



**Klimaanalyse Sachsen-Anhalt
für den Zeitraum 1951-2014
auf Basis von Beobachtungsdaten**

Impressum

Klimaanalyse Sachsen-Anhalt für den Zeitraum 1951-2014
auf Basis von Beobachtungsdaten

- Herausgeber: Landesamt für Umweltschutz
Tel.: +49 345-5704-101
poststelle@lau.mlu.sachsen-anhalt.de
Internet: www.lau.sachsen-anhalt.de
- Erstellt durch: Climate & Environmental Consulting Potsdam GmbH
in Zusammenarbeit mit der hydro & meteo GmbH Lübeck
- Abschlussdatum: Dezember 2015
- Redaktion: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
Dr. Christiane Röper
Manfred Unglaube
- Redaktionsschluss: Halle (Saale), Januar 2016
geändert Dezember 2016 in:
Abbildungsunterschrift der Abb. 4.42, S. 53
- Web-Link der Publikation www.lau.sachsen-anhalt.de
(Wir über uns, Publikationen/Fachpublikationen/Berichte des
LAU/Heft 1-2016)
- ISSN-Nummer: 0941-7281
- Titelfotos: Bergwetterwarte Brocken
(Fotos: M. Unglaube)



Vorwort

Der 5. Sachstandsbericht des IPCC belegt erneut: *„Die Erwärmung des Klimasystems ist eindeutig und es ist äußerst wahrscheinlich, dass der menschliche Einfluss die Hauptursache der beobachteten Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts war. Die bereits heute eingetretenen Klimaänderungen haben weitverbreitete Auswirkungen auf Mensch und Natur.“*¹

Klima ist im engeren Sinn als das durchschnittliche Wetter definiert, oder genauer: als die statistische Beschreibung des Wetters in Form von Durchschnittswerten und der Variabilität relevanter Größen über eine Zeitspanne, die im Bereich von Monaten bis hin zu Tausenden oder Millionen von Jahren liegen kann. Der klassische, von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definierte Zeitraum sind 30 Jahre.

In bisherigen Studien für Sachsen-Anhalt wurden Beobachtungsdaten aus den Zeiträumen 1961 bis 1990 oder 1971 bis 2000 ausgewertet. Inzwischen liegen insbesondere durch eine weitere Datenaufbereitung beim DWD Beobachtungsdaten über längere Zeiträume vor. Diese bildeten die Grundlage für die vorliegende Klimaanalyse für Sachsen-Anhalt. Ziel war es, Beobachtungsdaten über möglichst lange Zeiträume auszuwerten, im Idealfall über den Zeitraum von 1951 bis 2014. Es ist davon auszugehen, dass Aussagen zu beobachteten Klimatrends, die auf einem langen Zeitraum basieren, statistisch besser abgesichert sind.

Weiterhin stand in dem Projekt die Aufgabe, neben den meteorologischen Standardgrößen auch abgeleitete Klimagrößen (Klima-Indikatoren) zu bestimmen. Aus den Klima-Indikatoren und deren Änderungen kann die Betroffenheit einzelner Sektoren abgeleitet werden. So sind z. B. der Hitzeindex oder die Anzahl von Hitzetagen für den Gesundheitssektor besonders relevant, Heizgradtage oder Kühlgradtage dagegen für die Energiewirtschaft oder Gebäudetechnik und niederschlagsabgeleitete Indikatoren für Land- und Wasserwirtschaft.

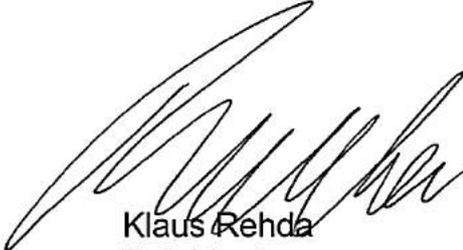
Einen weiteren Schwerpunkt der Klimaanalyse bildete die Auswertung der phänologischen Daten des Deutschen Wetterdienstes für die Naturräume in Sachsen-Anhalt. Die Phänologie befasst sich mit den im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen der Pflanzen. Es werden die Eintrittszeiten charakteristischer Vegetationsstadien (Phasen) beobachtet und festgehalten. Sie stehen in enger Beziehung zur Witterung und zum Klima. Es zeichnet sich gegenwärtig ab, dass phänologische Daten in

¹ Quelle: Fünfter Sachstandsbericht des IPCC – Synthesebericht

Zukunft verstärkt für Trendanalysen zur Klimadiagnostik herangezogen werden, da sich die Eintrittsdaten vieler phänologischer Phasen sehr gut in Beziehung zu Klimatrends setzen lassen.

Mit dem Abschluss des Projektes liegt nun eine belastbare und umfassende Datenbasis über Klimaänderungen in Sachsen-Anhalt vor. Darüber hinaus gibt es neben dem vorliegenden Abschlussbericht eine sehr umfangreiche Datensammlung, die bei Bedarf über das Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt abgerufen werden kann.

Halle (Saale), 29.01.2016



Klaus Rehda
Präsident



Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH

14469 Potsdam - David-Gilly-Straße 1



hydro & meteo GmbH & Co. KG
Wetter + Wasser

Klimaanalyse Sachsen-Anhalt 1951 bis 2014

Endbericht

In Auftrag gegeben vom Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt

Reideburger Straße 47, 06116 Halle (Saale)

Arne Spekat (1), Thomas Einfalt (2), Annemarie Jackisch (2)

Ausgeführt von einem Konsortium aus
(1) Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
(2) hydro & meteo GmbH & Co KG

Ausführende:

Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
David-Gilly-Straße 1
14469 Potsdam

hydro & meteo GmbH & Co KG
Breite Straße 6–8
23552 Lübeck

Dieser Bericht sollte so zitiert werden:

A. SPEKAT, T. EINFALT und A. JACKISCH, 2016: Klimaanalyse Sachsen-Anhalt 1951 bis 2014. Endbericht. Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH und hydro & meteo GmbH & Co KG im Auftrag des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale). Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Nr. 1/2016.

Kurzfassung

Im Vorhaben Klimaanalyse Sachsen-Anhalt 1951 bis 2014 wurde der Ansatz verfolgt, aus einer möglichst großen Vielfalt von Datenquellen eine umfangreiche Darstellung des Klimawandels seit den 1950er Jahren zu gewinnen. Zudem sollten klimadiagnostische Aktivitäten in Sachsen-Anhalt fortgeführt, erweitert und aktualisiert werden.

Weiterhin stand die Einbeziehung von Nutzern sowohl im Vorfeld als auch während der Laufzeit des Vorhabens an prominenter Stelle.

Bei einem solchen Vorhaben ist der Anteil der Daten-Akquise und -Qualitätskontrolle groß. Es galt, Daten aus verschiedenen Quellen zu vergleichen und ihre Qualität zu beurteilen. In diesem Bericht werden die im Vorhaben angewandten Verfahren der Qualitätskontrolle ausführlich beschrieben und ihr Einfluss auf den Umfang des akquirierten und tatsächlich eingesetzten Datenbestands geschildert.

Einige wichtige Ergebnisse dieses Vorhabens:

- Aus Stationsmessungen und abgeleiteten Klimaindikatoren konnten zahlreiche Tendaussagen gewonnen werden.
- Diese Trends zeigen den bereits stattfindenden Klimawandel.
- Sie sind stimmig mit Projektionen von Klimamodellen für die kommenden Jahrzehnte.
- Trends im Klima der letzten 50–60 Jahre sind insbesondere bei Temperaturgrößen sehr deutlich.
- Klimaveränderungen konnten aber auch im Bereich der Extreme von Temperatur, Feuchte und Niederschlag dargestellt werden.
- Insbesondere gibt es Hinweise auf Frühjahrstrockenheit, Zunahme der Dauer von Hitzeperioden und zunehmende Waldbrandgefahr.
- Mit Hilfe der Phänologie konnten viele der mit Messtechnik gewonnenen Tendaussagen verifiziert werden.

Im Rahmen des Verfahrens entstand ein umfangreicher Katalog an Auswertungen in Form von Dateien und Grafiken, die den Nutzern zur Weiterbearbeitung und Auswertung zur Verfügung gestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Kontext und Überblick	1
1.1	Kontext	1
1.2	Motivation und Strukturierung des Projekts	3
1.3	Vorstellung der Ziele	3
1.4	Vorstellung der Spezifika	4
1.5	Ablauf des Projekts	4
1.5.1	Vorbereitung der Datengrundlage für das Vorhaben (AP 1)	5
1.5.2	Auswertung meteorologischer Standardgrößen (AP 2)	5
1.5.3	Berechnung und Auswertung abgeleiteter komplexer Klimagrößen für Tageswerte (AP 3)	6
1.5.4	Extreme Witterungsereignisse (AP 4)	6
1.5.5	Aufbereitung von Stundendaten (AP 5)	7
1.5.6	Auswertung agrarmeteorologischer Daten (AP 6)	7
1.5.7	Auswertung phänologischer Daten (AP 7)	7
1.6	Bezug zu anderen Studien	8
2	Datenquellen	9
2.1	Vorbemerkungen	9
2.1.1	Klimadaten in täglicher Auflösung	9
2.1.2	Klimadaten in stündlicher Auflösung	9
2.1.3	Stationsdaten aus der so genannten agrarmeteorologischen Datenbank	10
2.1.4	Phänologische Daten	10
2.1.5	Reanalysedaten	11
2.1.6	Meteorologische Messdaten an den Stationen des Luftüberwachungssystems Sachsen-Anhalt (LÜSA)	11
2.1.7	Historische Zeitreihen	12
2.1.8	Lange Niederschlagsreihen in hoher Auflösung aus dem Projekt KOSTRA	12
2.1.9	Wind-korrigierte Niederschlagsdaten	12
2.2	Spezifika und Nutzbarkeit der Datenquellen	12
2.2.1	Stufe 1: Minimalanforderungen bezüglich Länge der Klimadatenreihen und Lücken in den Klimadatenreihen	14

2.2.2	Stufe 2: Qualitätskontrolle der gemessenen Werte	14
2.2.3	Stufe 3: Zusätzliche Vollständigkeitskriterien bei der Aggregation von Tages- zu Monatswerten	14
3	Eingesetzte Methodik	15
3.1	Zusammenhang zwischen Datenverfügbarkeit und Vielfalt der Ergebnisse	15
3.2	Meteorologische Standardgrößen und ihre Messung oder Berechnung	15
3.3	Klimaindikatoren, abgeleitete Parameter und ihre Berechnung	16
3.4	Trends und die Beurteilung ihrer Signifikanz	16
4	Ergebnisse	19
4.1	Potenzieller und tatsächlicher Datenbestand – AP 1	19
4.1.1	Klimaparameter	19
4.1.2	Phänologische Parameter	23
4.2	Analyse von meteorologischen Standardgrößen	24
4.2.1	Lufttemperatur	24
4.2.2	Niederschlag	35
4.2.3	Relative Feuchte	40
4.2.4	Sonnenscheindauer	41
4.2.5	Bedeckungsgrad	43
4.2.6	Windgeschwindigkeit	44
4.2.7	Windrichtung	47
4.2.8	Meteorologische Messreihen des LÜSA	49
4.3	Klima-Entwicklungen aus abgeleiteten Klimagrößen – AP 3	52
4.3.1	Indikatoren zu Temperaturveränderungen	52
4.3.2	Indikatoren zu Niederschlagsveränderungen	58
4.3.3	Indikatoren zu Veränderungen beim Wind	60
4.4	Extreme Ereignisse – AP 4	61
4.4.1	Klimaentwicklungen in verschiedenen Extremstufen	61
4.4.2	Extremwert-statistische Untersuchungen von Starkniederschlag	64
4.5	Analyse von Stundendaten – AP 5	67
4.5.1	Tagesspannen	67
4.5.2	Tagesverläufe	69
4.5.3	Jahresverläufe	71
4.6	Analyse von Daten mit agrarmeteorologischer Relevanz – AP 6	74
4.6.1	Hohe Luftfeuchte	74
4.6.2	Bodenfeuchte	75
4.7	Auswertung phänologischer Daten – AP 7	78
4.7.1	Statistische Grundlagen für die phänologischen Analysen	78
4.7.2	Vorarbeiten	78
4.7.3	Trendentwicklung in der Phänologie	84
4.7.4	Phänologische Uhren	89

4.7.5	Zusammenhang der phänologischen Beobachtungen mit anderen Parametern	90
5	Zusammenfassung	107
	Literaturverzeichnis	111
A	Stationen	I
A.1	Liste der untersuchten Klima-Stationen in täglicher Auflösung . .	I
A.2	Stationen mit besonders wenigen Lücken	VII
A.3	Bestand an Stationslisten für die Windrichtung	VIII
A.4	Liste der untersuchten Klima-Stationen in stündlicher Auflösung	IX
A.5	Liste der untersuchten Klima-Stationen in 5-minütiger Auflösung	IX
A.6	Liste der untersuchten Stationen mit Verdunstungsdaten nach Penman	X
A.7	Liste der untersuchten Klima-Stationen aus dem Bestand des LÜSA	X
B	Klima-Indikatoren	XI
B.1	Kenntage	XVIII
B.1.1	Zahl der Eistage in den Wintermonaten (Januar, Februar und Dezember) eines Jahres	XX
B.1.2	Zahl der Frosttage in den Wintermonaten (Januar, Februar und Dezember) eines Jahres	XXI
B.1.3	Zahl der Sommertage in den Monaten Juni–August	XXII
B.1.4	Zahl der heißen Tage in den Monaten Juni–August	XXIII
B.1.5	Zahl der Tropennächte pro Jahr	XXV
B.1.6	Zahl der Starkregentage pro Jahr	XXVI
B.1.7	Zahl der Extremniederschlagstage pro Jahr	XXVIII
B.1.8	Zahl der Starkwindtage pro Jahr	XXX
B.1.9	Zahl der Schwachwindtage pro Jahr	XXXIII
B.2	Zahl der Tage mit Schwüle	XXXV
B.3	Wärmesumme	XXXVIII
B.4	Kühlgradtage	XXXIX
B.5	Kältesumme	XL
B.6	Heizgradtage	XLI
B.7	Erdbodenminimum der Temperatur	XLIII
B.8	Tagesspanne der Lufttemperatur	XLVI
B.9	Vegetationsperiode	XLIX
B.9.1	Thermische Vegetationsperiode	XLIX
B.9.2	Phänologische Vegetationsperiode	LI
B.9.3	Frostfreie Periode	LIII
B.10	Huglin-Index	LVI
B.11	Hitze und warme Nächte	LVII
B.11.1	90-Perzentil der Maximumtemperatur	LVIII

B.11.2	Perioden der Überschreitung des 90-Perzentils der Maximumtemperatur in den Sommermonaten	LVIII
B.11.3	Maximale Länge von Perioden der Überschreitung des 90-Perzentils der Maximumtemperatur in den Sommermonaten	LX
B.11.4	90-Perzentil der Minimumtemperatur	LX
B.12	NOAA-Hitzeindex	LXI
B.13	Länge von Hitzeperioden	LXII
B.14	Kälte und kalte Nächte	LXIII
B.14.1	10-Perzentil der Maximumtemperatur	LXIV
B.14.2	10-Perzentil der Minimumtemperatur	LXV
B.14.3	Perioden der Unterschreitung des 10-Perzentil der Minimumtemperatur in den Wintermonaten	LXV
B.14.4	Maximale Länge von Perioden der Unterschreitung des 10-Perzentil der Minimumtemperatur in den Wintermonaten	LXVII
B.15	Globalstrahlung	LXVII
B.16	Korrigierter Niederschlag	LXVIII
B.17	Potenzielle Verdunstung und klimatische Wasserbilanz	LXVIII
B.18	Standardisierter Niederschlagsindex	LXX
B.19	Länge von Trockenperioden	LXXI
B.20	Mittlerer maximaler täglicher Niederschlag	LXXIII
B.21	Maximaler 5-tägiger Niederschlag	LXXIV
B.22	Starkniederschlag – Perioden und Häufigkeiten	LXXIV
B.23	Hohe Luftfeuchte	LXXVII
B.24	Bodenfeuchte	LXXVII
B.25	Waldbrand	LXXVII
C	Verfahren zur Qualitätskontrolle der Daten	LXXIX
C.1	Ergebnisse der Qualitätskontrolle	LXXIX
C.1.1	Allgemeines	LXXIX
C.1.2	Lufttemperatur	LXXXI
C.1.3	Niederschlag	LXXXIII
C.1.4	Relative Feuchte	LXXXIV
C.1.5	Sonnenscheindauer	LXXXIV
C.1.6	Windgeschwindigkeit	LXXXV
C.1.7	Bedeckungsgrad	LXXXV
C.1.8	Windrichtung	LXXXV
C.1.9	Übersicht über eventuell nachzuarbeitende Stationen	LXXXVI
C.2	NIKLAS	LXXXVII
C.2.1	Software	LXXXVII
C.2.2	Ergebnisse	XC
C.3	Prüfung phänologischer Daten	XCIV
C.3.1	Datenaufbereitung für die Analysen	XCIV
C.3.2	Datenprüfung	XCV

D Erläuterungen zu statistischen Verfahren	CIII
D.1 Zur Korrelationsanalyse	CIII
D.2 Konfidenzintervalle der Trendgeraden und des Wertekollektivs	CV
D.2.1 Berechnung der Konfidenzintervalle	CV
D.2.2 Inhalt der begleitenden Dateien	CVIII
D.3 Der Mann-Kendall-Test	CX
E Extremwertstatistische Auswertungen des Niederschlages	CXIII
E.1 DWA A-531 Tabellen	CXIII
E.2 Abbildungen der gleitenden 30-jährigen Auswertung	CXIII
E.3 Weitere Partielle Serien	CXIV
E.3.1 Abbildungen der partiellen Serien – Ereignishäufigkeiten pro Jahr	CXIV
E.3.2 Abbildungen der partiellen Serien – durchschnittliche Er- eignismengen pro Jahr	CXV
F Tagesgänge, Jahresgänge und Tagesspannen	CXVII
F.1 Grafiken der Tagesgänge der betrachteten Stationen	CXVII
F.2 Grafiken der Jahresgänge der betrachteten Stationen	CXVII
F.3 Grafiken der Tagesspannen der betrachteten Stationen	CXVII
G Phänologische Datenbasis	CXIX
G.1 Datengrundlage	CXIX
G.2 Auswahl der phänologischen Phasen	CXX
G.3 Räumliche Abgrenzung	CXX
G.4 Weitere vorgenommene Änderungen	CXXII
G.5 Übersicht der Trendentwicklung in verschiedenen Naturraum- gruppen	CXXIII

1 Kontext und Überblick

1.1 Kontext

Im Grunde ist das Klima eine statistische Eigenschaft des Atmosphärensystems. Es beschreibt mittlere Zustände und die Variabilität von physikalischen Eigenschaften der Atmosphäre; Letzteres umfasst auch das Auftreten von Extremen. Das Klima ist in dauernder Veränderung begriffen – es unterliegt zyklischen und aperiodischen Schwankungen. Die Ursachen bestehen in einer Mischung aus natürlichen und anthropogenen Einflussfaktoren.

Das atmosphärische Geschehen wird allerdings von den Beobachtungssystemen weder in Zeit noch in Raum kontinuierlich erfasst. Vielmehr gibt es ein mehr oder weniger dichtes Netz an Stationen, dessen Messorte nach Kriterien der Repräsentativität, Logistik und Ökonomie gewählt sind. An diesen Stationen erfolgen die Messungen je nach Element und technischer Ausstattung in unterschiedlichen zeitlichen Takten.

Die Analyse des Klimas aus den Messungen – das Klimamonitoring – ist aber keineswegs Selbstzweck, ausgeführt für die Klimawissenschaften. Der Klimawandel stellt vielmehr eine große Herausforderung für sehr unterschiedliche Bereiche der Zivilgesellschaft und insbesondere für Entscheidungsträger dar. Sowohl die natürliche Variabilität des Klimas als auch die vom Menschen herrührenden Veränderungen des Klimas erzeugen dabei Klimaauswirkungen (Impakte), die ihrerseits vielfältige Risiken darstellen (FIELD et al., 2014, 5. Sachstandbericht des IPCC, Physikalische Basis). Es ist von großer Wichtigkeit, Kenntnis über das Ausmaß der Klimaveränderungen zu erhalten. Diese Informationen sind zur Abschätzung von Klimawirkungen und Klimafolgen sowie für die Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen von grundlegender Bedeutung (CRAMER et al., 2014, 5. Sachstandbericht des IPCC: Impakte, Anpassung und Mitigation). Vielfach werden dazu Zukunfts-Projektionen der Klimaentwicklung eingesetzt, wie sie auf der Basis von Treibhausgas-Szenarios und unter Nutzung von Klimamodellen und in verstärktem Maße auch von Erdsystem-Modellen entstehen (FLATO et al., 2013, a.a.O.).

Angesichts der statistischen Natur der betrachteten Eigenschaften und der keineswegs idealen Verfügbarkeit von „Stichproben“ an den Orten der Stationen ist pragmatisches Vorgehen geboten. Die Nutzung von Referenzperioden stellt dabei einen übergeordneten Kontext her. Falls nicht zwingend, beispielsweise aus Gründen der Datenverfügbarkeit, davon abgewichen werden muss, empfiehlt die WMO, mehrere 10-jährige Zeiträume, immer vom Jahr $\langle xxx1 \rangle$ bis zum Jahr $\langle xxy0 \rangle$ gebildet, zusammenzufassen (WMO, 2010).

Klima-Betrachtungen, bei denen die Vergleichbarkeit eine sehr hohe Priorität besitzt, sollten nach den Empfehlungen der WMO für nicht-überlappende 30-jährige Zeiträume, 1901–1930, 1931–1960, 1961–1990 erfolgen. Die WMO ist sich dabei bewusst, dass auch die Nutzung von 30-jährigen Perioden ein standardisierender Kompromiss ist – für die Quantifizierung des Klimazustands der Temperatur sind unter Umständen kürzere Zeiträume ausreichend – während es beim Niederschlag wegen dessen besonders hoher Variabilität nötig sein kann, noch längere Mittelungsperioden zu verwenden (ANGEL et al., 1993).

Eine Konsequenz dieser Empfehlung ist, dass der Begriff Klimaänderung erst bei Zeitskalen von 30 oder mehr Jahren sinnvoll wird. Für die in diesem Vorhaben analysierten möglichst langen Zeitreihen aus der Region Sachsen-Anhalt besteht daher die Erwartung, einige Trendentwicklungen identifizieren und quantifizieren zu können. Der lineare Trend ist dabei nur scheinbar ein relativ grobes Beschreibungsmaß, denn er stellt eine robuste Informationsquelle dar. Die Einschätzung, ob ein mathematisch gefundener Trend belastbar ist oder auch durch Zufälligkeit erklärt werden könnte, erfolgt mit Hilfe von Signifikanztests. Dabei wird beispielsweise untersucht, ob die Beschreibung des zeitlichen Verhaltens einer Variablen auch ohne einen Trend adäquat ist.

Die WMO empfiehlt (WMO, 2010), Klimatrends von Datenreihen bestimmter Mindestlängen durchzuführen. Diese sind für Niederschlag 50 Jahre, für andere meteorologische Größen 30 Jahre. Trotzdem muss bei der Ermittlung von Trends mit fachlichem Augenmaß vorgegangen werden, um zum Beispiel dekadische Trends nicht irrtümlich als Gesamttrend anzusehen (z.B. WILLEMS, 2013).

Das Thema „Referenzperioden“ besitzt hohe Aktualität und auch Relevanz für zahlreiche Aspekte des Vorhabens:

- Wie die Commission for Climatology der WMO auf ihrem 17. Treffen feststellte (WMO, 2014, dort in den Absätzen 8.1.4 bis 8.1.7 dokumentiert), gibt es an vielen Orten Bedenken, dass die praktizierte Methode der Berechnung von Klima-Standardnormalwerten¹⁾ zu einer guten Leit-Bezugsgröße für die meisten Klima-Anwendungen führt. Insbesondere in einem sich wandelnden Klima ist eine adäquate Beschreibung durch Normalwerte wenig wahrscheinlich. Jedoch gibt es auch Bereiche der Klimatologie, für die eine relativ stabile Referenzperiode benötigt wird – zum Beispiel der Beschreibung der langfristigen Klimavariabilität oder bei der Klimaüberwachung.
- Des Weiteren ist festzustellen und wird von der WMO auch empfohlen, dass ein Übergang zu einem häufigeren Aktualisierungszyklus im Gange ist: Die 30-jährigen Mittel werden vielerorts alle 10 Jahre aktualisiert. Darüber hinaus soll aber die Periode 1961–1990 auch weiterhin als stabile Referenz für Langzeituntersuchungen der Klimavariabilität auf langen

¹⁾Bestimmung von 30-jährigen Normalwerten, die alle 30 Jahre aktualisiert werden; die derzeit gültige Periode ist 1961–1990.

Zeitskalen sowie für Untersuchungen des Klimawandels beibehalten werden.

- Im Tableau der verschiedenen zu bestimmenden 30-jährigen Mittelwerte innerhalb dieses Projekts ist die empfohlene WMO-Periode enthalten. Für Analysen des Trendverhaltens hingegen ist es eher von Nutzen, möglichst lange, mindestens 30-jährige Perioden (bei Niederschlag: 50 Jahre) zu untersuchen, die die Periode 1961–1990 vollständig enthalten können, aber nicht müssen.

1.2 Motivation und Strukturierung des Projekts

Auch wenn die Abschätzung *zukünftiger* Klimaentwicklungen einen hohen Stellenwert besitzt: Das Klima ändert sich und es gibt den Bedarf, Entwicklungen herauszuarbeiten, die das Klima der vergangenen rund 50–60 Jahre kennzeichnen. Zentrale Informationsquelle dafür sind Messungen (LATIF, 2012).

Eine Hauptrolle bei der Entwicklung und Umsetzung von Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen kommt dabei den auf regionaler Ebene tätigen Entscheidungsträgern zu. In Sachsen-Anhalt wurden im Laufe der Jahre mehrere Studien durchgeführt. Details finden sich auf den Webseiten des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt www.lau.sachsen-anhalt.de/startseite.

Um eine verbesserte Wissensbasis für relevante regionale Entwicklungen zu erhalten, wurde 2014 vom Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (Halle, Saale) das Vorhaben *Klimaanalyse für Sachsen-Anhalt 1951–2014* beauftragt. Über die Sichtung und Bewertung einer Vielzahl potenzieller Quellen von Klimadaten, verbunden mit einer Daten-Qualitätskontrolle, werden umfangreiche Auswertungen von Klimagrößen und -indikatoren vorgenommen, deren Ergebnisse dargestellt und evaluiert werden.

1.3 Vorstellung der Ziele

In Anbetracht der Tatsache, dass in den letzten 60 Jahren global wie auch regional ein deutlicher Temperaturanstieg zu erkennen ist, muss Folgendes konstatiert werden: Zur Bewertung der aus den klimatischen Änderungen erwachsenden Konsequenzen existieren keine ausreichend aktuellen sowie hinreichend differenzierten Klimaanalysen für Sachsen-Anhalt. Bisherige Klimadiagnosen für Sachsen-Anhalt umfassten den Beobachtungszeitraum 1951 bis 2006 bzw. den Zeitraum 1971 bis 2010. Ein zentrales Ziel des Vorhabens ist es, eine aktuelle Klimaanalyse für Sachsen-Anhalt auf der Basis einer Vielzahl von Beobachtungsdaten zu erarbeiten. Insbesondere sollen langfristige Trends von Klimaparametern über die vergangenen Jahrzehnte flächendeckend auf regionaler Ebene bewertet werden.

In der Regel erfolgt die Analyse der Klimaveränderungen „aus sich heraus“, d.h. die Erwartung an die Analysen ist, dass regionale Klimaveränderungen in den Datenreihen der Messorte identifiziert werden. Bei einem der Arbeitspakete wird dieser Rahmen erweitert: Bezüglich der Veränderungen phänologischer Parameter soll zusätzlich untersucht werden, ob hier Zusammenhänge mit großräumigen Veränderungen in der nordatlantischen Zirkulation nachweisbar sind.

Es geht folglich sowohl um die Fortschreibung bereits durchgeführter Studien (s. Abschnitt 1.6) als auch um die Erweiterung des Spektrums von Größen mit Relevanz für bedeutsame Klima-Auswirkungen. Die dabei betrachteten Größen umfassen meteorologische Standardvariable, wie z.B. Temperatur, Niederschlag, Feuchte, Bewölkung oder Wind. Des Weiteren werden die Analysen auf zahlreiche abgeleitete Größen ausgedehnt. Mit ihnen lässt sich ein sich veränderndes Verhalten sowohl von Klima-Extremen als auch von anderen, für verschiedene Bereiche der Zivilgesellschaft bedeutungsvollen Klima-Faktoren, aufzeigen und bewerten.

1.4 Vorstellung der Spezifika

In Sachsen-Anhalt sind im Laufe der vergangenen Jahrzehnte Daten verschiedenartiger Messnetze erhoben worden. Dazu gehören Messungen atmosphärischer Parameter an Wetter- und Klimastationen, spezielle landwirtschaftlich relevante Parameter, Messungen von meteorologischen Daten an Luftgütestationen oder phänologische Erfassungen von Pflanzen-Entwicklungsphasen. Genau hier liegt ein wesentliches Spezifikum des Vorhabens. Es gilt, die vorhandenen Daten hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit für die Analyse von Klimaentwicklungen zu bewerten. Damit kann ein sowohl inhaltlich als auch bezüglich der Flächenabdeckung ergänzender Bestand an Datenreihen identifiziert und für Analysen des Klimawandels der letzten rund 60 Jahre eingesetzt werden. Dieses Vorgehen, in Kombination mit zahlreichen klimaindikatorbasierten Auswertungen, ist eine weitere Besonderheit des Vorhabens.

Zusätzlich Vorteile entstehen dank eines fachlich sehr gut aufgestellten Begleitkreises. Dadurch wird die Nutzer-Relevanz der analysierten Größen gewährleistet. Außerdem ist ein hohes Maß an Synergie durch das Generieren von neuen, auf die Fragestellungen der Nutzer zugeschnittenen Zeitreihen möglich.

1.5 Ablauf des Projekts

Das Vorhaben ist in eine Reihe von Arbeitspaketen gegliedert, die zum Teil aufeinander aufbauen und zum Teil parallel bearbeitet werden können. Sie werden in diesem Abschnitt etwas eingehender beschrieben.

1.5.1 Vorbereitung der Datengrundlage für das Vorhaben (AP 1)

Um die Datenbasis für die weiteren Arbeitspakete zu schaffen, ist in einem ersten Schritt eine Evaluierung des vorhandenen Datenbestands, eine Qualitätskontrolle und die Aufbereitung für die weiteren APs durchzuführen. Dies ist das mit AP 1 bezeichnete Basis-Arbeitspaket AP 1.

Dafür ist eine Region um Sachsen-Anhalt herum festzulegen, aus der Stationsreihen zu akquirieren sind. Einerseits kann durch das Einbeziehen von Stationen aus benachbarten Bundesländern die Stationsdichte in einigen Gebieten erhöht werden – es ist andererseits darauf zu achten, dass es sich dabei um Ergänzungen im Wortsinne handelt, d.h. dass die Datenreihen aus kompatiblen Naturräumen oder Großlandschaften stammen sollen. Bisweilen können aus der Umgebung Sachsens-Anhalts auch weitere lange Zeitreihen mit gutem Potenzial für die Identifikation von Klimaänderungen hinzugefügt werden.

Eine sorgfältige Qualitätskontrolle der Daten ist wichtige Voraussetzung für die Beurteilung, ob Datenreihen als tauglich für die Analysen eingeschätzt werden können. Wichtige Informationsquelle sind dafür Metadaten, aus denen Angaben zu Verlagerung und Instrumentierung der Messstationen hervorgehen – nicht an allen Stationen liegen diese in hinreichend nutzbarer Form vor, weswegen oft Expertenwissen zu Rate gezogen werden muss.

Die Qualitätskontrolle umfasst eine Ermittlung der Vollständigkeit der Daten sowie Tests auf Ausreißer und mögliche Inkonsistenzen.

1.5.2 Auswertung meteorologischer Standardgrößen (AP 2)

In der Regel erheben meteorologische Messstationen einen Satz von Standardgrößen:

- Lufttemperatur Maximum TX
- Lufttemperatur Mittel TM
- Lufttemperatur Minimum TN
- Niederschlag RR
- Relative Luftfeuchte RF
- Sonnenscheindauer SD
- Bedeckungsgrad NN
- Windgeschwindigkeit FF
- Windrichtung FD

An Niederschlagsstationen wird zumeist nur der Niederschlag und keine andere Größe gemessen. Einige der Messstationen registrieren zudem nur einen

Teil der Standardgrößen und wieder andere messen zusätzliche Größen wie Strahlung oder Bodeneigenschaften.

Ein wesentliches Anliegen des AP 2 besteht in der Ermittlung von Trends der – über möglichst lange Zeiträume verfügbaren – Standardgrößen. Ergänzende Analysen zeigen den Vertrauensbereich und die Signifikanz von ermittelten Trends auf. Zudem werden Aussagen zu Mittelwerten und anderen statistischen Eigenschaften dieser Größen in Standardperioden (1951–1980; 1961–1990; 1971–2000; 1981–2010, s.a. Anmerkungen in Abschnitt 1.1) bestimmt.

Die Ergebnisse werden dem Auftraggeber in Form von Karten und Tabellen-dateien zur Verfügung gestellt.

1.5.3 Berechnung und Auswertung abgeleiteter komplexer Klimagrößen für Tageswerte (AP 3)

Von der Analyse der zeitlichen Entwicklung meteorologischer Standardgrößen können bereits aufschlussreiche Details zum Klimawandel erwartet werden. Die Nutzbarkeit der Ergebnisse kann weiter gesteigert werden, wenn zusätzlich abgeleitete Klimagrößen, im Kontext des Vorhabens auch Klima-Indikatoren genannt, ermittelt und analysiert werden.

Dazu zählen Ereignistage (z.B. die Zahl der Eistage, Frosttage, Sommertage, etc.), Wärmesummen, Kältesummen, Angaben zur Vegetationsperiode (Beginn, Ende, Dauer) oder verdunstungsbasierte Größen.

Darüber hinaus werden abgeleitete Größen mit Bezug zu Starkniederschlag, Trockenheit und Waldbrandgefahr identifiziert und analysiert. In Anhang B werden alle abgeleiteten Klimagrößen vorgestellt.

Wie schon im AP 2 erfolgen die Berechnungen bei den abgeleiteten Größen in Form von Trends, mit Vertrauensbereichen und Signifikanzangaben sowie als Mittelwerte für verschiedene 30-jährige Perioden.

1.5.4 Extreme Witterungsereignisse (AP 4)

Bei diesem Arbeitspaket geht es um weitere vergleichende Analysen von schwellenwertbezogenen Ereignissen. Auch werden Perzentilstufen ermittelt und mit ihnen Analysen von verschiedenen „Graden der Extremität“ durchgeführt. Einige Betrachtungen von AP 4 haben Anknüpfungen an Analysen im AP 3.

Darüber hinaus werden extremwertstatistische Untersuchungen für Starkregenereignisse mit wasserwirtschaftlicher Bedeutung durchgeführt.

Das DWA-Arbeitsblatt A 531 „Starkregen in Abhängigkeit von Wiederkehrzeit und Dauer“ stellt einen für Deutschland einheitlichen methodischen Rahmen für die Durchführung von Starkregenanalysen dar. Die Methodik zur Ermittlung der Statistik nutzt die Regenhöhen der Niederschlagsereignisse über partielle Serien festgelegter Dauerstufen. Daraus wird, mit Hilfe der im Vorhaben eingesetzten Software AquaZIS, eine Niederschlagsstatistik mit einem

Ausgleich (Glättung) über die Dauerstufen und Wiederkehrzeiten berechnet. Zudem erfolgt die Ermittlung der maßgebenden Regenhöhen durch gleitende Fenster auf Basis von 1-Minuten-Zeitschritten für die Dauerstufen $D < 1$ Tag.

1.5.5 Aufbereitung von Stundendaten (AP 5)

Viele Messreihen liegen in Form von täglichen Daten vor. Die Untersuchungen in AP 2, AP 3 und Teilen von AP 4 nutzen diese Datenart – bisweilen in weiter aggregierter Form für Trendanalysen, z.B. als Monats- oder Jahreswerte. Eine Teilmenge der Stationen misst Daten in stündlicher Auflösung. Zu ihrer Auswertung ist anzumerken, dass Qualitätskontrollen bei Stundenwerten, zum Beispiel bezüglich der Ausreißer, deutlich komplexer als bei Tageswerten sind. Stundenwerte können verwendet werden, um beispielsweise genauere Informationen zum wahren Tagesminimum und -maximum der Temperatur zu erhalten; sie sind oftmals den in den Tagesdaten angegebenen Werten überlegen.

Ein wichtiger Nutzungszweck von hinreichend langen Stundenwertzeitreihen im Rahmen des Vorhabens ist, zu untersuchen, ob es in den vergangenen Jahrzehnten sichtbare Veränderungen im Tagesgang gegeben hat.

1.5.6 Auswertung agrarmeteorologischer Daten (AP 6)

An einigen Stationen sind spezielle, für die Landwirtschaft relevante Größen verfügbar. Dazu zählen Parameter der Bodenfeuchte sowie die Anzahl der Stunden mit einer relativen Feuchte über 90 %. Für diese werden Trenduntersuchungen sowie Vertrauensbereiche der Trendgerade und Trendsignifikanzangaben ermittelt. Es ist anzumerken, dass hiermit einige abgeleitete Größen ergänzt werden können, die in AP 3 analysiert werden, wie z.B. die Vegetationsperioden, Kältesummen, Ereignistage oder Verdunstungsgrößen.

Bei sich abzeichnenden Trendentwicklungen wird ein Fokus auf die Belastbarkeit und die Aussagekraft des Vertrauensbereichs gelegt, was wichtig für Entscheidungsträger aber auch für die Kommunikation von Trendentwicklungen allgemein ist.

1.5.7 Auswertung phänologischer Daten (AP 7)

Die Entwicklungsphasen des Pflanzenwachstums werden in der gemäßigten Zone wesentlich durch die Temperatur bestimmt (MENZEL, 2002; CHMIELEWSKI, 2007). Im Rahmen der Studie für Sachsen-Anhalt gilt es, insbesondere vorhandene Studien zu aktualisieren und mit Blick auf den Zeitraum 1951–2014 Hinweise auf Änderungen der phänologischen Phasen in Sachsen-Anhalt nachzugehen.

Des Weiteren wird in diesem AP untersucht, welche Zusammenhänge zwischen den phänologischen Phasen und den in AP 2 und 3 analysierten meteorologischen Größen Temperatur, Niederschlag, Verdunstung, Trockenperioden und der Zahl der heißen Tage besteht.

Außerdem erfolgt eine Analyse der Zusammenhänge von phänologischen Phasen mit der großräumigen Zirkulation im atlantisch-europäischen Sektor.

1.6 Bezug zu anderen Studien

Die Studie *Klimaanalyse Sachsen-Anhalt 1951–2014* ist sowohl in der Kontinuität mit vorausgegangenen Studien zu sehen, als auch im Kontext mit Studien ähnlicher Zielstellung in anderen Bundesländern. In einigen Fällen umfassen diese Studien eine Betrachtung des Klimas der vergangenen Dekaden, fokussieren aber auf projizierte zukünftige Klimaänderungen.

Trendanalysen für das Klima der Gegenwart in Deutschland sind etwa seit den 1990er Jahren durchgeführt worden, als die Menge und Länge der verfügbaren Zeitreihen erste derartige Untersuchungen zuließ. Hier sind die Studien [RAPP und SCHÖNWIESE \(1995\)](#) sowie [RAPP \(2000\)](#) zu nennen. Zudem erschienen nach 2000 europaweite Klima-Statusberichte der European Environment Agency (EEA), in denen umfassend Klimaindikatoren genutzt wurden ([EEA, 2004, 2008](#)).

Für das Bundesland Sachsen-Anhalt erfolgte eine Analyse von Klimaänderungen bis 2006 in [BERNHOFER et al. \(2008\)](#) – es entstand u.a. auch die Klimadatenbank Sachsen-Anhalt ([BERNHOFER et al., 2007](#), vgl.) und das Klimainformationssystem REKIS – während in [LAU \(2008\)](#) der Fokus stärker auf der Zukunft als auf den rezenten Klimaänderungen lag. Eine weitere umfassende Studie mit Teil-Schwerpunkten Klimadiagnose, Klimaprojektionen, Klimafolgen, Extreme, Wasser und Naturschutz wurde 2012 vorgelegt ([KREIENKAMP et al., 2012](#)). Mit den vegetationsbezogenen Auswirkungen von Klimaänderungen in der jüngeren Vergangenheit in der Region um Sachsen-Anhalt befassen sich die Studien von [FRANKE und KÖSTNER \(2007\)](#), [KOLODZIEJ \(2007\)](#), [KOLODZIEJ und FRÜHAUF \(2008\)](#) sowie [SCHEFFLER und FRÜHAUF \(2011\)](#). Die dort entstandenen Ergebnisse sollen im Rahmen des Vorhabens *Klimaanalyse in Sachsen-Anhalt 1951–2014* ergänzt und fortgeschrieben werden. Ein wichtiger Bezug ist auch die vom PIK Potsdam erstellte Vulnerabilitätsstudie für Sachsen-Anhalt ([KROPP et al., 2009b](#)), in deren Mittelpunkt die Identifikation von Klimasensitivitäten, risikoreichen Regionen und gefährdeten Sektoren stand. Vergleichbare, als Informationsquelle relevante Studien sind [ZEBISCH et al. \(2005\)](#), [KROPP et al. \(2006\)](#) und [KROPP et al. \(2009a\)](#).

Wesentliche Bezüge zum Vorhaben *Klimaanalyse in Sachsen-Anhalt 1951–2014* sind außerdem Regions- bzw. Bundesländer-spezifische Studien wie [BERNHOFER und GOLDBERG \(2001\)](#), [BERNHOFER et al. \(2003, 2005a,b\)](#), [CHMIELEWSKI et al. \(2004\)](#), [BECKER et al. \(2004\)](#), [FRANKE et al. \(2006\)](#), [BERNHOFER und GOLDBERG \[HRSG.\] \(2008\)](#) und [FRANKE \(2010\)](#).

2 Datenquellen

2.1 Vorbemerkungen

Eine Besonderheit dieses Vorhabens ist, dass eine Vielzahl von Datenquellen betrachtet wird. Diese ergänzen einander zum Teil bezüglich der räumlichen Verteilung, der verfügbaren Reihenlängen, aber zum Teil auch inhaltlich. Die Datenquellen werden in den folgenden Unterabschnitten vorgestellt. Für einige Aspekte des Vorhabens sind tägliche und für weitere Aspekte stündliche zeitliche Auflösungen relevant. Wichtig sind dabei diese Eigenschaften:

- eine möglichst hohe Datenqualität;
- eine möglichst hohe Stationsdichte und
- die Verfügbarkeit der Daten für einen möglichst langen Zeitraum.

Der im Vorhaben angestrebte Analysezeitraum ist 1951 bis 2014. Dies ist in Abhängigkeit von der Datenquelle zu relativieren, da aus einigen Quellen Daten nur für kürzere Zeiträume vorliegen.

2.1.1 Klimadaten in täglicher Auflösung

Die benutzten Daten stammen aus Messungen an Klima- bzw. Niederschlagsstationen. Ihre Bezugsquelle ist der Bestand des Climate Data Service des Deutschen Wetterdienstes (GDS-CDC Portal). Im Einzelfall kamen Stationsdatensätze hinzu, die vom DWD zur Verfügung gestellt wurden. Für eine Teilmenge der Stationen ist die Länge der Reihen geringer als 1951–2014.

2.1.2 Klimadaten in stündlicher Auflösung

Die benutzten Daten stammen aus Messungen an Klimastationen, sowohl vom CDC-GDS Portal des DWD sowie einzelne Ergänzungen, wie z.B. bei den zum Teil noch höher aufgelösten Niederschlagsdaten (vgl. Abschnitt [2.1.8](#)), aus anderen DWD-Datenbeständen. In der Regel sind nicht alle meteorologischen Elemente in stündlicher Auflösung verfügbar, aber zum Kernbestand gehören Temperatur und relative Feuchte. Für eine Teilmenge der Stationen, unterschiedlich je nach Parameter, ist die Länge der Reihen geringer als 1951–2014. Minimalkriterium für die Berechnung von Trends ist, dass die Reihen vor 1980 beginnen und nach 2010 aufhören.

2.1.3 Stationsdaten aus der so genannten agrarmeteorologischen Datenbank

Die benutzten Daten stammen aus Messungen an einer Auswahl von Stationen. Sie sind aus zwei Gründen relevant für das Vorhaben: (i) Es wurde ein hoher Aufwand betrieben, um die Daten möglichst lückenfrei zur Verfügung stellen zu können; (ii) die Datenreihen umfassen neben dem Standardbestand an meteorologischen Elementen einige spezifische gemessene Größen. Die Bezugsquelle ist der DWD, Agrarmeteorologie Leipzig.

Es ist anzumerken, dass nach Böttcher (pers. Komm.) diese Daten auf Stundenbasis erhoben wurden. Wegen der Forderung der Lückenlosigkeit erfolgten aber einige Ergänzungen oder es wurden Tagesverläufe auf Grund von idealisierten Tagesgangannahmen konstruiert. Es sei hinzugefügt, dass Daten in täglicher Auflösung von den Betreibern des Datensatzes als belastbar und für Trenduntersuchungen geeignet eingeschätzt werden. Einige Stationen können als Erweiterung der in Abschnitt 2.1.1 erwähnten Stationsreihen eingesetzt werden. Allerdings liegen die Daten aus dieser Quelle lediglich für den Zeitraum 1961–2014 vor.

