in der Fernen Zukunft. Diese Entwicklung findet sich in den folgenden vier der acht Packs. Allerdings unterscheidet sich das Maß der Zunahmen, wie die angegebenen Werte zeigen. Die Prozentangaben der Änderungen beziehen sich immer auf den Referenzzeitraum.

Pack 2 (östliche Westfälische Bucht): je nach Station +15 % bis +30 %.

Pack 6 (östliches Sauer- und Siegerland): +20 %

Überwiegend im **Pack 5** (südliche Westfälische Bucht/Ruhrgebiet): +25 % in der Nahen und +30 % in der Fernen Zukunft.

Pack 4 (Niederrheinisches Tiefland): +35 % in der Nahen und +40 % in der Fernen Zukunft.

Davon **abweichende Entwicklungen** zeigen sich in den folgenden Packs:

Pack 1 (nordwestliche Westfälische Bucht): je nach Station zunächst eine sehr starke Zunahme in der Nahen Zukunft (+25 % bis +50 %) und anschließend konstante Werte bis geringe Abnahmen in der Fernen Zukunft (+20 % bis +40 %).

Pack 3 (Weserbergland): je nach Station zunächst eine moderate Zunahme in der Nahen Zukunft (+10 % bis +20 %) und anschließend eine sehr starke Zunahme in der Fernen Zukunft (+40 % bis +60 %). **Pack 7** (Bergisches Land): Zunahme in der Nahen Zukunft (+25 %) und anschließend leichte Abnahme in der Fernen Zukunft (+20 %).

Überwiegend im **Pack 8** (Eifel/Niederrheinische Bucht): Zunächst geringe Abnahme in der Nahen Zukunft (-5 %) und anschließend Zunahme in der Fernen Zukunft (+10 %).

Bei der Niederschlagsstatistik nach dem Arbeitsblatt A 121 werden die Regenhöhen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer vor allem durch die größten Niederschlagsereignisse der zu Grunde gelegten partiellen Serie beeinflusst.

In den folgenden Abbildungen werden exemplarisch für die Rasterfelder zu den Stationen Winterberg Züschen DWD ($\leftrightarrow$ Abb. 13.69) und Lichtenau i.W.-Blankenrode DWD ($\leftrightarrow$ Abb. 13.70) die Häufigkeiten der Starkregenereignisse in den partiellen Serien dargestellt. In beiden Abbildungen ist deutlich die Zunahme besonders hoher Starkregenereignisse ($N \geq 70$ mm/Tag) in der Nahen und Fernen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum zu erkennen.

Die Station Winterberg Züschen DWD (Pack 6, östliches Sauer- und Siegerland) besitzt eine für den Modelllauf CLM1 typische Entwicklung der Tagesniederschlagssummen mit relativ starken Zunahmen der hohen Starkregenereignisse in der Nahen Zukunft (5 Ereignisse mit $N \geq 70$ mm/Tag) gegenüber dem Referenzzeitraum (2 Ereignisse mit $N \geq 70$ mm/Tag) und dann konstant bleibender Anzahl in der Fernen Zukunft (5 Ereignis-

se mit $N \geq 70$ mm/Tag). Entsprechend nimmt die prozentuale Änderung der Regenhöhe zunächst in der Nahen Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum um +18 % stärker zu ($\hookrightarrow$ Abb. 13.71, hellblaue Linie), und bleibt dann mit einer Änderung der Regenhöhe von +22 % (Ferne Zukunft gegenüber dem Referenzzeitraum) auf einem annähernd konstanten Niveau. Die massiven Verschiebungen der Regenereignisse von der Niederschlagsklasse 20,1 mm-30 mm in die höheren Klassen 30,1 mm-40 mm und 40,1 mm-50 mm wirken sich somit wesentlich weniger stark auf die Ergebnisse der Niederschlagsstatistik aus, als die Zunahme der Starkregenereignisse ($N \geq 70$ mm/Tag).

Die Werte an der Station Lichtenau i.W.-Blankenrode DWD (Pack 3, Weserbergland) zeigen die Ursache für die besonders starke Zunahme der Tagesniederschlagssummen in der Fernen Zukunft ($\hookrightarrow$ Abb. 13.71, dunkelblaue Linie). Nach einer moderaten Zunahme der hohen Starkregenereignisse in der Nahen Zukunft (3 Ereignisse mit $N \geq 70$ mm/Tag) gegenüber dem Referenzzeitraum (2 Ereignisse mit $N \geq 70$ mm/Tag), verdoppelt sich die Anzahl in der Fernen Zukunft (6 Ereignisse mit $N \geq 70$ mm/Tag) und führt so zu dem überdurchschnittlichen Anstieg der Tagesniederschlagssummen in der statistischen Auswertung.

13.7 Niederschlagsstatistik nach dem ATV Arbeitsblatt A 121 für D=1 Tag und D=3 Tage

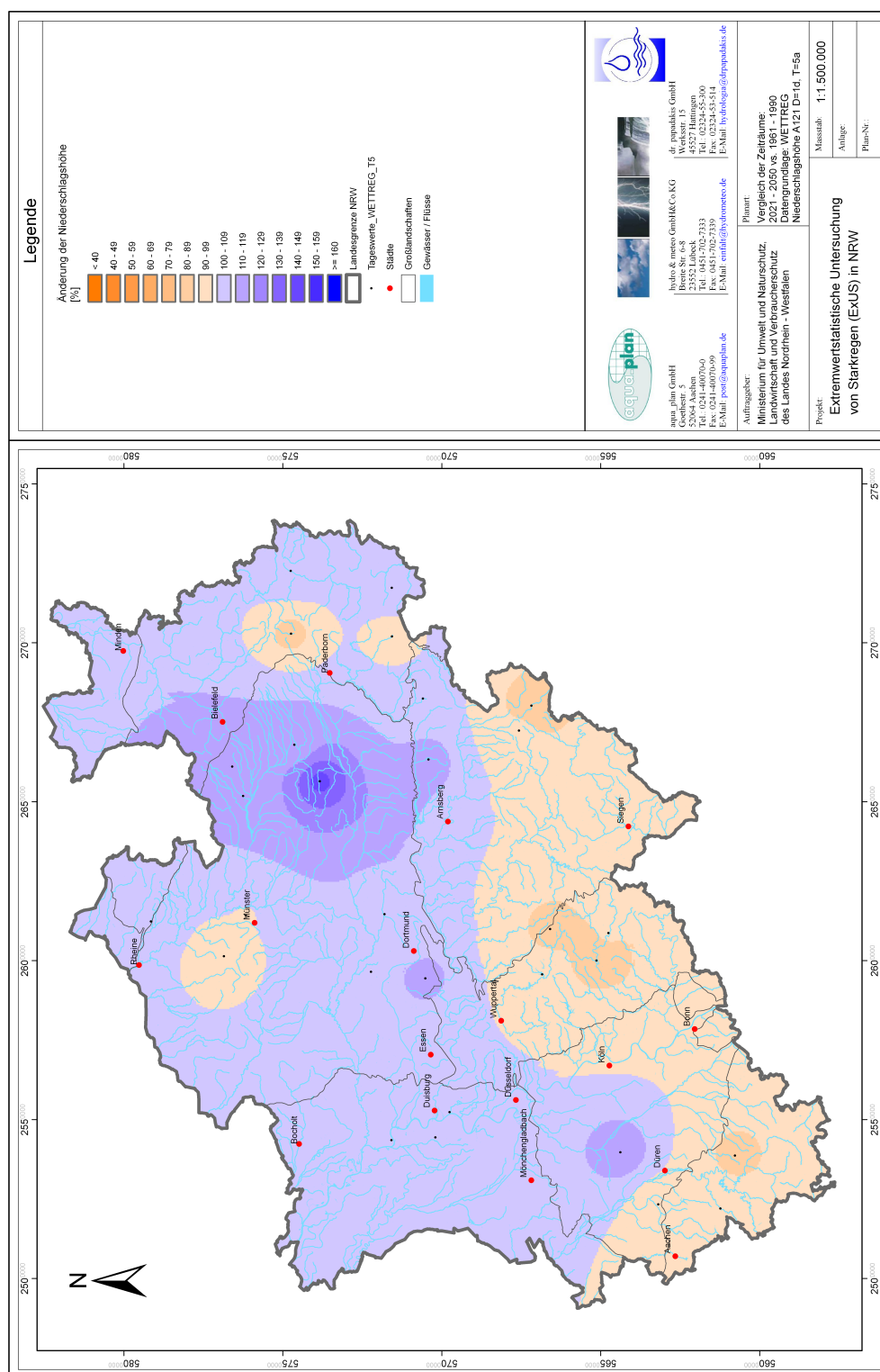


Abbildung 13.67: Räumliche Darstellung der Änderungen der Regenhöhen in der Nahe Zukunft (2021-2050) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG

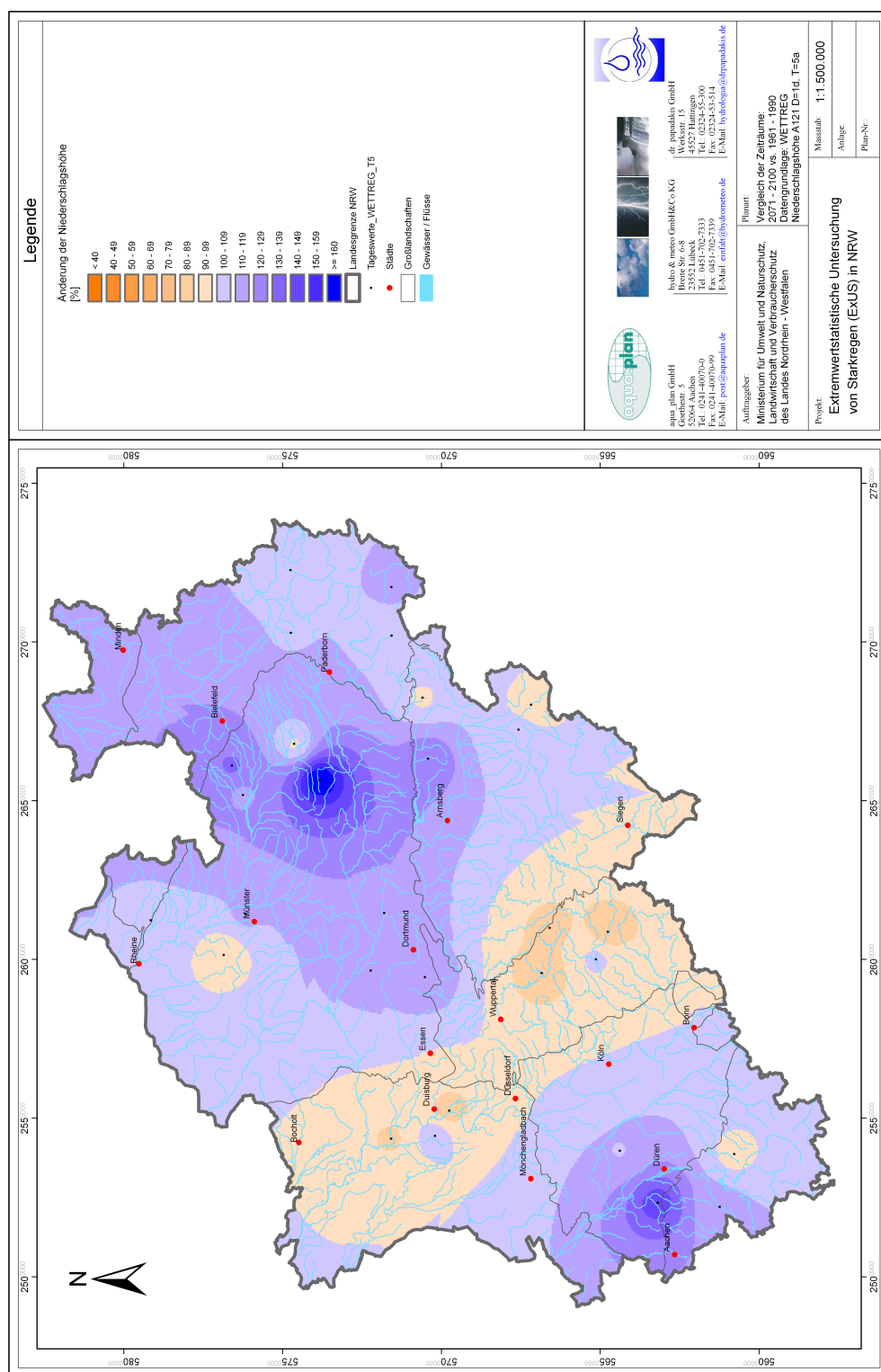


Abbildung 13.68: Räumliche Darstellung der Änderungen der Regenhöhen in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe D=1 Tag und die Wiederkehrzeit T=5 Jahre in Gesamt-NRW; als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchtes Modell: WETTREG

13.7 Niederschlagsstatistik nach dem ATV Arbeitsblatt A 121 für $D=1$ Tag und $D=3$ Tage

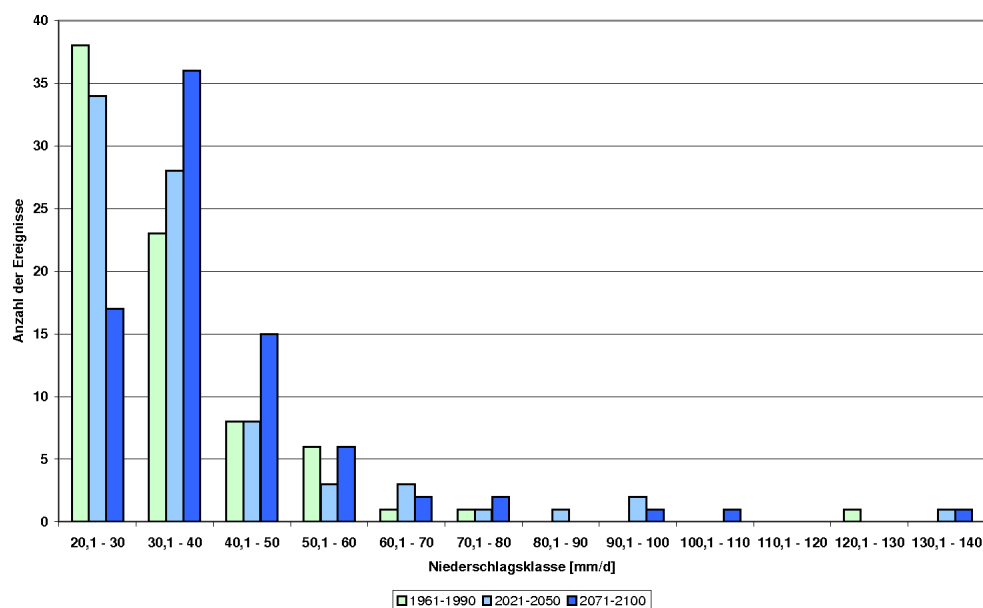


Abbildung 13.69: Häufigkeiten der Starkregenereignisse in der partiellen Serie (81 Ereignisse) der Station Winterberg Züschchen DWD (Pack 6) im Referenzzeitraum 1961-1990, in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) beim Modelllauf CLM1

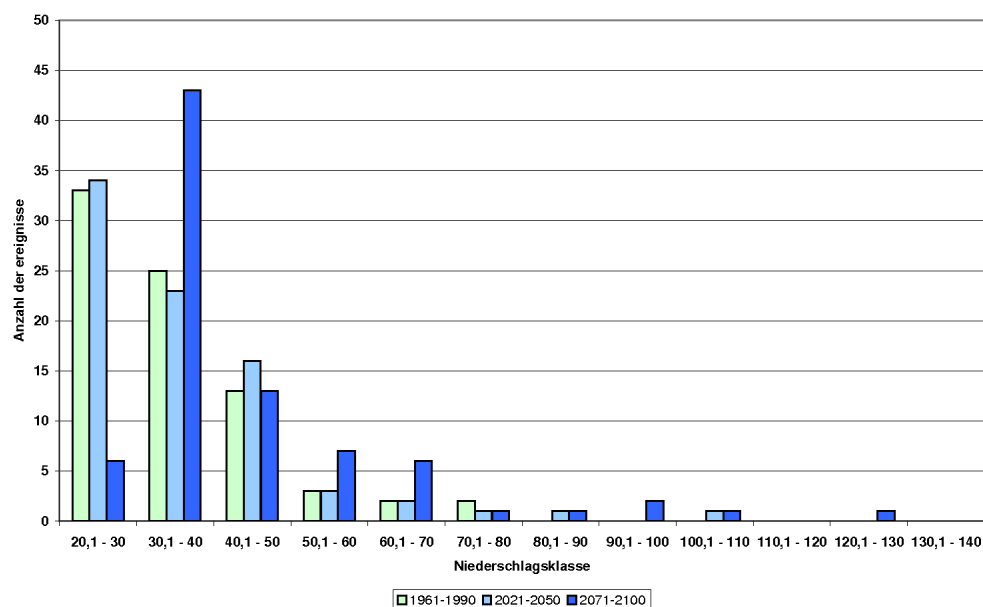


Abbildung 13.70: Häufigkeiten der Starkregenereignisse in der partiellen Serie (81 Ereignisse) der Station Lichtenau i.W.-Blankenrode DWD (Pack 3) im Referenzzeitraum 1961-1990, in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) beim Modelllauf CLM1

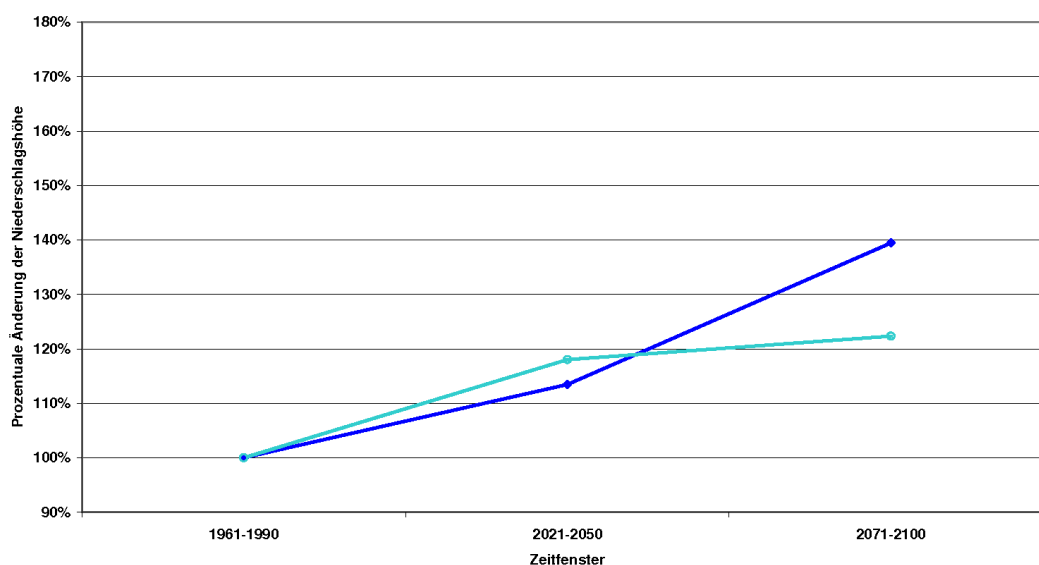


Abbildung 13.71: Änderungen der Regenhöhen in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) für die Dauerstufe $D=1$ Tag und die Wiederkehrzeit $T=5$ Jahre am Beispiel der Stationen Winterberg Züschen DWD (hellblau) und Lichtenau i.W.-Blankenrode DWD (dunkelblau); als Referenzwert gilt jeweils die statistisch ermittelte Regenhöhe im Referenzzeitraum 1961-1990; untersuchter Modelllauf: CLM1

13.7.2.2 Räumliche Differenzierung der Entwicklungen der Regenhöhen $D=1$ Tag im Modell CLM, Realisierung 2

Im Modelllauf CLM2 besitzen die Änderungen der Regenhöhen $D=1$ Tag in der Nahen Zukunft ein insgesamt geringeres Niveau als im Modelllauf CLM1. Auffällig ist, dass die Regenhöhen in der Fernen Zukunft an den einzelnen Stationen ein überwiegend gegenläufiges Verhalten gegenüber der Nahen Zukunft aufweisen.