2.1.4 Phänologische Daten

Diese Daten liegen in der Regel als phänologisch-biologische Kenngrößen in jährlicher Auflösung vor.

Für die Auswertungen im Vorhaben werden folgende Datenquellen verwendet:

- Datenbestand aus der Datenbank von Sachsen-Anhalt (MIRAKEL) bis 2011 (Datenlieferung im Oktober 2014)
- Der Jahremelder frei verfügbarer Daten über das CDC-GDS Portal
- Der Sofortmelder frei verfügbarer Daten über das CDC-GDS Portal

Der Datenbestand aus Sachsen-Anhalt wird als Datenbasis verwendet. Die Daten, die über das CDC-GDS Portal verfügbar sind, unterteilen sich in Daten aus dem Jahremelder und Daten aus dem Sofortmelder.

Zur Erläuterung: Im Jahremelder wird während der gesamten Vegetationsperiode und Jahr für Jahr an einem Objekt (Baum oder Strauch) bzw. einem Standort beobachtet. Die Jahremelder-Daten sind für den Zeitraum ab 1951 archiviert. Im Sofortmelderprogramm wird an der Gesamtheit der Pflanzen im Beobachtungsgebiet und nicht nur an einem Objekt beobachtet. Gemeldet wird hier das früheste Auftreten einer Phase im Beobachtungsgebiet. Der Datenbestand des Sofortmelders beginnt erst ab 1991 und ist im CDC-GDS Portal nur für ausgewählte Phasen verfügbar (siehe Abschnitt 4.7). Diese Daten dienen vor allem dazu, bei eventuellen Unstimmigkeiten zwischen den anderen beiden Datenbeständen Klarheit zu verschaffen und fehlende Daten zu ergänzen,

vor allem für die Jahre 2013/2014. Da sich die Daten aus dem Jahresmelder und dem Sofortmelder zum Teil unterscheiden, wurden, wenn vorhanden, die Daten aus dem Jahresmelder bevorzugt, da diese als langjähriger Standarddatensatz als repräsentativer angesehen werden und eine gute Übereinstimmung mit den Daten aus der Datenlieferung von Sachsen-Anhalt zeigen. Ob das Verwenden des Sofortmelders einen möglichen Einfluss auf Trends haben könnte, wird im weiteren Verlauf des Projektes untersucht und berücksichtigt.

Die Daten aus den verschiedenen Datenquellen wurden für die weitere Bearbeitung entsprechend umformatiert und am Ende zu einem Datensatz zusammengeführt. Da es für die verschiedenen Stationen zum Teil unterschiedliche Beobachtungspunkte gibt (Phäno-Kennung), die aber im CDC-GDS Portal nicht mitgeführt werden, werden alle Phäno-Kennungen mit der dazugehörigen Stations-Kennung zusammengeführt.

Die Auswahl der Stationen sowie deren räumliche Verteilung ist im Abschnitt [C.3.2](#) dargestellt.

2.1.5 Reanalysedaten

Ein Aspekt der Untersuchung der phänologischen Daten (s. Abschnitt [2.1.4](#)) ist die Identifikation möglicher Zusammenhänge mit Veränderungen in der großräumigen Zirkulation im atlantisch-europäischen Sektor. Basisdaten dafür sind Reanalysen, eine in sich konsistente Aufbereitung von Klimadaten aus der freien Atmosphäre. Aus diesen werden Zirkulationsindizes, wie der North Atlantic Oscillation Index (NAO) gewonnen. Bezugsquelle für die Reanalysen und den NAO ist die Datenbank von NOAA-NCAR.

2.1.6 Meteorologische Messdaten an den Stationen des Luftüberwachungssystems Sachsen-Anhalt (LÜSA)

Die Bezugsquelle für diese Daten ist das Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt. Sie besitzen zwei Besonderheiten: (i) Die zeitliche Auflösung ist mit halbstündlich/täglich, relativ hoch; (ii) die Messorte ergänzen den Bestand der anderen Klimadaten, denn Luftgütemessnetze haben eine andere Standortpriorisierung als Klimamessnetze.

Im Bereich von Sachsen-Anhalt und Umgebung sind Daten von rund 10 Stationen verfügbar. Es ist hinzuzufügen, dass diese Daten nur einen relativ kurzen Zeitraum umfassen – maximal 1990–2014 – was ihre Eignung für Trenduntersuchungen stark einschränkt. Die LÜSA-Daten sind als zeitnahe Information für den operationellen Betrieb konzipiert. Nach Ehrlich (pers. Komm.) gibt es bezüglich der meteorologischen Daten des LÜSA-Messnetzes eine einfache Plausibilitätsprüfung und weitere Qualitätskontrollen sind erforderlich. Einige Auswertungen mit LÜSA-Daten finden sich in Abschnitt [4.2.8](#).

2.1.7 Historische Zeitreihen

Die Bezugsquelle für diese Daten ist der Deutsche Wetterdienst. Im Rahmen des Projektes KLIDADIGI werden beim DWD Aufzeichnungen von Stationen digitalisiert. In Zusammenarbeit mit Herrn Mächel (pers. Komm.) sind in der KLIDADIGI-Datenbank rund 15 Stationen aus dem Bereich Sachsen-Anhalt identifiziert worden. Davon enthalten zwei Stationen (Brocken und Magdeburg) keine größeren Lücken oder mögliche verlagerungsbedingte Brüche. Für die Analysen relevant sind auch die Stationen Helmstedt (endet 2006), Braunschweig (verlagert 1961), Weisen/Seehausen (verlagert 1976) und Wolfsburg (verlagert 1981). Bei anderen Stationsreihen gibt es im KLIDADIGI-Bestand zum Teil mehrjährige Lücken.

2.1.8 Lange Niederschlagsreihen in hoher Auflösung aus dem Projekt KOSTRA

Im Rahmen des Projektes KOSTRA wurden beim DWD Niederschlagsaufzeichnungen von Stationen in 5-Minuten-Werten digitalisiert. Hier konnten durch Frau Dr. Malitz (DWD-Hydrometeorologie, Berlin-Buch) die Daten von 8 Stationen für einen erweiterten Bereich von Sachsen-Anhalt bereitgestellt werden. Sie werden insbesondere für die Extremwert-bezogenen Auswertungen in AP 4 (vgl. Abschnitt 1.5.4) verwendet.

2.1.9 Wind-korrigierte Niederschlagsdaten

Einige Nutzer aus dem Bereich der Wasserwirtschaft benötigen für ihre Haushalts- und Wirkmodelle Niederschlagsdaten, bei denen der geräte- und aufstellungsbedingte systematische Fehler konventioneller Niederschlagsmessungen korrigiert wurde. Dazu kommen Verfahren zum Einsatz, die in [RICHTER \(1995\)](#) dargestellt sind. Die so genannten Richter-korrigierten Niederschlagsdaten können aus der REKIS-Datenbank bezogen werden.

Anmerkung: Für Trenduntersuchungen ist es nicht notwendig, die korrigierten Niederschlagsdaten zu verwenden, da die Korrektur keine Zeitabhängigkeit besitzt.

2.2 Spezifika und Nutzbarkeit der Datenquellen

In diesem Vorhaben besteht der ambitionierte Anspruch, möglichst zahlreiche, lange und vollständige Datenreihen auf Anzeichen des Klimawandels hin zu untersuchen. Dabei ist zu beachten und anzuerkennen, dass Messdaten mit unterschiedlichen Anspruchshaltungen erfasst und archiviert werden.

- Im *operationellen Betrieb* ist es oftmals notwendig, einen Überblick des Geschehens zu erlangen. Leitwarten, beispielsweise von Kraftwerken,

Flugsicherheit oder Hochwasserzentralen benötigen aktuelle Werte – die Zeitnähe besitzt Priorität. Ob in ihnen einzelne Messgeber ausfallen oder auch einzelne Fehlmessungen auftreten können, ist, je nach Nutzungsprofil der Information, nachrangig. Die Erlangung eines Archivs mit gegebenenfalls ergänzten und korrigierten Werten ist dabei nicht das primäre Ziel und die dafür notwendigen Maßnahmen sind aus wirtschaftlichen Gründen auch oft nicht ausführbar.

- Im *dokumentierenden Betrieb* werden oftmals Daten mit stärker qualitätsorientierten Vorgaben erhoben. Priorität haben Faktoren wie maximale Stationsdichte, zeitliche Vollständigkeit der Messungen oder Korrektur von Messfehlern, das heißt, die Zeitnähe der Verfügbarkeit ist nachrangig. Daten dieser Herkunft sind per se für Analysen dieses Vorhabens hervorragend geeignet.

Es bleibt nicht aus, dass in diesem Vorhaben Daten beider Arten zu analysieren sind. Dafür sind mitunter weitere Qualitätskontroll-Maßnahmen notwendig. **Wichtig ist, dass die im Vorhaben durchgeführten Qualitätskontrollen keine eigenen Ergänzungen/Korrekturen/Homogenisierungen nach sich ziehen – das würde den Umfang des Vorhabens sprengen. Die Tests führen jedoch dazu, dass Zeitreihen ggfs. nicht oder nur für einen Teil der Untersuchungen verwendet werden.** Wie viele Datenreihen auf diese Weise ausscheiden, ist von Quelle zu Quelle unterschiedlich und hängt stark von den o.g. „Betriebsphilosophien“ ab.

In der ersten Vorhabensphase stellte sich heraus, dass die im Vorfeld eingeschätzte Datensituation einiger Revisionen bedurfte. So gibt es beispielsweise in einigen Fällen Diskrepanzen bezüglich der verfügbaren Reihenlängen zwischen den Metadaten im CDC-GDS Portal des DWD und den tatsächlich in der Datenbank verfügbaren Messreihen. In der Folge gestaltete sich die Datenakquise aufwändiger als erwartet, denn es waren Alternativ-Datenquellen und bisweilen auch alternative oder zusätzliche Stationen zu identifizieren. Vielfach wurde dabei die Datenverfügbarkeit im Vorhaben neu erhoben, beispielsweise, um Lücken zu dokumentieren.

Ein Abgleich mit dem Datenbestand in der DWD-internen Datenbank MIRAKEL ergab, mit Blick auf möglichst lange lückenlose Beobachtungsreihen, die Notwendigkeit von Nachlieferungen und zeitlichen Ergänzungen. Im Zuge dieser Zusatzakquise wurden rund 35 Datenreihen – eine recht geringe Menge bei mehreren hundert Stationsreihen – hinzugefügt bzw. ergänzt.

Für zahlreiche Klima-Stationsreihen wurde eine mehrstufige Vollständigkeits-/Nutzbarkeitsanalyse vorgenommen.

2.2.1 Stufe 1: Minimalanforderungen bezüglich Länge der Klimadatenreihen und Lücken in den Klimadatenreihen

Ein erster Kriterienkatalog wurde erstellt. Er umfasst folgende Anforderungen, die zur Tauglichkeits-Einstufung zum Einsatz kamen:

- Es müssen für die verschiedenen Analysen mindestens folgende zusammenhängende Zeiträume vorhanden sein:
 - 20 Jahre: Datenprüfung, Klimaindikatoren, Extremstatistik
 - 30 Jahre: Trends (außer Niederschlag)
 - 50 Jahre: Trends (Niederschlag)
- Datenlücken dürfen höchstens an 3 % der untersuchten Termine auftreten.

2.2.2 Stufe 2: Qualitätskontrolle der gemessenen Werte

Im Vorhaben wurden die zentralen meteorologischen Parameter mit dem Softwarepaket NIKLAS geprüft. Es ist ausführlich in Anhang C beschrieben.

2.2.3 Stufe 3: Zusätzliche Vollständigkeitskriterien bei der Aggregation von Tages- zu Monatswerten

Vielfach, insbesondere bei den abgeleiteten meteorologischen Größen, werden Tageswerte zu Monatsmitteln oder Monatssummen aggregiert. Im Idealfall sind alle Tage eines Monats vorhanden – ein aggregierter Wert kann aber auch hinreichend repräsentativ sein, wenn bis zu 2 Tage fehlen. In Anbetracht der konkreten Datenlage und wenn sich der Nutzer der Einschränkungen bewusst ist, kann ein Monatswert auch zur Analyse verwendet werden, wenn bis zu 5 Tage fehlen, in einigen Fällen kann dann z.B. ein Mittel oder ein Trend über einen langen Zeitraum noch „gerettet“ werden. Tatsache ist aber, dass durch die Stufe 3 einige Datenreihen, die die Längen- und Lückenkriterien der Stufe 1 erfüllen, doch von den Analysen ausgeschlossen werden müssen.

3 Eingesetzte Methodik

3.1 Zusammenhang zwischen Datenverfügbarkeit und Vielfalt der Ergebnisse

Die im Grunde willkommene Vielfalt der Datenquellen – und der daraus gewonnenen Ergebnisse – kann sowohl Fluch als auch Segen sein. Scheinbar am gleichen Ort erhobene Daten können systematische, quellenimmanente Abweichungen voneinander aufweisen. Daten einer atmosphärischen Variablen, die im Stundentakt erhoben werden, können sich von denjenigen unterscheiden, die im Tagestakt erhoben werden.

Das postulierte gleichförmige Ändern einer atmosphärischen Variablen an einem Ort kann zudem durch Verlagerung der Station oder Änderungen im natürlichen oder bebauten Umfeld der Station beeinflusst werden. Hierzu ist das Betrachten von Hintergrundinformationen, wie sie in den Metadaten zu einer Station existieren, unerlässlich. Es wäre allerdings zu optimistisch, zu erwarten, dass *alle* Inhomogenitäten der Stationsreihen durch die Metadaten erklärbar sind.

3.2 Meteorologische Standardgrößen und ihre Messung oder Berechnung

Im Vorhaben werden statistische Untersuchungen für eine Reihe von Klimagrößen durchgeführt (s. Aufstellung in Abschnitt 1.5.2). Diese stammen aus unterschiedlichen Quellen, die in Abschnitt 2.1 vorgestellt wurden. In der Regel werden sie von Messnetzen in täglicher oder stündlicher Auflösung erfasst. Einige Standardgrößen können durch Aufbereitung der Daten gewonnen werden, wie z.B. die Mittel-, Maximum- und Minimumtemperatur, die aus stündlichen Registrierungen bestimmbar sind oder in Form von täglichen Werten vorliegen. Die Mitteltemperatur ist dabei nur scheinbar eine „schlichte“, stabil und einfach zu bestimmende Größe. JUNGE (1989) weist auf die Problematik hin, die in der Berechnung der Tagesmitteltemperatur bei Verwendung einer unterschiedlichen Zahl von Meldeterminen steckt. Dies führt auch an Stationen, deren Zeitreihen unter gleichem Stationsnamen verfügbar sind, zu nicht deckungsgleichen Reihen.

3.3 Klimaindikatoren, abgeleitete Parameter und ihre Berechnung

Mit meteorologischen Standardgrößen (s.o.) lässt sich der Zustand der Atmosphäre und dessen Änderungen bereits vielfältig beschreiben. Ein weites Feld an zusätzlicher Information kann durch die Berechnung von abgeleiteten Klimaindikatoren erschlossen werden. Einige dieser Indikatoren sind mit Über- oder Unterschreitung von Schwellenwerten oder Quantilen verbunden, andere kombinieren mehrere Standardgrößen. Im Vorhaben werden Indikatoren verwendet, die in Anlehnung an ähnliche Studien in anderen Bundesländern Anwendung fanden und die auch von der WMO (KLEIN TANK et al., 2009) und anderen internationalen Quellen¹⁾ empfohlen werden.

Für das Vorhaben wurde eine Vielzahl von Indikatoren ausgewählt; die Abkürzungen der verwendeten Messgrößen finden sich in der Aufstellung in Abschnitt 1.5.2 und die im Vorhaben berechneten Indikatoren werden in Anhang B vorgestellt.

3.4 Trends und die Beurteilung ihrer Signifikanz

Sowohl für die meteorologischen Standardgrößen als auch die Klimaindikatoren wurden – wo es sinnvoll ist und wo hinreichend lange Reihen vorlagen – lineare Trends nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Die Trendstärke wurde auf drei Wegen eingeschätzt:

- Bestimmung des Korrelationskoeffizienten r aus unabhängiger (Zeit) und abhängiger (Messgröße) Variablen. Mit Hilfe des Korrelationskoeffizienten kann die Stärke des Zusammenhangs quantifiziert werden. Weitere Betrachtungen zur Korrelationen und deren Signifikanz finden sich in Anhang D.1.
- Bestimmung des Konfidenzintervalls für die Trendgerade und die Werte, aus denen die Trendgerade bestimmt wird. Ersteres zeigt einen „Aufenthaltsraum“ an, in dem sich – mit a priori wählbarer Irrtumswahrscheinlichkeit – die Trendgerade aufhalten kann. Zweiteres ist ein Hinweis darauf, welche Werte als „Ausreißer-Kandidaten“ eingestuft werden können. Detaillierte Betrachtungen zu diesen Konfidenzintervallen finden sich in Anhang D.2.
- Nutzung des Mann-Kendall-Signifikanztests. Mit ihm können aus qualitativer Information (Wert A ist größer oder kleiner oder gleich Wert B) Aussagen zur Stärke eines Trends gewonnen werden. Im Gegensatz zu den

¹⁾Zu finden unter <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php> oder <http://etccdi.pacificclimate.org>

beiden anderen Tests ist der Mann-Kendall-Test nicht von Grundannahmen einer statistischen Verteilung für die untersuchten Werte abhängig. Weitere Ausführungen dazu finden sich in Anhang [D.3](#).

Im Zusammenhang mit phänologischen Untersuchungen wurde auch Zusammenhänge zwischen dem Eintritt phänologischer Phasen und der Temperatur, der Höhe über Normalnull, der klimatischen Wasserbilanz und der großräumigen Zirkulation analysiert (s. Abschnitt [4.7.5](#)). Die statistischen Grundlagen für die Korrelationsuntersuchungen werden in Abschnitt [4.7.1](#) dargestellt.

4 Ergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein großer Umfang an Daten, Auswertungen und grafischen Darstellungen erarbeitet. In diesem Abschnitt werden wichtige Ergebnisse im Kontext der Arbeitspakete (AP) des Vorhabens vorgestellt. Weitere Ergebnisse und Beschreibungen finden sich im Anhang sowie im Daten- und Kartenwerk, das an den Auftraggeber übergeben wurde.

4.1 Potenzieller und tatsächlicher Datenbestand – AP 1

In diesem Abschnitt werden wichtige Fakten zu den Prüfverfahren und den Auswirkungen der Prüfung für verschiedene Datenbestände des Vorhabens kurz vorgestellt. Weiteres ist in Anhang C zu finden.

4.1.1 Klimaparameter

Die Stationsbestände lagen zu Beginn des Vorhabens in einer „Basisversion“ vor. Schon nach der ersten Sichtung im Zuge der Arbeiten von AP 1 sowie nach Durchlauf einer ersten Vollständigkeitsprüfung stellte sich die Notwendigkeit von Ergänzungen heraus, um im gesamten Untersuchungsgebiet eine akzeptable Stationsdichte zu erhalten. Dabei wurden sowohl Stationen aus weiteren Quellen des DWD eingebracht als auch das Bezugsgebiet, wo es sinnvoll erschien, erweitert. Insbesondere das südliche Mecklenburg-Vorpommern und das nordwestliche Brandenburg besitzen ähnliche Landschaftstypen nebst klimatischen Bedingungen, die diese Maßnahme rechtfertigen. Im Süden und Westen Sachsen-Anhalts hingegen ist wegen der dort stärker gegliederten Landschaft und des teilweise ausgeprägten Mittelgebirgscharakters der Bereich für die hinzugenommenen Stationen enger gefasst.

Bei den Niederschlagsstationen wurde (i) wegen der hohen räumlichen Variabilität des Niederschlags und der somit geringeren Repräsentativität weiter entfernt liegender Stationen, aber auch (ii) wegen der im Grunde recht hohen Stationsdichte nur der 30 km-Bereich um Sachsen-Anhalt herum zur Erweiterung des Stationsbestands hinzugezogen.

Die Prüfung der Temperaturdaten und anderer Klimaparameter wurde folgendermaßen durchgeführt:

1. Auswahl der Daten (bei mehreren möglichen Datenreihen, z.B. aus dem GDS und dem agrarmeteorologischen Datensatz)
2. Ggfs. Kombination von mehreren Reihen bei Lücken (s. Anhang C)

3. Elimination der Stationen mit zu kurzen Reihen (zu kurze Dauer oder Ende vor 2000)
4. Prüfung des Parameters mit der Qualitätskontroll-Software NIKLAS
5. Elimination von Reihen mit zu großen Lückenzeiträumen (Lücken zu Beginn und am Ende, die trotzdem eine Reihe von mindestens 30 Jahren Länge mit max. 3 % Fehlwerte ergaben, wurden in dieser Phase toleriert)
6. Iteration der Prüfung, um sicher zu gehen, dass nach der Anwendung von NIKLAS beispielsweise die Kriterien hinsichtlich der Datenlücken noch erfüllt sind und Reihen als nutzbar gekennzeichnet bleiben.

Die zugehörigen Tabellen mit den Einzelheiten der Prüfergebnisse finden sich in Anhang C.

Für die einzelnen Parameter gab es durch diese Prüfung eine teilweise erhebliche Reduktion an verfügbaren Datenreihen (s. Abb. 4.1), die sich auch auf die räumliche Dichte der verfügbaren Stationsdaten auswirken. In welcher räumlichen Dichte Stationsdaten zur Analyse an die AP 2 und 3 übergeben werden konnten, ist für die Klimastationen in Abb. 4.2 und für die Niederschlagsstationen in Abb. 4.3 dargestellt.

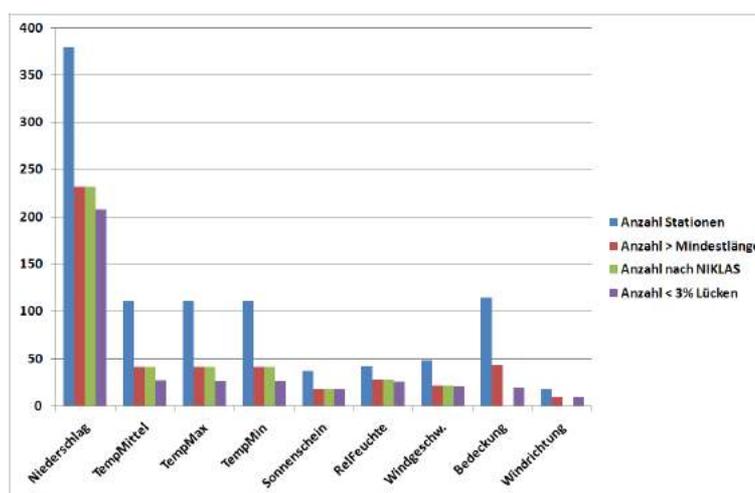


Abbildung 4.1: Prüfergebnis der untersuchten Parameter (Tageswerte, außer bei Windrichtung).

Als kleiner Vorgriff auf die Erkenntnisse aus AP 2 und 3 sei an dieser Stelle hinzugefügt, dass, insbesondere bei der Bestimmung von Trends, weitere Einschränkungen zu Tage traten. Wenn 3 % der Daten fehlen dürfen, so kann dies in Form von einzelnen Ausfällen sein, aber auch in Form eines Ausfalls längerer Episoden mit mehreren Tagen oder Wochen Andauer. Dies hat vielfach einen erheblichen Einfluss auf die Möglichkeiten, Trends zu bestimmen.

Der DWD verfügt über einen Datenbestand, der für agrarmeteorologische Nutzung mit hohem Aufwand lückengefüllt ist (s.a. Abschnitt 2.1.3).

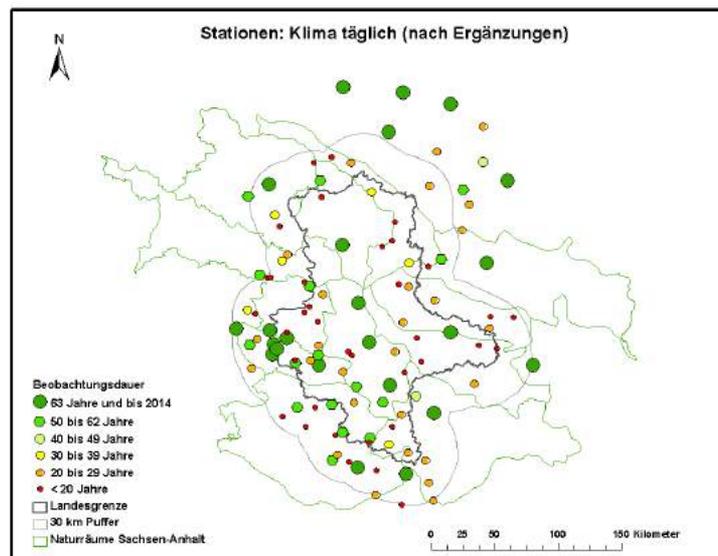


Abbildung 4.2: Lage der Stationen mit Messungen von mehreren Klimaparametern. Die farbigen Symbole geben Auskunft über die vorliegenden Reihenlängen. Eingezeichnet sind zudem die Grenze Sachsen-Anhalts, ein 30 km großer Bereich um Sachsen-Anhalt herum (Puffer) und die Naturräume Sachsen-Anhalts.

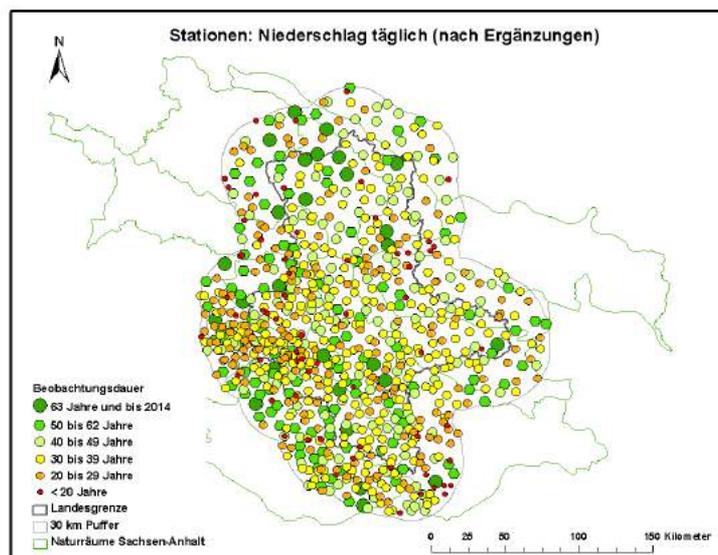


Abbildung 4.3: Lage der Stationen mit Niederschlagsmessung. Die farbigen Symbole geben Auskunft über die vorliegenden Reihenlängen. Eingezeichnet sind zudem die Grenze Sachsen-Anhalts, ein 30 km großer Bereich um Sachsen-Anhalt herum (Puffer) und die Naturräume Sachsen-Anhalts.

Für eine Vielzahl der Untersuchungen dieses Vorhabens, insbesondere bei den abgeleiteten Größen, wurde diese Untermenge der Stationsreihen eingesetzt. Damit ging einher, dass die Trends aus einem leicht verkürzten Zeitraum (1961–2014) bestimmbar waren. Die Lage der lückengefüllten Stationen aus dem agrarmeteorologischen Bestand ist in Abb. 4.4 dargestellt.



Abbildung 4.4: Lage der Stationen mit besonders hoher Vollständigkeit aus dem Bestand der DWD-Agrarmeteorologie. Alle Stationen haben eine Länge von 1961–2014, mit Ausnahme von Seehausen (1976–2014). Eingezeichnet sind zudem die Grenze Sachsen-Anhalts, ein 30 km großer Bereich um Sachsen-Anhalt herum (Puffer) und die Naturräume Sachsen-Anhalts.

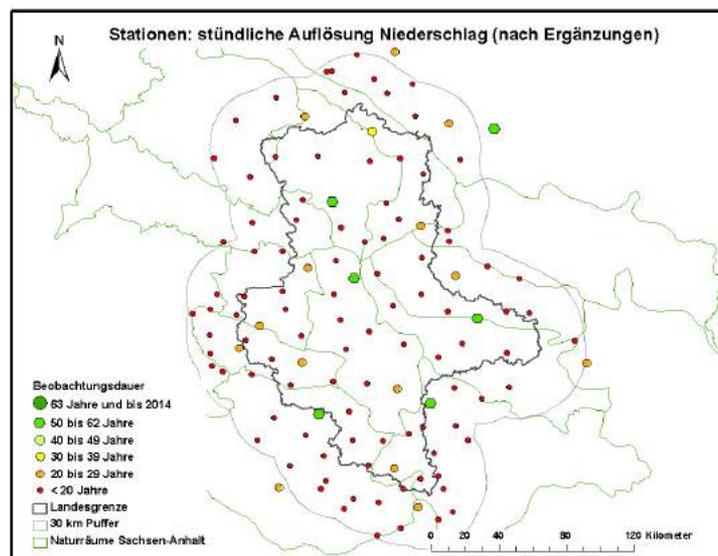


Abbildung 4.5: Lage der Niederschlagsstationen mit stündlicher Auflösung. Die farbigen Symbole geben Auskunft über die vorliegenden Reihenlängen. Eingezeichnet sind zudem die Grenze Sachsen-Anhalts, ein 30 km großer Bereich um Sachsen-Anhalt herum (Puffer) und die Naturräume Sachsen-Anhalts.

Einige Aspekte des Vorhabens nutzen Stundendaten. Hier ist das gleichzeitige Zutreffen der Kriterien (i) lange Zeitreihe und (ii) viele gemessene Parameter relativ selten. Angaben zu Lage und Länge der nutzbaren Stationszeitreihen sind für stündliche Niederschlagsdaten in Abb. 4.5 dargestellt. Bei anderen Kli-

maparametern (Temperatur, Feuchte, Wind etc.) ist die Zahl der für die Ziele des Vorhabens nutzbaren Stationsreihen noch kleiner.

4.1.2 Phänologische Parameter

Alle Daten, die für nicht plausibel erachtet wurden, wurden aus den Analysen ausgeschlossen. Eine vollständige Dokumentation der Datenprüfung ist auf der Daten-DVD des Vorhabens enthalten. Tab. 4.1 gibt einen Überblick über den Datenbestand nach der Prüfung.

Tabelle 4.1: Datenvolumen für die Analyse phänologischer Phasen vor und nach der Vollständigkeitsprüfung und der Qualitätskontrolle.

<i>Phänologische Phase</i>	<i>Vor Prüfung</i>	<i>Nach Prüfung</i>	<i>Datenverlust [%]</i>
<i>Schneeglöckchen</i>	18523	18224	1,6
<i>Sal-Weide</i>	16133	15887	3,5
<i>Löwenzahn</i>	17834	17631	1,1
<i>Stieleiche Blattentfaltung</i>	12721	12564	1,2
<i>Holunder Blüte</i>	16930	16571	2,1
<i>Sommer-Linde</i>	15157	14816	2,3
<i>Heidekraut</i>	10097	9809	2,9
<i>Holunder Fruchtreife</i>	16475	16014	2,7
<i>Stieleiche Fruchtreife</i>	11446	11096	3,0
<i>Stieleiche Blattverfärbung</i>	13290	12967	2,4
<i>Stieleiche Blattfall</i>	4651	4489	3,5

Einzelheiten zu den Verfahrensschritten der Prüfung mit Beispielen finden sich in Anhang C.3.

4.2 Klima-Entwicklungen anhand von meteorologischen Standardgrößen – AP 2

In diesem Abschnitt werden einige Trendentwicklungen exemplarisch vorgestellt. Eine umfangreiche Sammlung von Trendinformationen liegt beim Auftraggeber auf Datenträger vor.

4.2.1 Lufttemperatur

4.2.1.1 Maximumtemperatur

Exemplarisch sind die Trendentwicklung für die Maximumtemperatur für zwei Stationen wiedergegeben: Station Brocken in Abb. 4.6 im Jahr und Station Magdeburg im Sommer (Abb. 4.7). Der Verlauf des Vertrauensbereichs für die Trendgerade weist darauf hin, dass der Anstieg von 1,47 °C am Beispiel Brocken und 1,98 °C am Beispiel Magdeburg über den Gesamtzeitraum (0,23 °C bzw. 0,32 °C pro Dekade) gesichert ist und auch der Mann-Kendall-Test ergibt ein Q von rund 3,8 (Brocken) bzw. 3,3 (Magdeburg); d.h. der Trend ist mit einer Sicherheit von mehr als 99 % gesichert. Der Korrelationskoeffizient ist mit 0,46 bzw. 0,43 ebenfalls relativ groß.

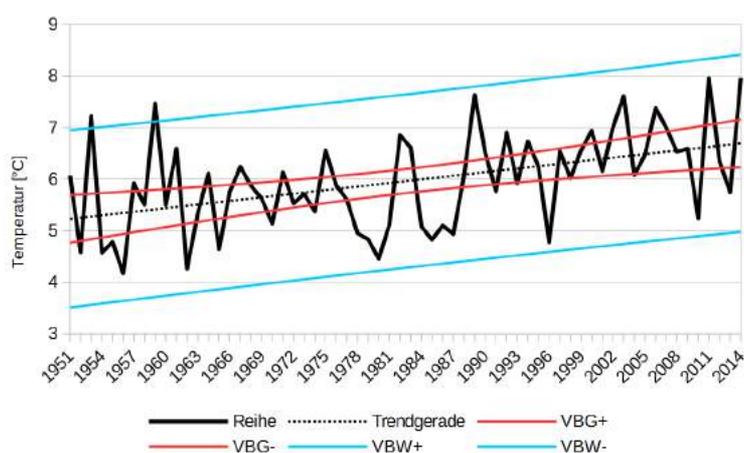


Abbildung 4.6: Zeitliche Entwicklung der Tagesmaximumtemperatur an der Station Brocken. Bestimmungszeitraum: Jahr. Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend an. Die beiden roten Kurven zeigen den Vertrauensbereich für die Trendgerade und die beiden blauen Kurven den Vertrauensbereich für die Werte.

In Tab. 4.2 sind einige Maßzahlen für Trends der Tagesmaximumtemperatur an der Station Brocken zusammengefasst – in Tab. 4.3 erfolgt dies für die Station Magdeburg. Die Trends sind im Frühjahr und Sommer ausgeprägter und auch auf hohem Niveau statistisch abgesichert, während dies im Herbst und Winter nicht der Fall ist.

4.2 Analyse von meteorologischen Standardgrößen

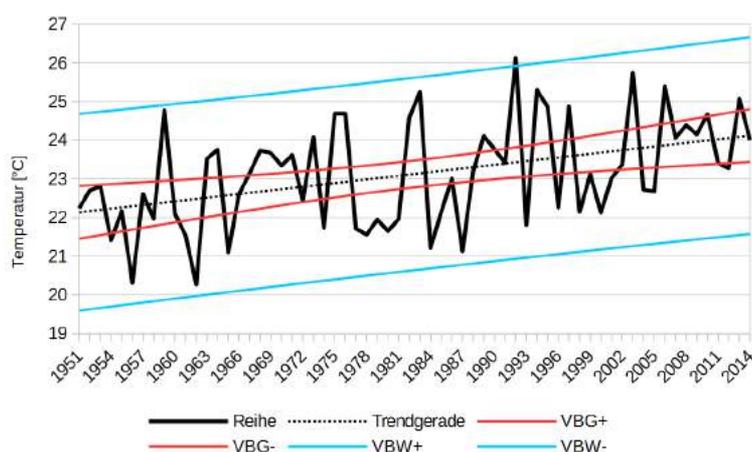


Abbildung 4.7: Zeitliche Entwicklung der Tagesmaximumtemperatur an der Station Magdeburg. Bestimmungszeitraum: Sommer (Juni–August). Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend an. Die beiden roten Kurven zeigen den Vertrauensbereich für die Trendgerade und die beiden blauen Kurven den Vertrauensbereich für die Werte.

Tabelle 4.2: Trends der Tagesmaximumtemperatur an der Station Brocken in verschiedenen Jahreszeiten.

Jahreszeit	Gesamtanstieg in Grad	Anstieg/Dekade in Grad/10 Jahre	Korrelation	Mann-Kendall-Q
Frühjahr	2,18	0,35	0,43	3,15
Sommer	2,00	0,31	0,45	3,60
Herbst	0,61	0,10	0,13	0,18
Winter	1,06	0,17	0,20	1,66

Tabelle 4.3: Trends der Tagesmaximumtemperatur an der Station Magdeburg in verschiedenen Jahreszeiten.

Jahreszeit	Gesamtanstieg in Grad	Anstieg/Dekade in Grad/10 Jahre	Korrelation	Mann-Kendall-Q
Frühjahr	2,41	0,38	0,46	3,58
Sommer	1,98	0,31	0,43	3,31
Herbst	1,00	0,16	0,24	1,73
Winter	2,03	0,32	0,31	2,63

Aber nicht nur die einzelnen Jahreszeiten weisen unterschiedliche Trendentwicklungen auf – die Trends variieren auch in ihrer Stärke, wenn unterschiedliche Teil-Zeiträume von 1951–2014 betrachtet werden. Dieser Effekt wird anhand der mittleren Maximumtemperatur im Sommer an der Station deutlich (s. Abb. 4.8).

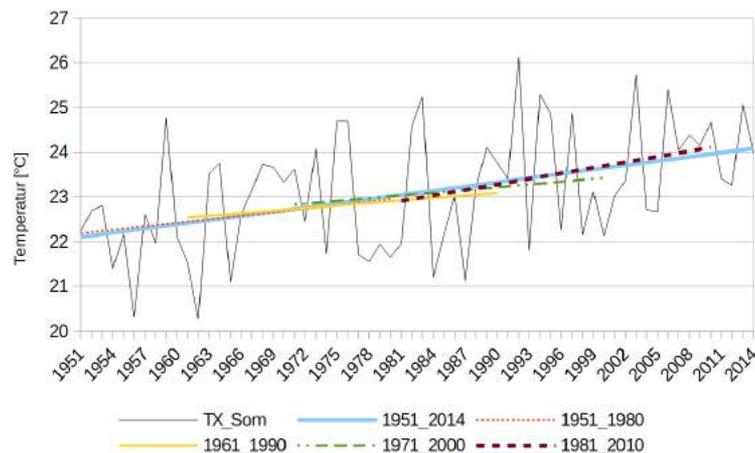


Abbildung 4.8: Zeitliche Entwicklung der mittleren Tagesmaximumtemperatur in den Sommermonaten (Juni–August) an der Station Magdeburg (dünne schwarze Linie). Eingezeichnet sind Trends, die aus dem gesamten Untersuchungszeitraum 1951–2014 (hellblaue Linie) sowie verschiedenen 30-jährigen Teilzeiträumen (gestrichelte und eingefärbte Linien) bestimmt wurden.

Die Steigung der Trendgeraden pro 10 Jahre ist für die unterschiedlichen Zeiträume wie folgt:

- 1951–2014: 0,31 K/10 Jahre hellblaue Linie
- 1951–1980: 0,26 K/10 Jahre fein gepunktete rote Linie
- 1961–1990: 0,19 K/10 Jahre durchgezogene gelbe Linie
- 1971–2000: 0,21 K/10 Jahre strichpunktierte grüne Linie
- 1981–2010: 0,41 K/10 Jahre dicke gepunktete schwarze Linie

In den 1960er Jahren bis Ende der 1990er Jahre ist die Trendentwicklung also relativ gering, während zum Ende der Zeitreihe hin die einsetzende Erwärmung deutlicher wird. In einem weiteren Experiment wurden sukzessive aus den Daten Bereiche von 10 Jahren Länge entfernt und die jeweilige Steigung der Trendgeraden auf Basis der verkürzten Reihe bestimmt. Im Beispielfall veränderte sich der Trend wie folgt:

- 1951–2014: 0,31 K/10 Jahre
- 1961–2014: 0,32 K/10 Jahre
- 1971–2014: 0,33 K/10 Jahre
- 1981–2014: 0,36 K/10 Jahre

Diese Ergebnisse sollen verdeutlichen, dass es „Binnentrends“ im Untersuchungszeitraum geben kann. Dennoch wird aus Gründen der Vergleichbarkeit der Trend für den verfügbaren Zeitraum bestimmt.

4.2 Analyse von meteorologischen Standardgrößen

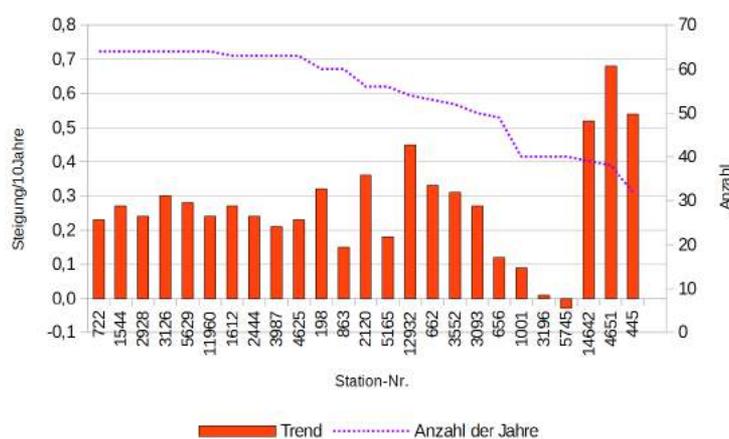


Abbildung 4.9: Trends der Maximumtemperatur für die ausgewerteten Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die gestrichelte Linie stellt die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und ist auf die rechte y-Achse bezogen.

Mit Blick auf die Datensituation soll in diesem Zusammenhang einmal die Problematik, Trendaussagen in der Fläche zu gewinnen, beleuchtet werden.

In Abb. 4.9 ist die Trendstärke pro Dekade (Säulen, bezogen auf die *linke* y-Achse) sowie die Anzahl der nutzbaren Jahre für die Trendauswertungen der Maximumtemperatur des Jahres (gestrichelte Linie, bezogen auf die *rechte* y-Achse) wiedergegeben. Die Stationsnummern (vgl. Tab. A.1¹⁾) sind auf der x-Achse aufgetragen. Die Sortierung erfolgte nach der Zahl der Jahre, aus denen der Trend berechnet wurde, gefolgt von der Sortierung nach der Stationsnummer.

Insgesamt konnten die Trends an 25 Stationen ausgewertet werden, die die Kriterien für Mindest-Reihenlänge und Vollständigkeit erfüllten. Die zwölf Stationen mit mindestens 60 Jahren Reihenlänge (00722 bis 00863 in Abb. 4.9) besitzen dabei Trends in einer Größenordnung von 0,15 bis 0,3 K/Dekade. Die recht unterschiedlichen Trendbeträge der übrigen Stationen sind im Wesentlichen in den unterschiedlichen verwendbaren Zeitabschnitten und den dahinter liegenden generellen Entwicklungen bei der Lufttemperatur begründet – vgl. Untersuchungen zu „Binnentrends“ und Abb. 4.8.

Beispielsweise enden die nutzbaren Reihen für die Stationen 0656 (Braunlage), 1001 (Doberlug-Kirchhain), 3196 (Marnitz) und 5745 (Zehdenick) bereits 1999 (Braunlage) bzw. 1990. Das bedeutet, dass der starke Anstieg in den Jah-

¹⁾Führende Nullen wurden aus den Stationsnummern entfernt. Wenn die Nummer fünfstellig ist und eine 1 an der ersten Stelle steht, dann handelt es sich um eine Station, die nicht aus dem Datenarchiv des Climate Data Center des DWD verwendet wurde. Dies war für einige Stationen ein Ausweg, da im CDC-Datenbestand zwar oftmals längere Reihen zur Verfügung standen, sich in diesen aber auch zum Teil größere Lücken fanden. In einigen Fällen erfolgte daher die Ersetzung durch Stationen aus der Agrarmeteorologischen Datenbank des DWD. Diese sind in hohem Maße lückengefüllt, aber sie beginnen erst 1961 – s.a. die Ausführungen in Abschnitt 4.1 – um den Unterschied zwischen der CDC-Datenquelle und der Agrardatenbank-Quelle zu verdeutlichen, wurde die CDC-spezifische Stationsnummer durch die vorangestellte 1 markiert.

ren danach im Trend nicht mehr repräsentiert ist. Die Stationen 14642 (Seehausen, die führende 1 kennzeichnet eine alternative Datenquelle, vgl. Fußnote auf S. 27), 4651 (Seesen) und 0445 (Bernburg) hingegen beginnen erst 1976 bzw. 1977 bzw. 1983 und reichen bis 2014. In diesen 30 Jahren ist *nur* der starke Trend der letzten Jahre repräsentiert. Deshalb werden dort auch Anstiegsraten von 0,5 und mehr K pro Dekade ermittelt.

Als Ausweg wurde eine Darstellung entwickelt, mit der für einen reduzierten Stationsbestand eine Aussage zum Betrag der Trendentwicklungen möglich ist. Leitidee für die Stationsauswahl ist, möglichst die Grobstruktur der Naturräume Sachsen-Anhalts abzubilden. Zur Ergänzung wurden die Stationen Braunlage und Artern hinzugenommen. Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor ist, dass die Reihen möglichst lang sein sollen – auch das ist mit Kompromissen verbunden. Aus Gründen der Vergleichbarkeit sollen möglichst immer die Analysen der selben Stationen dargestellt werden. Nicht in allen Fällen konnten die Vorgaben erfüllt werden, aber für die Maximumtemperatur ist es doch relativ oft möglich.

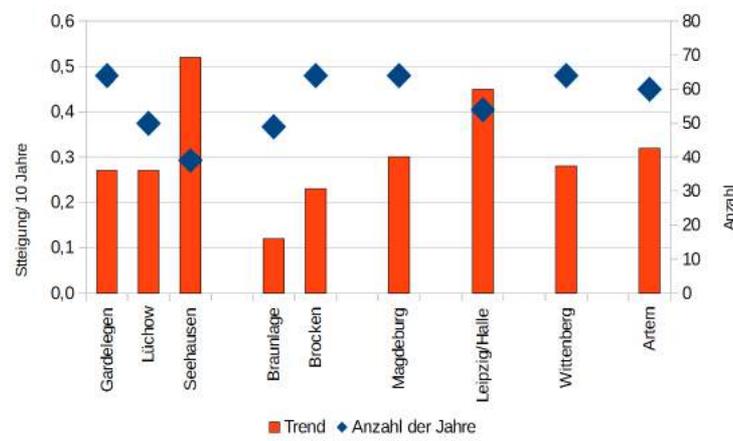


Abbildung 4.10: Trends der Maximumtemperatur für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Die Ergebnisse für die Stationsauswahl sind in Abb. 4.10 dargestellt. Drei Stationen (Gardelegen, Lüchow und Seehausen) decken dabei die relativ niedrig gelegenen Regionen Altmark, Wendland und Umgebung ab. Zwei Stationen (Braunlage und Brocken) decken die Harzregion ab. Magdeburg repräsentiert die nördliche Bördenregion, Leipzig/Halle die südliche, Wittenberg das Elbe-Mulde-Tiefland und Artern das Thüringer Becken mit Randplatten. Die Balken geben jeweils die Trendstärke pro Jahrzehnt an. Sie sind mit der *linken* y-Achse verbunden und die blauen Rauten geben an, aus wie vielen Jahren der Trend ermittelt wurde. Diese sind mit der *rechten* y-Achse verbunden. Analoge Darstellungen werden für eine Vielzahl von vergleichenden Auswertungen im diesem und in anderen Abschnitten des Berichts verwendet.

Der Abb. 4.10 sind leichte Unterschiede in der Trendentwicklung an Stationen mit gleich langen Reihen zu ersehen. Wie die blauen Rauten angeben, ist dieser direkte Vergleich für die Stationen Gardelegen, Brocken, Magdeburg, Wittenberg und Artern möglich, die über mindestens 60 Jahre Länge verfügen. Etwas geringere Trendentwicklungen finden sich in der Harzregion und etwas höhere im Bereich der Börden sowie im Bereich der Ausläufer des Thüringer Beckens.

Um die Größenordnung der Trendentwicklung bei der Maximumtemperatur im Zeitraum 1951–2014 besser abschätzen zu können wurde außerdem für alle Stationen, für die dieser Zeitraum vollständig abgedeckt ist, ein Vergleich durchgeführt.

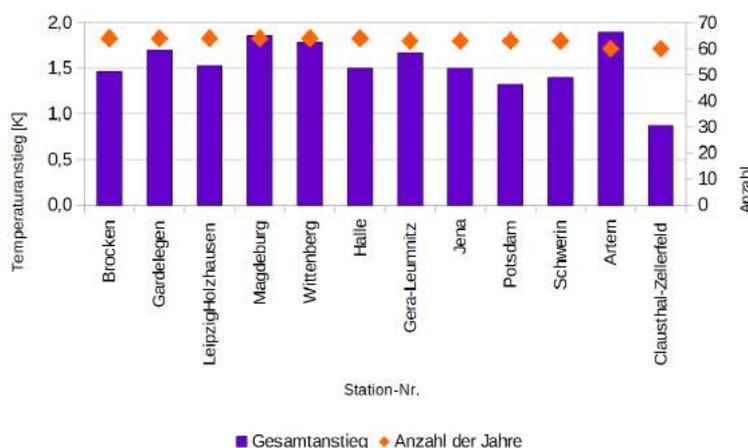


Abbildung 4.11: Anstieg der Maximumtemperatur im Zeitraum 1951–2014 aufgrund der Trends für ausgewählte Stationen. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die blauen Balken stellen den Anstieg Maximumtemperatur dar. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die orangefarbenen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Abb. 4.11 zeigt die Änderungen an den verschiedenen Stationen. Die Auswahl weicht von der in Abb. 4.10 verwendeten ab, da nur Stationen mit dem kompletten Datenbestand von 64 Jahren einbezogen wurden. Einige davon sind nicht in unmittelbarer Nähe Sachsen-Anhalts, die Stationen befinden sich jedoch in einem vergleichbaren Landschaftstyp zu den tiefer gelegenen Landesteilen von Sachsen-Anhalt. Es ist hervorzuheben, dass Änderungen der Maximumtemperatur zwischen rund 1,5 und 2,0 K auftreten.

4.2.1.2 Minimumtemperatur

Die Minimumtemperatur der Luft ändert sich in ähnlicher Weise – exemplarisch sei hier das Ergebnis für die Station Magdeburg für das Jahr gezeigt (s. Abb. 4.12). Der Trend ist mit einem Mann-Kendall Q von +2,43 signifikant und auf dem 90 %-Niveau statistisch abgesichert.

Die Ergebnisse für die Stationsauswahl sind in Abb. 4.13 dargestellt. Die Balken geben jeweils die Trendstärke pro Jahrzehnt an. Sie sind mit der linken y-Achse verbunden und die blauen Rauten geben an, aus wie vielen Jahren der Trend ermittelt wurde. Diesen sind mit der rechten y-Achse verbunden. Es ist,

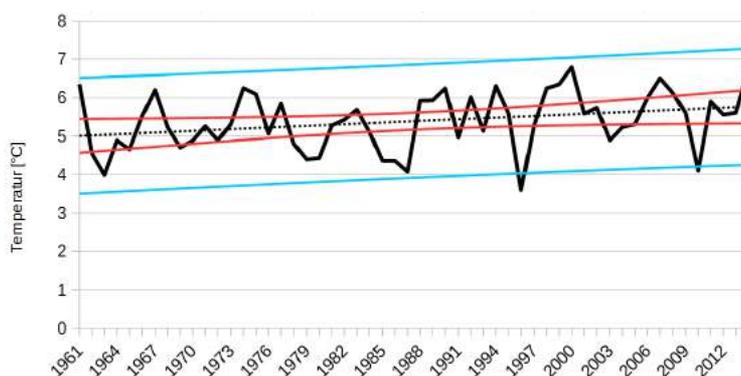


Abbildung 4.12: Zeitliche Entwicklung der Tagesminimumtemperatur an der Station Magdeburg. Bestimmungszeitraum: Jahr. Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend an. Die beiden roten Kurven zeigen den Vertrauensbereich für die Trendgerade und die beiden blauen Kurven den Vertrauensbereich für die Werte.

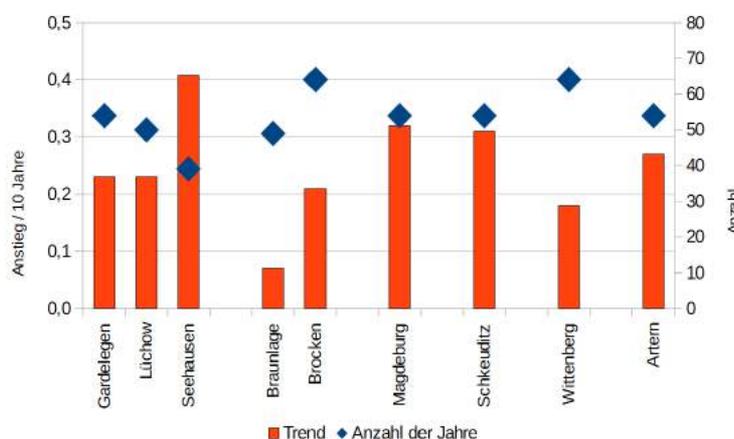


Abbildung 4.13: Trends der Minimumtemperatur für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

ähnlich wie bei der Maximumtemperatur (vgl. Abb. 4.10), eine leichte Unterschiedlichkeit der Trendentwicklung zu ersehen. Dabei sind die Längen der verwendeten Zeitreihen recht unterschiedlich. Die geringe Trendentwicklung an der Station Braunlage liegt größtenteils daran, dass die Daten dieser Station nur bis 1990 verwendet werden konnten. Starke Änderungen der Minimumtemperatur, die erst in den Jahren danach erfolgten und an anderen Stationen belegt sind (vgl. Abb. 4.12) finden sich daher im Trend von Braunlage nicht wieder. An der Station Seehausen hingegen – diese beginnt erst 1976 – ist genau dieser starke Anstieg dominierend und die Verhältnisse der 1950er und 1960er Jahre finden sich in ihr nicht wieder. Daher ist der Anstieg der Minimumtemperatur, der in der Stationsreihe von Seehausen ermittelt wurde, so stark.

Abb. 4.14 zeigt die Änderungen an den verschiedenen Stationen die über die volle nutzbare Zeitreihenlänge (1951–2014) verfügen. Die Stationsauswahl

4.2 Analyse von meteorologischen Standardgrößen

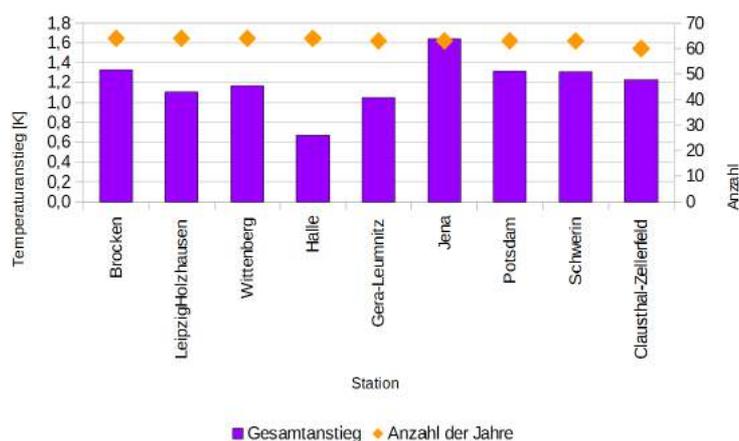


Abbildung 4.14: Anstieg der Minimumtemperatur im Zeitraum 1951–2014 aufgrund der Trends für ausgewählte Stationen. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die blauen Balken stellen den Anstieg Minimumtemperatur dar. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die orangefarbenen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

weicht daher von der in Abb. 4.13 verwendeten ab. Einige Stationen sind nicht in unmittelbarer Nähe Sachsen-Anhalts. Sie befinden sich jedoch in einem vergleichbaren Landschaftstyp zu den tiefer gelegenen Landesteilen von Sachsen-Anhalt. Es ist hervorzuheben, dass zumeist Änderungen der Minimumtemperatur zwischen rund 1,0 und 1,5 K auftreten.

4.2.1.3 Mitteltemperatur

Wird die Mitteltemperatur analysiert, so findet sich in den Trendentwicklungen nichts grundsätzlich Abweichendes – die Anstiegsraten sind mit denen der Maximum- bzw. Minimumtemperatur (s. Abschnitte 4.2.1.1 und 4.2.1.2) vergleichbar.

Es soll mit Hilfe der Mitteltemperatur untersucht werden, ob es eine Häufung der „Warmereignisse“ in bestimmten Jahrzehnten gibt. Dazu wurden die fünf Stationen ausgewählt, für die aus dem vollen Zeitraum (1951–2014, 64 Jahre) Daten zur Verfügung standen:

1. 00722: Brocken
2. 01960: Halle-Stadt
3. 02928: Leipzig-Holzhausen
4. 03126: Magdeburg
5. 05629: Wittenberg

Für jedes Jahr wurde die Mitteltemperatur bestimmt und danach in eine Rangfolge gebracht. Das wärmste Jahr bekam den Rang 1; bei allen Stationen

bis auf Leipzig-Holzhausen²⁾ war dies das Jahr 2014. Das kälteste Jahr bekam den Rang 64; bei allen Stationen bis auf Magdeburg³⁾ war dies das Jahr 1956. Um die Repräsentativität zu erhöhen wurden die Ränge der fünf Stationen für jedes Jahr addiert. Das führte im Fall des wärmsten Jahres zum selben Resultat (2014), aber bei den nachfolgenden Rängen gab es durchaus Verschiebungen gegenüber der Analyse einer Einzelstation. Das Jahr 1956 blieb übrigens auch in der gemeinsamen Analyse der fünf Stationen das kälteste.

Um mögliche Häufungen darzustellen wurde ein Scatterplot angefertigt. In diesem ist auf der x-Achse das Jahr und auf der y-Achse der Rang aufgetragen. Die Verhältnisse bei den wärmsten und kältesten Jahren sind in Abb. 4.15 dargestellt.

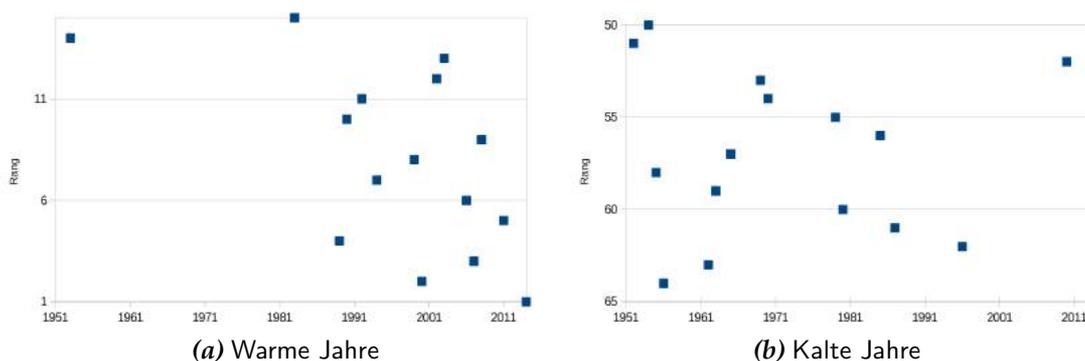


Abbildung 4.15: Scatterplot für die Ränge der 15 wärmsten (links) und 15 kältesten Jahre ermittelt aus den Reihen der Jahresmitteltemperatur der Stationen Brocken, Halle-Stadt, Leipzig-Holzhausen, Magdeburg und Wittenberg.

Im ersten Scatterplot [Abb. 4.15 (a)] fällt die deutliche Häufung der eingetragenen Datenpunkte in der rechten Hälfte auf. Bis auf ein Jahr (1953) sind unter den 15 wärmsten nur Jahre nach 1981. 11 der 15 Jahre, also rund 75 % kommen dabei aus dem Zeitraum nach 1991 und 7 der 15 wärmsten Jahre (rund die Hälfte) stammen aus dem Zeitraum nach 2001. Aus Abb. 4.15 (a) lässt sich zudem ablesen, dass die wärmsten 5 Jahre 2014, 2000, 2007, 1989, 2011 sind.

Im zweiten Scatterplot [Abb. 4.15 (b)] sind die Verhältnisse bei den 15 kältesten Jahren dargestellt. Spiegelbildlich zu den 15 wärmsten Jahren zeigt sich, dass mit wenigen Ausnahmen (2010 und 1996) eine Häufung von besonders kalten Jahren in den ersten Dekaden des Untersuchungszeitraums zu finden ist. Allerdings ist die Verteilung breiter als bei den wärmsten Jahren, das heißt unter den kältesten Jahren finden sich auch solche der Dekaden 1981–90, 1971–80 und 1961–70. Die fünf kältesten Jahre sind, wie in Abb. 4.15 (b) ersichtlich 1956, 1962, 1996, 1987 und 1980. In der Tendenz ist aber ein erhöhter Anteil der frühen Jahre des Untersuchungszeitraums unter den kältesten Jahren sichtbar.

²⁾In Leipzig-Holzhausen wurde 2000 das wärmste Jahr des Zeitraums 1951–2014 verzeichnet.

³⁾In Magdeburg war 1996 das kälteste Jahr des Zeitraums 1951–2014.

Außerdem wurde eine ähnliche Analyse für die Sommermonate (Juni–August) durchgeführt. Die Ergebnisse für die 15 wärmsten, bzw. kältesten Sommer finden sich in Abb. 4.16.

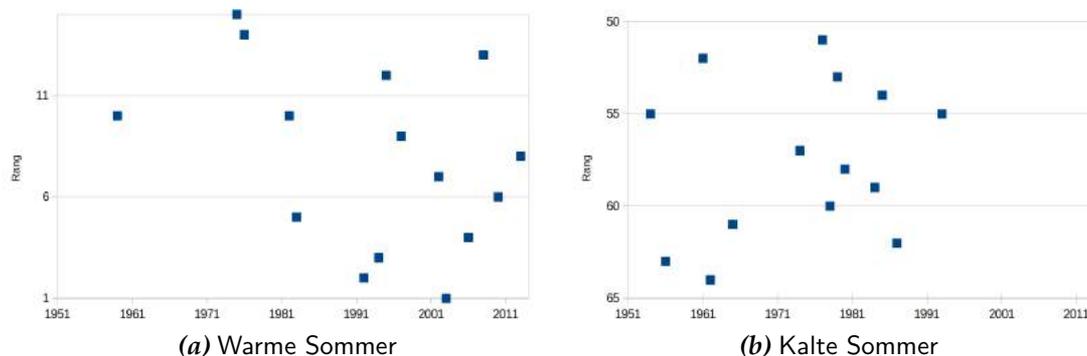


Abbildung 4.16: Scatterplot für die Ränge der 15 wärmsten (links) und 15 kältesten Sommer ermittelt aus den Reihen der Sommermitteltemperatur der Stationen Brocken, Halle-Stadt, Leipzig-Holzhausen, Magdeburg und Wittenberg.

Die Grundtendenz ist im Sommer ähnlich wie bei den Untersuchungen der Jahresmitteltemperatur: Die besonders warmen Sommer stammen in erhöhtem Maße aus den Jahren der jüngeren Vergangenheit – 10 von 15 Sommern, das sind 2/3 der wärmsten Sommer, traten nach 1990 auf. Aus Abb. 4.16 (a) lässt sich ablesen, dass die 5 wärmsten Sommer 2003, 1992, 1994, 2006 und 1983 waren. Besonders kalte Sommer traten bis auf eine Ausnahme (1993) alle im Zeitraum vor 1990 auf, wobei aus Abb. 4.16 (b) ersichtlich ist, dass die 5 kältesten Sommer 1962, 1956, 1987, 1965 und 1978 waren. Interessant ist hier zudem, dass nicht notwendigerweise ein besonders kalter Sommer auch in einem besonders kalten Jahr liegen muss.

Bei einer Analyse der Winter (Dezember–Februar, Abb. 4.17) stellte sich heraus, dass sowohl besonders strenge (kalte) als auch besonders milde (warme) Winter in allen Dekaden vorkommen können. Eine leichte Häufung strenger Winter in den frühen Jahren des Untersuchungszeitraums zeigt sich aber darin, dass 11 der 15 kältesten Winter (das sind rund 75 %) vor 1990 auftreten. Die Rangfolge führen die Winter 1962/63, 1969/70, 1955/56, 1978/79, 1984/85, 1995/96, 1986/87 und 2009/10 an.

Besonders milde Winter finden sich allerdings deutlich häufiger in den Jahren der jüngeren Vergangenheit. So liegen nur 6 der 15 mildesten Winter (40 %) vor 1990 und 60 % traten nach 1990 auf. Die Rangfolge der mildesten Winter führen 2006/07, 1989/90, 1974/75, 2013/14, 2007/08 und 1988/89 an.

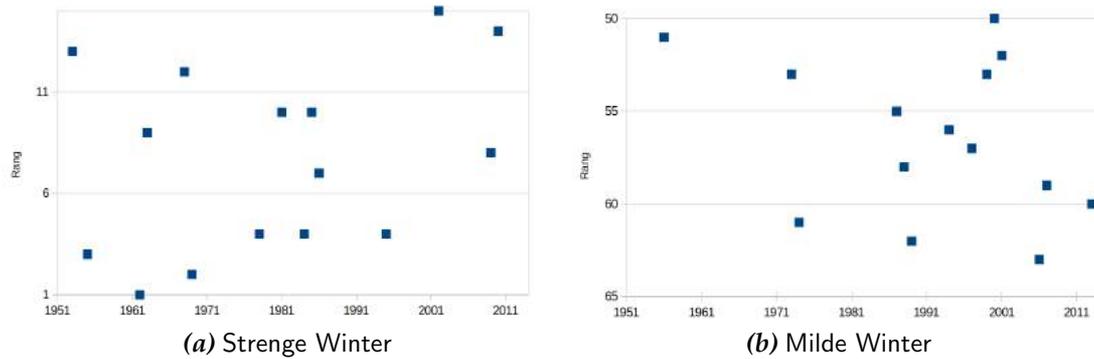


Abbildung 4.17: Scatterplot für die Ränge der 15 kältesten (links) und 15 wärmsten Winter, ermittelt aus den Reihen der Wintermitteltemperatur der Stationen Brocken, Halle-Stadt, Leipzig-Holzhausen, Magdeburg und Wittenberg.

In einer gesonderten Untersuchung wurde der Frage nachgegangen, ob die Nutzung der Temperaturzeitreihen der Station Brocken (sie gehört einem anderen Klimaregime als die übrigen Stationen an) möglicherweise einen Einfluss auf die ermittelte Rangfolge besitzt. So wurde die oben beschriebene Bestimmung der gemeinsamen Rangfolgen mit und ohne die Verwendung der Station Brocken durchgeführt. Es ist aber festzustellen, dass in diesem Zusammenhang praktisch keine Unterschiede zu finden sind – es also gerechtfertigt ist, die Ranguntersuchungen auf der Basis aller fünf Auswahlstationen durchzuführen.

Als Resultat der Untersuchungen der Lufttemperatur ist festzuhalten: Die analysierten Trends widerspiegeln und untermauern den Eindruck, dass es seit den 1950er Jahren im Schnitt wärmer geworden ist. Zudem zeigt sich diese Entwicklung deutlicher in den letzten 30 Jahren als in den 1950er bis 1980er Jahren. In abgeleiteten Größen (s. Abschnitt 4.3 und Anhang B) wird dem detailliert weiter nachgegangen.

4.2.2 Niederschlag

Niederschlagstrends sind nicht so ausgeprägt wie Temperaturtrends. Hier spielen lokale Gegebenheiten ebenso eine Rolle, wie eine besonders hohe zeitliche Fluktuation des Niederschlags. Außerdem ist aus Studien des zukünftigen Klimawandels bekannt, dass sich die Änderungen in den Jahreszeiten spezifisch anders verhalten und zum Teil Zunahme- und zum Teil Abnahmetrends auftreten. In diesem Teil der Studie wird übersichtsartig darauf eingegangen, ob sich dieses Charakteristikum auch schon in den Trends des Niederschlags in den letzten 50–60 Jahren wiederfinden lässt.

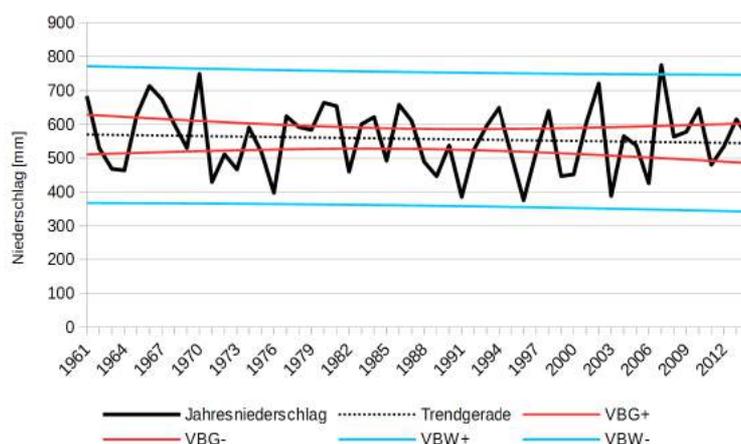


Abbildung 4.18: Zeitliche Entwicklung des Jahresniederschlags an der Station Gardelegen. Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend an. Die beiden roten Kurven zeigen den Vertrauensbereich für die Trendgerade und die beiden blauen Kurven den Vertrauensbereich für die Werte.

Abb. 4.18 zeigt als Beispiel den Jahresniederschlagstrend für Gardelegen. Ein sehr geringer, statistisch nicht signifikanter Rückgang ist erkennbar.

Tabelle 4.4: Trends des Niederschlags an der Station Gardelegen in den einzelnen Jahreszeiten.

Jahreszeit	Gesamtanstieg [mm]	Anstieg/Dekade	Korrelation	Mann-Kendall-Q
Frühjahr	-24,4	-4,5	-0,16	-0,84
Sommer	-16,5	-3,1	-0,10	-1,39
Herbst	6,7	1,2	0,04	-0,46
Winter	9,4	1,8	0,08	0,03

Tab. 4.4 und Abb. 4.19 geben die Trendentwicklungen in den Jahreszeiten wieder. Während im Frühjahr und Sommer Abnahmen von 3–4 mm/Dekade auftreten, sind die Zunahmen im Herbst und Winter mit rund 1,5 mm/Dekade deutlich geringer. Die Trends sind in keiner Jahreszeit statistisch signifikant.

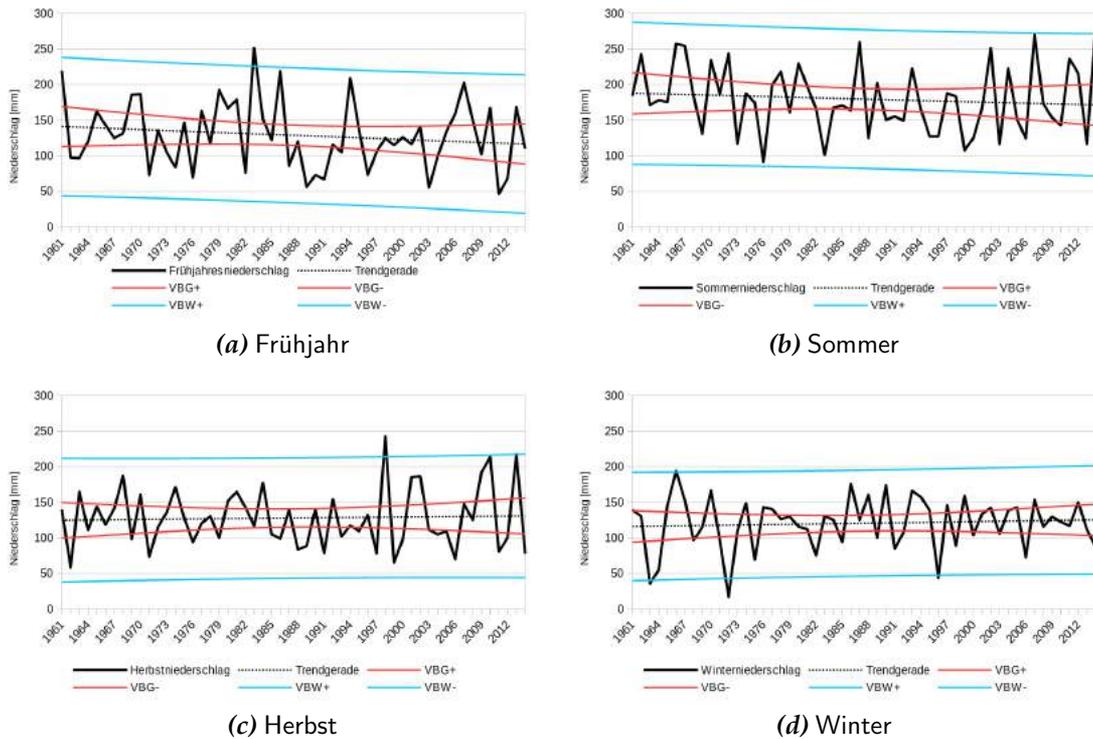


Abbildung 4.19: Entwicklung des Niederschlags an der Station Gardelegen in den einzelnen Jahreszeiten.

Zum Vergleich: Für den Jahresniederschlag und den Niederschlag in den Jahreszeiten an der Station Brocken (Abb. 4.21 und 4.20) ist ein sehr viel stärkerer Trend im Jahr sowie in Herbst und Winter und sichtbar.

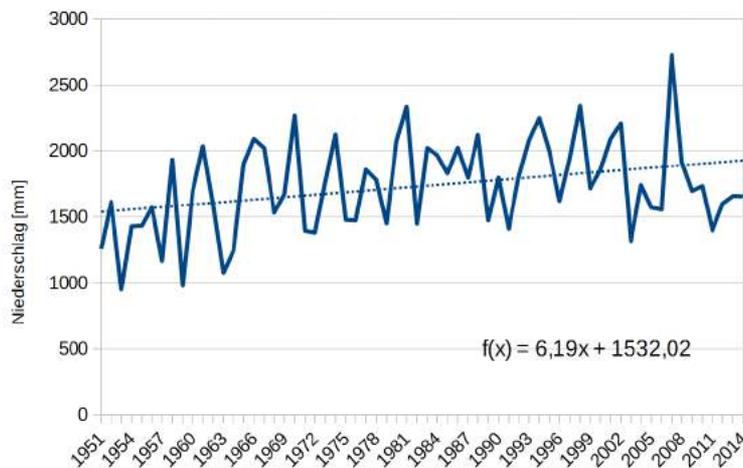


Abbildung 4.20: Zeitliche Entwicklung des Jahresniederschlags an der Station Brocken. Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend an.

4.2 Analyse von meteorologischen Standardgrößen

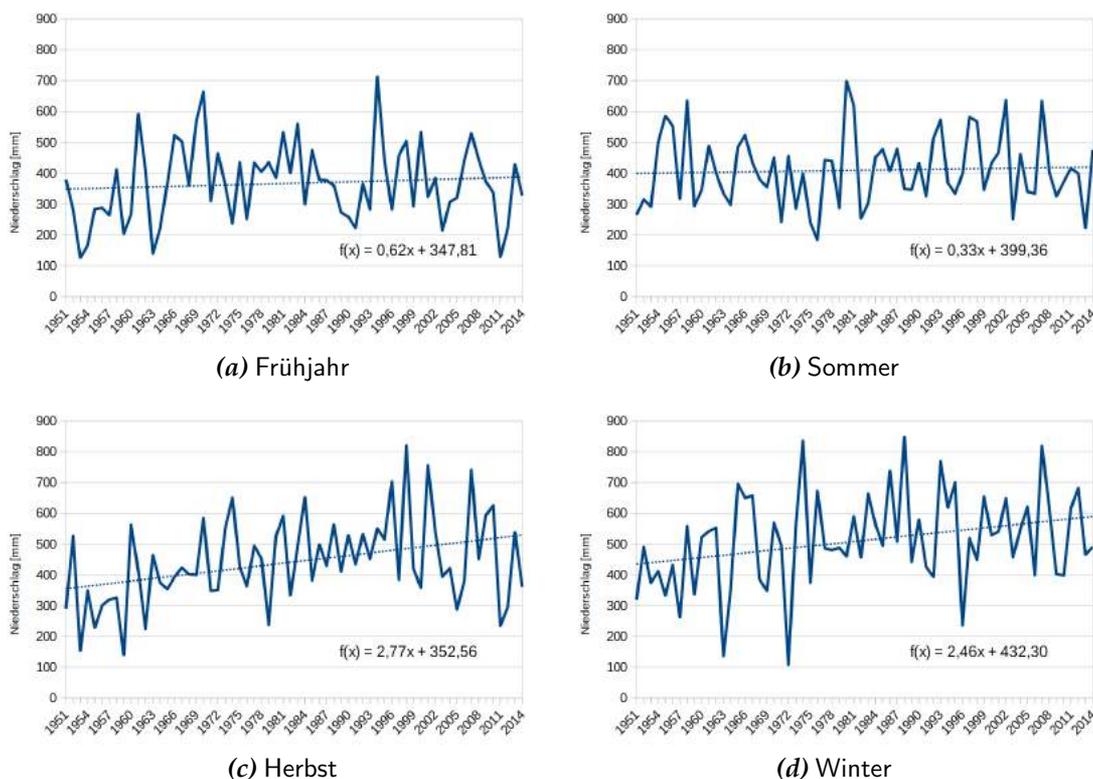


Abbildung 4.21: Entwicklung des Niederschlags an der Station Brocken in den einzelnen Jahreszeiten.

Im Mittel nimmt der Jahresniederschlag dort von rund 1500 mm in den 1950er Jahren auf rund 1900 mm am Ende der Analyseperiode 1951–2014 zu. Das sind über 60 mm/Dekade⁴). Dieser Trend, so zeigen weitere Analysen, ist auf dem 95 %-Niveau statistisch signifikant.

Da für den Niederschlag zum Teil andere Stationen mit langen Zeitreihen verfügbar sind als bei anderen Messgrößen, wie der Temperatur, ist die in Abb. 4.22–4.24 benutzte Stationsauswahl auch abweichend von derjenigen in Abb. 4.10 oder 4.13.

Um sich ein Bild von den verschiedenen Größenordnungen der Niederschlagsänderungen zu verschaffen, wurde in den Einheiten des Niederschlags gerechnet.

Wie die analysierten Stationsreihen zeigen, kommen im Jahresniederschlag im Untersuchungszeitraum (zumeist 60 Jahre) sowohl starke Zunahmen (Harz) als auch geringere Zunahmen (Artern und Raum Leipzig) vor. Außerdem besitzen einige Stationen Trends, die nicht klar genug als Zu- oder Abnahmen erscheinen. Abgesehen von der Station Brocken, bei der, wie oben beschrieben, ein signifikanter Trend im Jahresniederschlag zu verzeichnen ist, sind die Verände-

⁴)Die in Abb. 4.20 eingeblendete Gleichung der Trendgeraden weist auf einen Anstieg von 6,19 mm/Jahr hin.

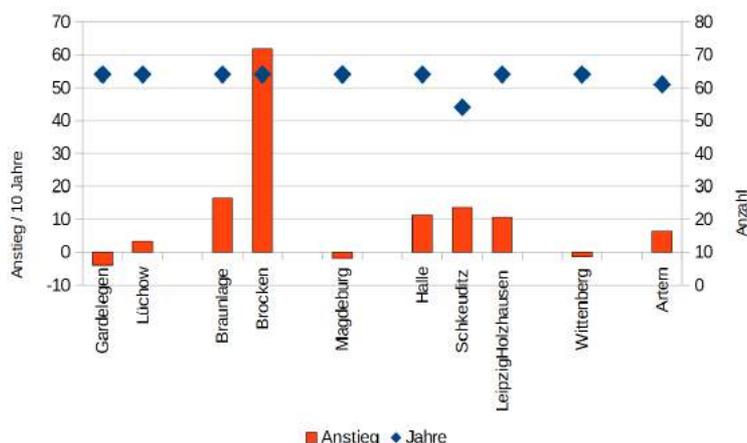


Abbildung 4.22: Trends des Niederschlags für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang in mm pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Die Trends an den übrigen Stationen sind nicht oder nur sehr schwach signifikant. Der Mann-Kendall Signifikanztest ergab Q -Werte von 1,5 und weniger.

Die Trendanalysen des Niederschlags für Sommer und Winter sind in Abb. 4.23 dargestellt.

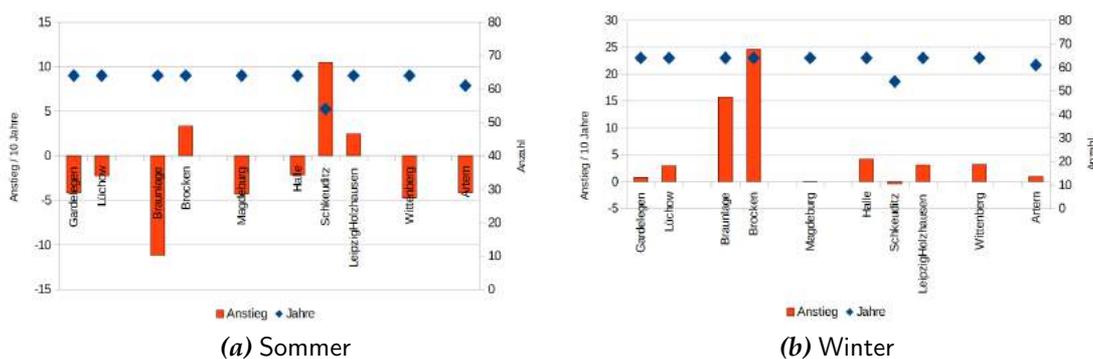


Abbildung 4.23: Trends des Niederschlags für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Sommer (links) und Winter (rechts). Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang in mm pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Es zeigt sich, dass die Niederschlagstrends im Sommer [Juni–August, Abb. 4.23 (a)] nicht einheitlich sind. Es gibt einerseits relativ gut belegte Zunahmetrends zum Beispiel in Schkeuditz. Dort wird rund 10 mm Zunahme pro Dekade verzeichnet und der Trend ist schwach signifikant auf dem 90 %-Niveau.

Andererseits treten verbreitet sommerliche Abnahmetrends auf. So weist beispielsweise die Station Braunlage einen mittlere Rückgang von rund 10 mm pro Dekade auf, der jedoch nicht statistisch signifikant ist. Auch wenn die Entwicklung des Sommerniederschlags nicht überall in die gleiche Richtung zeigt: Es ergibt sich in der Zusammenschau eine leichte Tendenz zur Abnahme im Sommer, die aber zumeist nicht statistisch signifikant ist.

Beim Winterniederschlag [Dezember–Februar, Abb. 4.23 (b)] ist festzustellen, dass zumindest keine klaren Abnahmetrends erkennbar sind. Die Trends zeigen entweder Zunahmen oder keine Veränderungen. Die stärksten mittleren Veränderungen werden an den Stationen im Harz verzeichnet. An der Station Braunlage ist ein Anstieg von rund 15 mm pro Dekade sichtbar, der allerdings nur schwach signifikant ist. Die Station Brocken weist für den Winterniederschlag einen mittleren Anstieg von rund 25 mm pro Dekade aus. Dieser ist zwar nicht hoch signifikant aber auf dem 90 %-Niveau statistisch abgesichert.

Aufschlussreich ist in diesem Zusammenhang ein Darstellung der Entwicklung in den beiden Vegetationsperioden – diese sind einerseits mit dem mittleren Verhalten der Vegetation verbunden und andererseits teilen sie das kalendarische Sommerhalbjahr in zwei gleich große Hälften. Die Vegetationsperiode I (VP I) umfasst dabei die Monate April bis Juni und die Vegetationsperiode II (VP II) die Monate Juli bis September. Die in der Meteorologie und Klimatologie als Standard verwendete Definition des Sommers umfasst die Monate Juni bis August. Die Niederschlagstrends, ermittelt für die beiden Vegetationsperioden an den Stationen mit langen Reihen sind in Abb. 4.24 dargestellt.

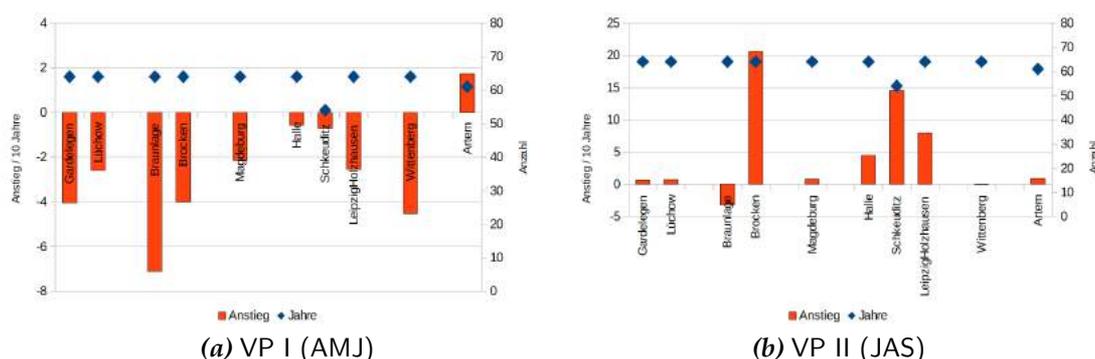


Abbildung 4.24: Trends des Niederschlags für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Vegetationsperiode I (April–Juni, links) und Vegetationsperiode II (Juli–September, rechts). Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang in mm pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Recht deutlich wird das Vorherrschen von Rückgangsentwicklungen in der Vegetationsperiode I. In der Vegetationsperiode II weisen die Trends entweder Zunahmen aus, oder sie sind nicht vorhanden. Allerdings kommen die Trends

nur in wenigen Fällen in die Nähe einer statistischen Signifikanz: Die Trendentwicklung am Brocken in der Vegetationsperiode II ist auf dem 90 %-Niveau signifikant und diejenige in der selben Vegetationsperiode in Schkeuditz ist auf relativ niedrigem 80 %-Niveau signifikant. Alle übrigen Trends, insbesondere alle Trends in der Vegetationsperiode I sind nur schwach oder gar nicht signifikant. Dennoch: Die Entwicklungen zeichnen sich ab, auch wenn sie eher als *Tendenzen* einzustufen sind.

4.2.3 Relative Feuchte

Für diese Größe werden nur selten Trendbetrachtungen durchgeführt. Die Relative Feuchte ist für die letzten 50–60 Jahre überwiegend durch Abnahmetrends charakterisiert. Ein exemplarisches Beispiel ist anhand der Station Gardelegen für das Jahresmittel in Abb. 4.25 gegeben.

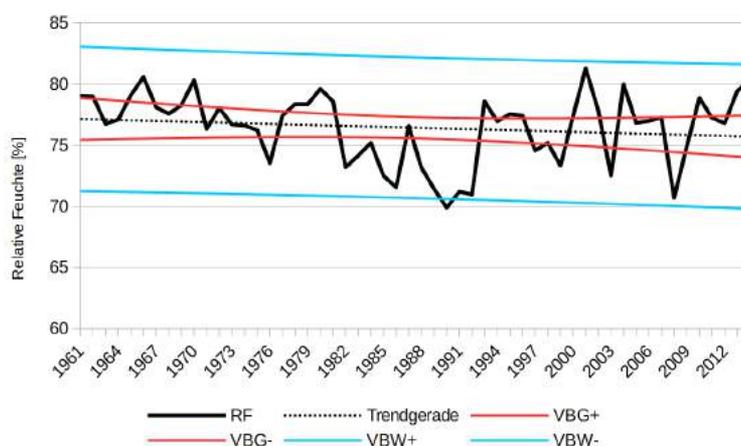


Abbildung 4.25: Zeitliche Entwicklung der relativen Feuchte an der Station Gardelegen. Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend an.

Der Abnahmetrend in Gardelegen ist zwar erkennbar, aber von relativ geringer Größenordnung. Das Mann-Kendall Q von $-1,29$ weist ihn als schwach signifikant zum 80 %-Level aus.

Es wurden im Vorhaben zahlreiche Trends der Relativen Feuchte für Einzelmonate und Jahreszeiten erstellt. Abb. 4.26 fasst für eine Stationsauswahl die Trends für das Jahresmittel der relativen Feuchte zusammen. Bis auf wenige Einzelfälle mit leichten Zunahmen⁵⁾ sind überwiegend Abnahmetrends zu erkennen. Diese sind jedoch zumeist nur schwach signifikant.

⁵⁾Die Zunahme an der Station Brocken wurden mit dem Mann-Kendall-Test auf Signifikanz untersucht; es fand sich jedoch kein Hinweis auf statistische Signifikanz.

4.2 Analyse von meteorologischen Standardgrößen

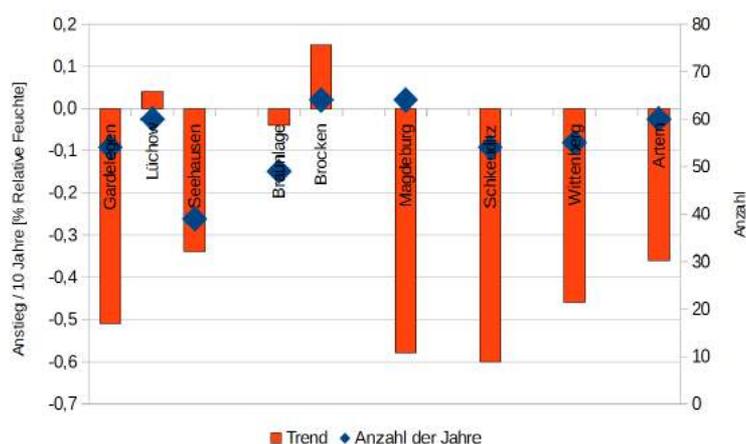


Abbildung 4.26: Trends der relativen Feuchte für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang in % pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

4.2.4 Sonnenscheindauer

Die tägliche Sonnenscheindauer in Stunden ist nur an einer geringen Zahl von Stationen vorhanden. Zudem gibt es bei dieser Größe oft Datenausfälle, so dass hier auf den Bestand der Stationen aus der DWD-Agrarmeteorologie (vgl. Tab. A.2 im Anhang) zurückgegriffen wird. Der Bestimmungszeitraum für die Trends beginnt dann nicht 1951 sondern erst 1961 (bzw. bei Seehausen 1976). Für den Untersuchungszeitraum wurden allgemein schwache Trends gefunden.

Exemplarisch sind in Abb. 4.27 die Entwicklungen für den Sommer (mittlere Sonnenscheindauer in den Monaten Juni–August), den Winter (Dezember–Februar) und das Jahr an der Station Wittenberg dargestellt. Die für Wittenberg gefundenen Trends sind sehr gering – das Mann-Kendall Q im Winter und im Jahr beträgt jeweils rund 1,0, d.h. der Trend ist statistisch nicht signifikant. Im Sommer ist gar kein Trend zu identifizieren.

Werden mehrere Stationen aus Sachsen-Anhalt und der Umgebung hinzugezogen, so finden sich im Sommer (Abb. 4.28) in der Regel etwas schwächere Trends als für das Jahr (Abb. 4.29). Statistisch signifikant auf dem 95 %-Niveau gesichert sind aber nur die Zunahmen der Sonnenscheindauer in Artern sowie in Neuruppin (beides im Jahr) – auf dem 90 %-Niveau statistisch gesichert ist der Jahrestrend in Magdeburg. Es ist zu beachten, dass die dargestellten Werte immer das Trendverhalten *pro Dekade* wiedergeben. Damit erklärt sich auch der relativ hohe Anstieg (pro Dekade) bei Seehausen, sowohl im Sommer als auch für das gesamte Jahr: Durch den späten Beginn der Messreihe im Jahr 1976 wird nur das relativ starke Anstiegsverhalten der unmittelbaren Vergangenheit erfasst.