An den meisten Stationen im **Pack 1** (nordwestliche Westfälische Bucht), im **Pack 2** (östliche Westfälische Bucht), im **Pack 5** (südliche Westfälische Bucht/Ruhrgebiet) und im **Pack 7** (Bergisches Land) sind die Änderungen nur gering ausgeprägt und liegen sowohl in der Nahen, als auch in der Fernen Zukunft überwiegend in einer Spanne von -10 % und +10 %.

In den übrigen Packs nimmt die Regenhöhe überwiegend in der Nahen Zukunft zu, während in der Fernen Zukunft wieder annähernd das Niveau des Referenzzeitraums erreicht wird. Die Prozentangaben der Änderungen beziehen sich immer auf den Referenzzeitraum.

Pack 8 (Eifel/Niederrheinische Bucht): Überwiegend moderate Zunahmen in der Nahen Zukunft (+10 % bis +20 %) und anschließend moderate Abnahmen in der Fernen Zukunft

13.7 Niederschlagsstatistik nach dem ATV Arbeitsblatt A 121 für $D=1$ Tag und $D=3$ Tage

(+5 % bis +10 %).

Pack 3 (Weserbergland): Zunahmen in der Nahen Zukunft (+15 % bis +30 %) und anschließend Abnahmen in der Fernen Zukunft (-10 % bis 0 %).

Pack 4 (Niederrheinisches Tiefland): Zunahmen in der Nahen Zukunft (+15 % bis +35 %) und anschließend Abnahmen in der Fernen Zukunft (-5 % bis +5 %).

Pack 6 (östliches Sauer- und Siegerland): Zunahmen in der Nahen Zukunft (+25 % bis +40 %) und anschließend überwiegend Abnahmen in der Fernen Zukunft (+10 % bis +30 %).

Exemplarisch für ein Rasterfeld ohne signifikante Änderungen der Tagesniederschlagssummen werden in Abbildung 13.72 die Häufigkeiten der Starkregenereignisse in den partiellen Serien im Rasterfeld zur Station Rietberg DWD dargestellt. In allen Zeitfenstern ist die Anzahl besonders hoher Starkregenereignisse ($N \geq 70$ mm/Tag) mit 2 bzw. 3 annähernd gleich.

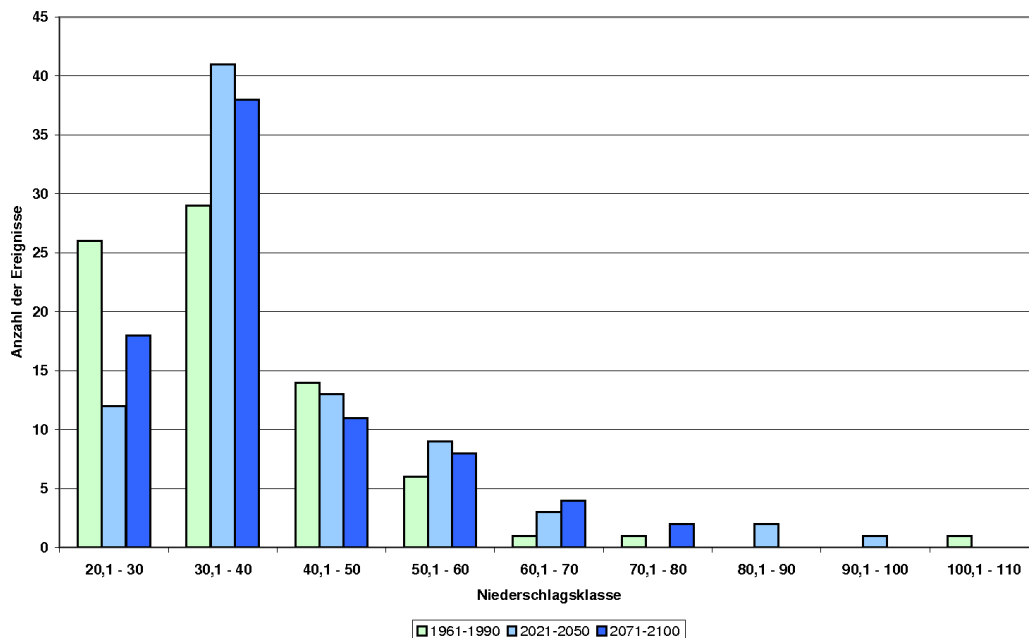


Abbildung 13.72: Häufigkeiten der Starkregenereignisse in der partiellen Serie (81 Ereignisse) der Station Rietberg DWD (Pack 2) im Referenzzeitraum 1961-1990, in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) beim Modelllauf CLM2

13.7.2.3 Räumliche Differenzierung der Entwicklungen der Regenhöhe $D=1$ Tag im Modell WETTREG

Beim Modell WETTREG fallen die Änderungen der Regenhöhen in der Nahen und Fernen Zukunft überwiegend moderat aus. Der Anteil an Stationen mit Zunahmen und Abnahmen ist ausgewogen.

An den meisten Stationen im **Pack 1** (nordwestliche Westfälische Bucht), im **Pack 3** (Weserbergland), im **Pack 4** (Niederrheinisches Tiefland,) im **Pack 5** (südliche Westfälische Bucht/Ruhrgebiet), im **Pack 6** (östliches Sauer- und Siegerland) und im **Pack 7** (Bergisches Land) sind die Änderungen nur gering ausgeprägt und liegen sowohl in der Nahen, als auch in der Fernen Zukunft überwiegend in einer Spanne von -15 % und +15 %.

Im **Pack 2** (östliche Westfälische Bucht) und im **Pack 8** (Eifel/Niederrheinische Bucht) streuen die Änderungen der Regenhöhen an den Stationen stärker. In jedem Pack liegt auch einer der Ausreißer. Insbesondere im Pack 2 zeigen die Änderungen ein sehr unterschiedliches Verhalten. Hier liegen sowohl Stationen vor, die nur eine geringe Änderung in der Nahen und Fernen Zukunft besitzen, als auch Stationen mit stetigen Zunahmen in der Nahen (+15 %) und Fernen Zukunft (+20 % bis +30 %). Beim Ausreißer sind diese stetigen Änderungen mit +45 % in der Nahen und +70 % in der Fernen Zukunft besonders stark ausgeprägt. Im Pack 8 ist die Spanne der Änderungen in der Nahen Zukunft (-12 % bis +17 %) etwas größer als in den anderen Packs. Der Ausreißer besitzt in der Fernen Zukunft eine Zunahme von +45 %.

Exemplarisch für eine Station mit besonders starken Änderungen (Ausreißer) werden in Abbildung 13.73 die Häufigkeiten der Starkregenereignisse in den partiellen Serien der Station Wadersloh DWD dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass besonders starke Änderungen nicht nur auf eine hohe Anzahl besonders hoher Starkregenereignisse ($N \geq 70$ mm/Tag) in der Nahen und Fernen Zukunft zurückzuführen sein muss. Im vorliegenden Beispiel resultieren die besonders starken Änderungen auch aus dem Fehlen besonders hoher Starkregenereignisse ($N \geq 70$ mm/Tag) im Referenzzeitraum.

13.7 Niederschlagsstatistik nach dem ATV Arbeitsblatt A 121 für $D=1$ Tag und $D=3$ Tage

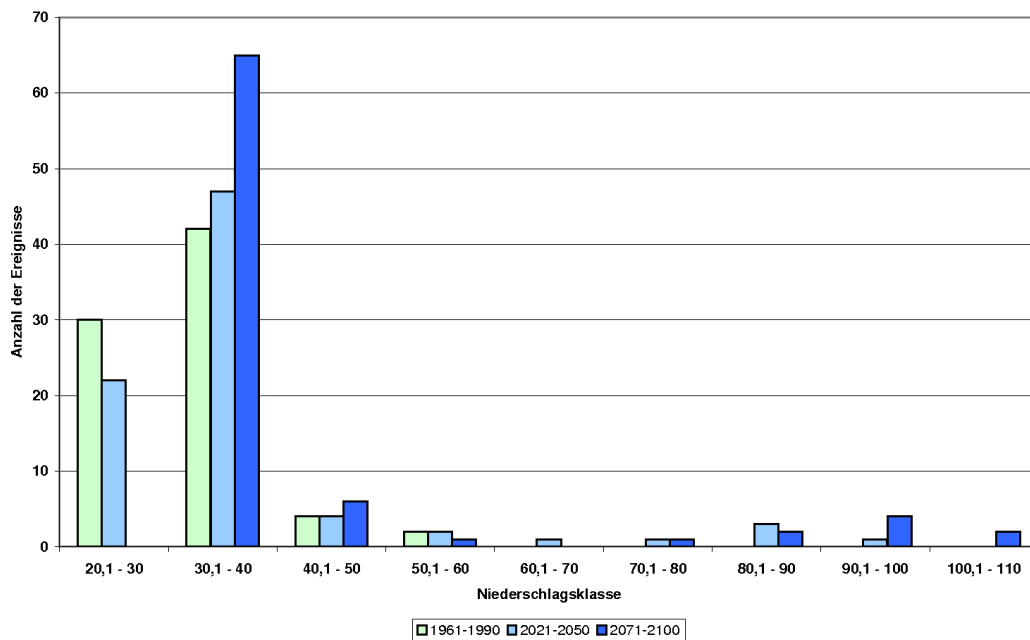


Abbildung 13.73: Häufigkeiten der Starkregenereignisse in der partiellen Serie (81 Ereignisse) der Station Wadersloh DWD (Pack 2) im Referenzzeitraum 1961-1990, in der Nahen Zukunft (2021-2050) und in der Fernen Zukunft (2071-2100) beim Modell WETTREG

13.7.3 Zusammenfassung zu den Regenhöhen $D=1$ Tag und $D=3$ Tage

Insgesamt zeigt die Untersuchung der Regenhöhen $D=1$ Tag, die aus einer Statistik über einen 30-jährigen Zeitraum nach dem Verfahren des ATV-Arbeitsblattes A 121 resultieren, eine breite Spanne möglicher zukünftiger Entwicklungen in der Nahen und Fernen Zukunft auf. Die Spanne reicht in der Nahen und Fernen Zukunft von geringen Rückgängen an einzelnen Stationen, die überwiegend in der Größenordnung bis -10 % liegen, bis hin zu signifikanten Zunahmen um bis zu +40 %. In jedem Modell sind regionale Unterschiede festzustellen, ohne dass aber eine Region in allen Modellen/Modellläufen in eine Richtung heraus sticht.