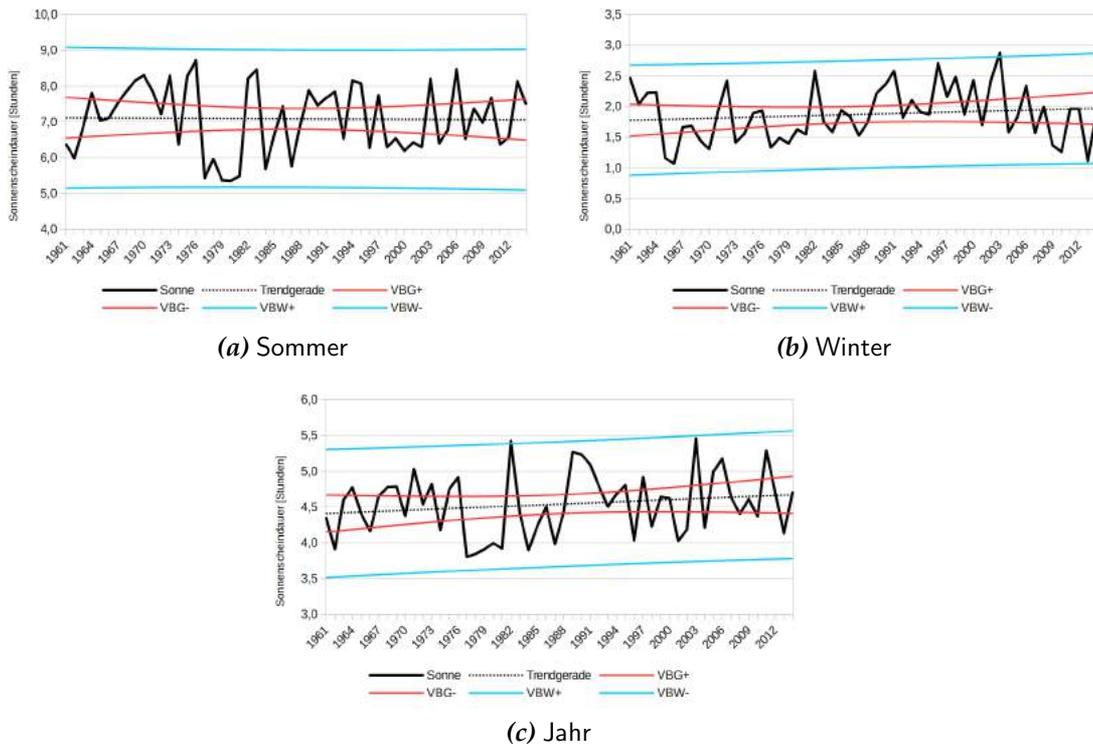


Abbildung 4.27: Entwicklung der Sonnenscheindauer an der Station Wittenberg im Sommer, Winter und Jahr.

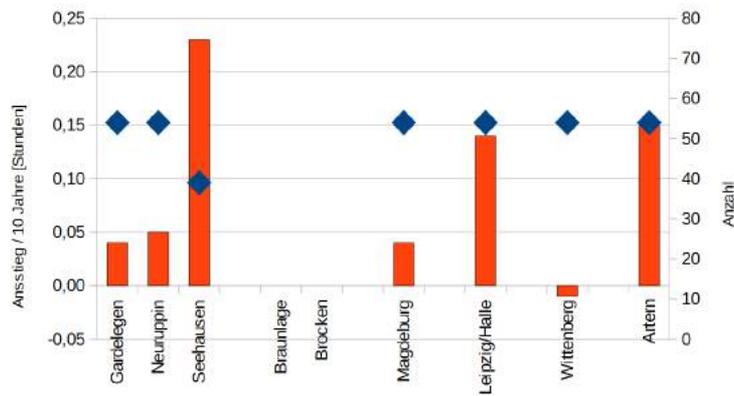


Abbildung 4.28: Trends der mittleren täglichen Sonnenscheindauer in den Sommermonaten (Juni–August) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang in Stunden pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

4.2 Analyse von meteorologischen Standardgrößen

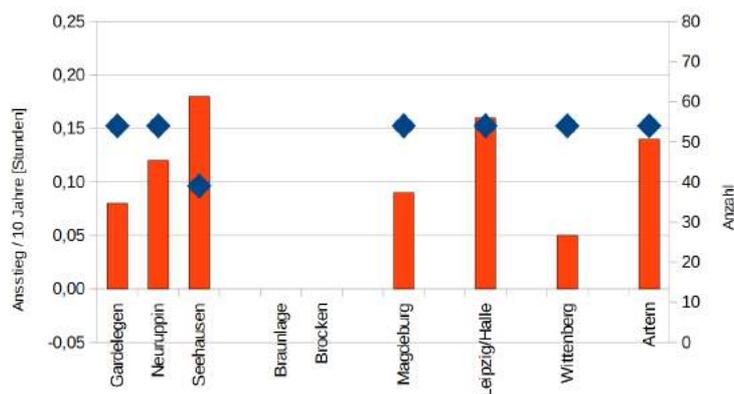


Abbildung 4.29: Wie Abb. 4.28, jedoch für das Jahr.

4.2.5 Bedeckungsgrad

Tagesmittel des Gesamt-Bedeckungsgrads mit tiefen, mittelhohen und hohen Wolken, registriert in Achteln der gesamten Himmelsfläche (Octas), sind nur für wenige Stationen verfügbar. Datenlücken schränken die Nutzbarkeit weiter ein. Das Bild bezüglich der Trendentwicklungen ist uneinheitlich. Es gibt zu allen Jahreszeiten sowohl Zu- als auch Abnahmen.

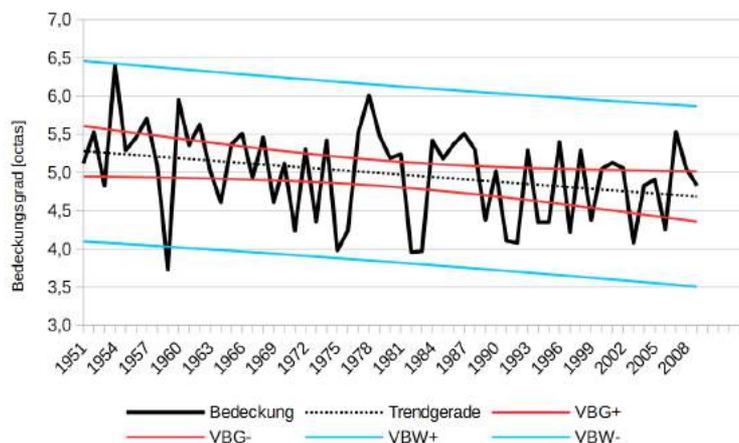


Abbildung 4.30: Zeitliche Entwicklung des Bedeckungsgrads an der Station Clausthal-Zellerfeld. Die gestrichelte Linie gibt den linearen Trend an.

Ein relativ deutlicher Abnahmetrend an der Beispielstation Clausthal-Zellerfeld ist in Abb. 4.30 dargestellt. Die Mann-Kendall-Testgröße Q beträgt $-2,47$, d.h. dieser Trend ist auf dem 95 %-Niveau statistisch abgesichert.

Der Vergleich der Jahrestrends für verschiedene Stationen (Abb. 4.31) unterstreicht das wenig einheitliche Bild. Nur wenige Trends, beispielsweise die Abnahme auf dem Brocken, sind auf dem 95 %-Niveau statistisch signifikant.

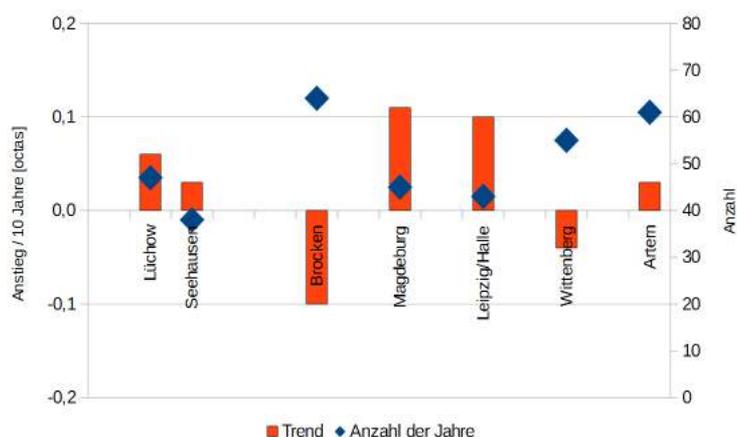


Abbildung 4.31: Trends des mittleren Bedeckungsgrads für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang in Octas pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

4.2.6 Windgeschwindigkeit

Windmessungen aus Sachsen-Anhalt und Umgebung sind über das Climate Data Center des DWD nur an einer kleinen Zahl von Stationen verfügbar. Sie beginnen oft in späteren Jahren als die Reihen der anderen meteorologischen Parameter. In diesen Reihen der Windgeschwindigkeit gibt es zudem zahlreiche, durchaus mehrere Monate lange Lücken oder andere Auffälligkeiten.

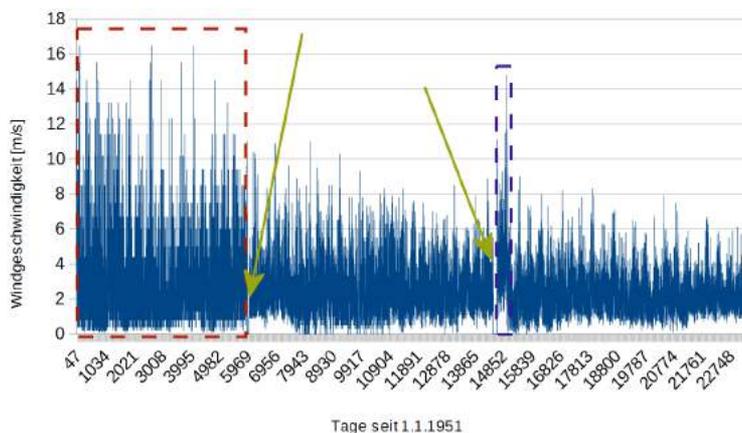


Abbildung 4.32: Zeitlicher Verlauf des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit an der Station Halle für den Zeitraum 1951–2014. Auffälligkeiten sind durch Rahmen und Pfeile hervorgehoben.

Auch wenn eine Zeitreihe für einen langen Zeitraum verfügbar ist, wie beispielsweise bei der Station Halle (Abb. 4.32), so besitzt diese Auffälligkeiten, die sie von der Verwendung für Trendberechnungen ausschließt. Dort finden sich bis 1967 fast ausnahmslos nur bestimmte Werte (0,2; 0,4; 0,8; 1,3; 1,9; 2,5; 3,0; 3,8; 4,4 ...). Der rote gestrichelte Rahmen in Abb. 4.32 kennzeichnet diese

„Phase der Stufigkeit“. Danach tritt eine mehrmonatige Lücke in Erscheinung (linker grüner Pfeil in Abb. 4.32). Eine weitere längere Lücke gibt es im Jahr 1990 (rechter grüner Pfeil in Abb. 4.32). Dazwischen sind bei genauem Hinsehen weitere „Phasen der Stufigkeit“ auszumachen. Für fast das gesamte Jahr 1991 gibt es ein auffälliges erhöhtes Wertenniveau (blauer, gestrichelter Rahmen in Abb. 4.32). Danach sind Auffälligkeiten nicht mehr erkennbar.

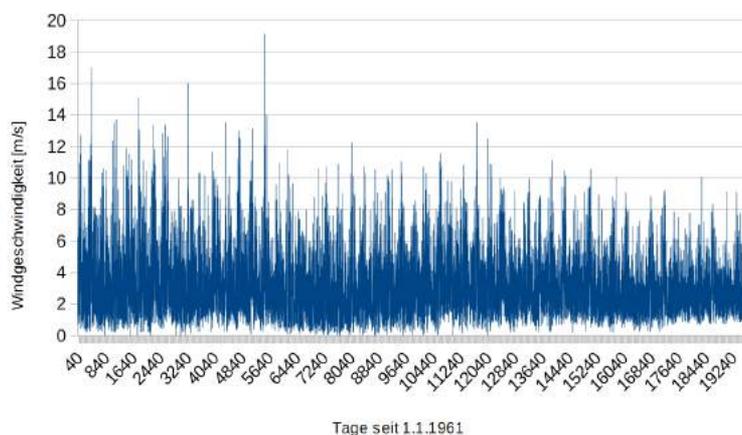


Abbildung 4.33: Zeitlicher Verlauf des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit an der Station Gardelegen für den Zeitraum 1961–2014.

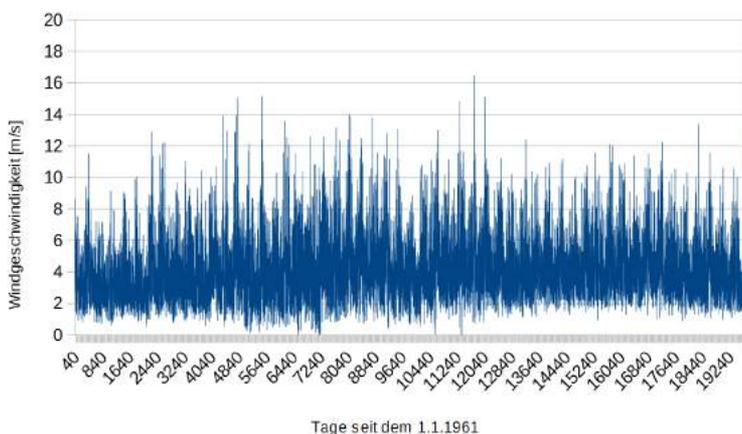


Abbildung 4.34: Zeitlicher Verlauf des Tagesmittels der Windgeschwindigkeit an der Station Schkeuditz für den Zeitraum 1961–2014.

Die Datenreihen aus dem Bestand der DWD-Agrarmeteorologie beginnen zwar erst 1961, sie wurden jedoch für die Analysen von Windtrends benutzt. Ein wichtiger Vorteil ist deren Lückenlosigkeit. Als Beispiel ist in Abb. 4.33 das Tagesmittel der Windgeschwindigkeit an der Station Gardelegen gezeigt. Dort gibt es zwar möglicherweise auch Mess-Artefakte, denn die *niedrigsten* aus den Registrierungen berechneten Tagesmittel der Windgeschwindigkeit weisen einen uneinheitlichen Verlauf über den gesamten Zeitraum auf.

Der Effekt des „uneinheitlichen Windminimums“ ist auch in der Reihe der Tagesmittel der Windgeschwindigkeit an der Station Schkeuditz (Abb. 4.34) erkennbar. Für lange Zeiträume, speziell im letzten Drittel der Reihe, werden keine Tagesmittel unter 1 m/s bestimmt.

All dies rechtfertigt den Hinweis, dass die Zeitreihen mit einem gewissen Vorbehalt analysiert werden, da weitere Artefakte, beispielsweise durch die wechselnde Instrumentierung oder bauliche Veränderungen in der Umgebung der jeweiligen Station, zu erwarten sind.

Langzeitveränderungen können mit bloßem Auge aus den Darstellungen in Abb. 4.33 und 4.34 abgelesen werden. Um diese Trends besser analysieren zu können, erfolgte die Aggregierung der Tagesmittel zu Jahresmitteln. Anhand der Stationen Wittenberg und Schkeuditz ist dies in Abb. 4.35 gezeigt.

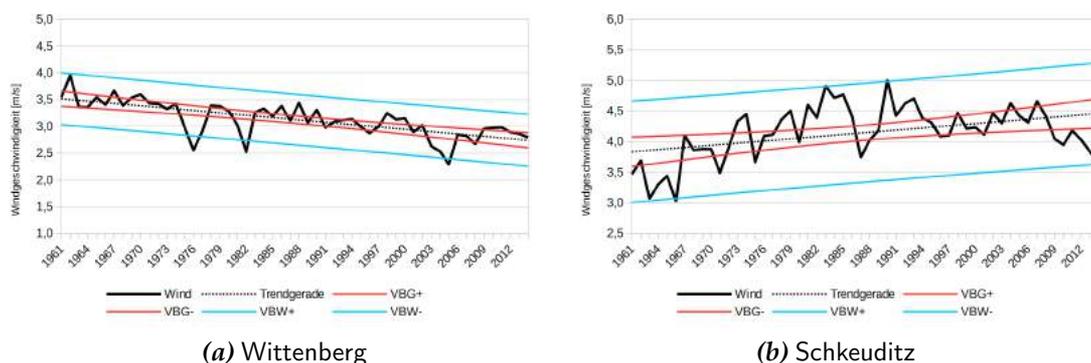


Abbildung 4.35: Entwicklung der Windgeschwindigkeit an den Stationen Wittenberg (links) und Schkeuditz (rechts) im Jahresmittel. Die durchgezogenen schwarzen Linien stellen die Jahresmittel dar, die gestrichelte Linie ist der lineare Trend. Die beiden roten Linien zeigen den Vertrauensbereich (95 %-Niveau) der Trendgeraden an. Die beiden blauen Linien zeigen den Vertrauensbereich der Jahresmittelwerte an.

Für die Station Wittenberg [Abb. 4.35 (a)] findet sich ein *Abnahmetrend*. Er ist ausgeprägt, denn der Vertrauensbereich der Trendgeraden (rote Linien) zeigt, dass alternative Positionen der Trendgeraden zwar möglich sind, aber keine von diesen Positionen einen entgegengesetzten Trend anzeigen würde. Mögliche Ausreißerjahre mit relativ niedrigem Jahresmittel der Windgeschwindigkeit sind 1976, 1982 und 2005. Entgegengesetzt stellt sich die Entwicklung der Windgeschwindigkeit an der Station Schkeuditz [Abb. 4.35 (b)] dar, wo ein gut ausgeprägter *Zunahmetrend* analysiert wird. Der „Aufenthaltsbereich“ der Trendgeraden (eingefasst durch die roten Linien) zeigt auch bei Schkeuditz an, dass alternative Lagen dieser Geraden zwar im Bereich des Möglichen sind, jedoch keine entgegengesetzte Neigung der Trendgeraden zu erwarten ist. Der Zunahmetrend in der Reihe von Schkeuditz ist zudem besonders in den Jahren bis etwa 2007 ausgeprägt. Kandidaten für Ausreißer mit besonders niedrigem Jahresmittel der Windgeschwindigkeit sind in Schkeuditz die Jahre 1963, 1966 und

2014; relativ hohe Jahresmittel, die in die Nähe des 95 %-Vertrauensbereiches der Werte gehen, finden sich in den Jahren 1983 und 1990. Der Mann-Kendall-Test ergab, dass die Trends an beiden Stationen auf dem 99 %-Niveau statistisch signifikant sind.

Nach Rücksprache mit dem DWD ist durchaus Vertrauen in die Anstiegstrends der Reihe von Schkeuditz zu setzen. Diese gehört zu einem Flughafen – Windmessungen müssen dort besonders hohen Qualitätsstandards genügen. Zudem sind im relativ offenen Gelände kleinere Stationsverlagerungen weniger gravierend als bei Stationen in stark gegliedertem Gelände.

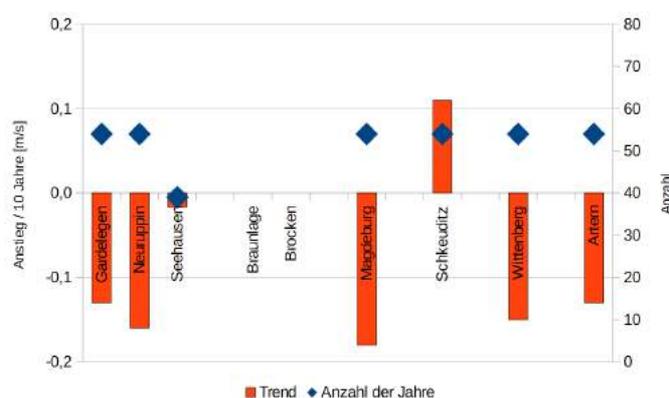


Abbildung 4.36: Trends des Jahresmittels der Windgeschwindigkeit für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang in m/s pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Die Reihen des Jahresmittels der Windgeschwindigkeit an ausgewählten Stationen mit langen Reihen (s. Abb. 4.36) zeigen überwiegend Abnahmetrends oder keine Trends. Eine Ausnahme bildet die Station Schkeuditz mit einem ausgeprägten Zunahmetrend.

Dem Trend der Windgeschwindigkeitsreihe von Schkeuditz ist nach Hinweisen des DWD dabei durchaus zu vertrauen – es sei aber hinzugefügt, dass Windmessreihen komplexe Charakteristika besitzen, da über die Zeit verschiedene Mess- und Korrekturmethode verwendet wurden. Eine abschließende Beurteilung würde Untersuchungen erfordern, die zu umfangreich für diese Studie sind.

4.2.7 Windrichtung

Eine Trenddarstellung wie in den vorherigen Abschnitten ist für die Windrichtung nicht möglich. Die Darstellung von Zuständen und Veränderungen erfolgt statt dessen in Form von Windrosen für verschiedene Zeithorizonte, um mögliche Spezifika herauszuarbeiten. Es wurden zwei Stationen zur Analyse gewählt: Brocken und Artern – sie stellen sehr unterschiedliche Windregimes dar.

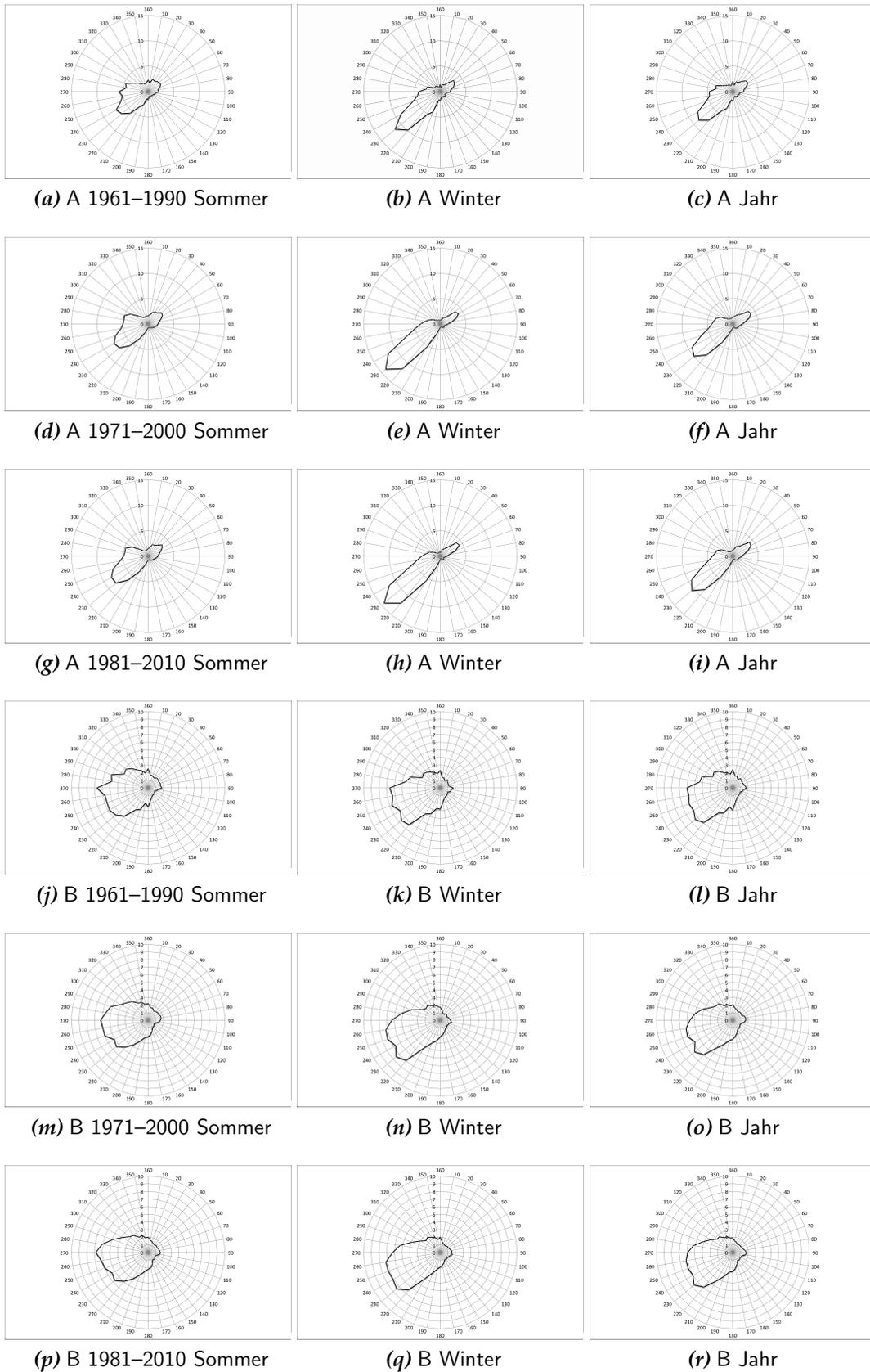


Abbildung 4.37: Verteilung der Windrichtungen für Sommer, Winter und Jahr in verschiedenen 30-jährigen Perioden an den Stationen Artern (A) und Brocken (B).

Wesentliche Unterschiede zwischen den Stationen Brocken und Artern (Abb. 4.37) sind, dass es am Brocken keine so dominanten Windrichtungen gibt wie in Artern und dass die Windrichtung 0 (windstill oder keine Windrichtung angebar) am Brocken fast gar nicht auftritt, aber in Artern in 12–15 % der Zeit.

Artern zeigt für die Jahressumme eine leichte Tendenz, dass zu späteren Zeitabschnitten die Richtungen SW (230°) und NO (60°) häufiger auftreten, insbesondere im Winter. Im Sommer gab es keine sichtbaren Änderungen.

Am Brocken sind fast gleich verteilt vorherrschende Windrichtungen die Richtungen 220° bis 270° für die Jahressicht. Diese wird wesentlich durch die Wintermonate geprägt. Systematische Veränderungen sind über die Zeit nicht erkennbar.

4.2.8 Meteorologische Messreihen des LÜSA

Das Luftüberwachungssystem Sachsen-Anhalt (LÜSA) misst neben luftchemischen Parametern auch einige meteorologische Größen. Der Hintergrund ist in Abschnitt 2.1.6 dargestellt. Die Stationen messen im 30-minütigen Takt, verfügen aber in der Regel über relativ kurze Messreihen – es gibt seit 1994 Registrierungen, aber vielfach sind die Reihen deutlich kürzer und damit können Trenduntersuchungen nicht durchgeführt werden.

Die Standorte der LÜSA-Stationen stellen Alternativen und Ergänzungen zu den übrigen Messnetzen mit meteorologischer oder agrarwissenschaftlicher Auslegung dar. Die hohe zeitliche Dichte der Messungen könnte im Zusammenhang mit Studien von lokalen atmosphärisch-physikalischen Zusammenhängen nützlich sein. Dafür müsste dann aber eine weitere Qualitätskontrolle und Homogenisierung durchgeführt werden, was den Umfang dieses Vorhabens übersteigt.

In diesem Abschnitt wird der Fokus auf der Diagnose von Lücken in den LÜSA-Zeitreihen sowie in der Erstellung von Jahres- und Monatsmitteln der Lufttemperatur (TE) und der Windgeschwindigkeit (FF) liegen. Es liegen auch Windrichtungsdaten vor, aber diese wurden nicht in die Diagnose einbezogen.

Für diese vier Stationen wurden meteorologische Daten des LÜSA ausgewertet:

- Burg (TE und FF, 1994–2014 mit einer Lücke im Jahr 1997)
- Wernigerode Bahnhof (TE und FF, 1994–2014 durchgehend)
- Magdeburg West (TE und FF 1994/1995 und 2010–2014 TE)
- Bitterfeld (TE und FF ab 2000)

Grundlage der in Abb. 4.38 für die LÜSA-Stationen Burg und Wernigerode dargestellten Daten ist die Analyse, wie häufig in einem Jahr Messwerte in den

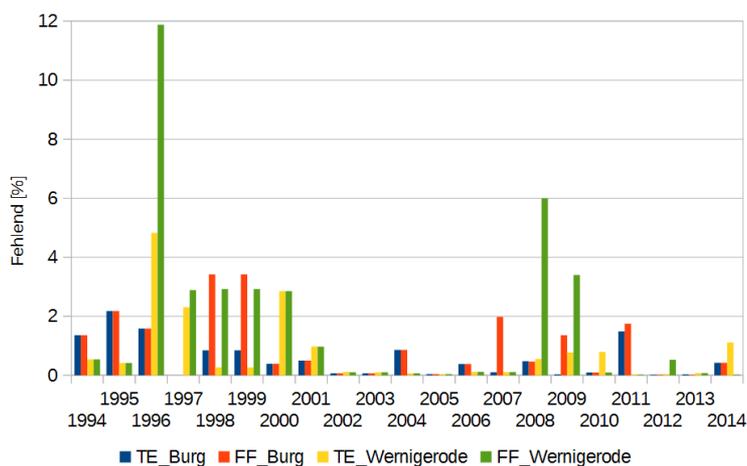


Abbildung 4.38: Prozentualer Anteil der Datenlücken im Jahr für die LÜSA-Stationen Burg und Wernigerode für die Messgrößen Temperatur (TE) und Windgeschwindigkeit (FF).

Zeitreihen fehlen. Diese Zahl kann sich für die Temperatur- bzw. Windmessungen unterscheiden. Es zeigt sich, dass auch bei der Station mit der besten Abdeckung (Wernigerode, gelbe und grüne Balken in Abb. 4.38) aufgrund von Datenlücken in einzelnen Monaten 3 und mehr Prozent der Daten fehlen können. Auch bei Burg ist in einigen Jahren die Datenbasis reduziert.

Die Stationen Magdeburg und Bitterfeld (s. Abb. 4.39) liegen nicht für alle Jahre vor. Sie werden in den nachfolgenden Analysen aber zur Orientierung hinzugezogen.

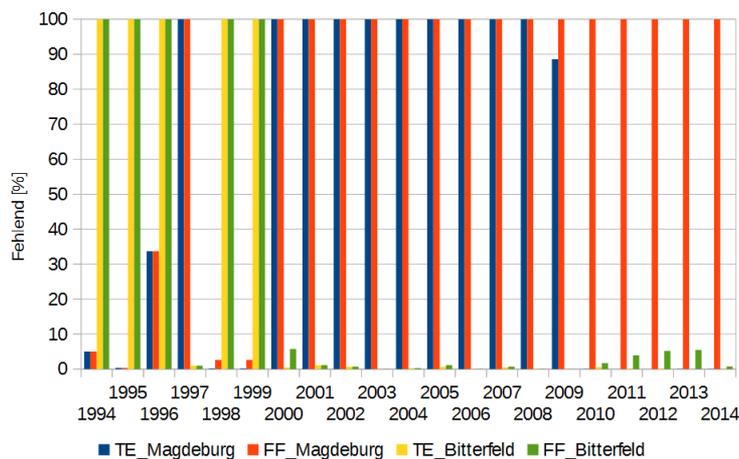


Abbildung 4.39: Prozentualer Anteil der Datenlücken im Jahr für die LÜSA-Stationen Magdeburg und Bitterfeld für die Messgrößen Temperatur (TE) und Windgeschwindigkeit (FF).

In Abb. 4.40 sind die Monatsmittel für die beiden Stationen Burg und Wernigerode wiedergegeben. Es ist zu beachten, dass die Datenbasis für beide nicht aus dem vollständigen Zeitraum 1994–2014 stammt – aber sofern hinreichend viele Werte verfügbar sind, werden sie einbezogen.

4.2 Analyse von meteorologischen Standardgrößen

Abb. 4.41 zeigt die Jahresmittel der Temperatur und der Windgeschwindigkeit für die vier analysierten Stationen. Die Stationen Burg und Wernigerode sind dabei als durchgezogenen Linien geplottet, sofern die Datenlage die Ermittlung von Jahresmittel erlaubt. Wenn für die Stationen Magdeburg und Bitterfeld Daten verfügbar und hinreichend vollständig sind, wurden zu den entsprechenden Jahren Dreieckssymbole in die Grafik eingetragen.

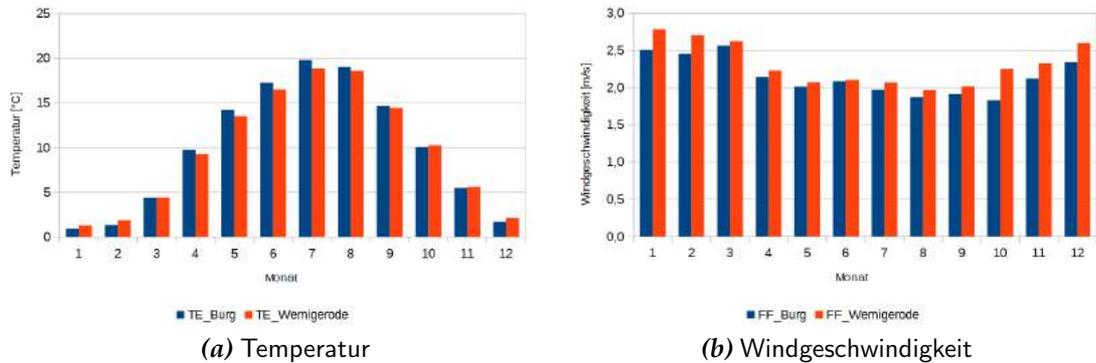


Abbildung 4.40: Monatsmittel der Temperatur (links) und der Windgeschwindigkeit für die Stationen Burg (blaue Balken) und Wernigerode (rote Balken).

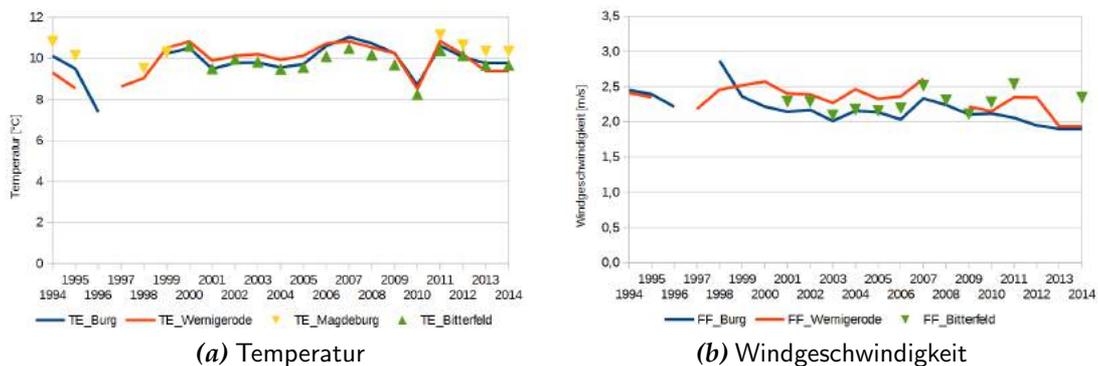


Abbildung 4.41: Jahresmittel der Temperatur (links) und der Windgeschwindigkeit für die Stationen Burg (blaue Linie), Wernigerode (rote Linie), Magdeburg (gelbe Dreieckssymbole, nur TE) und Bitterfeld (grüne Dreieckssymbole).

4.3 Klima-Entwicklungen anhand von abgeleiteten Klimagrößen – AP 3

Im Vorfeld des Vorhabens wurde in Zusammenarbeit mit Nutzern ein umfangreicher Katalog an abgeleiteten Klimagrößen und anderen Indikatoren zusammengestellt, die für die Kommunikation des Klimawandels oder die Verwendung in Wirkmodellen, beispielsweise für die Wasserhaushaltsmodellierung, von Bedeutung sind. Darüber hinaus erging der Auftrag, diesen Katalog in Zusammenarbeit mit dem Begleitkreis zu erweitern. Die ganze Bandbreite der untersuchten Größen und Indikatoren an dieser Stelle vorzustellen, erscheint unvorteilhaft. Daher findet sich in Anhang B eine umfangreiche Beschreibung der Analysen mit zahlreichen Beispielen, Abbildungen und Tabellen. In diesem Kapitel werden besonders interessante, durchaus auch überraschende Ergebnisse vorgestellt – für zusätzliche Informationen und mehr Hintergrund sei auf den Anhang verwiesen.

Zudem gehört zum Vorhabens eine umfangreiche Zusammenstellung von Tabellendateien, Grafik-Dateien, Dokumentationen und anderem berichtsrelevanten Material. Inhalt und Struktur dieser Daten sind in den einzelnen Teilen des Anhangs ebenfalls dokumentiert.

Zahlreiche abgeleitete Größen und Indikatoren basieren auf den *meteorologischen Standardparametern*. Diese besitzen selbst zum Teil ein Trendverhalten, worauf im Abschnitt 4.2 eingegangen wird.

Dieses Kapitel ist in verschiedene Themenbereiche gegliedert: In Abschnitt 4.3.1 werden Temperaturänderungen anhand relevanter Indikatoren vorgestellt. Analysen zu Niederschlagsveränderungen finden sich in Abschnitt 4.3.2 und Analysen zu Veränderungen bei der Windgeschwindigkeit sind Thema des Abschnitts 4.3.3.

4.3.1 Indikatoren zu Temperaturveränderungen

Wenn wir von einem sich erwärmenden Klima berichten, dann bezieht sich diese Aussage zunächst auf den mittleren Zustand – es ist nicht selbstverständlich, dass sich diese Erwärmung im gleichen Sinne in abgeleiteten Größen wiederfinden lässt. Die Erfahrung lehrt, dass auch bei Temperaturzunahme z.B. gelegentlich besonders kalte Winter auftreten. Das Verhalten von Extremen hat eine zusätzliche Dynamik, denn es ist auch an Veränderungen der *Klimavariabilität* gekoppelt.

Zur Messung von Klimaveränderungen im Bereich der Extreme bieten sich Kenntage an. Sie sind verbreitet genutzte Indikatoren und stellen sicher, dass diese Beschreibungen in standardisierter Form erfolgen, die mit anderen Untersuchungen vergleichbar sind. Temperaturbezogene Kenntage (ausführlich in Anhang B.1 beschrieben) sind beispielsweise die Eis-, Frost- und Sommertage sowie die heißen Tage und die Tropennächte.

4.3 Klima-Entwicklungen aus abgeleiteten Klimagrößen – AP 3

Zur Veranschaulichung ist in Abb. 4.42 dargestellt, wie sich die Zahl der Frosttage (das Minimum der Temperatur liegt unter 0 °C) bei einer hoch gelegenen Station (Brocken) und einer Flachlandstation (Wittenberg) verändert hat.

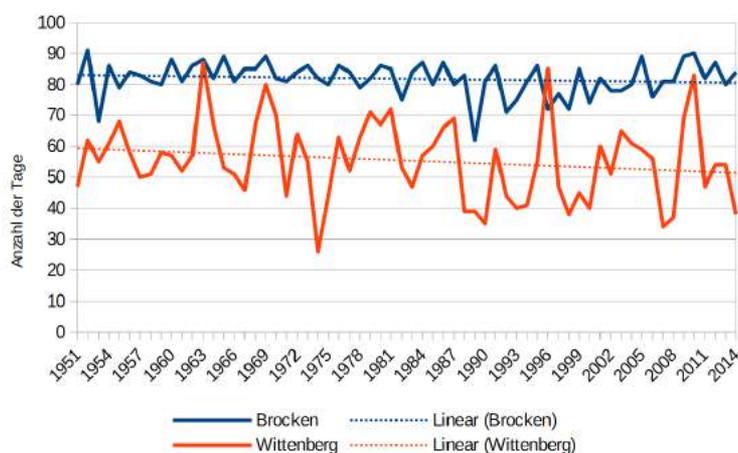


Abbildung 4.42: Zeitliche Entwicklung der Zahl der Frosttage in den Wintermonaten (Januar, Februar, Dezember) eines Jahres an den Stationen Brocken und Wittenberg. Die gestrichelten Linien geben den Trend wieder.

Es ist erkennbar, dass die zeitliche Entwicklung für die beiden Stationen zwar in die selbe Richtung verläuft, dabei aber unterschiedliche Ausprägungen hat. Zudem unterliegt dieser Indikator bei der Flachlandstation viel größeren Schwankungen von Jahr zu Jahr.

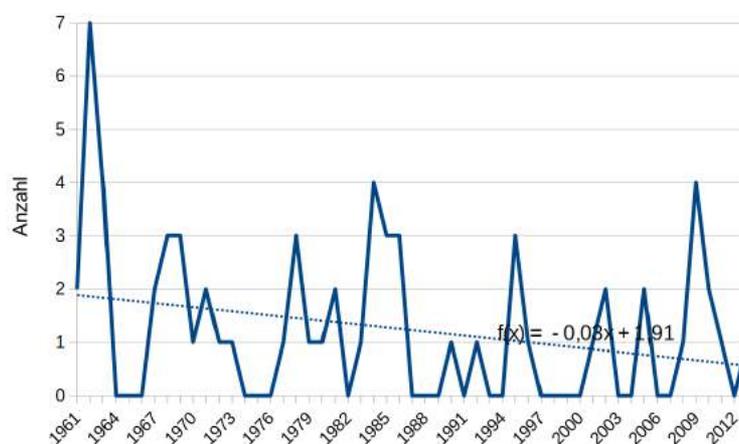


Abbildung 4.43: Zeitliche Entwicklung der Anzahl von Kälteperioden mit mindestens 3 Tagen Dauer an der Station Magdeburg. Die gestrichelte Linie gibt den Trend wieder.

Im Beispiel wurde ein fester Bezugswert gewählt – das mag zwar aus Gründen der Vergleichbarkeit praktisch sein, aber die Temperatur 0 °C stellt für eine Bergstation einen anderen Grad von „Normalität“ dar als für eine Flachlandstation. Schwellen einer Größe können alternativ auch über *Perzentile* definiert werden. Dabei wird der *Wertebereich* (hier der Temperatur) an der Station

betrachtet und es werden Schwellen bestimmt, oberhalb derer sich beispielsweise die höchsten 10 % des gemessenen Wertebereichs befinden – und 90 % des Wertebereichs sich darunter befindet; in statistischer Nomenklatur ist dies das 90-Perzentil. Im übertragenen Sinn liegt also in einem Jahr (365 Tage) die Temperatur im Schnitt an rund 36 Tagen oberhalb des 90-Perzentils.

Für die Betrachtung von Kälte und Kältewellen wird beispielsweise ausgezählt, wie lang Serien von Tagen sind, an denen es „ungewöhnlich kalt“ war. Hier kommt das 10-Perzentil der Minimumtemperatur zum Einsatz – ein Maß dafür, wie kalt es im Winter im Schnitt nur an 10 % aller Tage ist, unabhängig davon, ob es eine Berg- oder eine Flachlandstation ist. In Abb. 4.43 ist die zeitliche Entwicklung solcher Perioden an der Station Magdeburg dargestellt. Ein Rückgang ist gut erkennbar, auch wenn in der jüngeren Vergangenheit immer wieder Winter mit einem erhöhten Anteil solcher Perioden in Erscheinung treten. Weiteres mit Schwerpunkt Kälte und kalte Nächte findet sich in Anhang B.14.

Noch ein interessanter, mit Temperaturminima im Zusammenhang stehender Sachverhalt wurde durch Vergleich der Trends der Minimumtemperatur am Erdboden und in der standardisierten Wetterhütte, also in 2 m Höhe gefunden. Die nächtliche Temperatur am Erdboden liegt durch Ausstrahlung (Zusammenhang mit Wolkenbedeckung!) und erhöhte Abkühlung (Zusammenhang mit geringer Windgeschwindigkeit!) oft deutlich unter der im meteorologischen Routinebetrieb gemessenen Temperatur in der Wetterhütte. Die Erwartungshaltung ist, dass sich beide Temperaturarten (Erdbodenminimum und Wetterhütten-Minimum) im Laufe der Zeit gleichsinnig verändern. Unerwarteterweise ist dies aber nicht der Fall.

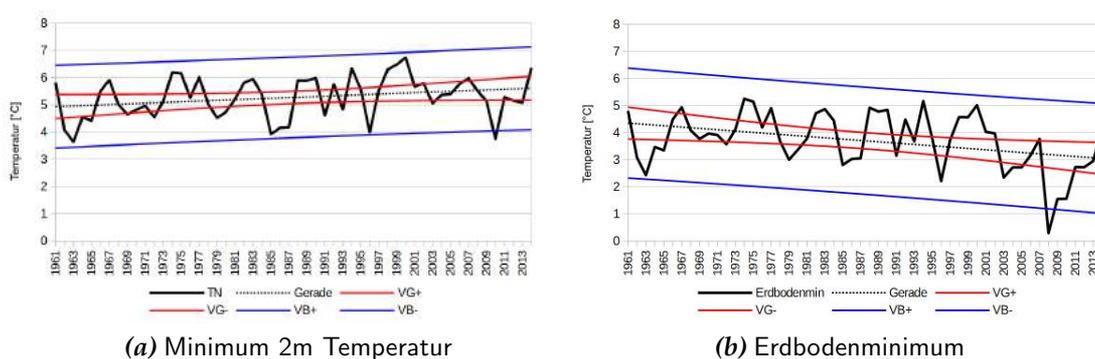


Abbildung 4.44: Entwicklung des Temperaturminimums in 2m Höhe an der Station Artern. Dargestellt sind die Verhältnisse für (a) das Minimum, in der Wetterhütte gemessen und (b) das Erdbodenminimum. Bestimmungszeitraum: Jahr. Die gestrichelte Linie ist die Trendgerade, die roten Kurven zeigen den Vertrauensbereich für die Lage der Trendgeraden an und die blauen Linien sind Bereichsanzeiger für mögliche Ausreißer.

Abb. 4.44 gibt die unterschiedlichen Trendentwicklungen wieder. Der Trend ist jahreszeitlich etwas unterschiedlich – im Winter ist er deutlich schwächer ausgeprägt, was mit der Messmethodik der Erdbodentemperatur zusammenhängt. Sie wird in einer festen Höhe über dem Erdboden gemessen und

kann bei einer Schneedecke verfälscht werden. Weitere Details dazu, auch bezüglich der Trendentwicklung in den Jahreszeiten, finden sich in Anhang B.7.

Aber es gibt auch Indikatoren, die ganz besonders deutlich die Erwärmung im gegenwärtigen Klima zeigen. Dazu gehört die Zahl der Heizgradtage, ein Maß zur Untersuchung der Winterstrenge. Für die Station Magdeburg ist in Abb. 4.45 ein Beispiel gegeben. Diese sehr deutliche Trendentwicklung findet sich jedoch auch an anderen Stationen.

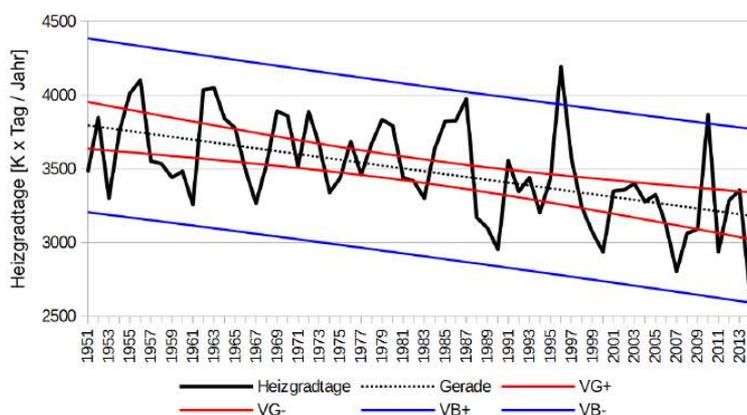


Abbildung 4.45: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Heizgradtage an der Station Magdeburg.

Weitere Details zu den Heizgradtagen finden sich in Anhang B.6; auch zu anderen Kälteindikatoren, wie den Kältesummen sind dort Beispiele und Abbildungen enthalten (Anhang B.5).

Nach der Beschreibung von Indikatoren, die Kälte und deren zeitliche Entwicklung darstellen, nun zu Indikatoren der Wärme. Auch hier ist die Analyse von Kenntagen ein wichtiger Weg.

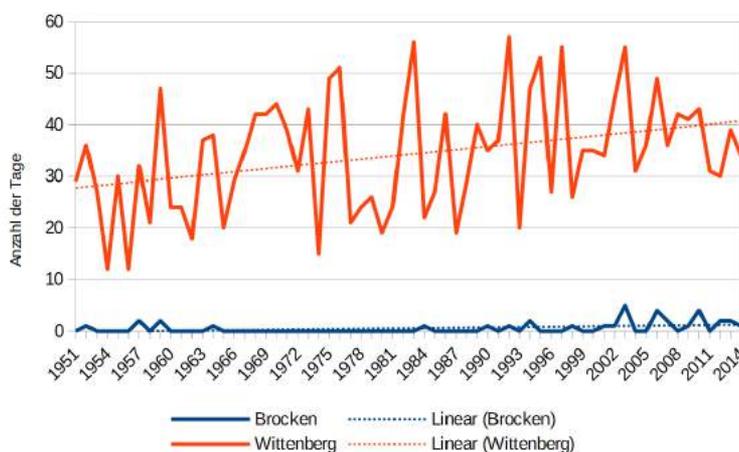


Abbildung 4.46: Zeitliche Entwicklung der Zahl der Sommertage an den Stationen Brocken und Wittenberg. Die gestrichelten Linien geben den Trend wieder.

Sommertage mit einem Maximum von 25 °C oder mehr auf dem Brocken? Ein seltenes Ereignis, aber eines, das, wie Abb. 4.46 zeigt, im Zunehmen begriffen

ist. Sehr viel deutlicher ist der Zunahmetrend der Sommertage jedoch bei der ebenfalls in Abb. 4.46 dargestellten Flachlandstation Wittenberg.

Eine weitere Charakteristik der Klimaerwärmung ist das häufiger werdende Auftreten von Hitzeperioden. Die Darstellung von Perzentilen kann helfen, extreme Zustände herauszuarbeiten, ohne dabei auf konkrete Temperaturniveaus angewiesen zu sein. Bei der Überschreitung des 90-Perzentils der Maximumtemperatur werden Tage identifiziert, die zu den „oberen 10 %“ der Temperaturskala an dieser Station gehören.

Für die Station Magdeburg sei ein Beispiel vorgestellt. In Abb. 4.47 wird die Häufigkeit von Perioden in den jeweiligen Sommermonaten (Juni–August) der Jahre 1961–2014 gezeigt, die das 90-Perzentil der Tagesmaximumtemperatur überschreiten. Auf der linken Seite werden Perioden von 6 Tagen und länger gesucht und auf der rechten Seite erfolgt die Identifikation von mindestens 3-tägigen Hitzeperioden. Die Zunahme im Laufe der Zeit ist nicht zu übersehen! Weitere Beispiele und Hintergrund zur Analyse von Hitzewellen findet sich in Anhang B.11.

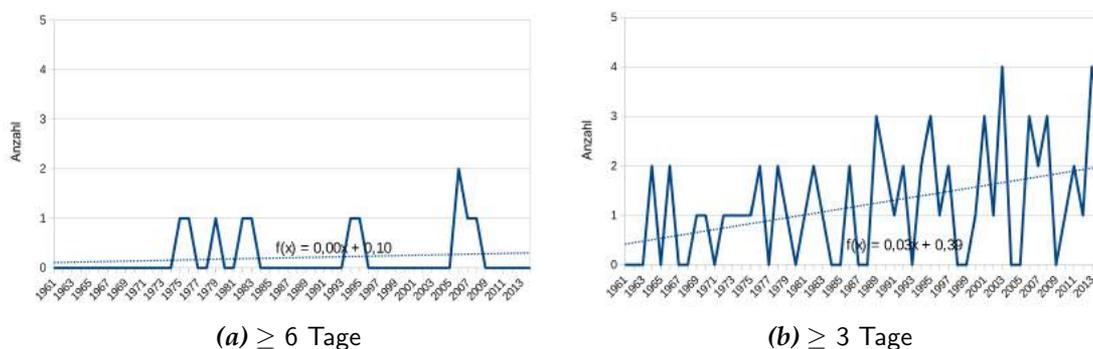


Abbildung 4.47: Anzahl der Perioden von 6 (links) und 3 (rechts) Tagen Länge an denen eine Überschreitung des 90-Perzentils der Maximumtemperatur in den Sommermonaten auftrat. Station: Magdeburg.

Ein anderes Maß für ein sich wandelndes Klima ist der Kenntage-Indikator „Tropennächte“, in denen die Temperatur nicht unter einen Wert von 20 °C fällt. Solche festen Schwellen sind physiologisch relevant. Es geht, wie beim häufiger werdenden Auftreten von Hitzewellen, um medizinisch relevante Belastungen des Organismus.

Tropennächte sind relativ selten, aber eine Häufung in den letzten Jahren zeichnet sich ab – veranschaulicht durch die Darstellung der Entwicklung an der Station Wittenberg in Abb. 4.48. Weitere Details zu Tropennächten finden sich in Anhang B.1.5.

Temperatur und Feuchte sind in der abgeleiteten Größe „Schwüle“ miteinander gekoppelt. Die Verbindung ist der Dampfdruck, ein Maß für die in der Luft enthaltene Menge an Wasserdampf. Hohe Schwüle hat ebenfalls physiologische Relevanz und eine Analyse der Entwicklung des Auftretens von Tagen mit solchen Bedingungen erfolgte im Rahmen des Vorhabens.

4.3 Klima-Entwicklungen aus abgeleiteten Klimagrößen – AP 3

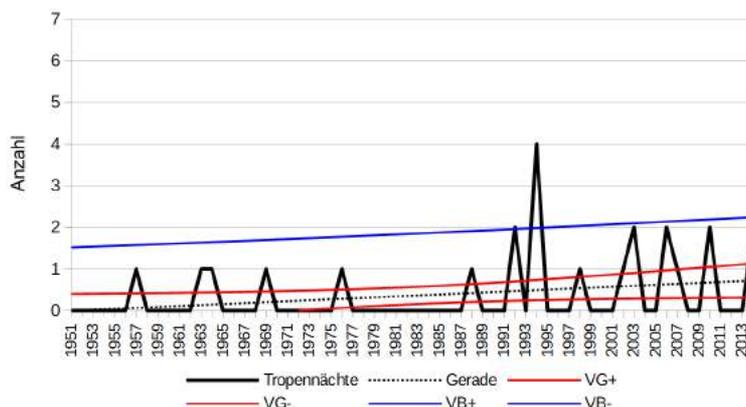


Abbildung 4.48: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Tropennächte an der Station Wittenberg.

Eine exemplarische Analyse für die Station Gardelegen ist in Abb. 4.49 wiedergegeben.

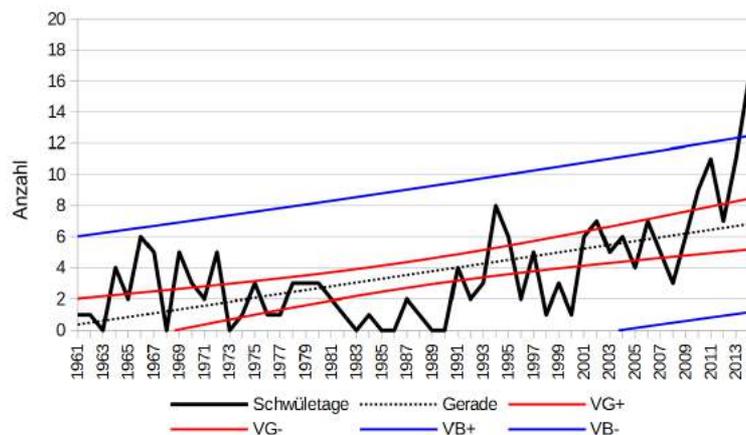


Abbildung 4.49: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Tage mit Schwüle an der Station Gardelegen.

Die Zahl der Tage pro Jahr, an denen Schwüle auftritt, ist relativ gering. Es gibt Jahre, in denen das Kriterium an keinem der Tage zutrifft. Auffällig ist jedoch auch die Häufung der Tage mit Schwüle in den Jahren nach 1990. Weitere Details finden sich in Anhang B.2.

Schließlich sei bezüglich der Entwicklung der hohen Temperatur noch auf die Kühlgradtage hingewiesen. In dieser Größe (auch in Anhang B.4 beschrieben) wird die klimatische Information zusammengefasst, mit der z.B. technische Lösungen zur Klimatisierung bemessen werden können.

Die Entwicklung der Kühlgradtage ist anhand der Station Wittenberg (Abb. 4.50) dargestellt. Der Anstiegstrend ist sehr deutlich. Besonders warme Jahre werden verstärkt seit den 1990ern beobachtet.

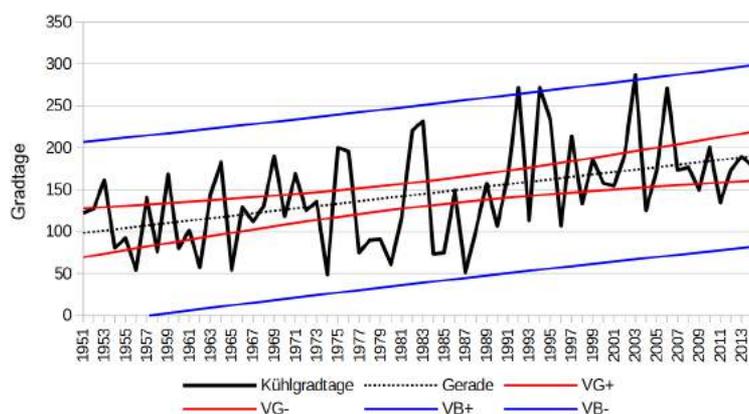


Abbildung 4.50: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Kühlgradtage an der Station Wittenberg.

4.3.2 Indikatoren zu Niederschlagsveränderungen

Der Niederschlag ist auf komplexe Weise mit der Klimaerwärmung verbunden. Es gibt eine Vielzahl von rückgekoppelten Prozessen. Bei Temperaturzunahme wirken diese zum Beispiel in Form von Veränderungen der großräumigen Zirkulation. Aber auch Faktoren wie das Aufnahmevermögen für Wasserdampf in einer wärmer werdenden Atmosphäre und die Wirkung von Wasserdampf als Treibhausgas sind Teile des Wirkkomplexes.

Im Rahmen des Vorhabens wurde in AP 2 zunächst eine Trenduntersuchung der Niederschlagsmessungen durchgeführt (s. Abschnitt 4.2.2). Sie ergibt ein nicht immer einheitliches Bild der Niederschlagsentwicklung im Klima der vergangenen 50–60 Jahre. Trends sind zum Teil gut ausgeprägt, aber zum Teil auch kaum nachweisbar. Es zeichnet sich aber, unterstützt von einer Reihe von Stationen, ab, dass der Niederschlag tendenziell – aber nicht an allen Stationen – im Sommer ab- und im Winter zunimmt.

Unter den Kenntagen befinden sich auch Maße für Starkniederschlag, gekoppelt an die Häufigkeit von Tagesniederschlagsmengen von 10 bzw. 20 mm. Wie die Untersuchungen (vgl. Anh. B.1.6 und B.22) zeigen, gibt es große Unterschiede zwischen den Trends an Berg- und Flachlandstationen.

Zur Illustration ist die Entwicklung des Extremniederschlagstrends (Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag) in Abb. 4.51 dargestellt. Für die Bergstation Brocken ist dabei ein klarer Zunahmetrend dieser dort ohnehin häufig auftretenden Ereignisse erkennbar, während es bei der Flachlandstation solche Ereignisse relativ selten gibt und ein Trend nicht erkennbar ist. Weitere Trenduntersuchungen zu anderen Niederschlagsstufen sind in Anhang B.22 zu finden. Zudem gibt es einen weiteren Schwerpunkt des Vorhabens mit Bezug zu Extremniederschlag, der in Abschnitt 4.4.2 beschrieben wird. Bezüge zu Niederschlag, aber auch Temperatur haben auch die Untersuchungen des Waldbrandindex, beschrieben in Anhang B.25.

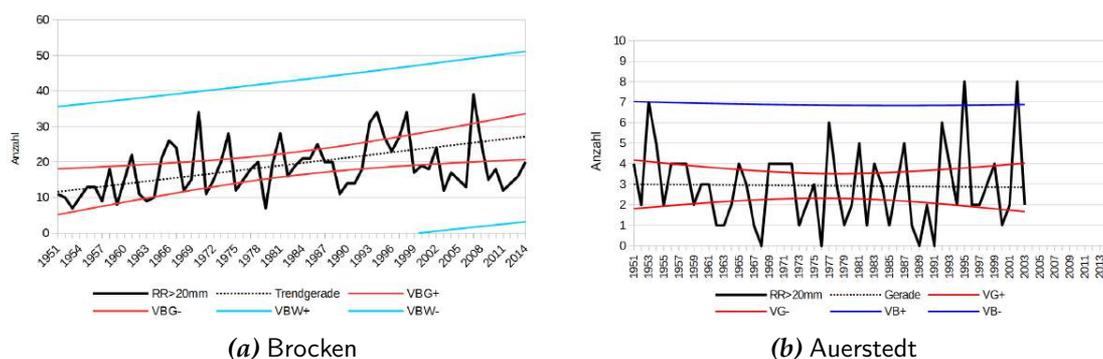


Abbildung 4.51: Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Tage mit einem Niederschlag über 20 mm an den Stationen Brocken (links) und Auerstedt (rechts).

Ein weiterer erwähnenswerter Vergleich fand im Rahmen dieses Vorhabens für den Indikator „Maximaler 5-Tage Niederschlag“ statt. Details finden sich in Anhang B.21.

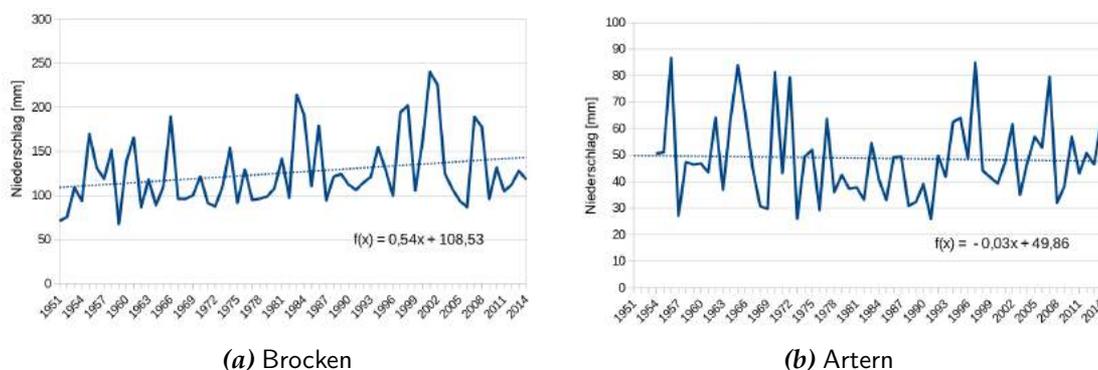


Abbildung 4.52: Zeitliche Entwicklung des maximalen 5-Tage-Niederschlags an den Stationen Brocken und Artern.

Wie Abb. 4.52 anhand der Entwicklung des 5-tägigen Maximalniederschlags für eine Berg- und eine Flachlandstation zeigt, stützt diese Untersuchung die These, dass Trendentwicklungen beim Extremniederschlag von der Höhenlage der Station abhängig sein könnten. Die für die Station Brocken durchgeführte Analyse des mittleren maximalen Tagesniederschlags (vgl. Anhang B.20) erbringt ebenfalls Hinweise zu gut sichtbaren Veränderungen an einer hoch gelegenen Station.

Es fanden zudem Untersuchungen mit Trockenheitsindikatoren statt – beispielsweise in Form einer Analyse von Trockenheitsperioden in Anhang B.19.

Zusammenhänge von Niederschlag/Trockenheit und Vegetation wurden außerdem in den phänologischen Untersuchungen betrachtet. Es konnten Beziehungen zwischen Winterniederschlägen und dem Beginn der Frühjahrespha-

sen sowie den Frühjahresniederschlägen und dem Beginn der phänologischen Sommerphasen gezeigt werden – s. Abschnitt 4.7.5.2.

4.3.3 Indikatoren zu Veränderungen beim Wind

Auch Veränderungen des Windes in den letzten 50–60 Jahren wurden analysiert. Für die Schwelle 8 m/s, wie sie in den Kenntagen vorgesehen ist (s. Anhang B.1.8) konnten sowohl Zunahme, als auch Abnahmetrends nachgewiesen werden. Dies zeigt z.B. Abb. 4.53 für die Station Schkeuditz (Leipzig/Halle)⁶⁾.

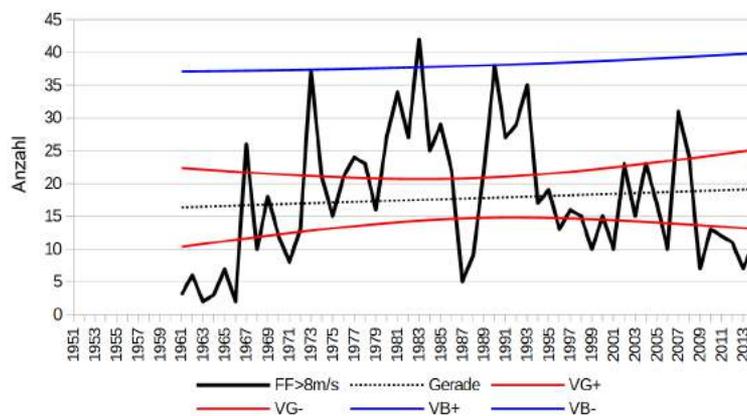


Abbildung 4.53: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Tage mit einem Mittelwind von 8 m/s oder mehr an der Station Schkeuditz.

Windmessungen haben eine besonders komplexe Historie. Sowohl die Vorschriften zur Messung als auch die Methodik und Technik hat sich über die Zeit umfassend gewandelt. Entsprechend vielschichtig sind die Möglichkeiten, dass sich in den Messreihen Artefakte dieser Historie finden. Einige Betrachtungen dazu finden sich in Abschnitt 4.2.6.

Die Analyse von windschwachen Situationen und deren Entwicklung in den letzten 50–60 Jahren ist ebenfalls ein vielschichtiges Unterfangen. Hier ist besonders der Einfluss der Mess-Technik zu bemerken. Allerdings sind die gefundenen Trendentwicklungen in der Regel nur von geringer statistischer Signifikanz.

⁶⁾In den verschiedenen Datensätzen, die im Projekt verwendet wurden, ist die Benennung der Station am Flughafen Leipzig/Halle nicht einheitlich. Sie wird zum Teil mit „Leipzig/Halle“ oder „Leipzig-Halle“ oder „Schkeuditz“ bezeichnet.

4.4 Extreme Ereignisse – AP 4

4.4.1 Klimaentwicklungen in verschiedenen Extremstufen

4.4.1.1 Perzentil-Untersuchung der Klimaentwicklungen in verschiedenen Extremstufen

In diesem Arbeitspaket wird der Frage nachgegangen, ob Trends möglicherweise in verschiedenen Extremstufen unterschiedlich ausgeprägt sind. Die dazu notwendigen Analysen sind sehr umfangreich. Anhand einiger Beispiele sollen Grundzüge der klimatischen Entwicklungen erläutert werden. [Abbildung 4.54](#) zeigt dies für das Temperaturmaximum an der Station Wittenberg. Die x-Achse gibt die verschiedenen Quantile vom Perzentil P2 (2 % des Wertebereichs liegt darunter, 98 % darüber) in Schritten von 2 % bis zum P98 an. Die y-Achse ist in Trendstärke pro Dekade skaliert.

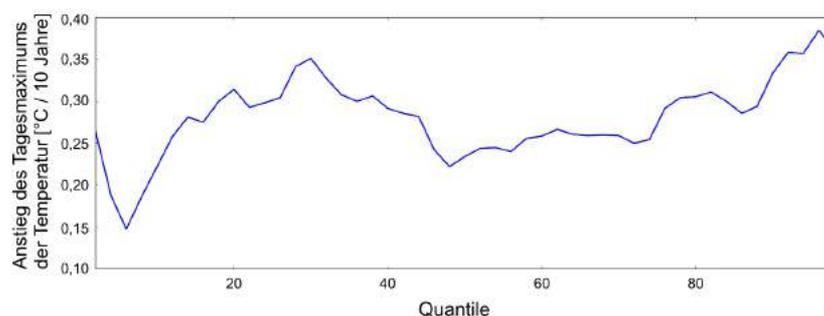


Abbildung 4.54: Trends der Tagesmaximumtemperatur an der Station Wittenberg in verschiedenen Quantilen. Betrachtungszeitraum: Jahr.

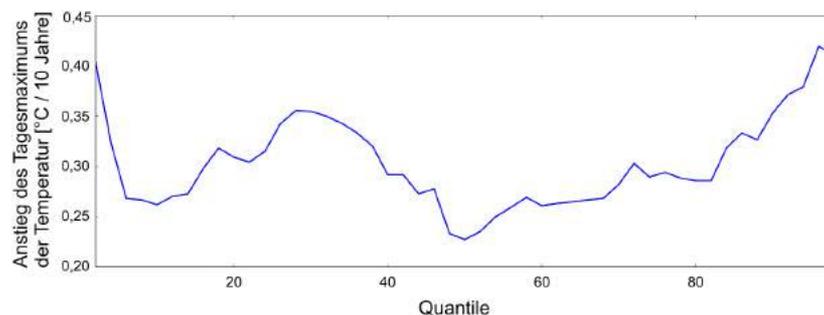


Abbildung 4.55: Trends der Tagesmaximumtemperatur an der Station Artern in verschiedenen Quantilen. Betrachtungszeitraum: Jahr.

Für die Maximumtemperatur ist eine Präferenz zu stärkeren Trends in den höheren Quantilen zu verzeichnen, das heißt in den oberen Extrembereichen hat es in den letzten 60 Jahren ausgeprägtere Entwicklungen gegeben als in weniger extremen Bereichen. Uneinheitlich ist dagegen die Trendentwicklung im Bereich der relativ niedrigen Temperaturmaxima, die für relativ kalte Tage stehen.

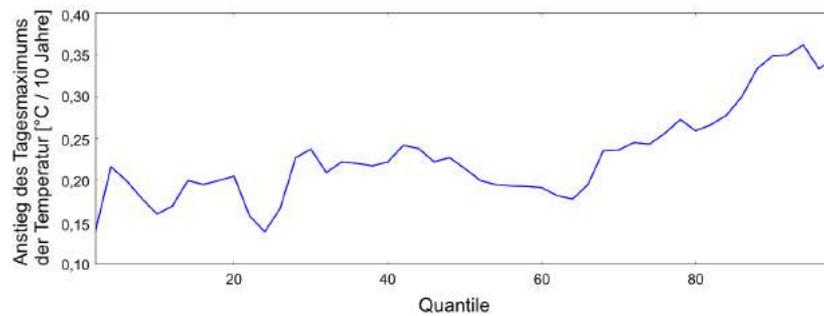


Abbildung 4.56: Trends der Tagesmaximumtemperatur an der Station Brocken in verschiedenen Quantilen. Betrachtungszeitraum: Jahr.

Interessanter und auch einheitlicher sieht das Bild bei den auf Quantile bezogenen Entwicklungen des *Tagesniederschlags* aus. In Abb. 4.57 und 4.58 sind diese für die Stationen Artern und Brocken zusammengestellt.

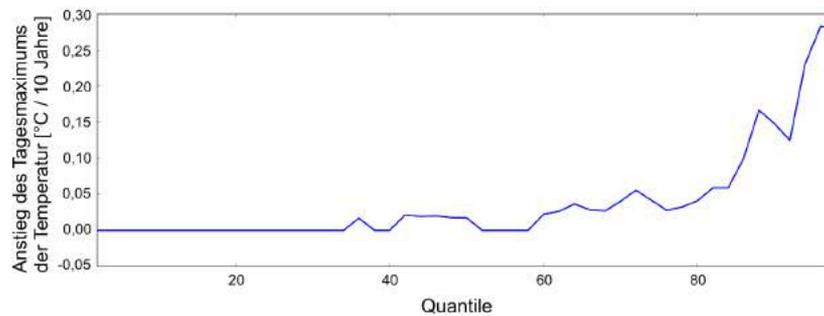


Abbildung 4.57: Trends des Niederschlags an der Station Artern in verschiedenen Quantilen. Betrachtungszeitraum: Jahr.

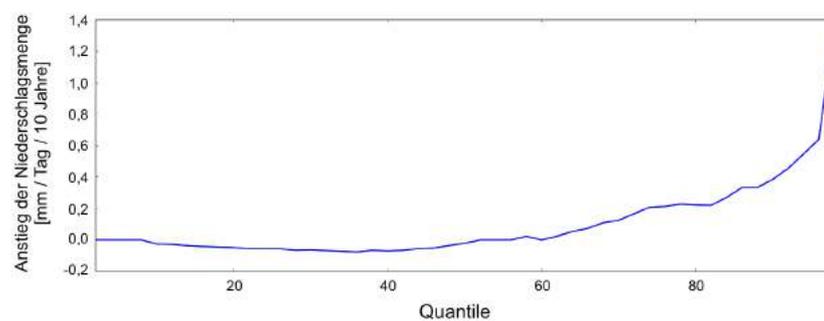


Abbildung 4.58: Trends des Niederschlags an der Station Brocken in verschiedenen Quantilen. Betrachtungszeitraum: Jahr.

Im Mittel besitzt der Niederschlag keine deutlichen Trendentwicklungen, jedoch sieht dies bei den Quantilen anders aus: Der Einfluss der hohen und sehr hohen Perzentile ist unübersehbar.

Die Quantiltrends wurden für alle in der Liste im Anhang A.1 aufgeführten Stationen bestimmt⁷⁾.

4.4.1.2 Konfidenzintervalle für die Klimaentwicklungen in verschiedenen Extremstufen

Mit Hilfe eines Bootstrap-Verfahrens⁸⁾ wurde für die Stationen Artern und Brocken außerdem eine weitere Verfeinerung der Quantil-Regressionen durchgeführt. Damit kann ein Eindruck gewonnen werden, in welchen Bereichen die Quantil-Regressionen wie stark schwanken.

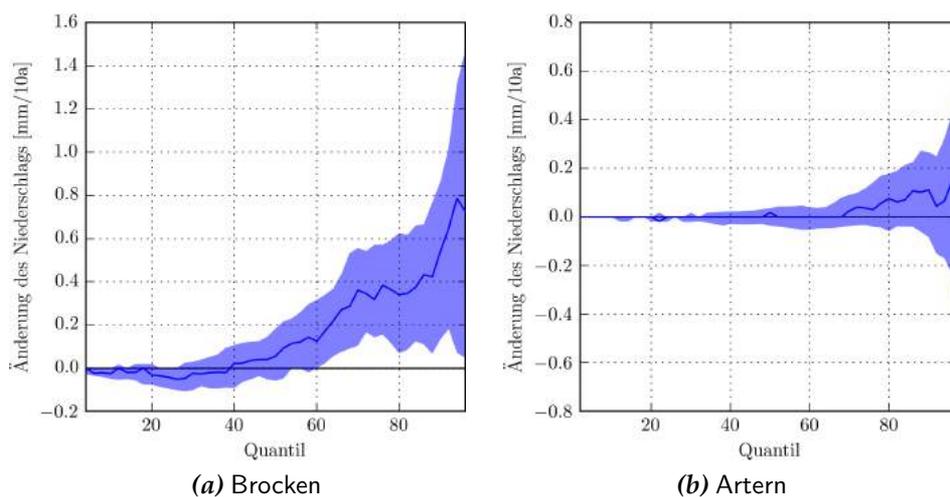


Abbildung 4.59: Quantil-Regression mit Bootstrap-Konfidenzintervallen (blau gefärbter Bereich) in den Wintermonaten (DJF) an den Stationen Brocken und Artern.

Wie Abb. 4.59 zeigt, ist für eine Station mit hohem Jahresniederschlag (Brocken) auch im Bereich der hohen Perzentile (über 80) ein Trend in jedem Fall auf der positiven Seite: Der blau markierte Bereich liegt immer über 0. Das ist ein Indiz dafür, dass diese Trend eine relativ hohe Belastbarkeit besitzen. Für eine Flachlandstation (Artern) hingegen kann ein Trend in diesem Quantilbereich auch negativ sein und die Belastbarkeit von Trendaussagen ist relativ gering.

⁷⁾Die zugehörigen Dateien finden sich auf dem projektbegleitenden Datenträger im Verzeichnis `Quantil.Regression`. Das Unterverzeichnis `data` beinhaltet Tabellen für jede Station in den vier Jahreszeiten den zwei Vegetationsperioden und für das gesamte Jahr. Im Unterverzeichnis `pictures` finden sich Abbildungen wie die in diesem Abschnitt gezeigten Darstellungen.

⁸⁾Dies ist eine Klasse von statistischen Methoden, bei denen aus einer Zeitreihe wiederholt zufällig Werte ausgewählt werden. Diese Auswahl ist die Basis für weitere statistische Untersuchungen, wie z.B. hier die Bestimmung von Konfidenzintervallen der Quantilregressionen. Literatur zu diesen Methoden findet sich in [EFRON \(1982\)](#) und in [DAVISON und HINKLEY \(2009\)](#). Für die Untersuchungen an den Stationen Brocken und Artern wurden jeweils 10000 zufällige Ziehungen vorgenommen.

4.4.2 Extremwert-statistische Untersuchungen von Starkniederschlag

Auf Basis der hochaufgelösten Niederschlagsdaten wurden zum einen Starkregenstatistiken nach DWA A-531 für den Gesamtzeitraum berechnet (Abschnitt 4.4.2.1), zum anderen jeweils für 30-Jahres-Blöcke, die zeitlich im 10-Jahres-Raster verschoben wurden (Abschnitt 4.4.2.2). Darüber hinaus wurden die partiellen Serien darauf untersucht, wie sich Auftretenshäufigkeiten von Starkregen pro Jahr verhalten und wie hoch die durchschnittliche Menge eines Starkregens über die Jahre ist (Abschnitt 4.4.2.3).

Die Vorauswahl umfasste diese acht Stationen, für die jeweils zeitlich hoch aufgelöste Niederschlagsdaten von Mai bis September vorlagen:

- Artern: 1959–2010
- Braunlage-Hohegeiß: 1955–1983
- Braunschweig-Völkenrode: 1952–2006
- Leipzig-Halle: 1951–2012
- Lüchow: 1994–2006
- Magdeburg: 1956–2010
- Neuruppin: 1958–2010
- Wittenberg: 1955–2010

Damit ist die Aussagekraft der Statistiken auf Dauerstufen ungefähr < 3 Stunden begrenzt, weil für andere Dauerstufen auch wesentliche Ereignisanzahlen in den übrigen Monaten im Jahr auftreten.

Insgesamt wurden die Dauerstufen 5, 15, 30, 60, 120, 240, 360, 720 und 1440 Minuten berechnet. Aufgrund der jeweiligen Länge der Beobachtungsdauern wurden alle Stationen bis auf Lüchow und Braunlage-Hohegeiß verwendet.

4.4.2.1 Starkregenauswertung für den Gesamtzeitraum

Hinweise zu den Starkregenauswertungen und dem Speicherort der Auswertungsdateien finden sich als Ergebnistabellen und Grafiken in Anhang E. Es gab keine Auffälligkeiten, beispielsweise in Form von sich abzeichnenden Trends, bei dieser Auswertung.

4.4.2.2 Starkregenauswertung für 30-Jahres-Zeiträume

Die Starkregenauswertung der sechs Stationen mit genügend langer Beobachtungsdauer wurde für gleitende 30-Jahres-Zeiträume durchgeführt, für die komplette Dekaden vorlagen.

Insgesamt kann für keine der untersuchten Dauerstufen ein Trend erkannt werden. Die Station Neuruppin zeigt zwar für alle Dauerstufen wachsende

Werte in der Zeit, hingegen weist die Station Wittenberg durchweg in der letzten Dekade fallende Werte auf (siehe Abb. 4.60).

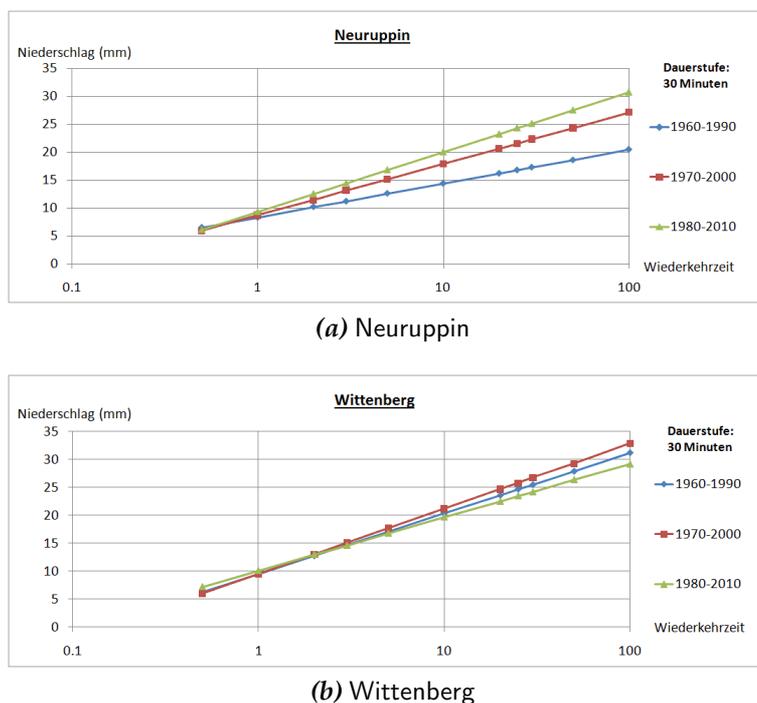


Abbildung 4.60: Trenddarstellung der Starkregenauswertung $D = 30$ Minuten für die Station Neuruppin (oben) und Wittenberg (unten) – die Wiederkehrzeit ist in Jahren angegeben.

Diese Auswertung zeigt also mehr die räumlichen Unterschiede zwischen den Stationsdaten als tatsächlich erkennbare Trends in der Zeit. Für die anderen Dauerstufen sehen die Ergebnisse vergleichbar aus.

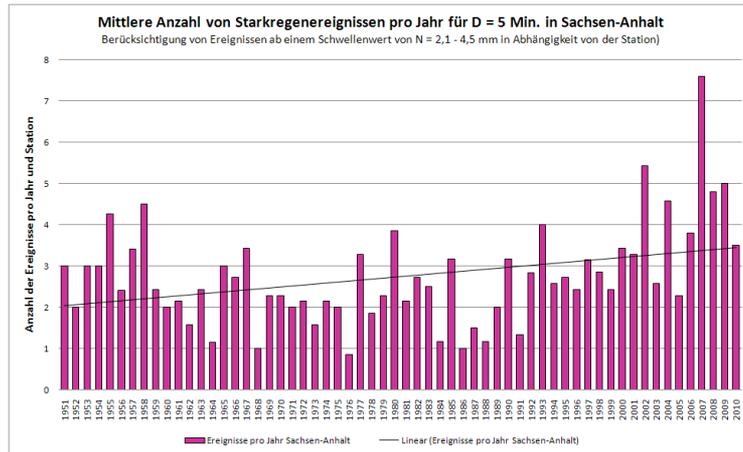
Weitere Details zu den Auswertungen finden sich in Anhang E.

4.4.2.3 Auswertung der partiellen Serien

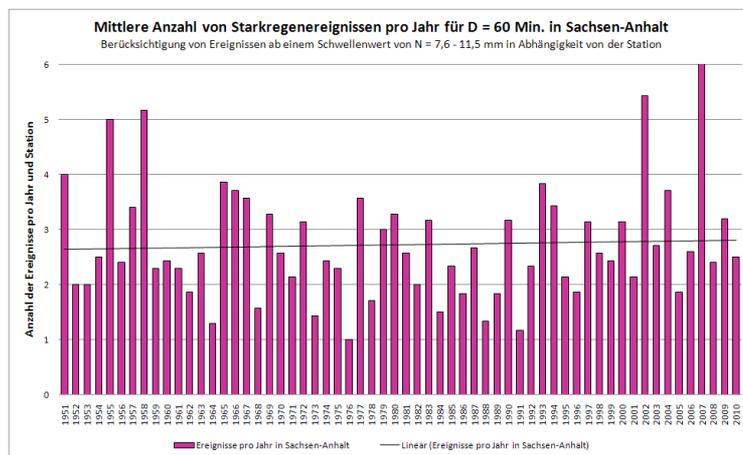
Die partielle Serie einer Zeitreihe ist definiert als die n höchsten Ereignisse einer Dauerstufe D . Die Zahl n berechnet sich als Anzahl der Datenjahre, multipliziert mit $2,7^9$, beträgt also für eine 30-jährige Reihe 81. In der Theorie sollte über einen langen Zeitraum die Anzahl der Ereignisse pro Jahr, die zur partiellen Serie zählen, etwa gleich sein, wenn keine externen Einflüsse (z.B. Klimawandel) eine Rolle spielen.

Für alle sechs hier vorliegenden Stationen wurden die Auftretenshäufigkeiten pro Jahr und Station berechnet und ebenso die durchschnittlichen Ereignismengen pro Jahr, Station und Ereignis.

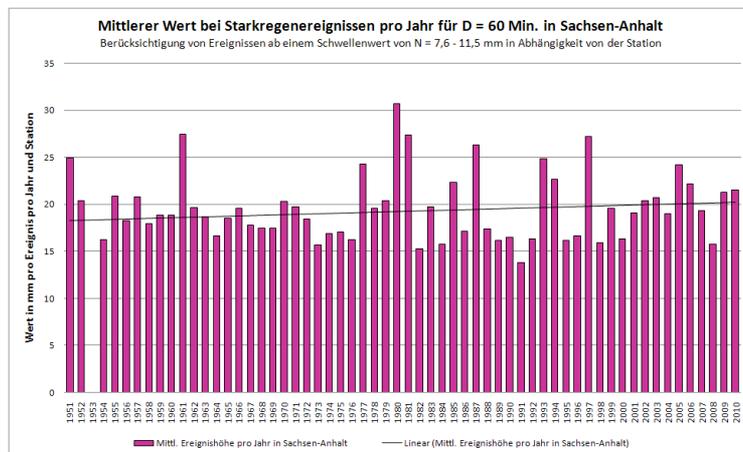
⁹⁾Es handelt sich dabei um die aus der Mathematik bekannte eulersche Zahl $e = 2,71\dots$



(a) Häufigkeit $D = 5$



(b) Häufigkeit $D = 60$



(c) Ereignismengen $D = 60$

Abbildung 4.61: Häufigkeitsauswertung der partiellen Serie (a) für $D = 5$ Minuten und (b) für $D = 60$ Minuten über alle Stationen. (c) Ereignismengenauswertung der partiellen Serie für $D = 60$ Minuten über alle Stationen. Eingezeichnet ist zudem der lineare Trend.

Für die Auftretenshäufigkeiten fällt auf, dass die beobachteten Elemente der partiellen Serie für die Dauerstufe $D = 5$ Minuten ab ca. 1990 häufiger auftreten [Abb. 4.61 (a)]. Der Grund hierfür ist noch nicht restlos geklärt – neben dem Klimawandel kann hier auch eine Modernisierung der Messtechnik in den Daten erkennbar sein. Ab der Dauerstufe $D = 60$ Minuten ist dieser Effekt nicht mehr sichtbar [Abb. 4.61 (b)].

Es stellt sich die Frage: Werden die Ereignisse möglicherweise *intensiver*? Dafür wird nicht die Häufigkeit, sondern die mittlere *Ereignismenge* pro Jahr und Station ausgewertet. Es zeigen sich, anders als bei den Häufigkeiten, nur geringe Unterschiede zwischen dem Verhalten bei den einzelnen Dauerstufen. Als Beispiel ist in Abb. 4.61 (c) der mittlere Wert bei Starkregenereignissen für die Dauerstufe $D = 60$ Minuten dargestellt. Eine Trendentwicklung ist kaum erkennbar – dies ist auch in den anderen Dauerstufen der Fall.

Weitere Einzelheiten finden sich in Anhang E.

4.5 Analyse von Stundendaten – AP 5

Stundendaten sind, wie in Abschnitt 4.1.1 dargelegt, in aller Regel mit guter Datenqualität für den Zeitraum ab 1961, in Einzelfällen auch ab 1951 vorhanden. Aber auch damit lassen sich viele Trendentwicklungen im Klima der jüngeren Vergangenheit gut dokumentieren, wie die nachfolgenden Abschnitte zeigen.

4.5.1 Tagesspannen

Als Tagesspannen versteht man die Differenz aus Tagesmaximum und Tagesminimum. Werden dafür Stundendaten ausgewertet, so kann das wahre Maximum und Minimum der Temperatur eines Tages bisweilen genauer bestimmt werden als bei der Nutzung von Tagesdaten – Letztere basieren oftmals auf 6-stündigen Ablesungen und haben das Potenzial, die wahren Maxima und Minima zu verfehlen.

Analysiert wurde die mittlere Tagesspanne für Winterhalbjahre, Sommerhalbjahre und komplette Jahre. Winterhalbjahre („1. Halbjahr“) sind dabei hydrologische Halbjahre vom 1.11. des Vorjahres bis zum 30.4. des laufenden Jahres, und Sommerhalbjahre („2. Halbjahr“) dauern entsprechend vom 1.5. bis 31.10. eines Jahres.

Es ist dabei interessant, festzustellen, dass die Tagesspanne der Temperatur durchaus über trendhafte Entwicklungen verfügt. Abb. 4.62 zeigt beispielhaft ein Ergebnis für die Station Artern – das aber auch an den anderen Stationen charakteristisch ist: Die mittlere jährliche Tagesspanne steigt leicht, aber konsistent an. Dabei ist die Tagesspanne für das Winterhalbjahr geringer als die für das Sommerhalbjahr.

Dabei manifestiert sich die unterschiedlich starke Trendentwicklung bei den Tagesminima und den Tagesmaxima.

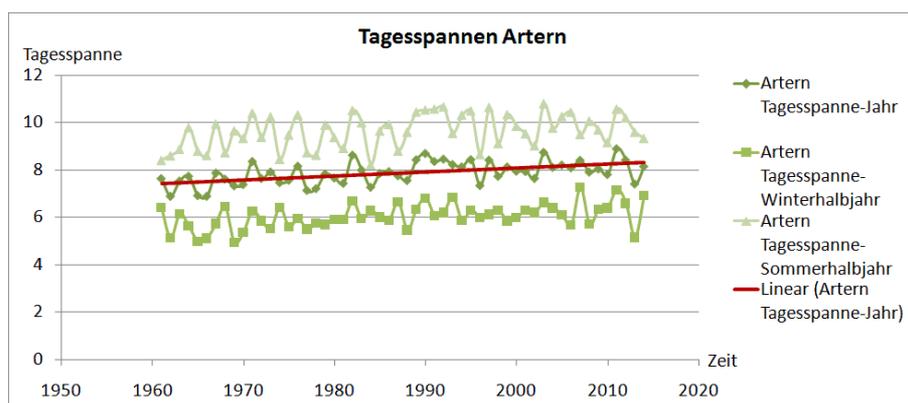


Abbildung 4.62: Mittlere Tagesspannen in Stunden an der Station Artern: Winterhalbjahr, Sommerhalbjahr und Gesamtjahr.