An einzelnen Stationen treten besonders starke Zunahmen insbesondere in der Fernen Zukunft auf, die auf eine überdurchschnittliche Anzahl besonders hoher Starkregenereignisse ($N \geq 70$ mm/Tag) im betrachteten 30 a-Zeitraum zurückzuführen sind. Das Auftreten dieser Ausreißer an einzelnen Stationen deutet alleine noch nicht darauf hin, dass in Zukunft in Gesamt-NRW flächendeckend besonders extreme Niederschlagsereignisse auftreten werden. Auch in historischen Zeitreihen werden die statistisch ermittelten Regenhöhen durch lokal begrenzt auftretende besonders hohe Starkregenereignisse beeinflusst, ohne dass die lokal gültigen hohen Werte auf ganze Regionen bzw. Gesamt-NRW übertragbar wären.

Betrachtet man die Ausreißer der statistisch ermittelten Regenhöhen $D=1$ Tag gemeinsam mit vereinzelt vorkommenden hohen Einzelereignissen in den partiellen Serien anderer Stationen und unter der Berücksichtigung der signifikanten Zunahmen der Regenhöhen um bis zu +40 % insbesondere in den CLM-Läufen, so ist grundsätzlich mit einer Zunahme von besonders hohen Starkregenereignissen ($N \geq 70$ mm/Tag) in NRW zu rechnen.

Bei den statistisch ermittelten Regenhöhen $D=3$ Tage ist generell eine ähnliche Tendenz wie bei den Regenhöhen $D=1$ Tag (moderate Rückgänge bis signifikante Zunahmen) zu erkennen. Durch die größere Dauerstufe werden besonders hohe Tagessummen aber gedämpft, wenn nicht an den beiden vorangegangenen oder folgenden Tagen ebenfalls hohe Tagessummen auftreten. Als Folge ergeben sich sowohl in der Nahen, als auch in der Fernen Zukunft kleinere Spannen bei den Änderungen der Regenhöhen $D=3$ Tage, und auch die Ausreißer treten nicht mehr so stark in Erscheinung.

Auch bei unterschiedlichen Wiederkehrzeiten (zwischen $T=1$ Jahr und $T=20$ Jahre) ist bei den Regenhöhen generell eine ähnliche Entwicklung wie bei der detaillierter untersuchten Wiederkehrzeit $T=5$ Jahre zu erkennen. Lediglich die Spanne der Änderungen nimmt in allen Modellen/Modellläufen mit größer werdender Wiederkehrzeit zu.

14 Zusammenfassung

14.1 Ziel und Aufgabenstellung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels werden neue Herausforderungen an die Erarbeitung der Planungsgrundlagen gestellt. Die pauschale Aussage „Starkregenereignisse nehmen zu“ muss in diesem Zusammenhang differenziert werden. Ziel dieses Projektes war die Untersuchung einer möglichen Veränderung von Starkniederschlägen in Nordrhein-Westfalen in Bezug auf ihre Dauer, Intensität und Eintretenswahrscheinlichkeit auf der Grundlage beobachteter Ereignisse. Eine räumliche Differenzierung wurde mit Hilfe von Großlandschaften vorgenommen.

Für die verschiedenen Fragestellungen in der Wasserwirtschaft sind unterschiedliche Betrachtungen des Starkregens erforderlich. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Betrachtung der jeweils relevanten Dauerstufe des Niederschlages. So sind für siedlungswasserwirtschaftliche Bemessungen besonders die kurzen, intensiven Starkregen relevant, während für Hochwasserschutzanlagen an Gewässern oder bei Überschwemmungsgebietsermittlungen vor allem die längeren Dauerstufen zur Bemessung von Bedeutung sind.

Zudem wurden für Wasserhaushaltsaspekte die Bilanzwerte der Jahres-, Halbjahres- und Monatssummen sowie die Kennwerte ausgewertet. Darüber hinaus wurden ausgewählte Untersuchungen mit vier Läufen regionaler Klimamodelle durchgeführt und mit den Entwicklungen in den Messdaten verglichen.

14.2 Daten und Methoden

Es wurde mit der größtmöglichen verfügbaren Datenbasis in NRW zwischen 1950 und 2008 gearbeitet. Die Daten wurden qualitätsgeprüft und die Reihen mit einer Länge von mindestens 20 Jahren selektiert. Danach verblieben Niederschlagsdaten von 176 kontinuierlich messenden Stationen, von 412 Tageswertstationen und berechnete Daten von vier Läufen regionaler Klimaprognosemodelle.

Alle Trenduntersuchungen wurden nach Mann-Kendall und Linearer Regression/t-Test durchgeführt. Die für den t-Test notwendige Normalverteilung der Stichprobe wurde für die Hauptwerte mit dem Chi-Quadrat-Test überprüft. Es zeigte sich, dass bei den Jahres- und Halbjahreswerten von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann, die Monatssummen hingegen nicht normalverteilt sind. Bei allen anderen Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass keine Normalverteilung vorliegt. Die Signifikanzüberprüfung über t-Test wurde deshalb nur für die Jahres- und Halbjahreswerte durchgeführt.

14.3 Zusammenfassung der Hauptwerte (Jahressummen, Halbjahresniederschlagssummen und Monatssummen)

Die Untersuchung der Trends in den Jahresniederschlagssummen zeigt für den Gesamtzeitraum 1950-2008 überwiegend positive Trends zwischen 0 mm/Jahr und +3,7 mm/Jahr. An etwa jeder zweiten Station liegen diese positiven Trends auf einem Signifikanzniveau von mindestens 80 %. Diese überwiegend positiven Trends der Jahresniederschlagssummen sind dabei im Wesentlichen auf die fast ausschließlich signifikant positiven Trends zwischen 0 mm/Jahr und +3,4 mm/Jahr im Winterhalbjahr zurückzuführen. Bricht man die Niederschlagssummen des Winterhalbjahres auf kleinere Bilanzierungszeiträume (Quartale, Monate) herunter, so konzentrieren sich diese signifikanten Zunahmen im Wesentlichen auf das meteorologische Winterquartal (Dezember-Februar) sowie im besonderen Maße auf den Monat März. Im Sommerhalbjahr zeigen sich dagegen zwischen 1950-2008 nur geringfügige, überwiegend nicht signifikante Trends zwischen -1,0 mm/Jahr und +0,9 mm/Jahr. Bei der Untersuchung der Monatsniederschlagssummen zeigt sich aber eine Konzentration der Rückgänge in den Monaten Juli und August, welche im Wesentlichen durch eine Zunahme in den Monaten September und Oktober ausgeglichen wird. Aufgrund der Normalverteilung der Jahres- und Halbjahressummen können hier die Signifikanzniveaus der Trends mit Hilfe des Mann-Kendall-Tests und des t-Tests untersucht werden. Bei den Halbjahressummen des Winterhalbjahres treten vereinzelt Unterschiede auf. Insgesamt werden die Unterschiede der Jahres- und Halbjahressummen zwischen beiden Trendverfahren aber als gering und vernachlässigbar bewertet.

Bei der Untersuchung der Großlandschaften sticht die Region im Dreieck der Ortschaften Lüdenscheid-Lindlar-Siegen an der Grenze des Bergischen Landes zum Sauer- und Siegerland heraus. In dieser Region liegen konzentriert mehrere Stationen, an denen stärkere Zunahmen der Jahresniederschlagssummen ($>+3,7$ mm/Jahr) auf einem sehr hohem Signifikanzniveau (≥ 95 %) festgestellt wurden.

Zudem fällt im Sommerhalbjahr eine relativ klare räumliche Abgrenzung zwischen Stationen mit positiven Trends und Stationen mit negativen Trends auf. Während nördlich der Ruhr und in der Region im Dreieck der Ortschaften Lüdenscheid-Lindlar-Siegen überwiegend positive Trends auftreten, sind die Trends in den übrigen Regionen Nordrhein-Westfalens überwiegend negativ.

In den Mittelgebirgen fällt darüber hinaus grundsätzlich auf, dass hier einerseits hohe signifikante positive Trends und andererseits schwache positive Trends auf einem geringen Signifikanzniveau oder gar negative Trends in unmittelbarer Nachbarschaft auftreten können. Die Aussagekraft einzelner lokaler Stationen im Hinblick auf die umliegende Region ist somit in den Mittelgebirgen wesentlich geringer als in den Tiefländern.

Die Untersuchung mehrerer gleitender Zeitfenster über jeweils 30 Jahre und die Untersuchung wachsender Zeitfenster zwischen 20 und 58 Jahren haben gezeigt, dass die natürlichen Klimaschwankungen, insbesondere die trockene Dekade 1971-1980, einen großen Einfluss auf die Trendanalysen besitzen. Je nach betrachtetem Zeitfenster können bei

Zeitreihen von 30 Jahren völlig gegenläufige Trends resultieren. Annähernd stabile Trends mit ähnlichen Aussagen wie für den Gesamtzeitraum können mit der verwendeten Datengrundlage für NRW nur getroffen werden, wenn die Zeitreihen mindestens bis 1959 zurückreichen. Dies entspricht hier einer minimal erforderlichen Zeitreihenlänge von 50 Jahren.

14.4 Kenngrößen

Bis hierhin wurde untersucht, inwiefern sich die Jahres-, Halbjahres- und Monatsniederschlagssummen geändert haben. Weitergehend sollte untersucht werden, ob eine Veränderung des Niederschlagsverhaltens gezeigt werden kann. Hierfür wurden die Anzahl der Tage pro Jahr mit

- $\leq 0,1$ mm/Tag (niederschlagsfreie Tage)
- > 10 mm/Tag
- > 20 mm/Tag
- > 30 mm/Tag

auf Vorliegen eines Trends (Lineare Regression und Mann-Kendall) untersucht.

Die Anzahl der Tage $\leq 0,1$ mm/Tag nimmt bei Betrachtung des Gesamtzeitraumes in den Winterhalbjahren flächendeckend über ganz NRW ab, in den Sommerhalbjahren dagegen zu. Hier finden sich in den Mittelgebirgen auch Stationen mit abnehmenden Trends.

Für beide Halbjahre ist der Trend an ungefähr der Hälfte der Stationen signifikant. In den Winterhalbjahren bewegen sich die Trends an fast 90 % der Stationen in einem Bereich bis $-0,4$ Tage/Jahr. Dies bedeutet eine Änderung von ca. 20 Tagen in den letzten 58 Jahren. In den Sommerhalbjahren ist der Trendbereich mit $0,2$ Tagen/Jahr nur halb so groß.

Die Auswertung der Entwicklung der Anzahl der Tage pro Jahr mit viel Niederschlag zeigte in den Winterhalbjahren für die Tage > 10 mm/Tag und > 20 mm/Tag über ganz NRW fast ausschließlich Stationen mit steigenden Trends. Jeweils ca. $2/3$ dieser Trends liegen auf einem Signifikanzniveau > 80 %. Bei der Anzahl der Tage > 10 mm/Tag haben 75 % der Stationen einen positiven Trend von $< 0,1$ Tage/Jahr, dies entspricht einem Zuwachs von bis zu 5 Tagen pro Jahr in 50 Jahren. Bei der Anzahl der Tage > 20 mm/Tag haben 90 % der Stationen einen Anstieg von $< 0,05$ Tage/Jahr.

Bei den Tagen mit den höchsten Niederschlägen (> 30 mm/Tag) ist das Ergebnis nicht so homogen. Hier sind auch nur 40 % der Trends signifikant. Westlich des Rheins und am Niederrhein überwiegen abnehmende Trends, im nördlichen Weserbergland ist das Verhältnis von Zu- und Abnahmen ausgeglichen, im übrigen NRW überwiegen steigende Trends. Über 80 % der Stationen weisen hier einen geringeren Trend als $\pm 0,02$ Tage/Jahr auf, das entspricht einer Zunahme von einem Starkregentag in den letzten 50 Jahren.

In den Sommerhalbjahren verhält sich die Entwicklung der Anzahl der Tage >30 mm/Tag sehr ähnlich wie in den Winterhalbjahren. Bei diesen, aber auch bei den Tagen >10 mm/Tag und >20 mm/Tag ist die Größe des Trendbereiches, innerhalb dessen die deutliche Mehrheit der Stationen liegt, in den Sommerhalbjahren nur halb so groß wie in den Winterhalbjahren. Auch ist hier die Anzahl der Stationen mit signifikanten Trends geringer als in den Winterhalbjahren.

Für die Anzahl der Tage >10 mm/Tag und >20 mm/Tag findet man in den Sommerhalbjahren eine Konzentration steigender Trends in der Emscher-Lippe-Region. Bei der Anzahl der Tage >10 mm/Tag überwiegen im übrigen NRW leicht Stationen mit abnehmenden Trends, bei den Tagen >20 mm/Tag dagegen leicht Stationen mit steigenden Trends.

Besonders auffällig ist in der Eifel eine Abnahme der Tage mit viel Niederschlag (>10 mm/Tag, >20 mm/Tag, >30 mm/Tag) bei Betrachtung der letzten 30 Jahre (1979-2008).

14.5 Niederschlagsverhalten kurzer Zeitdauern

Zur Beschreibung des Niederschlagsverhaltens kurzer Zeitdauern (5 Minuten bis 3 Tage) wurden partielle Serien nach folgenden Gesichtspunkten auf mögliche Entwicklungen untersucht:

- Ereignisse je Dauerstufe und Jahr aller Stationen nach
 - Anzahl der Ereignisse und
 - mittlerer Höhe der 15 höchsten Ereignisse
- Entwicklung der statistischen Regenhöhen für
 - wachsende Zeitfenster und
 - gleitende Zeitfenster

14.5.1 Ereignisse je Dauerstufe und Jahr

Die mittlere Anzahl von Starkregenereignissen in NRW variiert je nach Jahr und Dauerstufe. Dabei hat die Anzahl der Starkregenereignisse in den letzten 10 Jahren des Beobachtungszeitraum in den einzelnen Dauerstufen unterschiedlich stark zugenommen. Die Anzahl von Extremereignissen kurzer Dauerstufen (≤ 1 Stunde), die für die Siedlungsentwässerung eine große Rolle spielen, nimmt dabei überdurchschnittlich zu. Dies ist aber auf eine Überlagerung von Effekten aus einer veränderten Gerätetechnik und den Folgen des Klimawandels zurückzuführen.

Ab 1990 bzw. 2000 wurde die Gerätetechnik auf präziser arbeitende Wippengeräte bzw. Wägegeräte umgestellt, die eine genauere Aufzeichnung von Spitzenniederschlagsintensitäten ermöglichen. Für die Dauerstufen 5 Minuten, abgeschwächt für 15 Minuten und

im noch geringeren Maße für 60 Minuten zeigen die Auswertungen, dass ab 1997 die Anzahl von Ereignissen pro Jahr höher ist, als dies in den Auswertungen für Dauerstufen ab 2 Stunden erkennbar ist.

Zudem hat es eine Häufung besonders starker Ereignisse bereits in den 1950er- und in der zweiten Hälfte der 1960er-Jahre gegeben. Es wird zu prüfen sein, ob in Zukunft die Häufigkeit der Starkregen wieder abnimmt, auf einem hohen Niveau verbleibt oder sogar weiter zunimmt. Für alle Dauerstufen gilt aber, dass keiner der beobachteten Trends statistisch signifikant ist. Anders als bei der Häufigkeit von Starkregenereignissen sind keine signifikanten Änderungen der Niederschlagsmengen über die Zeit festzustellen. Die mittlere Höhe der Starkregenereignisse je Dauerstufe wird über die Jahre als konstant eingestuft.

14.5.2 Entwicklung der statistischen Regenhöhen

Ob die Starkregen in ihren Intensitäten zunehmen, wurde anhand der statistischen Regenhöhen aus den partiellen Serien nach ATV-A 121 beurteilt. Zur Entwicklungsanalyse der Regenhöhen wurden die Ergebnisse aus unterschiedlichen Zeitfenstern gegenübergestellt. Die Entwicklungen lassen sich quantifizieren und so Empfehlungen für die Bemessungspraxis ableiten. Die Untersuchung differenziert nach Dauerstufe, Jährlichkeit und Großlandschaften.

Mit den **gleitenden Zeitfenstern** wird die Entwicklung der Regenhöhen für mehrere 30-Jahres-Fenster über den Gesamtzeitraum (1950-2008) beurteilt. Für die sich überlappenden 30-Jahres-Fenster wurden gemäß Regelblatt A121 nach den anerkannten Regeln der Technik belastbare statistische Regenhöhen berechnet. Der Trend wurde aus dem chronologischen Vergleich dieser Regenhöhen abgeleitet.

Eine statistische Überprüfung der Signifikanz einer Entwicklung ist nicht möglich, weil der Stichprobenumfang mit je einem Element aus den vier Zeitfenstern zu gering ist. Zudem überschneiden sich die Zeitfenster, die Stichprobenelemente sind also nicht unabhängig voneinander. Die Ergebnisse genießen dennoch eine hohe Aussagekraft, weil der Gesamtzeitraum (1950-2008) entsprechend lang ist und je Gebiet die Statistiken vieler Stationen in einem Zeitfenster gemittelt wurden. Die Zufälligkeit kleinräumiger Ereignisse an einzelnen Stationen tritt damit in den Hintergrund.

Bei den 54 Stationen, die für Gesamt-NRW gemittelt wurden, ist ein generelles Muster in den gleitenden Zeitfenstern im Gesamtzeitraum (1950-2008) zu erkennen: Die 1-jährlichen Regenhöhen nehmen tendenziell von den kurzen zu den langen Dauerstufen zu. Bleibt die Regenhöhe für die Dauerstufe 5 Minuten noch nahezu konstant, so verstärkt sich der zunehmende Trend bei den längeren Dauerstufen: 15 Minuten $\approx 1\%$, 60 Minuten $\approx 1,5\%$, 2 Stunden $\approx 3\%$, 4 Stunden $\approx 4,5\%$, 12 Stunden und 1 Tag $\approx 8\%$, 3 Tage $\approx 11\%$. In höheren Jährlichkeiten schwächt sich dieser Trend durchgängig ab und schlägt, je kürzer die Dauerstufe, desto früher und stärker, in einen abnehmenden Trend um.