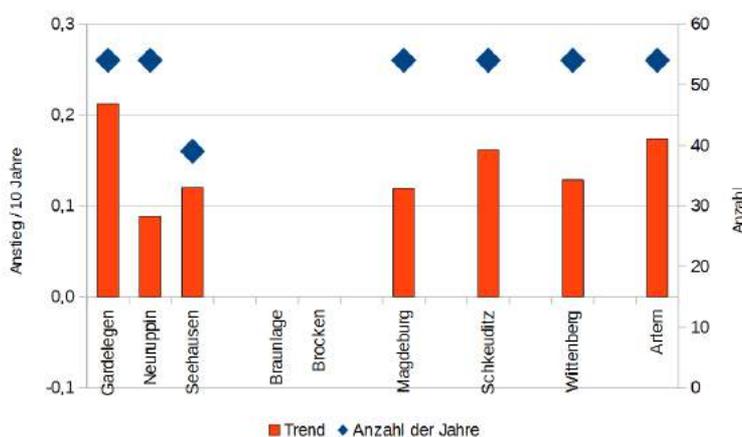


Abbildung 4.63: Trends der Tagesspanne der Temperatur (Differenz zwischen Tagesmaximum und Tagesminimum) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Abb. 4.63 fasst für einige Stationen aus der Region Sachsen-Anhalts die Trends der Tagesspanne zusammen. Die Auswahl berücksichtigt sowohl möglichst lange Zeitreihen als auch eine adäquate Flächenabdeckung der Region. Rote Balken, die sich auf die linke y-Achse beziehen, geben die Trendstärke an. Sie ist als Steigungsfaktor der Trendgeraden, umgerechnet für ein Jahrzehnt, bestimmt. Ein Bild von der Länge der verwendeten Zeitreihe ist durch die blauen Rauten gegeben. Sie beziehen sich auf die rechte y-Achse. Weitere Details zu den Analysen der Tagesspanne der Temperatur finden sich in Anhang B.8.

4.5.2 Tagesverläufe

In diesem Teil des Vorhabens wird der Frage nachgegangen, ob es Trendentwicklungen im Klima der jüngeren Vergangenheit gibt, die den Tagesgang der Temperatur betreffen. Ein Teil dieser Frage wurde bereits im Zuge der Untersuchungen der Tagesspannen (Abschnitt 4.5.1) beantwortet, denn die *Amplitude* des Tagesgangs besitzt einen gut ausgeprägten *Zunahmetrend*.

Von Interesse ist darüber hinaus, ob sich auch andere Eigenschaften des Tagesgangs ändern, also, ob es auch einen Wandel in der „Klimatologie der Stunden“ gibt. Erstens werden Entwicklungen des Gesamtniveaus untersucht, auf dem sich der Tagesgang befindet. Zweitens werden Formänderungen des Tagesgangs betrachtet, d.h. ob sich beispielsweise Maxima oder Minima verfrühen oder verspäten.

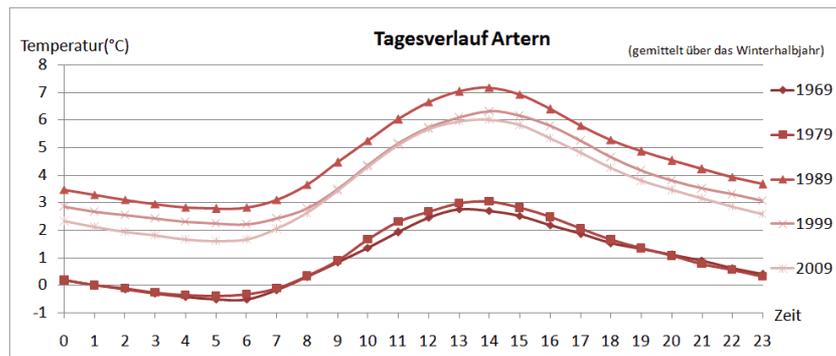
Dazu wurden für die selben Stationen wie bei der Untersuchung der Tagesspannen auch Tagesverläufe bestimmt. Mittlere Tagesgänge wurden für jedes Jahr und die beiden Halbjahre ermittelt. Im Bericht werden die mittleren Tagesgänge jeweils in dekadischen Abständen dargestellt, um ein deutlicheres Bild einer zeitlichen Entwicklung zu erhalten. Es fällt auf, dass Unterschiede im Maximalwert zwischen den Jahren besonders aus dem Winterhalbjahr stammen, wie das exemplarische Beispiel der Station Artern zeigt (Abb. 4.64).

Außerdem liegen im Beispiel ab der zweiten Hälfte der 1980er Jahre die Temperaturwerte insgesamt um 2–4 °C höher als davor. Eine Tendenz dazu ist auch bei den anderen Stationen erkennbar, aber die Ergebnisse sind dort nicht so deutlich: In der Rangfolge der Kurvenverläufe finden sich die Jahre der jüngsten Vergangenheit (nach 2000) zumeist vorn (in Abb. 4.64 oben liegend) während die Jahre vom Beginn der Messreihe tiefer liegen, aber das ist nicht immer der Fall.

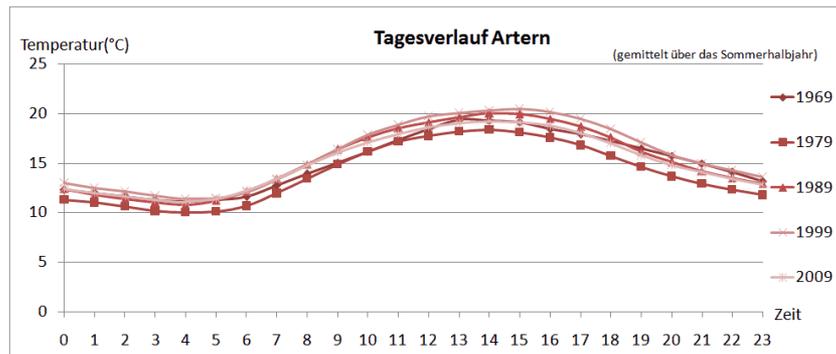
Um die Niveaushiftungen noch besser herauszuarbeiten, wurden Tagesgänge auch dekadenweise bestimmt. Für die Station Artern ist dies in Abb. 4.65 dargestellt. Es bestätigt sich, dass für die ersten drei Dekaden tendenziell niedrigere Gesamtniveaus des Tagesgangs ausgewiesen werden und die Dekaden danach ein höheres Gesamtniveau besitzen. Dabei ist zu beachten, dass die „Dekade“ der 2010er-Jahre nur mit vier Jahren belegt ist.

Bezüglich der Verlagerung der Tagesmaxima ist eine schwache Tendenz zum späteren Eintreten (13 Uhr → 14 Uhr) in der jüngeren Vergangenheit erkennbar. Ob dies ein Artefakt der nach 1980 eingeführten Umstellung auf die Sommerzeit ist, oder es sich um eine Klima-Entwicklung handelt, ist nicht abschließend zu beantworten, zumal dies nur relativ gering in Erscheinung tritt.

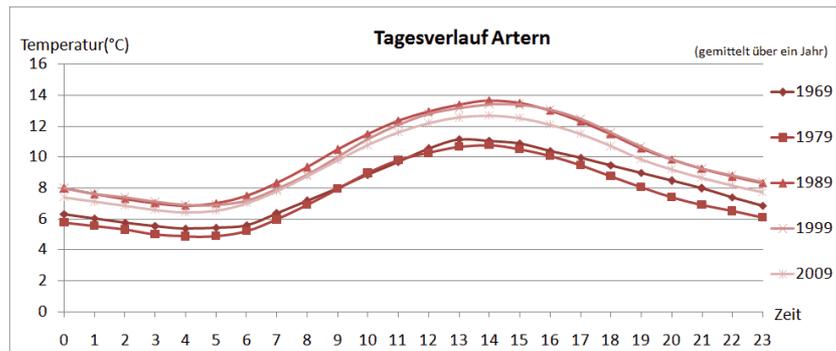
Auch zu den Auswertungen der Tagesgänge finden sich weitere Details in Anhang E.



(a) Winterhalbjahr



(b) Sommerhalbjahr



(c) Jahr

Abbildung 4.64: Mittlerer Tagesverlauf der Temperatur für verschiedene Einzeljahre an der Station Artern, bestimmt aus (a) dem Winterhalbjahr, (b) dem Sommerhalbjahr und (c) dem gesamten Jahr.

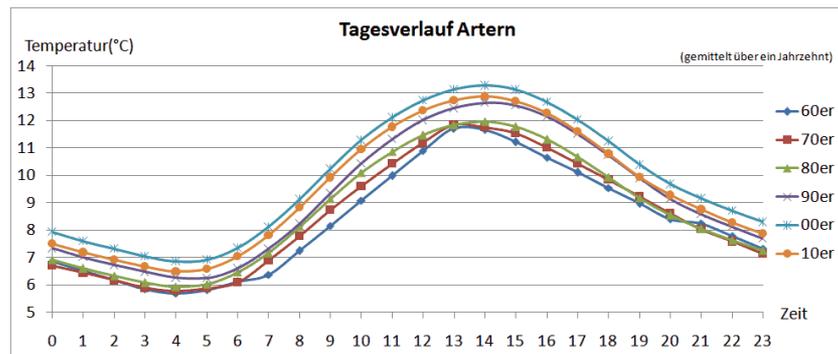


Abbildung 4.65: Mittlerer Tagesverlauf an der Station Artern im gesamten Jahr als Mittel über jeweils 10 Jahre.

4.5.3 Jahresverläufe

Im folgenden wird die Entwicklung von Jahresverläufen von verschiedenen Parametern dargestellt. Es wird jeweils der mittlere Jahresgang der ersten 30 Jahre (1951–1980), der zweiten 30 Jahre (1981–2010) und des gesamten Beobachtungszeitraumes dargestellt. In die Auswertung wurden nur vollständige Jahre einbezogen.

4.5.3.1 Lufttemperatur

Die mittlere Tagesmaximumtemperatur an der Station Magdeburg (Abb. 4.66) zeigt in ihrem Jahresgang eine deutliche Temperaturzunahme zwischen den Zeiträumen 1951–80 und 1981–2010, am klarsten im Winter.

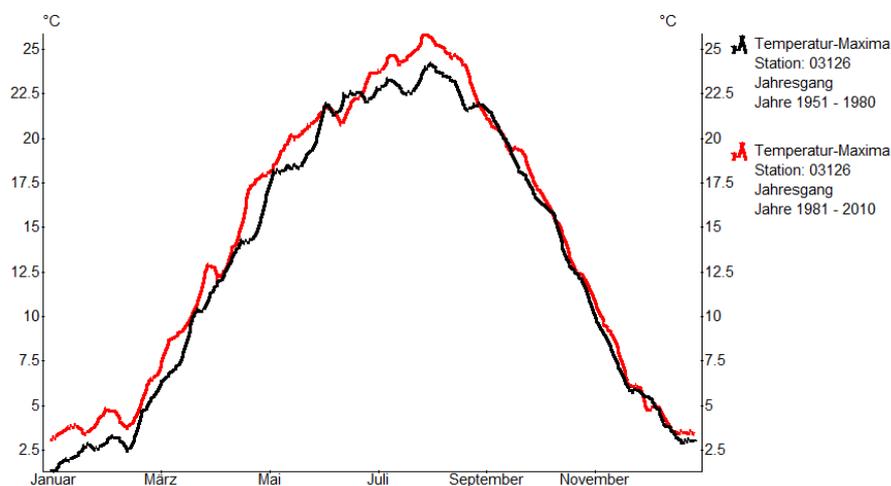


Abbildung 4.66: Mittlerer Jahresgang der Tagesmaximumtemperatur an der Station Magdeburg; Zeitraum 1951–1980 (schwarz) und 1981–2010 (rot).

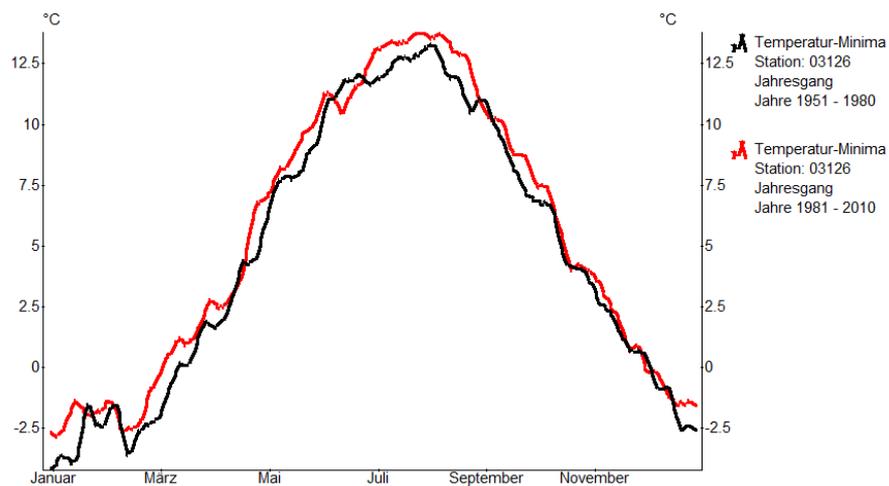


Abbildung 4.67: Mittlerer Jahresgang der Tagesminimumtemperatur an der Station Magdeburg: Zeitraum 1951–1980 (schwarz) und 1981–2010 (rot).

Erkennbar ist auch eine leichte Verschiebung des wärmsten Zeit von Juni/Juli in Richtung Juli/August. Die Änderungen sind zudem im Frühjahr ausgeprägter als im Herbst.

Die mittlere Tagesminimumtemperatur an der Station Magdeburg (Abb. 4.67) weist eine ähnliche Entwicklung auf, die, wie bei der Maximumtemperatur, am ausgeprägtesten im Winter ist. Erkennbar ist für die beiden Zeiträume auch eine leichte Verschiebung der höchsten Minimumwerte von Anfang Juli (1951–1980) in Richtung Anfang August (1981–2010).

Hinweise zu den Ergebnissen der anderen Stationen mit mehr als 60 Jahren Beobachtungsdauer finden sich in Anhang F.

4.5.3.2 Niederschlag

Für den Niederschlag wurde eine Darstellung entwickelt, die sowohl den Jahresgang in zwei 30-jährigen Zeitabschnitten als auch die Differenz wiedergibt. Die Auswertung mit 30-jährigen Mittelwerten unterscheidet sich in zweierlei Hinsicht von der Trendauswertung in Abschnitt 4.2.2: (i) hier werden Reihen benötigt, für die vollständige Daten sowohl für den Zeitraum 1951–1980 als auch 1981–2010 vorliegen; (ii) hier findet keine Trendberechnung statt, sondern es werden nur Tendenzen der langjährigen Änderung aufgezeigt. Ein Beispiel für den Brocken findet sich in Abb. 4.68.

Es zeigt sich, dass an dieser Station im Sommer kaum Änderungen auftreten, dafür aber im übrigen Jahr ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen ist. Zudem bestätigt sich eine Erkenntnis aus der Analyse von Starkregen (Anhang B.1.6, insbesondere Abb. B.15 und B.16): In der Vegetationsperiode I (April–Juni) ist oft ein anderes Niederschlagsverhalten vorzufinden als in der Vegetationsperiode II (Juli–September). Dies bezieht sich auch auf die Niederschlagstrends an der Station Brocken.

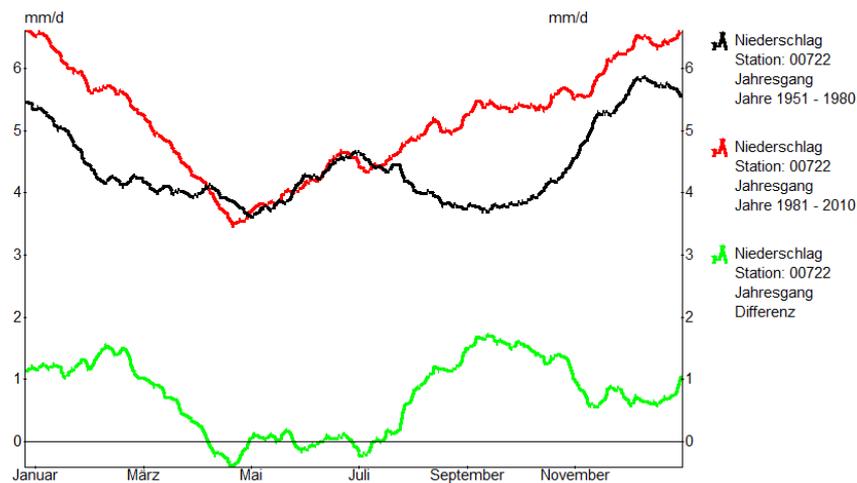


Abbildung 4.68: Mittlerer Jahresgang des Niederschlages an der Station Brocken: Zeitraum 1951–80 (schwarz) und 1981–2010 (rot) sowie die Differenz zwischen beiden Zeiträumen (grün).

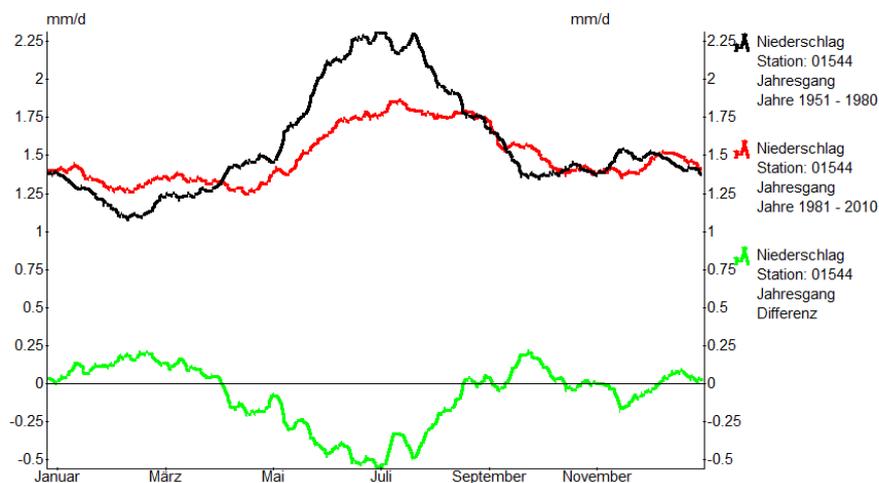


Abbildung 4.69: Mittlerer Jahresgang des Niederschlages an der Station Gardelegen: Zeitraum 1951–80 (schwarz) und 1981–2010 (rot) sowie die Differenz zwischen beiden Zeiträumen (grün).

Ein ganz anderes Verhalten im Jahresgang zeigt sich an der Station Gardelegen. Hier sind im Frühjahr und Sommer die deutlichsten Niederschlags-Rückgänge zwischen 1951–1980 und 1981–2010 zu erkennen (s. Abb. 4.69). Einerseits stellt dies Hinweise auf Frühjahrestrockenheit dar, andererseits ist die Veränderung insgesamt – die Skalierung der y-Achse ist zu beachten – deutlich geringer als auf dem Brocken.

Die Ergebnisse der anderen Stationen mit mehr als 60 Jahren Beobachtungsdauer finden sich in Anhang F.

4.6 Analyse von Daten mit agrarmeteorologischer Relevanz

4.6.1 Hohe Luftfeuchte

Als Indikator für hohe Feuchte wird die Anzahl der Stunden am Tag mit einer relativen Feuchte über 90 % bestimmt. Für einige Stationen ist diese Größe in den zugelieferten Dateien enthalten (eine Liste findet sich in Tab. A.2).

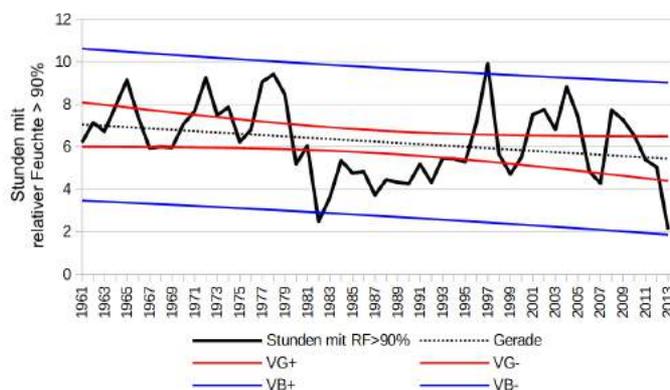


Abbildung 4.70: Zeitliche Entwicklung der Anzahl der Stunden am Tag mit einer relativen Feuchte über 90 %. Betrachtungszeitraum: Gesamtes Jahr. Station: Magdeburg.

Ein Beispiel ist in Abb. 4.70 für die Station Magdeburg dargestellt. Diese Größe besitzt an der Station Magdeburg einen leichten, nur auf dem 90 %-Niveau statistisch signifikanten Abnahmetrend. Ein Test mit der Zeitreihe einer anderen Station (Wittenberg) ergab, dass dort kein Trend auftrat.

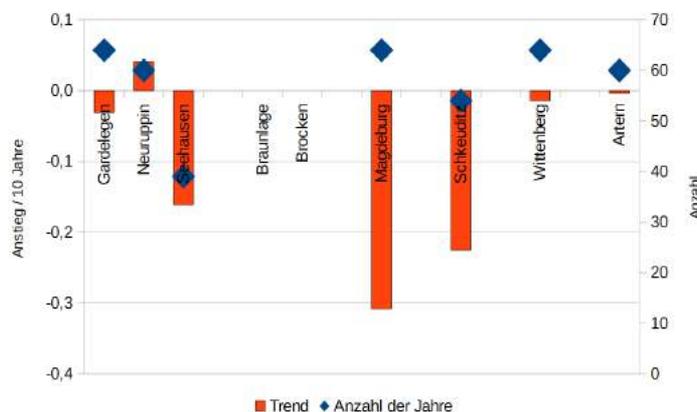


Abbildung 4.71: Trends der mittleren Anzahl von Stunden pro Tag mit einer relativen Feuchte über 90 % für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

In der Übersicht (Abb. 4.71) finden sich einige Stationen mit *Abnahmetrends* (Magdeburg, Schkeuditz und Seehausen). An den übrigen sind Trends nur sehr schwach bzw. nicht vorhanden.

4.6.2 Bodenfeuchte

Für die 8 Stationen mit besonders geringer Lückenzahl wurden durch den DWD Zeitreihen von mehreren Bodenfeuchteparametern, bestimmt mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell METVER (DWD, Agrarmeteorologie Leipzig), zur Verfügung gestellt. Angetrieben wurde das Bodenfeuchtemodell mit folgenden Größen:

- Meteorologische Daten:
 - Tagesmittel der Lufttemperatur,
 - Tagessumme einer Strahlungsgröße (wahlweise Sonnenscheindauer oder Globalstrahlung),
 - Tagessumme des (nicht korrigierten) Niederschlages.
- Bodenphysikalische Daten:
 - Feldkapazität,
 - Welkepunkt,
 - Anfangsfeuchte.
- Tägliche Pflanzenspezifische Daten der modellierten Kulturpflanzenart in Abhängigkeit von der phänologischen Entwicklung (mittlere phänologische Entwicklung oder Anpassung an die aktuelle phänologische Entwicklung des betreffenden Jahres):
 - biologisch-physiologischer Faktor (repräsentiert das Verhältnis zwischen potenzieller und realer Evapotranspiration),
 - Interzeptionskapazität,
 - Durchwurzelungstiefe.

Durch das Bodenwasserhaushaltsmodell wurde mit diesem Antrieb Folgendes errechnet:

- PET: Potenzielle Evapotranspiration in mm (Methode TURC-Wendling);
- AET: Reale Evapotranspiration in mm (hier über Gras);
- SNKk: korrigierte Niederschlagssumme in mm. In das Modell geht der unkorrigierte 1-min-Niederschlag ein und wird dort mit einer aufgrund der einfachen Inputdaten stark vereinfachten RICHTER-Korrektur versehen: bei positiver Tagesmitteltemperatur +10 %, bei negativer Tagesmitteltemperatur +30 %. Mit diesen Werten wird dann weiter gerechnet;
- PERC: Sickerwasser in mm aus der Schicht, die mit ZG beschrieben ist;

- BOF: Bodenfeuchte entweder in % nFK (Prozent der nutzbaren Feldkapazität) oder in Vol. % (Volumenprozent). Beide Werte beziehen sich auf den bodenphysikalischen Input (Feldkapazität und Welkepunkt, der für den Standort bekannt sein muss. Hier wurden Daten verwendet, die für die Landkreise, wie sie vor 1995 bestanden, erarbeitet worden waren und flächendeckend so zumindest für den Osten Deutschlands vorliegen. Ein gewisses Verbesserungspotenzial läge darin, real durch ein Bodenlabor bestimmte Standortdaten zu verwenden, die aber derzeit nicht existieren;
- SWI: Gesamtwassergehalt der gesamten Berechnungsschicht in Liter (hier: bis 2 m Tiefe);
- ZG: Schichtdicke des Bodens, aus der die vorher festgelegte Kultur (hier Gras) das Wasser beziehen kann. Das sind für die bereit gestellten Daten konstant 60 cm.

Des Weiteren wurde für die METVER-Rechnungen als Hauptfrucht Gras_SENTEK ohne Zwischenfrucht verwendet. Eine Flexibilisierung erfolgte nicht.

Im Vorhaben wurden für alle Größen Trends und deren Vertrauensbereiche berechnet, die den Nutzern zur Verfügung gestellt werden. Die Datenstruktur ist in Abschnitt D.2.2 erläutert.

Als Beispiel sei für die Station Wittenberg in Abb. 4.72 die Bodenfeuchte in Vol. % für die Vegetationsperiode I (April bis Juni) und die Vegetationsperiode II (Juli bis September) vorgestellt.

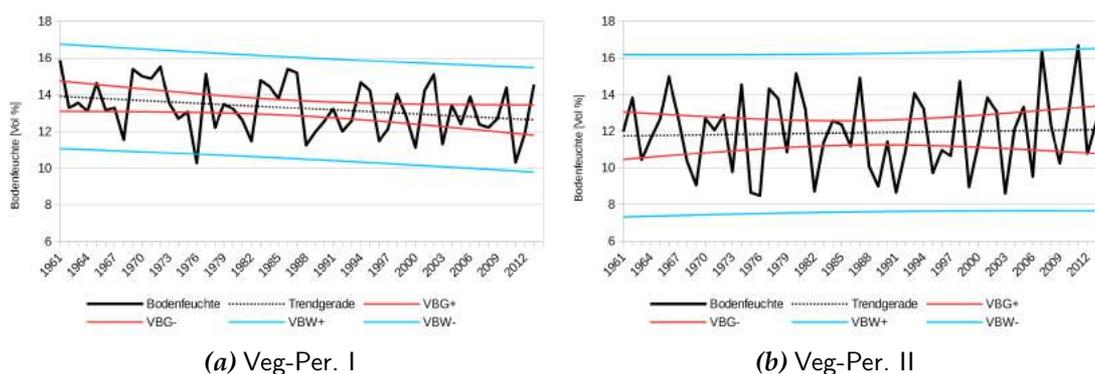


Abbildung 4.72: Zeitliche Entwicklung der Bodenfeuchte (aus METVER-Rechnungen, s. Text) an der Station Wittenberg für die Vegetationsperioden I (AMJ) und II (JAS).

Es findet sich in der Vegetationsperiode I ein auf dem 95 %-Niveau statistisch gesicherter Abnahmetrend, während in der Vegetationsperiode II kein Trend analysiert werden konnte. Diese Unterschiede zwischen den Vegetationsperioden treten an den meisten untersuchten Stationen auf.

4.6 Analyse von Daten mit agrarmeteorologischer Relevanz – AP 6

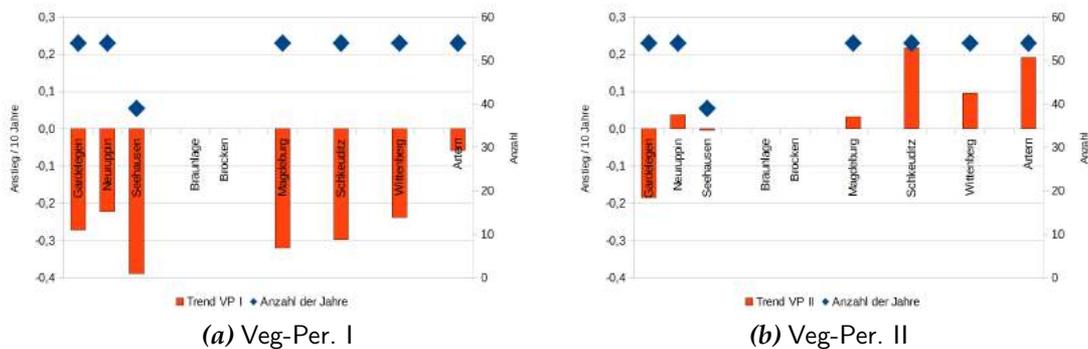


Abbildung 4.73: Trends der Bodenfeuchte für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt in der Vegetationsperiode I und II. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Bisweilen sind beide Trends nicht signifikant oder sie sind signifikant und in den beiden Vegetationsperioden von entgegengesetztem Verlauf, wie der Vergleich von Stationen aus der Region Sachsen-Anhalt (Abb. 4.73) zeigt.

4.7 Auswertung phänologischer Daten – AP 7

Angaben zur Datengrundlage sowie vorhandenen Naturraumgruppen, den gewählten phänologischen Phasen, der räumlichen Abgrenzung und weiteren Änderungen finden sich in Anhang G und die Darstellung der Datenprüfung in Anhang C.3. Im Bericht sind Beispielabbildungen wiedergegeben. Weitere Grafikdateien finden sich auf dem Projekt-Datenträger Verzeichnis /phaeno_grafiken/ – die darin enthaltenen Unterverzeichnisse sind analog zu den Berichtsabschnitten benannt. Die dazu verwendeten Daten in Form von ASCII-Files finden sich im Unterverzeichnis /phaeno_daten/, wobei insbesondere die Unterverzeichnisse /daten_hoehenkorrigiert und /daten_aggregiert von Bedeutung sind.

4.7.1 Statistische Grundlagen für die phänologischen Analysen

Für die Analysen der Phänologie wurde mit der Statistik-Software R gearbeitet. Das weitere Vorgehen lehnt sich an die Praxis phänologischer Untersuchungen an. Die Daten, die für die Analysen verwendet wurden, wurden auf Normalverteilung untersucht. Dafür wurde der Shapiro-Wilks Test verwendet, der vor allem für Stichproben mit einer Größe n zwischen 3 und rund 5000 sehr robust ist (ROYSTON, 1982). Da viele Daten nicht eindeutig normalverteilt sind, wurde für die Bestimmung von Korrelationen weitestgehend die Rangkorrelation nach Spearman verwendet. Für Trenduntersuchungen wurde ein einfaches lineares Modell genutzt und in diesem Fall eine Normalverteilung angenommen, auch wenn sie nach dem Shapiro-Wilks-Test nur bedingt gegeben ist. Um die Signifikanz der Ergebnisse zu testen, wurden die in R für die jeweiligen Methoden implementierten Tests verwendet. Für die Trenduntersuchungen wurde der T-Test angewendet und für die Korrelation nach Spearman eine asymptotische Approximation des T-Tests, wenn Bindungen in den Daten vorkamen¹⁰. Mit diesen Tests wurde untersucht, ob die Variablensätze z.B. unabhängig voneinander sind (Nullhypothese) oder ob es eine Abhängigkeit gibt (Alternativhypothese), die signifikant ist. Das Signifikanzniveau wurde durch die Irrtumswahrscheinlichkeit (p-value: probability of error) bei 0.05 festgelegt. Wurde das Signifikanzniveau von 0.05 unterschritten, wurde die Nullhypothese abgelehnt, die Alternativhypothese angenommen und damit war eine Abhängigkeit bzw. ein statistischer Zusammenhang signifikant.

4.7.2 Vorarbeiten

4.7.2.1 Besonderheit: Blattfall der Stieleiche

In der Leitphase für den Winter, dem Blattfall der Stieleiche, gibt es eine große Datenlücke zwischen 1961 und 1991. Die Phase ist damit für eine Trendanalyse

¹⁰Bestimmte Werte kommen doppelt vor und es ist damit keine eindeutige Rangreihenfolge feststellbar.

über den gesamten Betrachtungszeitraum nicht gut geeignet. Innerhalb des Projektbegleitkreises wurde vorgeschlagen, anhand eines möglichen Zusammenhangs zwischen der ersten negativen Tagesmitteltemperatur und dem Phaseneintritt die Lücken zu interpolieren. Jedoch war nach eingehenden Analysen kein Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Blattfall der Stieleiche erkennbar [vgl. Abb. 4.74 (a) und (b)].

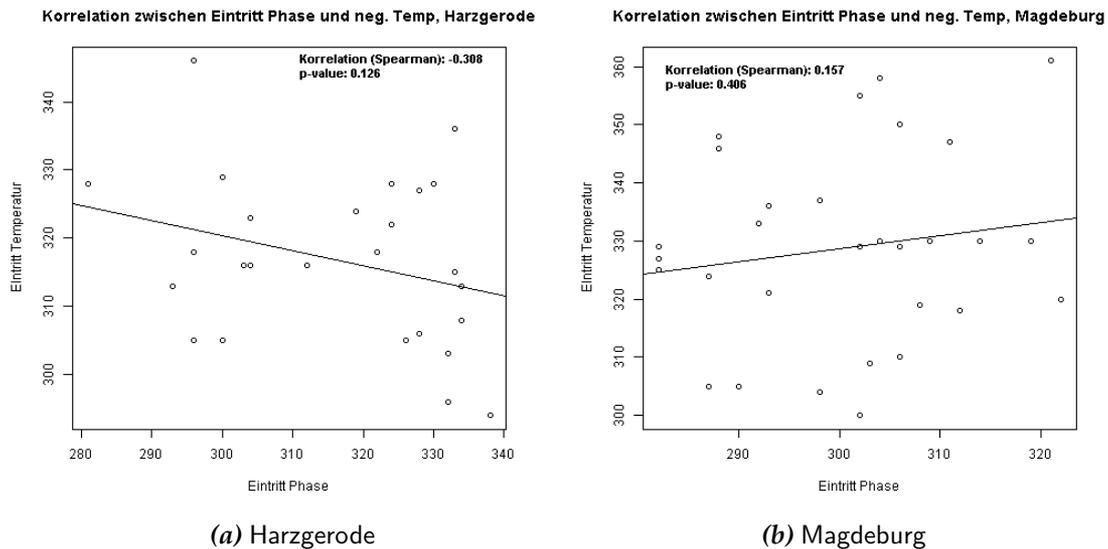


Abbildung 4.74: Eintritt des Blattfalls der Stieleiche (Tag des Jahres, x-Achse) und Eintritt der ersten negativen Tagesmitteltemperatur (Tag des Jahres, y-Achse) für die Stationen Harzgerode und Magdeburg.

In einer vorhergehenden Studie von SCHEFFLER (2010) wurde die Phase Blattfall der Stieleiche durch die Phase Auflaufen des Winterweizens ersetzt. Das Verwenden dieser Phase ist problematisch, da sie durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung vom Menschen stark beeinflusst ist. In der Arbeit von KOLODZIEJ (2007) wurde diese Phase (Blattfall) aufgrund der Datenlage nicht untersucht.

Für die Trendanalysen wird der Blattfall der Stieleiche daher auch innerhalb dieser Analyse nicht verwendet. Für die Darstellung und Veränderungen der phänologischen Jahreszeiten wird sie jedoch mit einbezogen, da die phänologische Uhr (siehe Abschnitt 4.7.4) sonst nicht verwendet werden kann. Bei der Interpretation und Verwendung der Ergebnisse für weitere Studien sollte das beachtet werden.

4.7.2.2 Höhenabhängigkeit und Höhenkorrektur der phänologischen Phasen

Für die spätere räumliche Aggregation der Daten ist es wichtig, eine eventuelle Höhenabhängigkeit der Leitphasen zu berücksichtigen. Da phänologische Pha-

sen direkt auf klimatische Veränderungen reagieren und vor allem von Temperaturschwankungen beeinflusst werden, ist zu erwarten, dass sich der Eintritt einer Phase in einer Naturraumgruppe mit der Höhe ändert, da die Temperatur mit zunehmender Höhe abnimmt. In einem ersten Schritt wird daher die Höhenabhängigkeit für alle Phasen pro Naturraumgruppe untersucht und diese anschließend über eine Höhenkorrektur mit einbezogen.

Für die Betrachtung ist es wichtig, dass alle Stationen, die in die Analyse einfließen, eine möglichst homogene Verteilung über die untersuchten Jahre aufweisen. Um das zu erreichen und gleichzeitig eine hohe räumliche Verteilung innerhalb Sachsen-Anhalts sowie innerhalb der Naturraumgruppen vorzufinden, wird der Betrachtungszeitraum von 65 Jahren in zwei Abschnitte von jeweils 30 Jahren unterteilt, von 1951 bis 1980 und 1981 bis 2014. Die untersuchten Stationen müssen dabei eine Datendichte von mehr als 17 Jahren aufweisen. Diese 17 Jahre werden gewählt, damit die Station Brocken, von größter Wichtigkeit für eine umfassende Betrachtung der Höhenabhängigkeit, mit in die Untersuchung einfließen kann. Über die beiden Zeiträume wird zusätzlich der Mittelwert der Tage im Jahr (TiJ) gebildet, um zwischenjährliche Schwankungen auszugleichen.

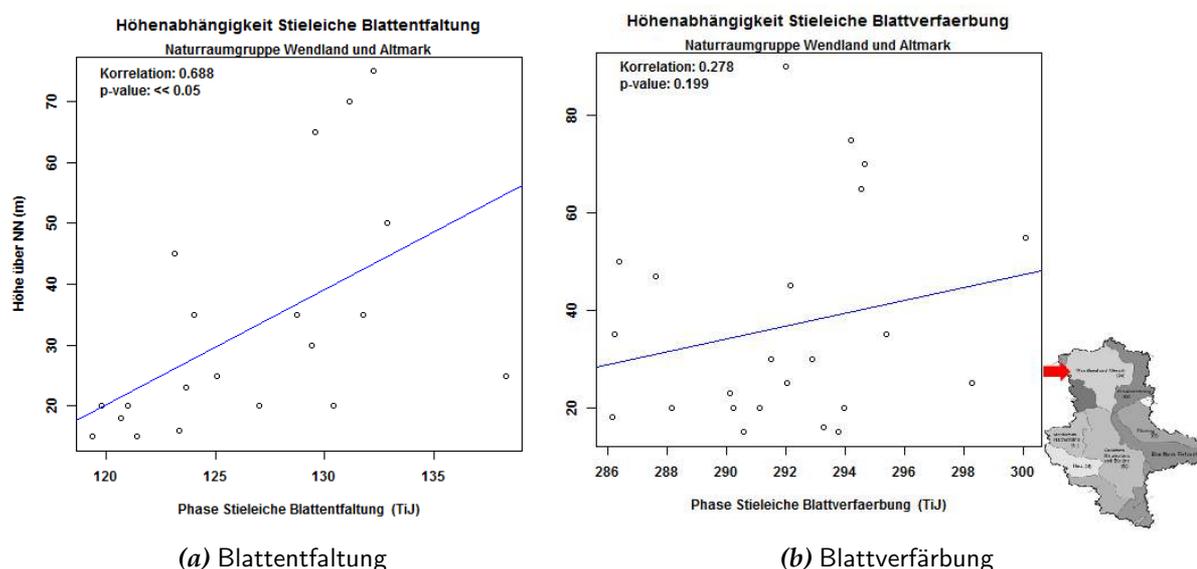


Abbildung 4.75: Höhenabhängigkeit der Phasen Blattentfaltung und Blattverfärbung der Stieleiche (für den Zeitraum von 1950 bis 1980) für die Naturraumgruppe Wendland und Altmark (mit rotem Pfeil auf der eingesetzten Karte markiert).

Die Ergebnisse belegen, dass viele Leitphasen eine Höhenabhängigkeit zeigen. Als Beispiel ist diese Beziehung für die Stieleiche in Abb. 4.75 dargestellt¹¹⁾.

¹¹⁾In diesem Beispiel ist auch mit einer kleinen Karte die Lage der Naturraumgruppe angezeigt. Für die übrigen Diagramme sei auf die Karte im Anhang G.3 verwiesen (Abb. G.1). Übersichtskarten des Trendverhalten in allen Naturraumgruppen Sachsen-Anhalts finden sich in Anhang G.5.

Ausnahmen, bei denen eine Höhenabhängigkeit nicht auftritt, finden sich z.B. beim Heidekraut.

Dabei ist zu beobachten, dass vor allem ab einer Höhe von 200–300 m, die Höhenabhängigkeit in den Naturraumgruppen eine größere Rolle spielt. Daher wird insbesondere die Höhenabhängigkeit in den Naturraumgruppen Harz (38), Thüringer Becken (47), Thüringer Becken (48) und Sächsisches Hügelland (46) näher betrachtet und für die Berechnung der Höhenkorrektur zusammengefasst. Für die anderen Naturraumgruppen ist kein funktionaler Zusammenhang ableitbar.

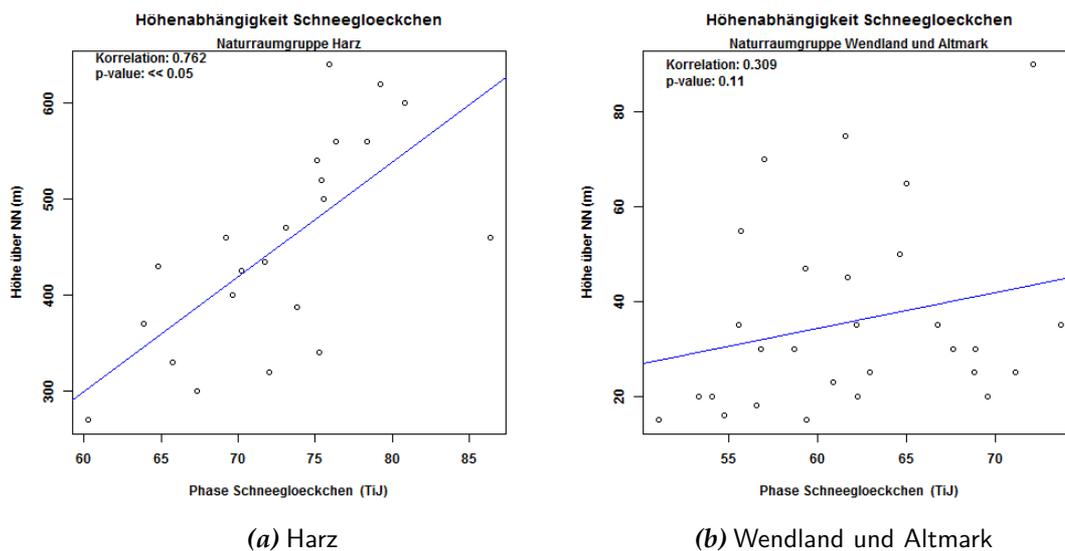


Abbildung 4.76: Höhenabhängigkeit des Schneeglöckchens für die Naturraumgruppen Harz (38, linke Teilfigur) und Wendland und Altmark (86, rechte Teilfigur).

Abb. 4.76 zeigt beispielhaft die Korrelationskoeffizienten für die Naturraumgruppen Harz (38) und Wendland und Altmark (86) für die Leitphase Schneeglöckchen.

Für beide 30-jährigen Abschnitte (1951–1980 und 1981–2010) werden für die zusammengefassten Naturraumgruppen die Korrelationskoeffizienten nach Spearman berechnet. Für die meisten Leitphasen wird eine Höhenabhängigkeit festgestellt. Vor allem die Frühlings- und Sommerphasen zeigen eine hohe Korrelation mit der Höhe, wie z.B. das Schneeglöckchen mit einem Koeffizienten von 0,7.

Die Phasen Heidekraut [s. Abb. 4.77 (a)], Blattverfärbung und Blattfall der Stieleiche zeigen keine Höhenabhängigkeit. Dagegen zeigt die Fruchtreife der Stieleiche in diesem Fall eine leichte Höhenabhängigkeit [s. Abb. 4.77 (b)]. Zu erkennen ist auch, dass es zwischen den beiden 30-jährigen Perioden leichte Verschiebungen in der Höhenabhängigkeit gibt. Ob dies auf klimatische Verände-

rungen im untersuchten Zeitraum hindeutet, kann aber nicht abschließend beantwortet werden.

Hinweis: Abbildungen für die Höhenabhängigkeit bei den Leitphasen befinden sich im Verzeichnis /phaeno_grafiken/Kapitel_4_7_2_2 des projektbegleitenden Datenträgers.

Für die Höhenkorrektur werden einfache lineare Regressionen für die 30-jährigen Abschnitte gebildet und daraus eine mittlere Regressionsgleichung bestimmt, wie es in Abb. 4.77 gezeigt ist. Dabei wird die mittlere Höhe der einzelnen Naturraumgruppen als repräsentative Höhe angenommen (Berechnung durch den Median aller Stationshöhen). Die Höhenkorrektur wird nur für die Phasen und Naturraumgruppen vorgenommen, für die eine signifikante Höhenabhängigkeit vorliegt (vgl. Tab. 4.5).

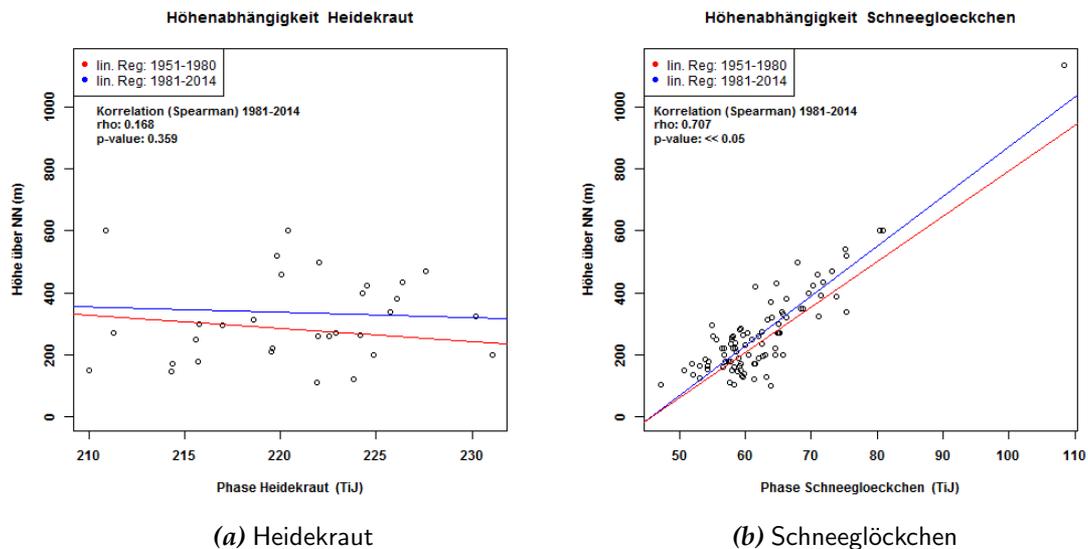


Abbildung 4.77: Höhenabhängigkeit für das Heidekraut (linke Teilfigur) und das Schneeglöckchen (rechte Teilfigur) für die zusammengefassten Naturraumgruppen mit Regressionsgeraden für die 30-jährigen Perioden 1951–1980 (rot) und 1981–2010 (blau).

Wie Tab. 4.5 zeigt, sind zur Belegung der Existenz einer ausgeprägten Höhenabhängigkeit relativ große Werte des Spearmankoeffizienten ρ so wie sehr kleine p-value-Werte notwendig. Wegen der riesigen Unterschiede in der Größenordnung der p-values ist diese Größe in Exponentialnotation dargestellt; $3,59 \cdot 10^{-1}$ sind in herkömmlicher Notation 0,359 – ein Wert der deutlich über dem vom Signifikanztest geforderten 0,05 ($= 5,00 \cdot 10^{-2}$) liegt, also nicht auf eine signifikante Höhenabhängigkeit hinweist. Zudem ist bemerkenswert, wie unterschiedlich die als signifikant erachteten Höhenabhängigkeiten sein können: Zwischen rund 3 und rund 5 Tagen im Jahr je 100 m werden gefunden.

Table 4.5: Statistische Kenngrößen zur Höhenabhängigkeit (HA) der untersuchten phänologischen Phasen.

Phänologische Phase	Spearman ρ	HA [Tij je 100 m]	p-value
Schneeglöckchen	0,707	4,37	$4,80 \cdot 10^{-15}$
Sal-Weide	0,697	4,02	$3,34 \cdot 10^{-13}$
Löwenzahn	0,732	3,78	$1,74 \cdot 10^{-16}$
Stieleiche Blattentfaltung	0,687	4,03	$7,18 \cdot 10^{-11}$
Schwarzer Holunder Blüte	0,770	4,41	$6,62 \cdot 10^{-17}$
Sommer-Linde	0,761	4,75	$1,66 \cdot 10^{-23}$
Heidekraut	0,168	0,18	$3,59 \cdot 10^{-1}$
Holunder Fruchtreife	0,610	4,87	$5,65 \cdot 10^{-10}$
Stieleiche Fruchtreife	0,583	2,86	$1,30 \cdot 10^{-5}$
Stieleiche Blattverfärbung	-0,052	0,11	$6,72 \cdot 10^{-1}$
Stieleiche Blattfall	0,051	0,17	$7,70 \cdot 10^{-1}$

4.7.2.3 Aggregation auf Ebene der Naturraumgruppen

Für die Trendanalysen der phänologischen Phasen wird der Datenbestand aggregiert, so dass für jede Naturraumgruppe eine Zeitreihe zur Verfügung steht.

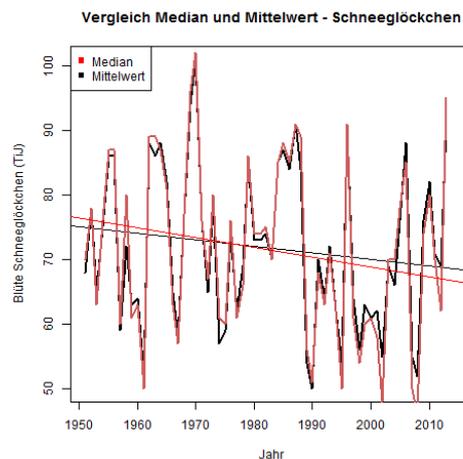


Abbildung 4.78: Vergleich zwischen Median und Mittelwert am Beispiel des Schneeglöckchens für den Naturraum Harz.

Da es trotz eingehender Prüfung in einigen Jahren eine relativ hohe Streuung in den phänologischen Phasen gibt, die durch eine objektive Prüfung nicht behoben werden kann, wird der Median als Aggregationsparameter verwendet. Der Median ist in diesem Fall robuster gegenüber einer hohen Streuung und noch potentiell vorhandenen Ausreißern als der Mittelwert. Ein Vergleich zwischen den beiden Aggregationsformen (Mittelwert- und Median-bezogen) zeigt auch, dass sich die Wahl des Aggregationsparameters auf die Trends auswirken kann (vgl. Abb. 4.78). Für die Leitphase Schneeglöckchen schwächt sich der Trend leicht ab, wenn der Mittelwert als Aggregationsparameter verwendet wird.

4.7.3 Trendentwicklung in der Phänologie

In allen phänologischen Phasen ist für das Land Sachsen-Anhalt über den Betrachtungszeitraum von 60 Jahren eine Veränderung sichtbar. In den Frühlings- und Sommerphasen sowie in den zeitigen Herbstphasen ist eine Tendenz zu einem früheren Phaseneintritt zu sehen. Die Blattverfärbung und der Blattfall der Stieleiche zeigen tendenziell einen späteren Phaseneintritt. Dadurch ergibt sich eine Verlängerung der phänologischen Vegetationsperiode.

Für eine räumliche Übersicht der Trendentwicklung der Frühlings-, Sommer- und Herbstphasen finden sich weitere Abbildungen im Anhang [G.5](#). Für die Darstellungen dort wurden die Naturraumgruppen 47 und 48 zusammengefasst. Grafikdateien für weitere Phasen und Naturraum finden sich auf dem projektbegleitenden Datenträger im Unterverzeichnis `/phaeno-grafiken/Kapitel_4_7_3`.

4.7.3.1 Frühlingsphasen

Zu den Frühlingsphasen zählen die Blüte des Schneeglöckchens (Vorfrühling), die Blüte der Sal-Weide (Vorfrühling), die Blüte des Löwenzahns (Erstfrühling) und die Blattentfaltung der Stieleiche (Vollfrühling).

Alle Frühlingsphasen zeigen einen Trend zu einem früheren Phasenbeginn (abwärts geneigte Trendgerade) von ein bis drei Tagen pro Dekade (vgl. [Abb. 4.79](#)). Die Blüte des Schneeglöckchens setzt für die Naturraumgruppen durchschnittlich zwei bis drei Tage pro Dekade früher ein. Nicht signifikant sind die Trends in den Naturraumgruppen Harz, Fläming und Lüneburger Heide¹²⁾.

Den stärksten Trend zeigt die Naturraumgruppe Wendland und Altmark (86). Ebenso setzt bei der Sal-Weide der Phasenbeginn zwei bis drei Tage früher ein. Bis auf die Naturraumgruppe Harz sind in allen Naturraumgruppen die Trends signifikant. In der Blüte des Löwenzahns und der Blattentfaltung der Stieleiche setzt der Phasenbeginn über den Betrachtungszeitraum 1 bis 3 Tage früher ein. In beiden Phasen sind die Trends signifikant. Auffällig in der Blattentfaltung der Stieleiche in der Naturraumgruppe Harz ist, dass die Abnahme mit 2 Tagen pro Dekade im Gegensatz zu den anderen Frühlingsphasen im Harz relativ hoch ist.

Auch [SCHEFFLER und FRÜHAUF \(2011\)](#) haben in ihrer Studie einen früheren Phasenbeginn der Frühlingsphasen um ein bis drei Tage pro Dekade feststellen können. [MENZEL \(2007\)](#) hat in ihren Untersuchungen sogar eine Veränderung von 1,2 bis 3,8 Tagen früher pro Dekade in den letzten vier bis fünf Jahrzehnten festgestellt.

¹²⁾Siehe auch Erläuterungen im Rahmen der Analyse von Temperaturabhängigkeiten in Abschnitt [4.7.5.1](#) ab S. [91](#).

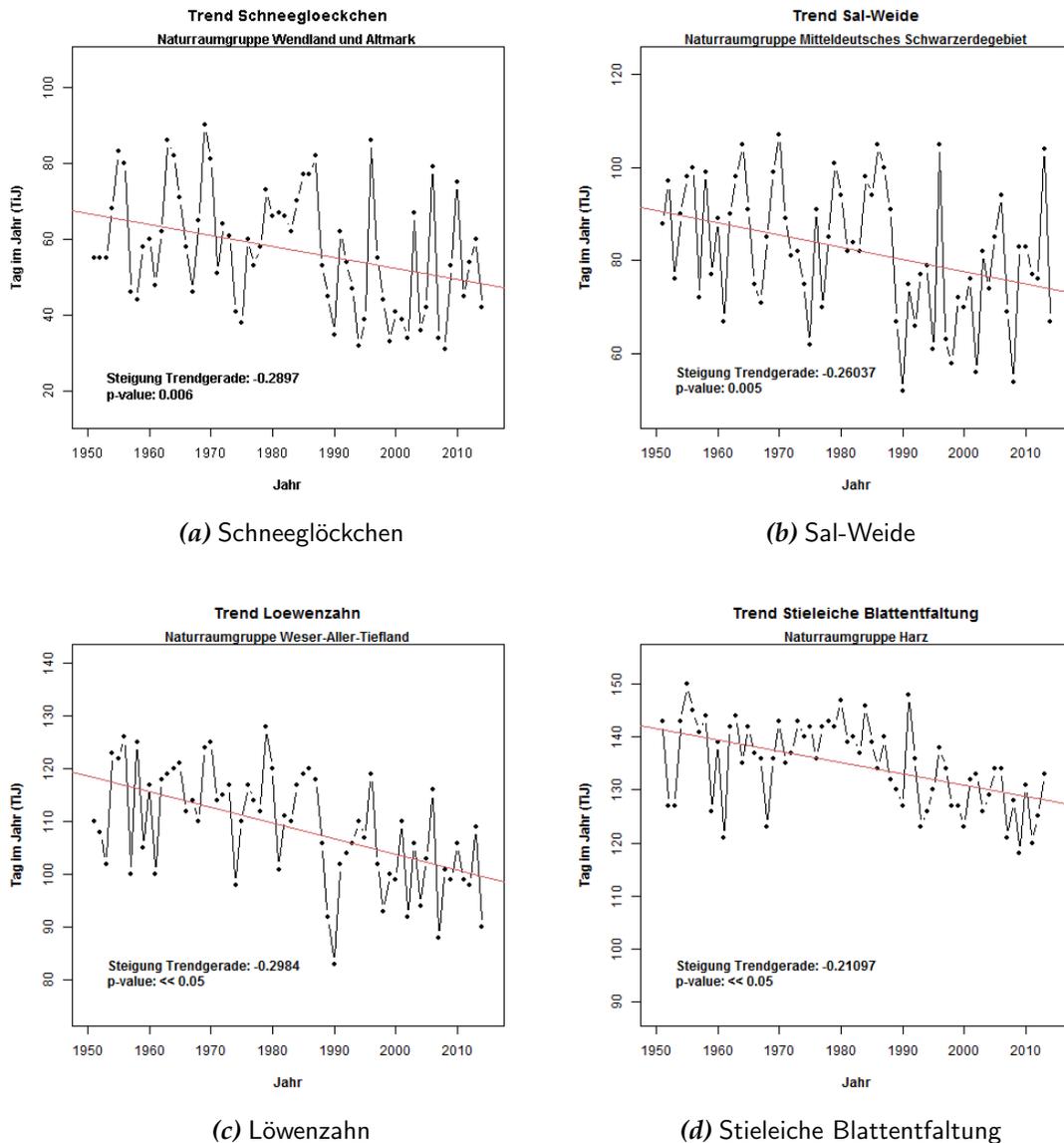


Abbildung 4.79: Beispiele für Trends in den Frühlingsphasen: (a) Schneeglöckchen im Wendland und der Altmark; (b) Sal-Weide im Mitteldeutschen Schwarzerdegebiet; (c) Löwenzahn im Weser-Aller-Tiefland und (d) Blattentfaltung der Stieleiche im Harz.

4.7.3.2 Sommerphasen

Zu den Sommerphasen gehören die Blüte des Holunders (Frühsommer), die Blüte der Sommer-Linde (Hochsommer) und die Blüte des Heidekrauts (Spätsommer).

Der Phasenbeginn der Blüte des Holunders setzt im Schnitt zwei bis drei Tage früher je Dekade ein. Die Sommer-Linde zeigt eine etwas schwächer ausgeprägte Neigung zum früheren Eintritt (1,5 bis 2 Tage); deutlicher ist dies in der Naturraumgruppe Weser-Aller-Tiefland mit einem Rückgang des Phaseneintritts bei der Linde von drei Tagen pro Dekade. Die Trends für die beiden Leitphasen sind in allen Naturraumgruppen statistisch signifikant.

Die Blüte des Heidekrauts zeigt keinen einheitlichen Trend. In einigen Naturraumgruppen gibt es einen schwach ansteigenden und in anderen einen schwach abfallenden Trend. Signifikant sind die Entwicklungen hier nur in den Naturraumgruppen Elbe-Mulde-Tiefland (späterer Eintritt von 0,6 Tagen pro Dekade), Elbtalniederungen (späterer Eintritt von 0,8 Tagen pro Dekade), Lüneburger Heide (späterer Eintritt von 0,6 Tagen pro Dekade und im Thüringer Becken (früherer Eintritt der Phase von 0,7 Tagen pro Dekade). Beispiele sind in Abb. 4.80 wiedergegeben.

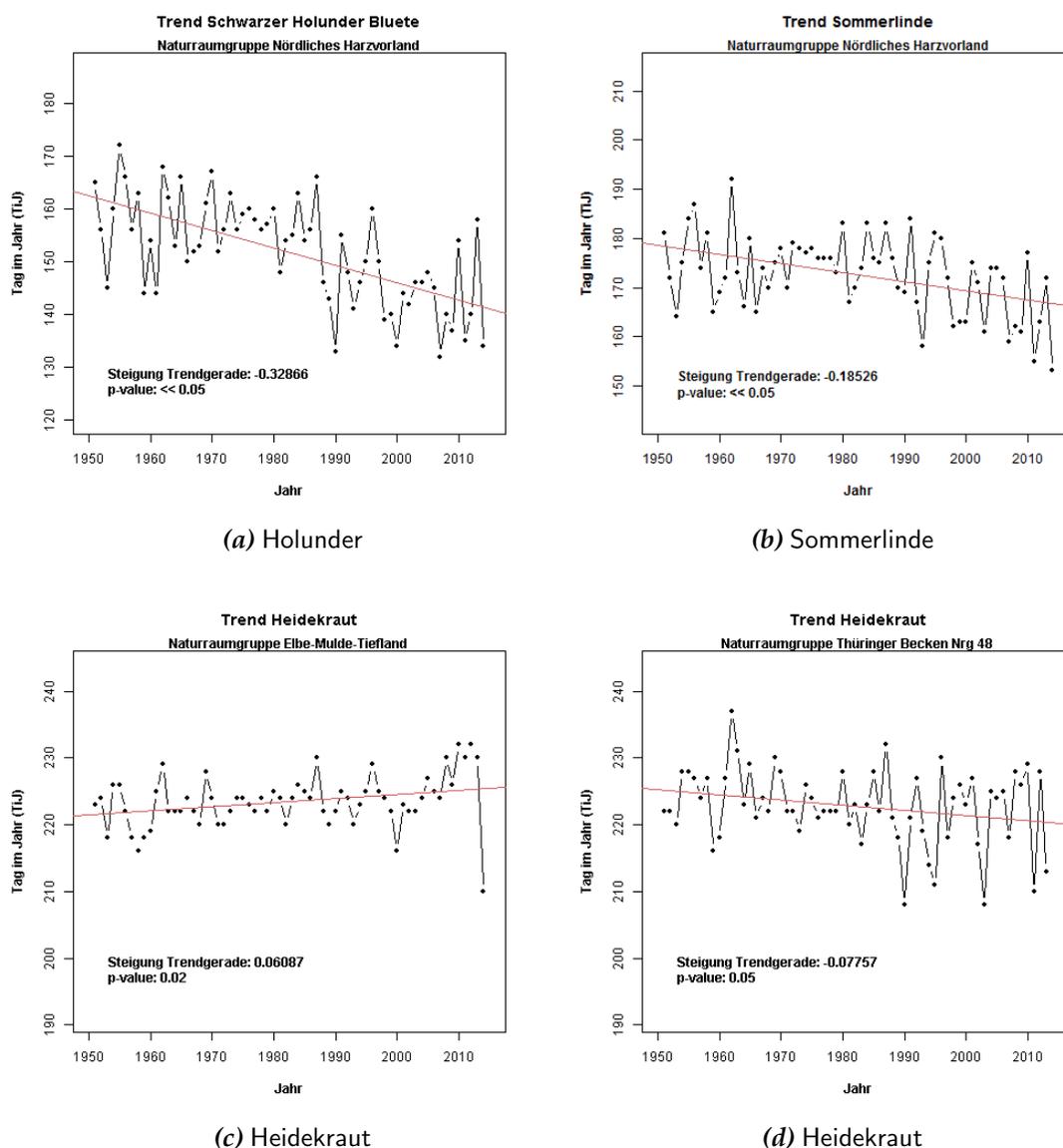


Abbildung 4.80: Beispiele für Trends in den Sommerphasen: (a) Schwarzer Holunder im nördlichen Harzvorland; (b) Sommerlinde im nördlichen Harzvorland; (c) Heidekraut im Elbe-Mulde-Tiefland und (d) Heidekraut im Thüringer Becken.

4.7.3.3 Herbstphasen

Die Fruchtreife des Holunders und der Stieleiche, sowie die Blattverfärbung der Stieleiche zählen zu den phänologischen Phasen des Herbstes.

Die Fruchtreife des Holunders zeigt einen Trend für einen früheren Phaseneintritt von 1,5 bis 3 Tagen pro Dekade.

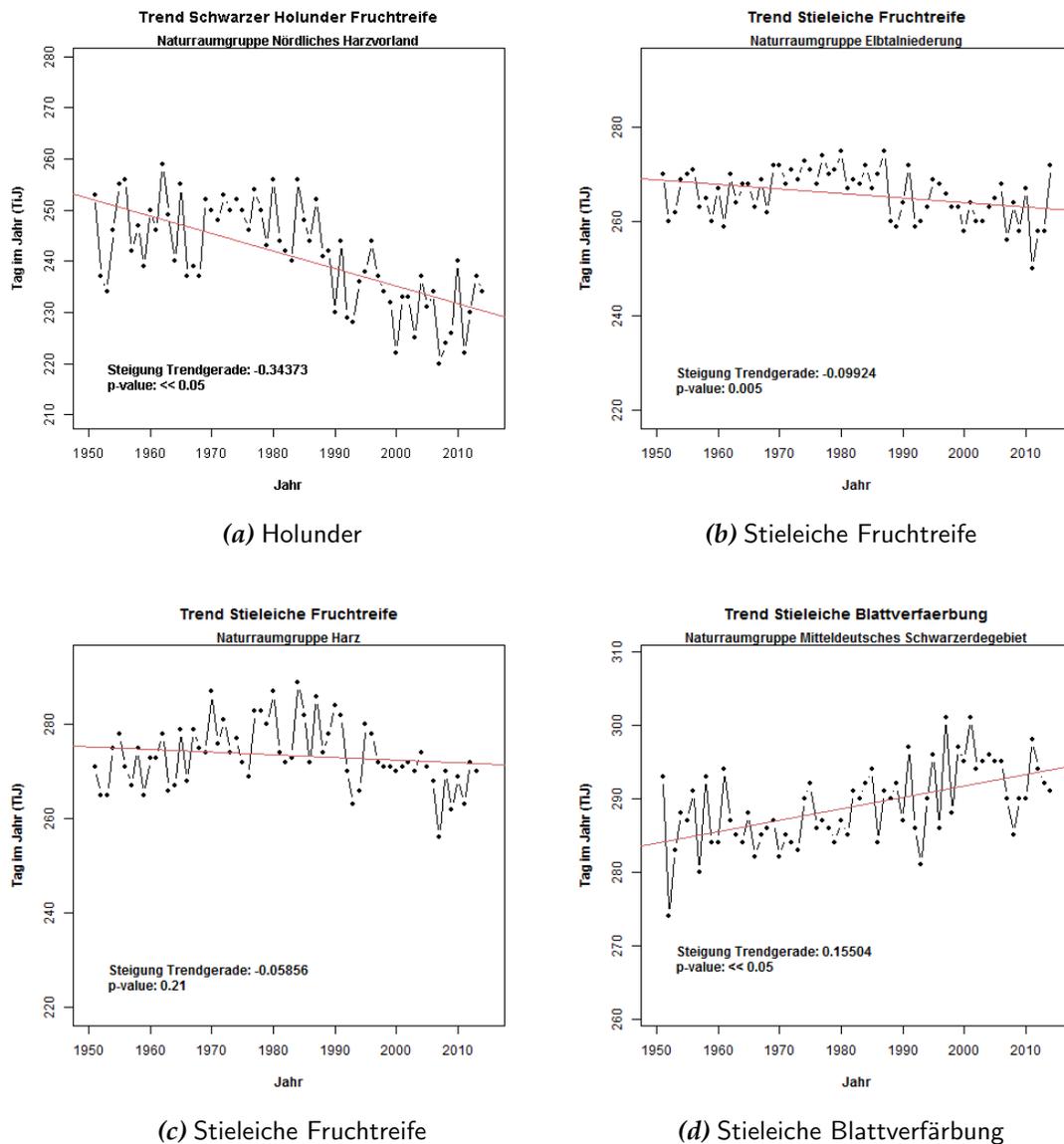


Abbildung 4.81: Beispiele für Trends in den Herbstphasen: (a) Schwarzer Holunder (Fruchtreife) im nördlichen Harzvorland; (b) Fruchtreife der Stieleiche in den Elbtalniederungen, (c) Fruchtreife der Stieleiche im Harz und (d) Blattverfärbung der Stieleiche im Mitteldeutschen Schwarzerdegebiet.

Die Fruchtreife der Stieleiche zeigt einen geringfügig früheren Phaseneintritt von ein bis 1,5 Tagen pro Dekade für einige Naturraumgruppen. Die Blattverfärbung der Stieleiche zeigt eine Entwicklung zum späteren Phaseneintritt

(aufwärts geneigte Trendgerade) um ein bis zwei Tage pro Dekade. Die Trends in den drei Leitphasen sind dabei nicht für alle Naturraumgruppen signifikant. Abb. 4.81 zeigt Beispiele für Trends in den Herbstphasen.

4.7.3.4 Winterphase

Für die Untersuchungen der Winterphase wird der Blattfall der Stieleiche verwendet. Da der Datenbestand sehr lückenhaft ist, kann eine Trenduntersuchung in Analogie zu den anderen Jahreszeitenphasen nicht durchgeführt werden. Trotzdem sind Veränderungen sichtbar, die einen Hinweis auf einen Trend geben. Abb. 4.82 zeigt eine Gegenüberstellung des Eintritts der ersten negativen Tagesmitteltemperatur und dem Blattfall der Stieleiche für die Stationen Harzgerode und Magdeburg.

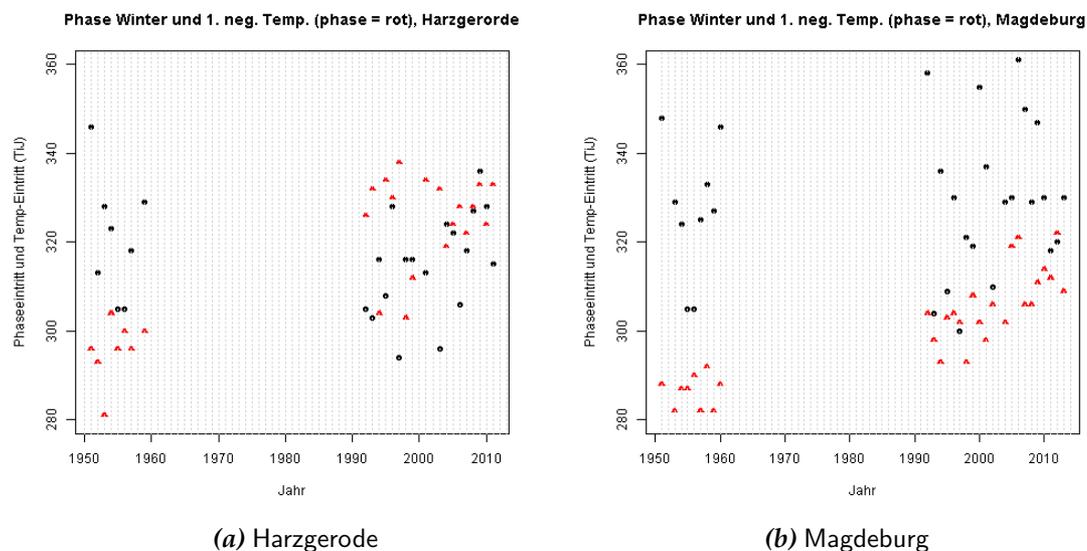


Abbildung 4.82: Veränderungen im Blattfall der Stieleiche an den Stationen Harzgerode (a) und Magdeburg (b). Dargestellt sind für jedes mit Daten belegte Jahr der Eintritt der phänologischen Phase (schwarze Symbole) und der Tag des erstmaligen Auftretens einer negativen Tagesmitteltemperatur (rote Symbole).

Es ist zu erkennen, dass in den Jahren 1950 bis 1960 der Blattfall systematisch nach Einsetzen der ersten negativen Tagesmitteltemperatur auftritt. In den Jahren nach 1990 ist diese eindeutige Reihenfolge nicht mehr zu beobachten. Es findet eine zufällig erscheinende Reihenfolge beider Parameter statt. Weiter ist sichtbar, dass die erste negative Tagesmitteltemperatur ab 1990 später auftritt. Eine Veränderung im Beginn des Blattfalls ist nicht klar zu erkennen.

4.7.4 Phänologische Uhren

Um Verschiebungen in den Jahreszeiten besser veranschaulichen zu können, werden die Mittelwerte der Phasen für die Jahre 1951–1980 und 1981–2014 mit Hilfe von phänologischen Uhren dargestellt (vgl. Abb. 4.83). Für die Erstellung wird das Programm *PhaenUhr* 1.0.9 verwendet (entwickelt von Jochen Senkbeil, Universität Gießen). In der Phänologischen Uhr werden alle phänologischen Jahreszeiten als Kreissegmente dargestellt. Dabei beginnt eine phänologische Jahreszeit jeweils mit dem Eintritt der jeweiligen phänologischen Leitphase und endet mit dem Beginn der nächsten Phase. Die beiden Ringe stellen die mittleren Werte für die betrachteten Zeitabschnitte dar. Zu beachten ist, dass der Eintritt der Winterphase aufgrund der fehlenden Daten nicht aussagekräftig genug ist, dennoch benutzt wird, um diese Darstellungsweise verwenden zu können.

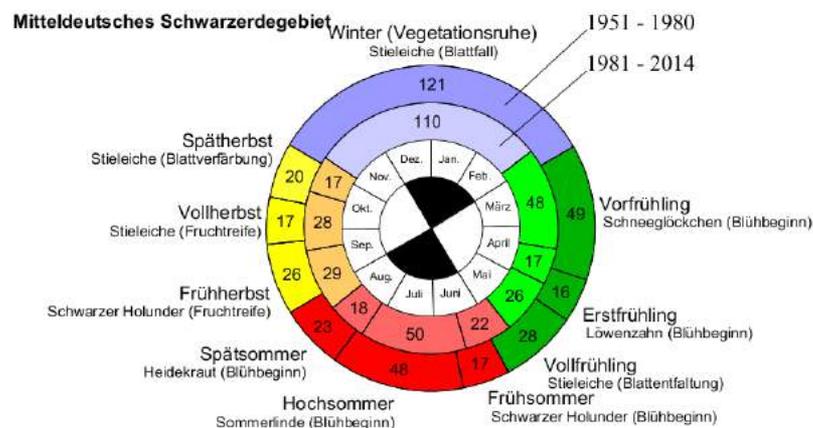


Abbildung 4.83: Phänologische Uhr für die Naturraumgruppe Mitteldeutsches Schwarzerdegebiet.

In Sachsen-Anhalt ist in den verschiedenen Naturräumen eine Verlängerung der vegetationsaktiven Zeit zu beobachten. Die Frühlingsphasen setzen in allen Naturräumen in der späteren Periode früher ein. Ebenso beginnen der phänologische Frühsommer und der Frühherbst zeitiger.

Unter Berücksichtigung des etwas ungenauen Eintritts der Vegetationsruhe¹³⁾ gibt es eine Tendenz für eine länger andauernde Herbstperiode.

Vergleicht man die phänologische Vegetationsperiode (Beginn Vorfrühling bis Beginn Blattverfärbung¹⁴⁾) des Betrachtungszeitraumes 1981 bis 2014 mit dem Zeitraum 1951 bis 1980, ist eine Verlängerung der Vegetationsperiode von 11 Tagen im Mittel über alle Naturraumgruppen zu beobachten. Dabei ist die Veränderung in der Naturraumgruppe Harz mit 5 Tagen am geringsten und im

¹³⁾Geringere Belastbarkeit der phänologischen Winterphase durch große Datenlücken, beschrieben in Abschnitt 4.7.3.4.

¹⁴⁾Die Länge Vegetationsperiode errechnet sich durch das Aufaddieren der Dauern der Jahreszeiten vom Vorfrühling bis einschließlich Vollherbst.

Mitteldeutschen Schwarzerdegebiet mit 14 Tagen am höchsten. Diese Ergebnisse decken sich weitgehend mit den Ergebnissen von SCHEFFLER (2010).

Abb. 4.83 zeigt die phänologische Uhr für die Naturraumgruppe Mitteldeutsches Schwarzerdegebiet. Phänologische Uhren wurden auch für die anderen Naturraumgruppen erzeugt. Die Grafiken finden sich auf dem projektbegleitenden Datenträger im Unterverzeichnis /phaeno_grafiken/Kapitel_4_7_3.

Zudem wurden Untersuchungen der Vegetationsperioden mit verschiedenen Definitionen für deren Beginn und Ende durchgeführt:

- Thermischer Vegetationsindex, der Beginn und Ende über bestimmte Temperaturverhalten definiert;
- Phänologischer Vegetationsindex, der Beginn und Ende über ausgewählte Phasen definiert;
- Frostfreie Zeit des Jahres, der Beginn und Ende über Perioden ohne Frosttage definiert.

Die zugehörigen Analysen finden sich in Anhang B.9.

Die Ergebnisse der Trendanalyse decken sich mit den Studien von SCHEFFLER (2010) und KOLODZIEJ (2007). Ursachen für die Trendentwicklungen werden vor allem in Veränderungen der Klimaparameter Temperatur und Niederschlag, sowie in der Variabilität von großräumigen atmosphärischen Zirkulationen wie der Nordatlantischen Oszillation gesehen (MENZEL, 2007). Inwieweit sich Zusammenhänge in dieser Studie zeigen, wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

4.7.5 Zusammenhang der phänologischen Beobachtungen mit anderen Parametern

4.7.5.1 Zusammenhänge mit der Temperatur

Die Temperatur zählt zu den Parametern, die die Variabilität von phänologischen Phasen besonders stark beeinflussen. In diesem Abschnitt wird daher untersucht, ob die Temperatur das frühere Einsetzen der Phasen im Frühjahr, Sommer und Herbst beeinflusst. Des Weiteren ist es interessant, zu ermitteln, ob sich extreme Temperaturparameter, wie Frost oder Hitze auf das Eintrittsverhalten der Phasen auswirken.

Nach MENZEL (2007) ist es sinnvoll, Mitteltemperaturwerte von zwei bis drei Monaten zu verwenden. Für diese Analyse der Zusammenhänge zwischen Frühlingsphasen und der Temperatur werden daher die Monatsmitteltemperaturwerte für Dezember bis Februar bestimmt.

Da die Temperatur mit der Höhe abnimmt, wird sie analog zu den phänologischen Phasen höhenkorrigiert. Um Luftmassenunterschiede zu berücksichtigen, nimmt man im Mittel einen Abnahmefaktor von 0,6 bis 0,7 K pro 100 m an.

Für diese Studie wird die Temperatur um den Faktor 0,6 K korrigiert (WALLACE und HOBBS, 2006).

Die Korrelationsanalyse zwischen den Frühlingsphasen Blüte des Schneeglöckchens, Blüte der Sal-Weide und Blüte des Löwenzahns zeigt einen hoch signifikanten negativen Zusammenhang mit Korrelationskoeffizienten bis zu $\rho = -0,8$ (Beispiele für Schneeglöckchen und Löwenzahn sind in Abb. 4.84 zu finden). Dies bedeutet, dass steigende Temperaturwerte zu einem früheren Blühen der entsprechenden Phasen führen.

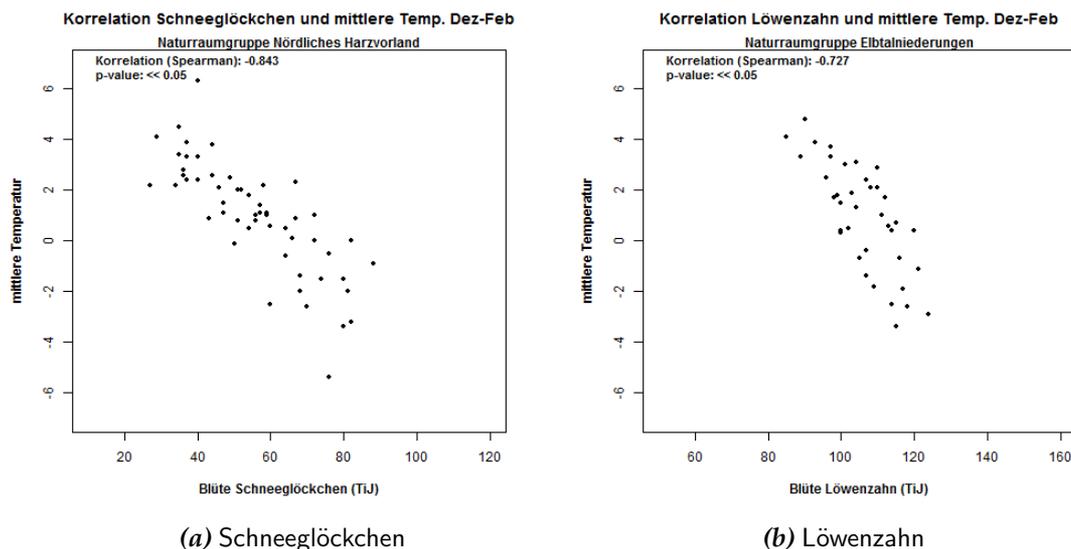
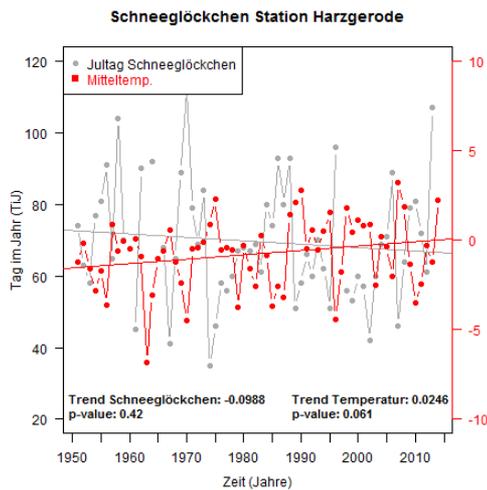


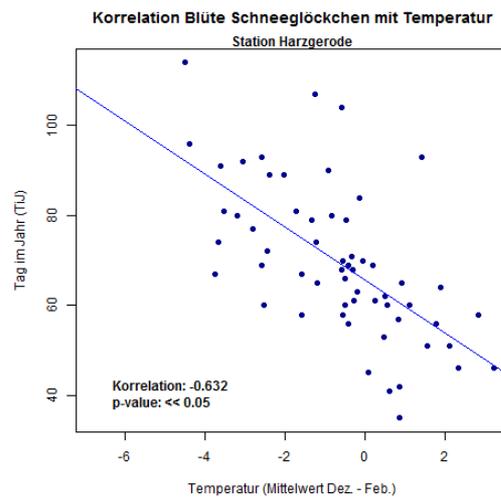
Abbildung 4.84: Scatterplots des Beginns von phänologischen Phasen (x-Achse) und der mittleren Temperatur der Monate Dezember bis Februar für die Blüte des Schneeglöckchens in der Naturraumgruppe Nördliches Harzvorland (linke Teilfigur) und die Blüte des Löwenzahns für die Naturraumgruppe Elbtalniederungen (rechte Teilfigur).

In Abschnitt 4.7.3 wurde deutlich, dass die Trendentwicklung der phänologischen Phasen in einigen Naturräumen signifikant und in anderen nicht signifikant ist. So konnte z.B. in der Naturraumgruppe Harz für das Schneeglöckchen kein signifikanter Trend nachgewiesen werden. Eine Analyse von Trends und Korrelationen zwischen Phaseneintritt und Temperatur an Einzelstationen kann Aufschluss über diese Unterschiede geben.

Die Abb. 4.85 (a) und (b) zeigen exemplarisch den Zusammenhang zwischen Temperatur und Phaseneintritt für die Station Harzgerode. Der vorher erwähnte negative Zusammenhang zwischen beiden Parametern, zeigt sich in der Gegenläufigkeit der beiden Trends. Beide Trends sind jedoch nicht signifikant [Teilfigur (a): p-value des Temperaturmittels = 0,061, p-value des Phaseneintritts = 0,42]. Abb. 4.85 (b) zeigt die Korrelation zwischen beiden Parametern mit dem Korrelationskoeffizienten und dem p-value. Der Zusammenhang ist mit $\rho = -0,63$ signifikant (p-value $\ll 0,05$).

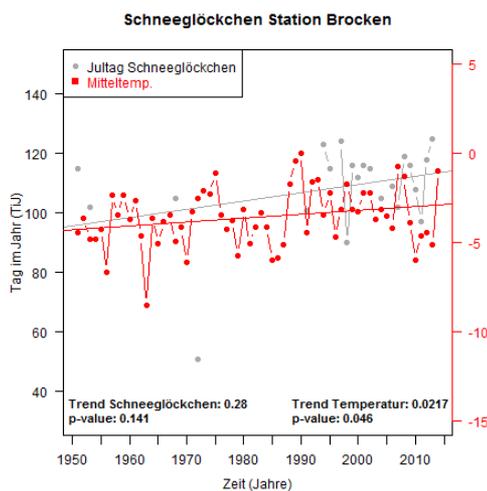


(a) Zeitl. Trend

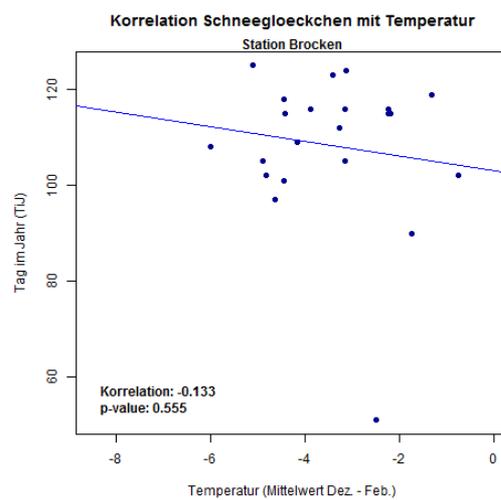


(b) Korrelation mit Temperatur

Abbildung 4.85: Trendentwicklung der Mitteltemperatur der Monate Dezember bis Februar (linke, Teilfigur, rote Kurve) und des Eintretens der phänologischen Phase Schneeglöckchen (linke Teilfigur, graue Kurve) sowie Scatterplot zwischen der Mitteltemperatur der Monate Dezember bis Februar und der Eintrittstage des Schneeglöckchens (rechte Teilfigur). Station: Harzgerode.



(a) Zeitl. Trend



(b) Korrelation mit Temperatur

Abbildung 4.86: Trendentwicklung der Mitteltemperatur der Monate Dezember bis Februar (linke, Teilfigur, rote Kurve) und des Eintretens der phänologischen Phase Schneeglöckchen (linke Teilfigur, graue Kurve) sowie Scatterplot zwischen der Mitteltemperatur der Monate Dezember bis Februar und der Eintrittstage des Schneeglöckchens (rechte Teilfigur). Station: Brocken.

Vergleicht man dazu die Abb. 4.86 (a) und (b), die den Zusammenhang zwischen Temperatur und Phaseneintritt für die Station Brocken darstellen, ist zu erkennen, dass der Zusammenhang weniger stark ausgeprägt ist. Zu beachten ist, dass für eine belastbare Trenduntersuchung der Phase Schneeglöckchen am Brocken die Zeitreihe nicht ausreichend lang ist. Gut zu sehen ist jedoch der schwache Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Phase in der Korrelation [Abb. 4.86 (b)]. Beide Stationen fließen in die Betrachtung auf der Ebene der Naturraumgruppen ein und können somit, wenn an einzelnen Stationen der Zusammenhang unterschiedlich stark ausfällt, dazu führen, dass ein Trend nicht signifikant ist.

Auch die Anzahl der Frosttage (mit einer Tagesminimumtemperatur unter 0 °C) hat einen Einfluss auf den Beginn der Frühjahrsphase. Je mehr Frosttage es gibt, desto später treten die Frühjahrsphasen ein. Für die Leitphasen Schneeglöckchen, Sal-Weide und Löwenzahn sind alle Zusammenhänge hoch korreliert und signifikant (vgl. Abb. 4.87). Die Phase der Blattentfaltung der Stieleiche zeigt ebenfalls einen positiven Zusammenhang, der jedoch nicht mehr so stark ausgeprägt ist.

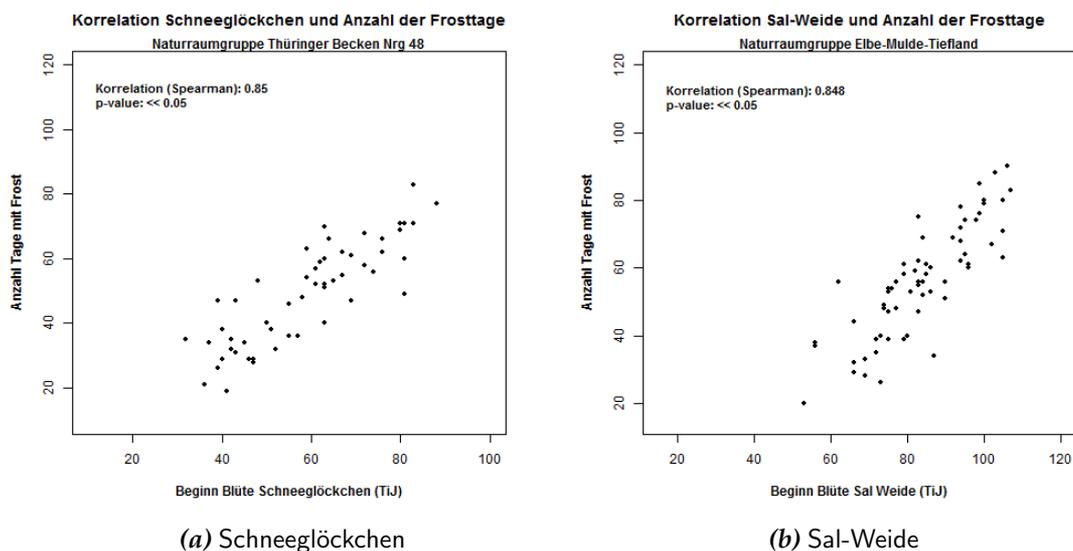


Abbildung 4.87: Scatterplots des Beginns von phänologischen Phasen (x-Achse) und der Anzahl der Frosttage (y-Achse) für die Schneeglöckchenblüte in der Naturraumgruppe Thüringer Becken (linke Teilfigur) und die Sal-Weide in der Naturraumgruppe Elbe-Mulde-Tiefland (rechte Teilfigur).

Spätfröste (hier: letzter Tag mit Frost im Frühjahr) haben ebenso einen Einfluss auf die phänologischen Phasen der Blattentfaltung der Stieleiche wie auf die Blüte des schwarzen Holunders und der Sommerlinde. Die Korrelationskoeffizienten variieren dabei zwischen $\rho = 0,25$ und $\rho = 0,6$. Im Harz ist der Zusammenhang zwischen Spätfrösten und Phaseneintritt am deutlichsten zu beobachten (vgl. Abb. 4.88).