Aussagen für Dauerstufen ≤ 60 Minuten sind kritisch zu betrachten, weil der Einfluss der geänderten Messtechnik schwer zu quantifizieren ist. Mit der Fortführung der Messtätigkeit und Fortschreibung der Zeitreihen wird dieser Einfluss in Zukunft aber an Gewicht

verlieren. Regional weicht die Entwicklung teilweise stark von dem Trend dieser gemittelten Werte ab, wie die Ergebnisse für die Großlandschaften belegen. In den Fällen sind die Werte für die kurzen Dauerstufen sehr viel größer. Für die Großlandschaften Westfälisches Tiefland, bzw. Weserbergland konnten für Dauerstufen <1 Tag mangels verfügbarer Stationen keine bzw. keine belastbaren Aussagen gemacht werden. Für alle anderen Großlandschaften gilt, dass die Auswertung der letzten 30 Jahre die höchsten Ergebnisse lieferte.

Ein Vergleich der Regenhöhen des 1979-2008-Zeitfensters mit dem Gesamtzeitraum 1950-2008 ergab, dass die Unterschiede in der Regel gering sind. Für Gesamt-NRW übertreffen die Regenhöhen der Dauerstufe 60 Minuten für den Zeitraum 1979-2008 die Werte aus dem Gesamtzeitraum am stärksten, bleiben aber mit einem Betrag bis zu 2 % über alle Jährlichkeiten gering. Einzige Ausnahme stellt die 5-Minuten-Dauerstufe mit ca. 5 % Unterschätzung für alle Jährlichkeiten dar.

Die Entwicklung der Regenhöhen in den letzten 30 Jahren wurde mit den **wachsenden Zeitfenstern** untersucht. Interessant ist, dass hier die größten Zunahmen der Regenhöhen in den kürzeren Dauerstufen und die stärksten Abnahmen in den langen Dauerstufen auftreten. Die Zunahmen bewegen sich zwischen 1,5 % und 8 % für die 1-jährliche Regenhöhe. Die stärksten Abnahmen der Regenhöhen stellen sich in der Dauerstufe 3 Tage dar. Für die 1-jährliche Regenhöhe beträgt sie zwischen -1 % und -5 %.

Mit höheren Jährlichkeiten nehmen die Zuwachsraten ab oder bleiben nahezu konstant. Ausnahmen bilden die Niederrheinische Bucht, die Eifel und das Bergische Land mit geringfügig steigenden Zuwachsraten.

14.5.3 Fazit der Untersuchung der kurzen Dauerstufen

Die überwiegend geringen positiven Änderungen der Regenhöhen über die vier gleitenden Fenster und die nur wenig höheren Werte aus der Niederschlagsstatistik aus dem letzten 30-Jahre-Zeitfenster 1979-2008 gegenüber dem Gesamtzeitraum 1950-2008 zeigen einen zunächst untergeordneten Einfluss des Klimawandels auf die statistisch ermittelten Regenhöhen. Die Regenhöhen haben zwar in der jüngsten Vergangenheit zugenommen, die Zunahmen liegen aber mit bis zu 11 % noch in einer Größenordnung, die als „normale“ statistische Unsicherheit bewertet werden kann. Dieses wird auch durch die Analyse der partiellen Serien bestätigt, bei denen Steigerungen der Ereignisanzahlen auftreten, die aber alle nicht als signifikant zu werten sind. Die zum Teil in den Klimaprognosedaten festgestellten möglichen zukünftigen Änderungen von bis zu 40 % bei den Tageswerten sind in den historischen Messdaten noch nicht festzustellen. Auf dem ersten Blick scheinen sich dagegen die Ergebnisse der wachsenden Zeitfenster (Zuwachs der Zeitreihenlänge von 20 Jahre auf 30 Jahre am Ende des Gesamtzeitraums) gegenüber den Ergebnissen der gleitenden Zeitfenster über je 30 Jahre zu widersprechen. Es ist aber bekannt, dass bei kleinen Zeitreihenlängen (<30 Jahre) der Einfluss von großen Einzelereignissen zunimmt. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass der Einfluss von großen Einzelereignissen bei zu kurzen Zeitreihen größer ist, als mögliche Änderungen durch den Klimawandel.

Die Ergebnisse unterstreichen die Forderung der Bemessungspraxis nach einer Mindest-

länge der Zeitreihen von 30 Jahren. Aufgrund des bisher noch geringen Einflusses des Klimawandels auf die Starkregenstatistik kann auch weiterhin bei längeren Zeitreihen von einem quasi stationären Zustand ausgegangen werden. Liegen längere Zeitreihen bis zu 50 Jahren vor, sollten diese in ihrer gesamten Länge berücksichtigt werden, um den Einfluss einzelner lokaler Starkregenereignisse zu minimieren. Auf noch längere Zeitreihen mit Daten vor 1950 sollte bei der Niederschlagsstatistik nur in Einzelfällen, z. B. Ableitung hoher Jährlichkeiten zum Hochwasserschutz, zurückgegriffen werden. Neben dem zunehmenden Einfluss möglicher klimabedingter Änderungen spielen hier auch andere Aspekte, wie die unsichere Datenlage in den Zeiten während des 2. Weltkriegs und in der Nachkriegszeit eine Rolle. Für die Zukunft gilt aber, dass die gemessenen Zeitreihen regelmäßig auf mögliche zukünftige Änderungen aufgrund des Klimawandels zu untersuchen sind. Sollten die prognostizierten stärkeren Änderungen der Regenhöhen auftreten und einen größeren Einfluss auf die Niederschlagsstatistik nehmen, so kann dann nicht mehr von einer Stationarität der Niederschlagsentwicklung ausgegangen werden. Gegebenfalls sind dann die Zeitfenster, in der eine Niederschlagsstatistik durchgeführt werden soll, auf eine Zeitspanne zwischen 30 und 50 Jahren zu begrenzen.

Um solche Untersuchungen mit sehr langen Zeitreihen auch außerhalb der Emscher-Lippe-Region in Zukunft durchführen zu können, sind die kontinuierlichen Niederschlagsmessungen in Gesamt-NRW flächendeckend zumindest auf dem jetzigen Niveau fortzuführen. Es kommen so sukzessive durch die kontinuierliche Messung weitere Stationen mit Zeitreihenlängen von mindestens 30 Jahren hinzu, die in wenigen Jahren eine erneute Untersuchung der Starkregenhöhen in einer höheren räumlichen Differenzierung und mit aktuellen Messdaten ermöglichen. Dieses ist besonders für Dauerstufen ≤ 60 Minuten erforderlich, um in Zukunft die dargestellten, nicht quantifizierbaren Geräteeffekte auf statistische Auswertungen zu verringern.

14.6 Klimaprognosedaten

Die Niederschlagsentwicklungen in der Zukunft wurden flächendeckend für Nordrhein-Westfalen anhand von Niederschlagszeitreihen auf Tageswertbasis aus den drei regionalen Klimamodellen CLM (2 Realisierungen), WETTREG und STAR2 untersucht. Für das rasterbasierte dynamische regionale Klimamodell CLM wurden acht Boxen à vier Rasterfelder ausgewählt. Korrespondierend zu den 32 Rasterfeldern wurden für die beiden statistischen regionalen Klimamodelle WETTREG und STAR2 Zeitreihen zu 29 Stationen analysiert. Die Trendanalysen wurden für zwei Zeitpunkte in der Zukunft, die Nahe Zukunft (2050) und die Ferne Zukunft (2100), durchgeführt. Allen Zeitreihen liegt das IPCC-SRES-Szenario A1B zu Grunde.

Für die Nahe Zukunft (2050) besitzen die Jahresniederschlagssummen ausschließlich positive Trends. Die Zunahmen und ihre Signifikanz sind in den Modellen/Modellläufen CLM1/WETTREG (geringe Zunahme/Signifikanz) und in den Modellen/Modellläufen CLM2/STAR2 (hohe Zunahme/Signifikanz) unterschiedlich stark ausgeprägt. Bis 2050 setzt sich somit bei den Jahresniederschlagssummen der positive Trend fort, der bereits

in den Messdaten (1950-2008) festzustellen ist. Auch die regionalen Unterschiede mit den größten und signifikantesten Zunahmen im Bergischen Land sind zum Teil in den prognostizierten Niederschlagsdaten zu erkennen.

Die besonders hohen Zunahmen der Jahresniederschlagssummen in den Modellen/Modellläufen CLM2/STAR2 sind auf signifikant hohe Zunahmen der Niederschlagssummen im Winterhalbjahr und etwas geringere, aber ebenfalls noch überwiegend signifikante Zunahmen im Sommerhalbjahr zurückzuführen. Bei den Modellen/Modellläufen CLM1/WETTREG überlagern sich dagegen überwiegend nicht signifikante Trends. Im Sommerhalbjahr liegen an den einzelnen Rasterflächen/Stationen relativ ausgewogen negative und positive Trends vor, während im Winterhalbjahr ausschließlich positive Trends auftreten. Im Winterhalbjahr folgen die Modelle/Modellläufe CLM2/STAR2 mit ihren signifikant positiven Trends für die Nahe Zukunft der Entwicklung der Messdaten im Zeitraum 1950-2008, während im Sommerhalbjahr die Modelle/Modellläufe CLM1/WETTREG mit ihrer ausgeglichenen Entwicklung um den Wert Null die Trends der Vergangenheit fortführen.

Bricht man die Halbjahresniederschlagssummen auf kleinere Bilanzierungszeiträume (Quartale, Monate) herunter, so zeigen sich in der Nahen Zukunft eher moderate Änderungen in den einzelnen Monaten und Quartalen, die erst in ihrer Summe zu den teilweise signifikanten Änderungen der Halbjahresniederschlagssummen führen.

In der Fernen Zukunft zeigen sich in allen drei Modellen/Modellläufen (keine STAR2-Daten verfügbar), anders als in der Nahen Zukunft, wesentlich stärkere Änderungen der Niederschlagssummen in den Monaten der meteorologischen Quartale Winter (DJF, Zunahme) und Sommer (JJA, Abnahme). Im Frühjahrsquartal (MAM) und im Herbstquartal (SON) sind die Änderungen der Niederschlagssummen in der Fernen Zukunft dagegen weiterhin moderat. Die starken Zunahmen im Winterquartal und die starken Abnahmen im Sommerquartal spiegeln sich entsprechend in den Halbjahresniederschlagssummen wider.

Insgesamt besitzen die Trends im Winter- und Sommerhalbjahr überwiegend hohe Signifikanzniveaus, lediglich bei WETTREG sind die Trends im Sommer etwas weniger stark ausgeprägt.

Bei den CLM-Modellläufen führen die gegenläufig ausgerichteten positiven Wintertrends und die negativen Sommertrends zu geringen Änderungen der Jahresniederschlagssummen. Die Trends der Jahresniederschlagssummen sind überwiegend nicht signifikant. Die Aussagen in den Modellläufen CLM1 und CLM2 sind in der Fernen Zukunft, anders als in der Nahen Zukunft, vergleichbar. Bei WETTREG resultieren dagegen aus den stärkeren Zunahmen im Winterhalbjahr gegenüber den geringeren Abnahmen im Sommerhalbjahr insgesamt signifikante Zunahmen der Jahresniederschlagssummen mit bis zu 1,5 mm/Jahr. In der Fernen Zukunft treten die regionalen Unterschiede in den Trends in den Hintergrund und sind nur noch weniger stark ausgeprägt als in der Nahen Zukunft. Auffälliger als die regionalen Unterschiede sind die Unterschiede der Trends in den Modellen CLM und WETTREG.

Neben den Trends von Niederschlagssummen über längere Bilanzierungszeiträume wurden für die Modelle CLM (2 Realisierungen) und WETTREG auch Änderungen von

Regenhöhen untersucht, die aus einer Statistik nach ATV-A 121 resultieren. Die Niederschlagsstatistik wurde sowohl in der Nahen Zukunft (2021-2050) als auch in der Fernen Zukunft (2071-2100) auf Basis einer partiellen Serie in einem Zeitraum von jeweils 30 Jahren durchgeführt. Die Änderungen beziehen sich jeweils auf die Ergebnisse der Niederschlagsstatistik im Referenzzeitraum 1961-1990.

Insgesamt zeigt die Untersuchung der Regenhöhen $D=1$ Tag über alle Modelle/Modellläufe eine breite Spanne möglicher zukünftiger Entwicklungen in der Nahen und Fernen Zukunft auf. Die Spanne reicht in der Nahen und Fernen Zukunft von geringen Rückgängen an einzelnen Stationen bis hin zu signifikanten Zunahmen. Für die Wiederkehrzeit von $T=5$ Jahre liegt die Spanne der Änderungen der Regenhöhen $D=1$ Tag sowohl in der Nahen, als auch in der Fernen Zukunft zwischen -10 % und +40 %. In jedem Modell sind regionale Unterschiede festzustellen, ohne dass aber eine Region in allen Modellen/Modellläufen in eine Richtung heraus sticht. Auch bei den anderen untersuchten Wiederkehrzeiten zwischen $T=1$ Jahr und $T=20$ Jahre ist bei den Regenhöhen generell eine ähnliche Entwicklung wie bei der detaillierter untersuchten Wiederkehrzeit $T=5$ Jahre zu erkennen. Lediglich die Spanne der Änderungen nimmt in allen Modellen/Modellläufen mit größer werdender Wiederkehrzeit zu.

Durch die größere Dauerstufe werden besonders hohe Tagessummen aber gedämpft, wenn nicht an den beiden vorangegangenen oder folgenden Tagen ebenfalls hohe Tagessummen auftreten. Als Folge ergeben sich sowohl in der Nahen, als auch in der Fernen Zukunft kleinere Spannen bei den Änderungen der Regenhöhen $D=3$ Tage.

14.7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Bewertung

Aus der Untersuchung lassen sich für NRW und seine Großlandschaften die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Schlussfolgerungen ziehen.

14.7.1 Konsequenzen aus den Messdaten

Die natürlichen Klimaschwankungen sind deutlich in den Zeitreihen erkennbar und wirken sich direkt auf den Parameter Niederschlag und auf alle untersuchten Bilanzierungszeiträume – von 5-Minuten-Summen bis hin zu Jahressummen – aus. Die Trendanalysen über Zeitfenster von 30 Jahren haben gezeigt, dass diese zu gegenläufigen Trendaussagen führen können und nicht repräsentativ für langfristige Klima- und Niederschlagsänderungen sind. Einen besonderen Einfluss auf die Trendanalysen kurzer Zeitfenster über 30 Jahre nimmt die trockene Dekade 1971-1980, die in der Mitte des Gesamtzeitraums 1950-2008 liegt. Für Trendaussagen, die auch eine nur begrenzte Extrapolation in die Zukunft zulassen, sind daher Zeitreihenlängen von mindestens 50 Jahren zu untersuchen.

An den Stationen mit langen Zeitreihen sind flächendeckend für NRW Veränderungen des Niederschlagsregimes, teilweise auf einem signifikanten Niveau, festzustellen. Die Details wurden vorab differenziert und erläutert. Diese Veränderungen gingen aber weitgehend unbemerkt vonstatten und zogen keine erkennbaren Probleme in wasserwirtschaftlichen

Bewirtschaftungen nach sich. Ausnahmen sind die niedrigen Wasserstände für die Trinkwasserversorgung in den 70er Jahren oder der extrem heiße und trockene Sommer 2003. Allerdings sind in den letzten 10 Jahren vermehrt Starkregenereignisse aufgetreten, die in den Städten zu Überflutungen geführt haben. Diese Häufung besonders starker Ereignisse hat es aber bereits auch schon in den 1950er- und in der zweiten Hälfte der 1960er-Jahre gegeben. Es wird zu prüfen sein, ob in Zukunft die Häufigkeit und Intensität der Starkregen wieder abnimmt, auf einem hohen Niveau verbleibt oder sogar weiter zunimmt.

Bei der Zunahme der Anzahl von Extremereignissen bei den Messungen kurzer Dauerstufen (<1 Stunde), die für die Siedlungsentwässerung eine große Rolle spielen, überlagern sich der Messeffekt und der Klimaeffekt. Beide Effekte spielen eine Rolle, die besonders starken Zunahmen bei Dauerstufen über 5 und 15 Minuten sind aber mehr auf die Modernisierung der Messgeräte als auf den Klimaeffekt zurückzuführen.

Anders als bei den langen Bilanzierungsdauern, für die Tagesmesswerte ausreichend sind, liegen lange Zeitreihen mit kontinuierlichen Messdaten nicht flächendeckend für NRW vor. Insbesondere für die Untersuchung von Starkregen ist es daher unabdingbar, die Niederschlagsmessungen fortzuführen. So werden in Zukunft sukzessive weitere Stationen mit Zeitreihenlängen über mindestens 50 Jahre hinzukommen, aus denen in Zukunft räumlich differenziertere Aussagen auch über die Entwicklung von Starkregen abgeleitet werden können. Es wird daher empfohlen, die Messwerte des Niederschlages flächendeckend für NRW in regelmäßigen Abständen (z. B. alle fünf Jahre) auf Veränderungen zu untersuchen.

Direkte Schlussfolgerungen von den Trendanalysen des Niederschlages auf die resultierenden Abflüsse in Gewässern sind ohne weiteres nicht möglich, da die Abflüsse neben dem Niederschlag durch weitere Faktoren beeinflusst werden. Für die Beurteilung von Änderungen im Abflussregime sind daher Abflussmessungen zu analysieren, die aber ebenfalls als langjährige Zeitreihen vorliegen müssen.

14.7.2 Konsequenzen aus den Klimaprojektionen

Die Klimaprojektionen zeigen im Wesentlichen, dass sich die in den Messdaten festgestellten Trends zumindest in der Nahen Zukunft (bis 2050) fortsetzen. Die Unsicherheiten in den Modellen und in den Annahmen, die diesen zu Grunde gelegt werden, spiegeln sich aber in dem unterschiedlichen Maß und damit in der unterschiedlichen Signifikanz wider, mit der sich die Trends in der Zukunft weiter entwickeln. Die unterschiedlichen Modelle und Realisierungen zeigen dabei mögliche, gleich wahrscheinliche Entwicklungen auf.

Grundsätzlich ist bezogen auf ein Wasserwirtschaftsjahr nicht mit großen Änderungen oder zumindest nicht mit großen negativen Auswirkungen auf die Wasserbilanz zu rechnen. Bei wasserwirtschaftlichen Systemen/Fragestellungen, die sensibel auf Änderungen in kürzeren Zeiträumen (Quartale) reagieren, können aber größere Probleme auftreten, insbesondere dann, wenn sich Effekte beim Niederschlag mit Effekten bei hier nicht betrachteten Parametern (z. B. Temperatur) überlagern. Durch die Rückgänge der Niederschläge im Sommerquartal können bei gleichzeitig zunehmenden Temperaturen Nutzungskonflikte entstehen (Trinkwasser, Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen, Kühlwasser für Kraft-

werke usw.). Durch die Zunahme im Winterquartal kann sich die Hochwassersituation verschärfen, insbesondere dann, wenn sich höhere Niederschlagssummen mit Schmelzwasser aus früher auftretenden Tauperioden überlagert.

Bei den Starkregenereignissen (Tagessummen) sind zwar landesweit keine katastrophalen Zunahmen zu erwarten, es ist aber damit zu rechnen, dass die Anzahl der als „Starkregen“ wahrgenommenen Ereignisse zunehmen werden. Für einen möglichen Anstieg der Intensitäten erscheinen die Voraussetzungen gegeben, hier ist eine belastbare Aussage jedoch nicht abschließend möglich, weil die Klimaprojektionen grundsätzlich hinsichtlich der Abbildung von extremen Starkregenereignissen (Konvektionswetterlagen) Einschränkungen aufweisen.

Auch in Zukunft werden weiterhin besondere Wetterextreme mit lokal besonders hohen Tagessummen des Niederschlags auftreten. Es ist zielführend, derartige Wetterextreme unabhängig von der Klimawandel-Diskussion grundsätzlich, z. B. durch Vulnerabilitätsbetrachtungen, stärker zu berücksichtigen. Bei der Bewertung von Auswirkungen des Klimawandels auf den Parameter Niederschlag, insbesondere auf Starkregenereignisse, ist daher Augenmaß zu bewahren. Wasserwirtschaftliche Systeme und die darin ablaufenden Wirkzusammenhänge sind als Ganzes zu bewerten.

14.7.3 Folgerungen für die Wasserwirtschaft

Aufgrund der zuvor beschriebenen Unsicherheiten und Bandbreiten möglicher Entwicklungen erscheinen pauschale Zuschläge auf die Eingangsgröße „Niederschlag“ für wasserwirtschaftliche Fragestellungen, wie z. B. Bemessungen, derzeit nicht zielführend. Darüber hinaus gibt es regional deutliche Unterschiede in der Entwicklung, die in den bisherigen Messdaten der letzten 60 Jahre erkennbar sind, und die eine räumlich gegliederte/räumlich unterschiedliche Strategie je nach wasserwirtschaftlicher Fachaufgabe erforderlich machen. Zweckmäßiger ist es, für wasserwirtschaftliche Systeme Sensitivitätsanalysen durchzuführen, die neben der Variation von Eingangsgrößen auch die Vulnerabilität eines Systems berücksichtigen. Mit verschiedenen Berechnungsvarianten kann das Systemverhalten auf unterschiedlich starke Niederschläge untersucht werden.

Flexible Entwürfe sind in der Lage, bei der gegebenen unsicheren Datenlage für die Projektion in die Zukunft mit vertretbarem Aufwand eine kurzfristige Änderung bzw. Ergänzung der Pläne umzusetzen. Insbesondere sind dabei Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen, die Schäden bei Ereignissen oberhalb von Bemessungsgrößen vermeiden oder verringern.

Aachen, Lübeck, Hattingen, den 16. März 2010

Gerhard Langstädtler

Dr. Thomas Einfalt

Dr. Markus Quirmbach

Arbeitsgemeinschaft
aqua_plan GmbH · hydro & meteo GmbH & Co KG · dr. papadakis GmbH

Literaturverzeichnis

- [1] aqua_plan: Benutzerhandbuch AquaZIS, unveröffentlicht, Aachen, 2009
- [2] aqua_plan: Klimawandel und Starkregenverhalten – Quantitative Einschätzung für das Stadtgebiet Hagen (im Auftrag der Stadtentwässerung Hagen SEH); Vortrag aqua_plan bei der Essener Tagung im April 2008, in Kürze auch Veröffentlichung in KA
- [3] ATV-DVWK: Arbeitsblatt A 118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen (1999)
- [4] Bartels, H.; Dietzer, B.; Malitz, G.; Albrecht, F.M.; Guttenberger, J. (2005): KOSTRA-DWD-2000, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2000) – Fortschreibungsbericht, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Offenbach am Main, 2005
- [5] Bronstein, I., Semendjajew, A., Musiol, G., Mühlig, H. (1989): Taschenbuch der Mathematik
- [6] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (Hrsg.): Niederschlag – Aufbereitung und Weitergabe von Niederschlagsregistrierungen (DVWK Regeln zur Wasserwirtschaft 123/1985, Hamburg und Berlin 1985)
- [7] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Hrsg.): Niederschlag – Starkregenauswertung nach Wiederkehrzeit und Dauer (DWA-Regeln zur Wasserwirtschaft ATV-A 121/1985, Hamburg und Berlin 1985), schriftgleich mit DVWK-Regeln 124
- [8] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (Hrsg.): Niederschlag – Anweisung für den Beobachter an Niederschlagsstationen (DVWK Regeln zur Wasserwirtschaft 126/1988, Hamburg und Berlin 1988)
- [9] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (Hrsg.): Statistische Methoden zu Niedrigwasserdauern und Starkregen (Schriftenreihe des DVWK, Heft 82, Hamburg und Berlin 1988)
- [10] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (Hrsg.): Starkniederschläge in der Bundesrepublik Deutschland (Schriftenreihe des DVWK, Heft 97, Hamburg und Berlin 1991)

- [11] DIN, Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): Wasserwesen: Begriffe, Normen – DIN-Taschenbuch 211 (Berlin 1991)
- [12] DWD: Anleitung für die Beobachter an den Klimahauptstationen des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach 1980
- [13] DWD: Anleitung für die Beobachter an den Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach 1983
- [14] Dyck, S.: Grundlagen der Hydrologie (Berlin 1983)
- [15] Einfalt & Hydrotec (2003): Analyse der zeitlichen Verteilung gemessener extremer Niederschlagsereignisse; Kurzbericht der einfalt & hydrotec GbR an den Erftverband (unveröffentlicht), September 2003
- [16] Einfalt, T., Jessen, M., Quirnbach, M. (2006). Can we check raingauge data automatically? 7th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, St. Moritz, Switzerland, 7-10 December, ISBN 3-909386-65-2.
- [17] Einfalt, T., Jessen, M., Hatzfeld, F. (2007). Klimawandel über Lübeck oder (noch) nicht? Die räumliche Verteilung von bemessungsrelevanten Starkregen über Lübeck. Proceedings DACH2007, Hamburg.
- [18] Einfalt (2008), Bericht zum Auftrag des LUWG: Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz: Erstellung eines Programms zur automatischen Prüfung von Klimastationszeitreihen (NIKLAS)
- [19] Einfalt, T., Gerlach, N., Podlasly, C., Demuth, N. (2008). Rainfall and climate data quality control. 11th ICUD, Edinburgh, 31 August-5 September
- [20] Günther, T. & Stalman, V. (2002): Hydrometeorologische Untersuchungen zum Problem der Klimaveränderungen, KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, 2002 (49), Nr. 7, S. 992-997
- [21] Integriertes Diagnose- und Präsentationstool, IDP 2006 – Ein Werkzeug zur explorativen Datenanalyse, CEC GmbH, Potsdam, 2006
- [22] Keuler, K.; Will, A.; Radtke, K.; Woldt, M. (2007): Klimaprojektionen für Deutschland, CLM – Workshop und Kontaktforum, 7. Dezember 2007, Hamburg, <http://www.mad.zmaw.de/projects-at-md/sg-adaptation/clm-workshop-2007/>
- [23] KLIWA-Berichte Heft 7: Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern, 2006
- [24] KLIWA-Berichte Heft 8: Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, 2006

- [25] Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2007): Grünbuch der Kommission “Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU“, KOM(2007) 354 vom 29.06.2007
- [26] Kostra-DWD 2000, Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen, Version 2.1.3
- [27] LANUV, NRW (2008): Ausschreibung: Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS) – Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit
- [28] LUWG: Software zur Plausibilisierung meteorologischer Messdaten – Version 1: Fachliche Dokumentation zur Parameterprüfung und -festlegung, unveröffentlicht, Mainz, 2007
- [29] Madsen, H.; Arnbjerg-Nielsen, K.; Mikkelsen, P.S. (2006): Evidence of Increased Storm Intensities in Denmark from the Augmented Rain Database (1997-2005), Proceedings of the 7th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, 7-10 December 2006, St. Moritz, Switzerland, pp. 129-133, ISBN 3-909386-65-2
- [30] Maniak, Ulrich: Hydrologie und Wasserwirtschaft – Eine Einführung für Ingenieure (Springer-Verlag, Berlin 1992)
- [31] MUNLV NRW (2007): Klimawandel in Nordrhein-Westfalen – Wege zu einer Anpassungsstrategie; Bericht des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, September 2007
- [32] Plate, Erich J (1993): Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, ISBN 3-433-01073-0
- [33] Pfister, A. & Verworn, H.-R. (2002): Trend-Untersuchungen von Starkregen im Emscher-Lippe-Raum, KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, 2002 (49), Nr. 8, S. 1101 – 1104
- [34] Quirnbach, M.; Papadakis, I. (2006): Historical development of precipitation estimates for the dimensioning of sewer systems and urban storage reservoirs – effects of extent and costs of building operations. Proceedings of the 7th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, 07.-10. December 2006, St. Moritz, Switzerland. pp. 221-225
- [35] Rauch, W. & DeToffol, S. (2006): Climate Change Induced Trends in High Resolution Rainfall, Proceedings of the 7th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, 7-10 December 2006, St. Moritz, Switzerland, pp. 119-123, ISBN 3-909386-65-2
- [36] Ruhrverband (2007): Jahresbericht Ruhrwassermenge 2006, Kapitel 10: Abschätzung der Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Bewirtschaftung der Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr, S. 32-50, ISSN 1861-7557

- [37] Sachs, L.: Angewandte Statistik, 7. Auflage (Berlin 1992)
- [38] Service Gruppe Anpassung (2007): Ergebnisse der regionalen Klimasimulationen durchgeführt mit dem Climate Local Model (CLM) – Analyse der klimatologischen 2m-Temperatur, CLM – Workshop und Kontaktforum, 7. Dezember 2007, Hamburg, <http://www.mad.zmaw.de/projects-at-md/sg-adaptation/clm-workshop-2007/>
- [39] Sevruk, B. (2004): Niederschlag als Wasserkreislaufelement – Theorie und Praxis der Niederschlagsmessung, Kapitel 4.4: Klimaänderung, ETH Zürich, Schweiz
- [40] Umweltbundesamt (2007): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen – Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG, Januar 2007
- [41] WMO (2007): WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2006, WMO-No. 1016, 2007, ISBN 92-63-11016-6

CD-ROM mit folgendem Inhalt:

- **ExUS_Bericht.pdf (Gesamtbericht)**
- **ExUS_Bericht_1.pdf (Textteil des Berichts)**
- **ExUS_Bericht_2.pdf (Anhang des Berichts)**