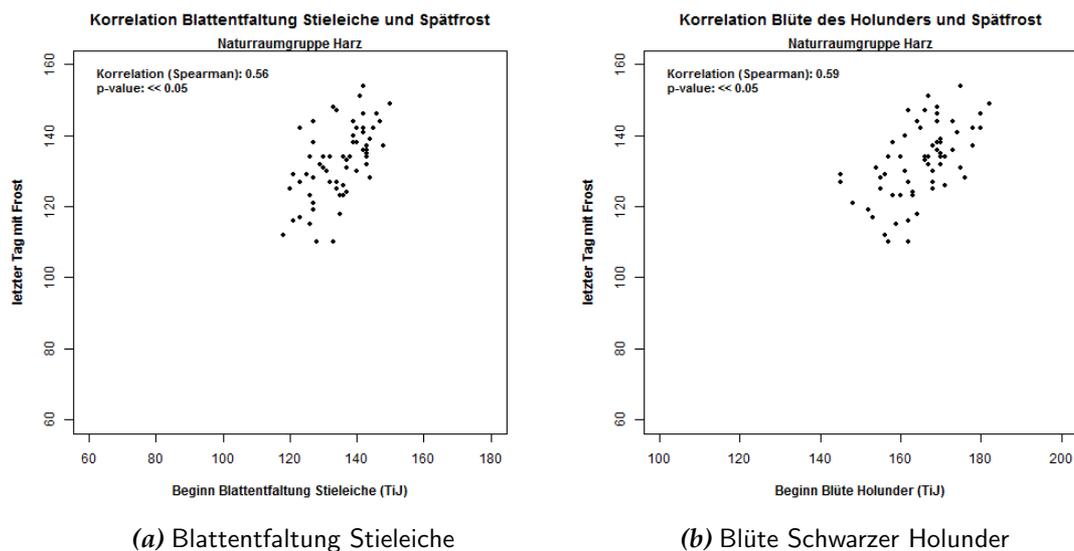


Abbildung 4.88: Scatterplots des Beginns der phänologischen Phasen (x-Achse) und Spätfrost (y-Achse) für die Blattformfaltung der Stieleiche (linke Teilfigur) und die Blüte des schwarzen Holunders (rechte Teilfigur) für die Naturraumgruppe Harz.

Für die phänologischen Phasen Blüte des Holunders, der Sommerlinde und des Heidekrauts wurde zusätzlich der Zusammenhang zu der mittleren Temperatur der Monate März bis Mai untersucht. Alle Phasen reagieren mit einem früheren Phasenbeginn auf hohe Temperaturwerte. Vor allem die Blüte des Holunders zeigt stark ausgeprägte Zusammenhänge mit Koeffizienten von $\rho = 0,9$ in allen Naturraumgruppen (Beispiele für Holunder und Sommerlinde finden sich in Abb. 4.89).

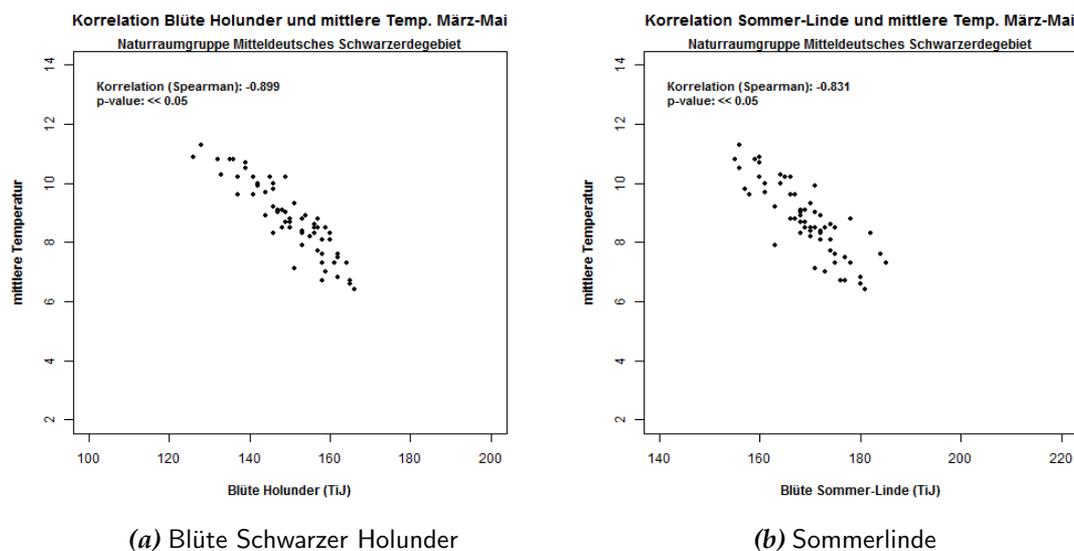


Abbildung 4.89: Scatterplots des Beginns der phänologischen Phasen (x-Achse) und der mittleren Temperatur der Monate März bis Mai (y-Achse) für die Blüte des Holunders (linke Teilfigur) und die Blüte der Sommerlinde (rechte Teilfigur) für die Naturraumgruppe Mitteldeutsches Schwarzerdegebiet.

Hitzetage mit einer Maximumtemperatur von 30 °C oder mehr führen andererseits dazu, dass die Evapotranspiration besonders hoch ist und Pflanzen damit potentiell Trockenstress ausgesetzt sind. Es ist daher lohnend, zu analysieren, inwiefern die Anzahl der Hitzetage im Sommer den Phaseintritt bestimmter Leitphasen beeinflusst. Die beobachteten Zusammenhänge sind nicht so stark, wie sie z.B. bei den Frosttagen festzustellen waren. Die Fruchtreife des Schwarzen Holunders und der Stieleiche reagieren am stärksten auf die Anzahl der Hitzetage (vgl. Abb. 4.90). Die Reaktion erfolgt in Form einer früher einsetzenden Fruchtreife, wenn Hitze und potentielle Trockenheit auftreten.

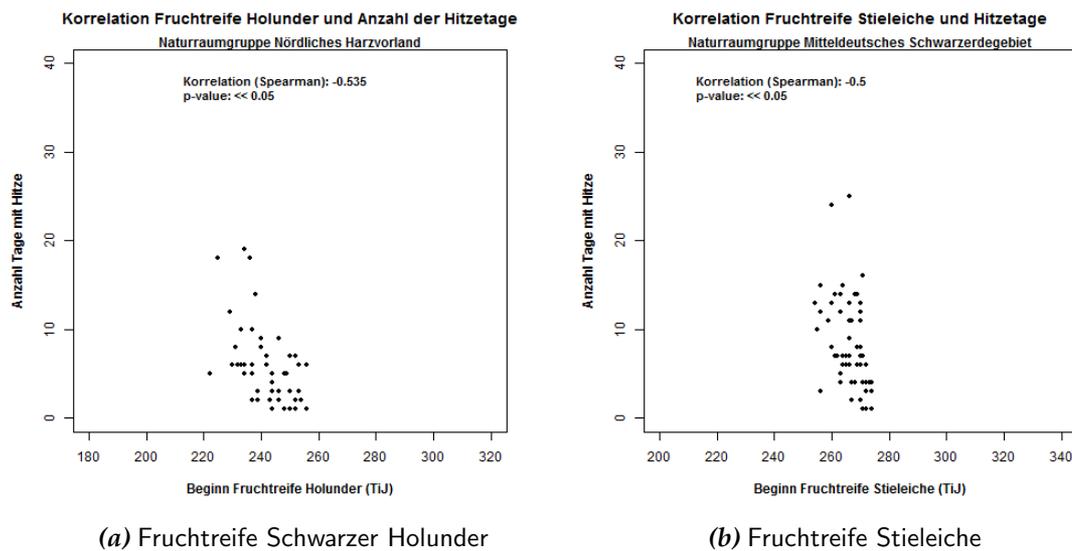


Abbildung 4.90: Scatterplots des Beginns von phänologischen Phasen (x-Achse) und der Anzahl der Hitzetage (y-Achse) für die Blüte des Schwarzen Holunders in der Naturraumgruppe Nördliches Harzvorland (linke Teilfigur) und die Fruchtreife der Stieleiche in der Naturraumgruppe Mitteldeutsches Schwarzerdegebiet (rechte Teilfigur).

Für die Zusammenhänge zwischen Temperatur und den Herbstphasen wurden für die Phasen Fruchtreife des Holunders und Fruchtreife der Stieleiche die mittleren Temperaturwerte der Monate Juni bis August und für die Phase Blattverfärbung der Stieleiche die mittleren Temperaturwerte der Monate August und September verwendet.

Für die Fruchtreife des Holunders und der Stieleiche zeigen sich negative Korrelationen mit einem Koeffizienten ρ , die in allen Naturraumgruppen signifikant sind ($\rho > 0,26$ und $\rho < 0,6$) (vgl. Abb. 4.91). Beide Phasen reagieren wie die Sommerphasen mit einem früheren Eintritt auf relativ hohe Temperaturwerte.

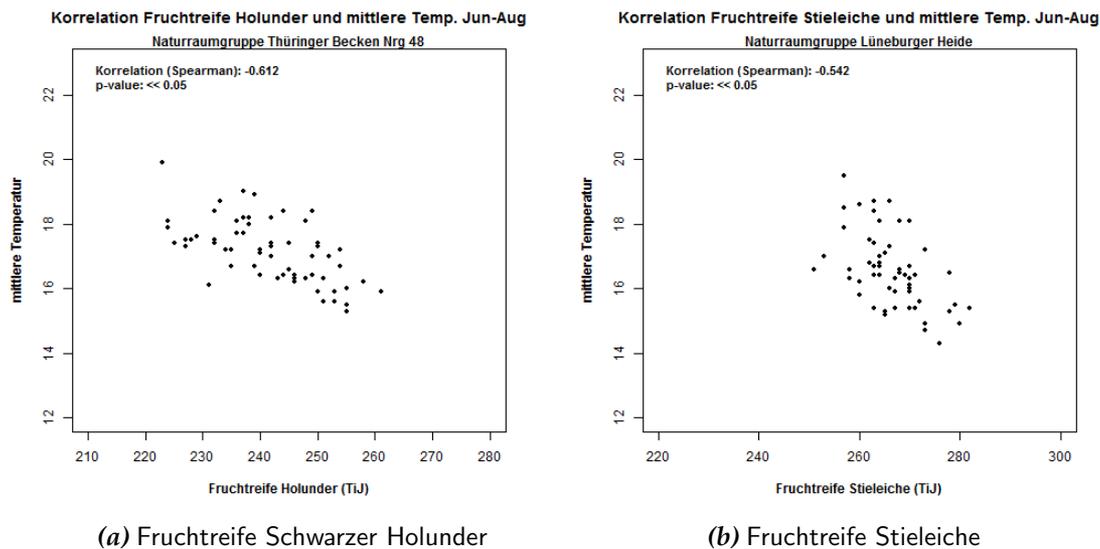


Abbildung 4.91: Scatterplots des Beginns der phänologischen Phasen (x-Achse) und der mittleren Temperatur der Monate Juni bis August (y-Achse) für die Fruchtreife des Holunders für die Naturraumgruppe Thüringer Becken und Randplatten 47 (linke Teilfigur) und die Fruchtreife der Stieleiche für die Naturraumgruppe Lüneburger Heide (rechte Teilfigur).

Die Phase Blattverfärbung der Stieleiche reagiert dagegen mit einem späteren Beginn auf erhöhte Temperaturwerte ($\rho > 0,42$ und $\rho < 0,65$) (vgl. Abb. 4.92). Somit kommt es zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode.

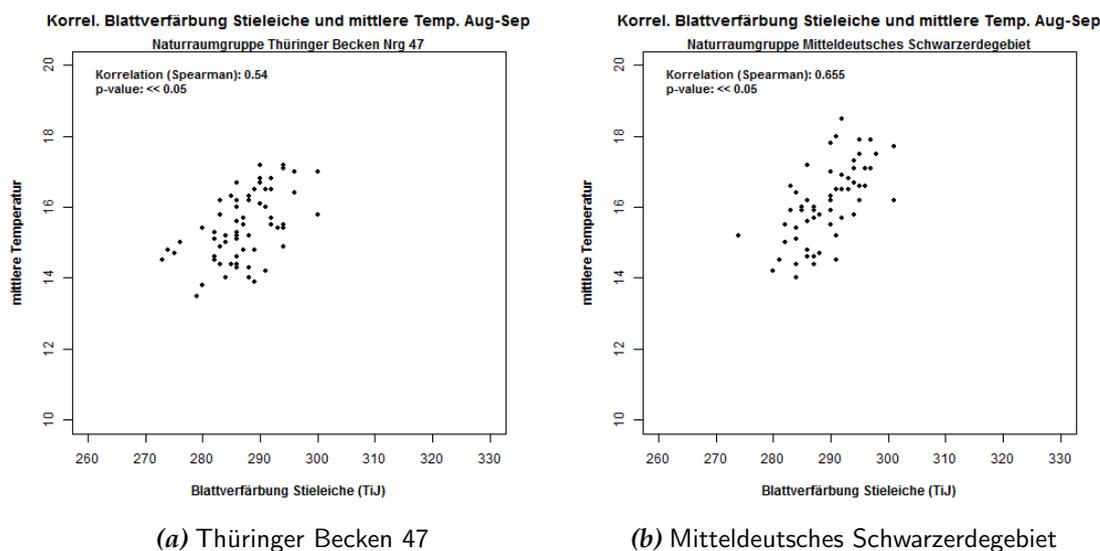


Abbildung 4.92: Scatterplots des Beginns der phänologischen Phasen (x-Achse) und der mittleren Temperatur der Monate August bis September (y-Achse) für die Blattverfärbung der Stieleiche für die Naturraumgruppe Thüringer Becken und Randplatten 47 (linke Teilfigur) und die Naturraumgruppe Mitteldeutsches Schwarzerdegebiet (rechte Teilfigur).

4.7.5.2 Zusammenhänge mit dem Niederschlagsverhalten

Neben der Temperatur hat auch Niederschlag einen großen Einfluss auf das Pflanzenwachstum. Interessant ist, ob sich diese Einflüsse auch in der Phänologie widerspiegeln und Veränderungen im Niederschlagsverhalten sich auf das Eintreten einer Phase auswirken. Vor allem bei den Herbstphasen spielen Niederschlagsmengen im Sommer und die Einstrahlung eine höhere Rolle. Geringer Niederschlag bei hoher Evapotranspiration kann zudem bei Pflanzen zu Wasserstress führen und z.B. zu einer frühzeitigen Blattverfärbung oder einem frühzeitigem Blattfall führen (CHMIELEWSKI, 2007).

Für diese Analyse wurden folgende Zusammenhänge betrachtet:

- Haben Winterniederschläge einen Einfluss auf den Beginn der Frühlingsphasen?
- Haben geringe Frühjahresniederschläge einen Einfluss auf die Sommerphasen?
- Haben geringe Niederschläge über das Sommerhalbjahr Einfluss auf die Herbstphasen?
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem SPI-Index und der Blattverfärbung der Stieleiche?

Die Analysen erfolgen, indem für die einzelnen Naturraumgruppen mittlere Niederschlagssummen aller vorhandenen Stationen gebildet werden, da eine relativ hohe Datendichte vorhanden ist. Bisweilen werden auch Zusammenhänge an Einzelstationen untersucht, die als repräsentativ für kleinere Naturraumgruppen erachtet werden.

Die *Winterniederschläge* zeigen für einige Naturraumgruppen leichte negative Korrelationen. In den Naturraumgruppen Wendland und Altmark (86), Lüneburger Heide (64), Weser-Aller-Tiefland (62) und dem Harz (38) ist der Zusammenhang statistisch signifikant (vgl. Beispiele in Abb. 4.93). Ein geringes Niederschlagsdargebot führt in diesem Fall zu einem leicht späteren Einsetzen der Frühlingsphase, in diesem Fall dem Schneeglöckchen.

Bei der Analyse des Einflusses der *Frühjahresniederschläge* auf den Phasenbeginn ist es interessant, zu ermitteln, ob es Veränderungen gibt, wenn in den Monaten April bis Juni (auch als Vegetationsperiode I bekannt) wenig Niederschlag fällt. In der Landwirtschaft hat ein geringer Niederschlag besonderen Einfluss auf die Ernte und Produktivität. Es wird daher geprüft, ob auch Wildpflanzen auf geringe Niederschläge im Frühjahr und Frühsommer reagieren. Untersucht wird der Zusammenhang zwischen Frühjahresniederschlägen und der Leitphase Sommerlinde.

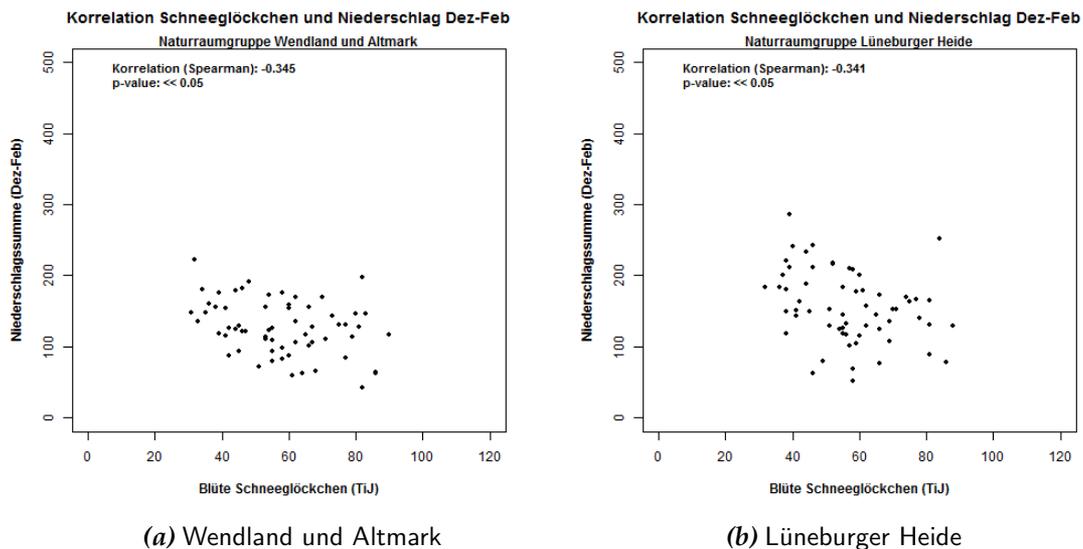


Abbildung 4.93: Scatterplot des Beginns der Schneeglöckchenblüte (x-Achse) und der Niederschlags-summe im Winter (y-Achse) für die Naturraumgruppe Wendland und Altmark (linke Teilfigur) und die Naturraumgruppe Lüneburger Heide (rechte Teilfigur).

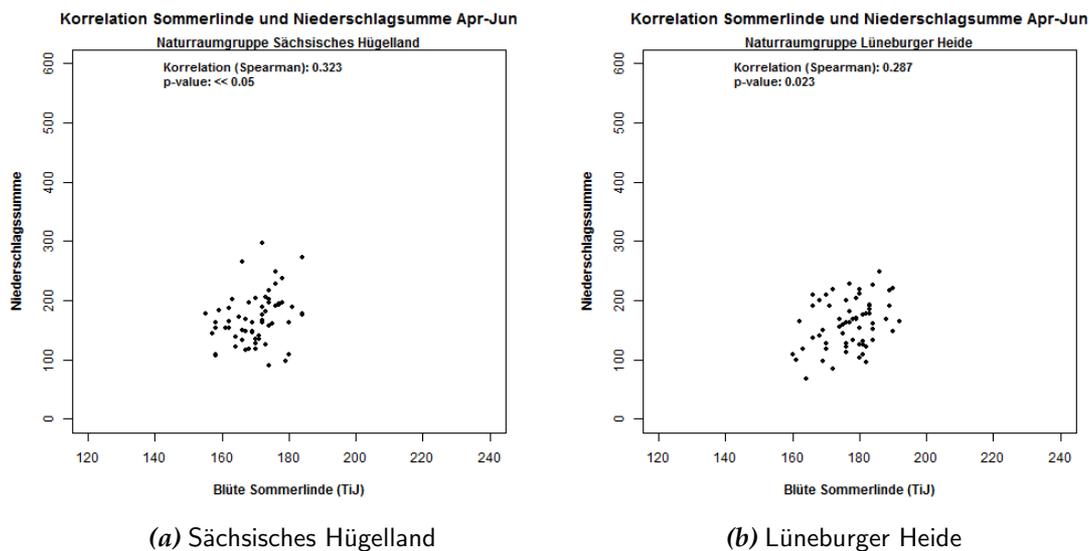


Abbildung 4.94: Scatterplot des Beginns der Blüte der Sommerlinde (x-Achse) und der Niederschlags-summe in den Monaten April bis Juni (y-Achse) für die Naturraumgruppe Erzgebirgsvorland und Sächsisches Hügelland (linke Teilfigur) und die Naturraumgruppe Lüneburger Heide (rechte Teilfigur).

Die Korrelationsanalyse zeigt einen leicht positiven Zusammenhang zwischen den Niederschlägen (April bis Juni) und der Leitphase Sommerlinde. Für die Naturraumgruppen Harz (38), Erzgebirgsvorland und Sächsisches Hügelland (46), Thüringer Becken Nrg. 47 und Lüneburger Heide (64) ist der Zusammenhang signifikant (vgl. Beispiele in Abb. 4.94). Die Sommerlinde reagiert also mit einem etwas früheren Beginn der Blüte auf geringere Niederschlagsmengen.

Nach CHMIELEWSKI (2007) haben fehlende Niederschläge auch einen Einfluss auf die *Herbstphasen*. Da Bäume und Pflanzen in unterschiedlicher Weise auf Trockenheit und Trockenstress reagieren, ist es interessant zu sehen, ob die Herbstphasen eine Reaktion auf geringere Niederschläge zeigen. Analysiert wurden die Niederschlagssummen des Sommerhalbjahres (April bis September). Die Herbstphasen zeigen jedoch keine statistisch signifikanten Korrelationen (vgl. Abb. 4.95). Die Analyse mit dem Trockenheitsindikator DP11, der Perioden mit Tagen beschreibt, an denen der Niederschlag 11 Tage lang geringer als 0,1 mm ist, zeigte keine Korrelation mit der Blattverfärbung der Stieleiche.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Analysen einen leichten, jedoch nicht immer deutlich erkennbaren Zusammenhang zwischen dem Niederschlagsangebot und der Variabilität der phänologischen Phasen zeigen. Die Ergebnisse decken sich mit den Studien von SCHEFFLER (2010) und von RUTISHAUSER und STUDER (2007), die in ihren Analysen ebenfalls zu der Erkenntnis kommen, dass der Niederschlag nur einen geringen Einfluss auf die von ihnen untersuchten phänologische Phasen hat.

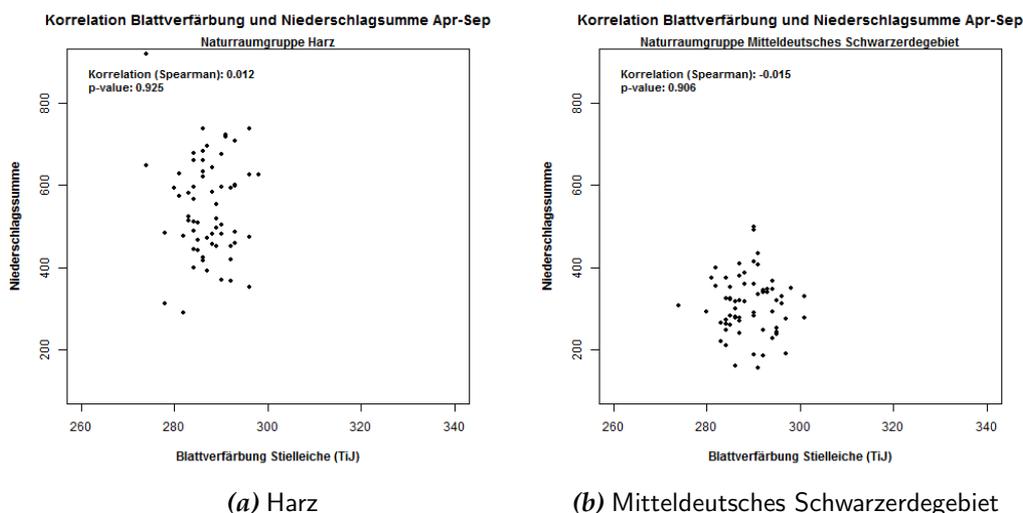


Abbildung 4.95: Scatterplot des Beginns der Blattverfärbung der Stieleiche (x-Achse) und der Niederschlagssumme in den Monaten April bis September (y-Achse) für die Naturraumgruppe 46 (Sächsischen Hügelland, linke Teilfigur) und die Naturraumgruppe 50 (Mitteldeutsches Schwarzerdegebiet, rechte Teilfigur).

4.7.5.3 Zusammenhänge mit der klimatischen Wasserbilanz

Um den Einfluss der potentiellen Verdunstung mit in die Analysen einzubeziehen, werden zusätzlich Zusammenhänge zwischen dem Phasenbeginn und der klimatischen Wasserbilanz (KWB) untersucht. Generell ist eine Einbeziehung von pflanzenspezifischen Parametern bei einer Untersuchung von Trockenheit oder Dürre wichtig. Dies ist in dieser Studie jedoch aufgrund der Datenlage und der räumlichen Ausdehnung zu komplex. Für eine Abschätzung des Wasserbedarfs der Pflanzen ist die KWB daher eine gute Alternative und wird oft als hydrologischer Indikator für Trockenperioden verwendet (LASCH und SUCKOW, 2007; SCHWÄRTZEL et al., 2009). Die KWB berechnet sich aus den kumulativen Unterschieden zwischen dem Niederschlag und der potentiellen Verdunstung (nach DIN 4049–3).

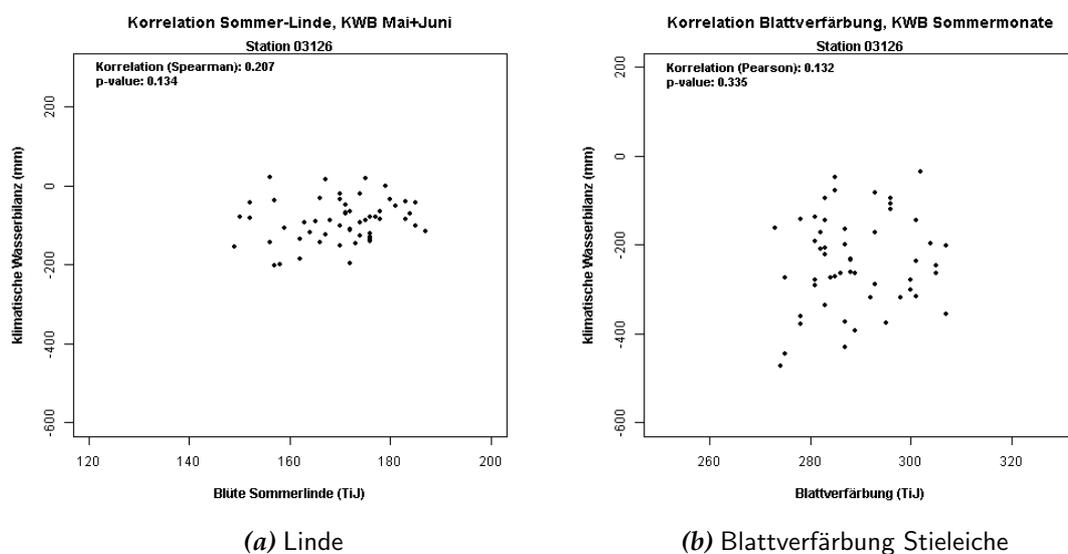


Abbildung 4.96: Scatterplot des Beginns einer phänologischen Phase (x-Achse) und der über mehrere Monate bestimmten klimatischen Wasserbilanz (y-Achse) für die Blüte der Linde im Mai und Juni (linke Teilfigur) und die Blattverfärbung der Stieleiche (rechte Teilfigur) an der Station Magdeburg.

Da die potentielle Verdunstung aufgrund der Datenlage nur für sehr wenige Stationen berechnet werden kann, werden die Analysen nur für diese Stationen durchgeführt und nicht auf Basis der Naturraumgruppen. Dabei wurden folgende Einflüsse untersucht:

- Kumulierte KWB der Sommermonate (April bis September) auf die phänologischen Phasen Fruchtreife, Blattverfärbung und Blattfall der Stieleiche;
- kumulierte KWB von Mai und Juni auf die Blüte der Sommerlinde und die Blattverfärbung der Stieleiche;

- Kumulierte KWB von Juni bis August auf die Fruchtreife des Holunders und die Blattverfärbung der Stieleiche.

Es ist festzuhalten, dass keine der Analysen einen signifikanten Zusammenhang identifizieren konnte. Beispiele an der Station Magdeburg sind in Abb. 4.96 dargestellt.

4.7.5.4 Zusammenhang mit der Nordatlantischen Oszillation

Ein Aspekt der Untersuchung der phänologischen Daten ist die Identifikation möglicher Zusammenhänge mit Veränderungen in der großräumigen Zirkulation im atlantisch-europäischen Sektor. Basisdaten dafür sind Reanalysen, eine in sich konsistente Aufbereitung von Klimadaten aus der freien Atmosphäre. Aus diesen werden Zirkulationsindizes, wie der North Atlantic Oscillation Index (NAO) gewonnen (Bezugsquelle: Datenbank von NOAA-NCAR).

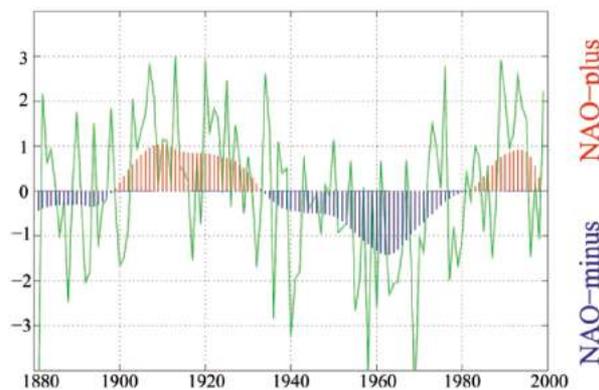


Abbildung 4.97: Beispiel für den zeitlichen Verlauf des NAO-Index von 1880–2000, aus HENSE und GLOWIENKA-HENSE (2008). Die Berechnung des „Lagrangeschen NAO-Index“ erfolgt nach GLOWIENKA-HENSE (1990). Grün dargestellt sind Einzeljahre, schraffierte Flächen geben die gleitenden Mittel wieder.

Die Nordatlantische Oszillation (NAO) beschreibt Abweichungen vom Normalzustand in den Druckverhältnissen über dem Nordatlantik. Dabei fällt den Steuerungszentren der hemisphärischen Zirkulation (Islandtief – polare Region und Azorenhoch – subtropischer Gürtel) eine besondere Rolle zu. Durch Lageverschiebungen oder die unterschiedlich starke Ausprägung der Steuerungszentren ändern sich Zirkulation und Luftmassentransport über dem gesamten atlantisch-europäischen Sektor fundamental. Sinn des in Abb. 4.97 dargestellten NAO-Index ist es, eine Maßzahl zur Verfügung zu stellen, die Auskunft über den Gesamtzustand der hemisphärischen Zirkulation gibt¹⁵⁾.

¹⁵⁾Dabei wird eine Variante des NAO-Index nach GLOWIENKA-HENSE (1990) benutzt, der so genannte „Lagrangesche Index“, in der gleichzeitige Verschiebungen und Stärkeänderungen der Steuerungszentren besser berücksichtigt sind (siehe auch HENSE und GLOWIENKA-HENSE, 2008).

Für die Analyse des Zusammenhangs zwischen den phänologischen Frühlingsphasen und der NAO, wird der NAO-Index analog zum Vorgehen in [HURRELL und NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH STAFF \(EDS.\) \(2015\)](#) für die Monate Dezember bis März aggregiert.

Der NAO-Index ist immer dann positiv, wenn sowohl Islandtief als auch Azorenhoch stark ausgeprägt sind. In der Folge herrscht eine zonale Strömung vor, d.h. es treten in den gemäßigten Breiten vermehrt von West nach Ost wandernde Tiefdruckgebiete auf, deren Zugbahn relativ weit polwärts verlagert ist. Für Mittel- und Nordeuropa ist die Folge, dass verhältnismäßig milde und feuchte Luft einfließen kann, während es in den mediterranen Regionen relativ trocken ist.

Der NAO-Index ist hingegen negativ, wenn beide Steuerungszentren schwach ausgebildet sind. Die großräumige Zirkulation nimmt eine eher meridionale Form an und der Luftmassentransport erfolgt bis in die relativ weit südlich gelegenen Breiten des atlantisch-europäischen Sektors. Nord- und oft auch Mitteleuropa liegen im Bereich kalter Anströmung aus dem Norden (Polarregion) oder Osten (Sibirien). Standardliteratur zur NAO und zum NAO-Index findet sich in [WALLACE und HOBBS \(2006\)](#) oder [LECKEBUSCH et al. \(2008\)](#).

Für die phänologische Auswertung ist interessant, ob sich die Schwankungen in der NAO auch in den phänologischen Phasen über die Jahre wiederfinden und ob dadurch Trends beeinflusst werden. Es ist z.B. zu vermuten, dass ein positiver NAO-Index im Winter bzw. Frühjahr durch den Transport von milden Luftmassen indirekt den Beginn der phänologischen Phasen im Frühjahr beeinflusst ([MENZEL, 2007](#)).

Der NAO-Index beschreibt die Abweichung vom Normalzustand; deshalb wird für jede einzelne Phase die Abweichung vom mittleren Wert des Betrachtungszeitraums dieser Phase berechnet und zur besseren Darstellbarkeit mit einem Faktor belegt. Verglichen wird der NAO-Index mit den phänologischen Frühjahresphasen; dazu gehören die Blüte des Schneeglöckchens, Blüte der Sal-Weide, Blüte des Löwenzahns und Blattentfaltung der Stieleiche.

In [Abb. 4.98](#) sind der NAO-Index und die Abweichungen in der Blüte des Löwenzahns für die Jahre 1951–2014 aufgetragen. Es fällt auf, dass sich die Schwankungen der NAO zum großen Teil gegenläufig in der Phase wiederfinden. Das bedeutet, negative bzw. niedrige NAO-Index Werte (verstärktes Einfließen kalter Luftmassen) sind mit einem späteren Eintritt der Phase und positive NAO-Index Werte (Einfließen von wärmeren und feuchteren Luftmassen) sind mit einem früheren Eintritt der Phase verbunden.

Auch die Korrelation nach Spearman ergibt für alle Frühlingsphasen in allen Naturraumgruppen einen hochsignifikanten negativen Zusammenhang (vgl. [Abb. 4.99](#)).

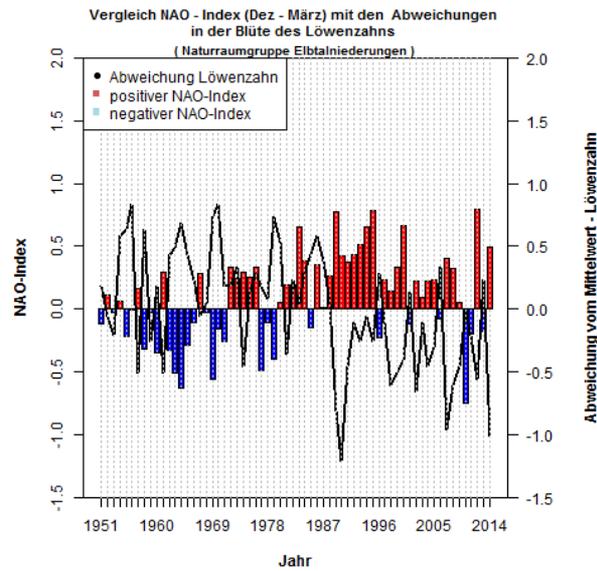


Abbildung 4.98: Vergleich zwischen NAO-Index und Blüte des Löwenzahns für die Naturraumgruppe Elbtalniederung.

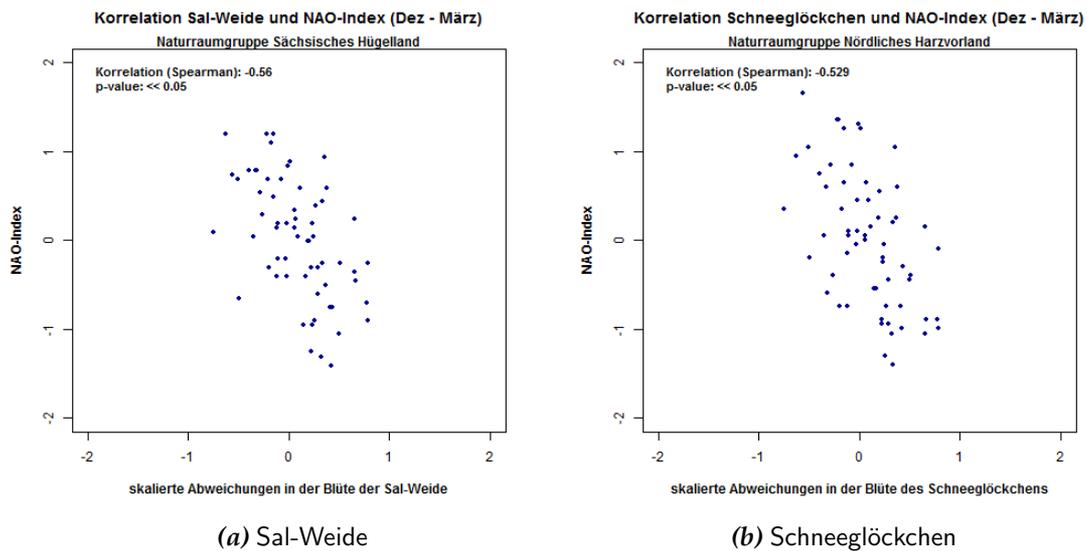


Abbildung 4.99: Scatterplot des Beginns einer phänologischen Phase (x-Achse) und dem NAO-Index der Monate Dezember–März (y-Achse) für die Blüte der Salweide in der Naturraumgruppe Sächsisches Hügelland (linke Teilfigur) und die Schneeglöckchenblüte in der Naturraumgruppe Nördliches Harzvorland (rechte Teilfigur).

Dabei zeigt die Blüte des Löwenzahns mit einem Korrelationskoeffizienten von $\rho = -0,4$ bis $-0,6$ die stärkste Korrelation. Tab. 4.6 gibt eine Übersicht über die höchsten und niedrigsten Korrelationskoeffizienten der vier Phasen.

Die NAO hat außerdem eine starke dekadische Variabilität (vgl. auch Abb. 4.97). Das bedeutet, dass es ausgeprägte Phasen gibt, in denen die NAO vorwiegend negativ bzw. vorwiegend positiv ist (LECKEBUSCH et al., 2008). Um diese dekadische Variabilität auch in den phänologischen Phasen zu identifizieren, werden die Zeitreihen durch die Berechnung von gleitenden Mitteln geglättet. Dabei werden für den gesamten Zeitraum jeweils Mittelwerte über 10 Jahre gebildet und als Zeitreihe aufgetragen.

Tabelle 4.6: Überblick über die Koeffizienten der Korrelation zwischen NAO und den einzelnen Phasen.

Phänologische Phase	Minimales ρ	Maximales ρ
Blüte Schneeglöckchen	-0,437	-0,577
Blüte Sal-Weide	-0,437	-0,595
Blüte Löwenzahn	-0,449	-0,613
Blattentfaltung Stieleiche	-0,331	-0,433

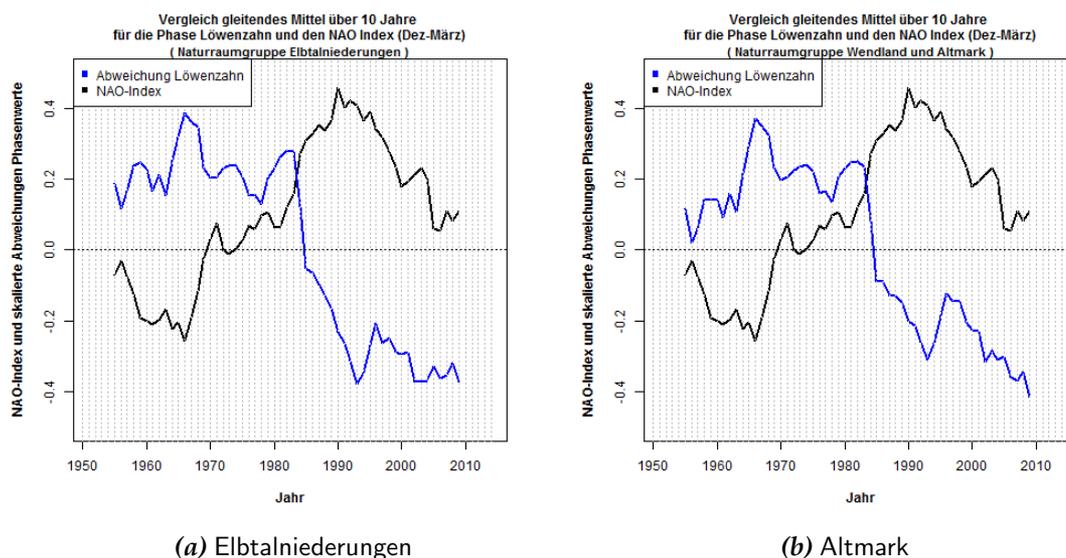


Abbildung 4.100: Vergleich der gleitenden Mittel von NAO und der Blüte des Löwenzahns für die Naturraumgruppen Elbtalniederungen (linke Teilfigur) und Wendland und Altmark (rechte Teilfigur).

Abb. 4.100 zeigt die geglätteten Zeitreihen die Naturraumgruppen Altmark und Wendland (86) sowie die Elbtalniederungen (87). Zu erkennen ist, dass die NAO in den 1950er und 1960er Jahren eine Periode mit einem vorwiegend negativen Index aufweist und sich ab den 1970er Jahren bis heute eine vorwiegend

positive Phase einstellt. Die Frühjahresphasen weisen eine ähnliche gegenläufige dekadische Variabilität auf. Das frühere Eintreten der Frühjahresphasen bis in die 1990er Jahre lässt sich zum Teil durch die Variabilität der NAO erklären.

Aber es ist auch zu sehen, dass andere Faktoren eine Rolle spielen. So wird deutlich, dass es um das Jahr 1980 eine Periode gibt, in denen der Phaseneintritt auffällig spät ist, es also besonders niedrige Temperaturwerte gegeben haben muss, die sich nicht auf die NAO zurückführen lassen. Des Weiteren ist Ende der 1990er Jahre und am Anfang des 21. Jahrhunderts im Phasenverlauf eine abfallende Tendenz zu erkennen (Hinweis auf Erwärmung), obwohl der NAO-Index zu dieser Zeit ebenfalls zurückgeht.

Bezüglich eines Zusammenhangs zwischen der NAO und den phänologischen Phasen ist festzuhalten, dass dieser durchaus existiert und ein Teil der Trends durch die Variabilität der NAO zu erklären ist. Dennoch gibt es einen Rückgang (abnehmenden Trend im Phasenverlauf), vor allem ab Mitte der 1990er Jahre, der sich durch die NAO nicht erklären lässt. Dies ist ein Hinweis auf weitere klimatische Veränderungen.

5 Zusammenfassung

Das Vorhaben Klimaanalyse Sachsen-Anhalt 1951–2014 hat aus einem umfangreichen Bestand an Aufzeichnungen meteorologischer Messungen Entwicklungen im regionalen Klima der jüngeren Vergangenheit (64 Jahre) herausgearbeitet. Für insgesamt 9 Klimaparameter lagen Daten von 8 (Windrichtung) bis 380 (Niederschlag) Stationen als Ausgangsmaterial vor, die „Kandidaten“-Stationen.

In der Umsetzung war es erforderlich, dass aus qualitativen Gründen die Auswertungen in der Regel für nur rund 50 % dieser „Kandidaten“-Stationen vorgenommen werden konnten. Dies hat Einfluss auf die Repräsentativität in der Fläche, denn die entfallenden Stationen reduzieren die Vergleichsmöglichkeiten mit der Umgebung.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt des Vorhabens war die Einbeziehung phänologischer Informationen in die Untersuchungen. Dazu standen Beobachtungen von Experten zum Vegetationsverhalten an 717 Standorten zur Verfügung. Phänologische Informationen stellen eine bedeutende Eingangsgröße für Untersuchungen der Klimaveränderungen dar, weil sie die Reaktionen von Pflanzen auf Klimaeinflüsse wiedergeben. Sie sind, weil sie nicht aufgrund von Registrierungen mit Messinstrumenten entstanden, eine alternative, unabhängige Beobachtung im Vergleich zu herkömmlichen meteorologischen Messungen.

Die Untersuchung von Trends benutzt einen statistischen Ansatz, der darauf abzielt, Veränderungen über längere Zeiträume zu beschreiben und deren Größenordnung anzugeben. Trends können für die mittleren und die extremen Eigenschaften von Beobachtungen in unterschiedlicher Art und Stärke vorliegen. Deshalb ist es je Parameter notwendig, dass z.B. Extremverhalten und mittleres Verhalten untersucht werden.

Mit besonderer Klarheit zeigen sich aufgrund der Untersuchungen **trendhafte Entwicklungen** für zahlreiche mit der **Temperatur** verknüpfte Größen. Dies beinhaltet die **höchsten und tiefsten** an den Stationen auftretenden Werte, die über den Beobachtungszeitraum von 1951 bis 2014 sehr deutlich zunehmen: Veränderungen von rund 1,5 °C bis 2,0 °C bei den Höchsttemperaturwerten und Veränderungen von rund 1,0 °C bis 1,5 °C bei den Tiefsttemperaturwerten wurden beobachtet.

Anhand der Zahl der Tage, an denen es Dauerfrost gibt (Eistage), lässt sich die Entwicklung veranschaulichen. Diese werden im Zuge der beobachteten Erwärmung seltener. Ein Rückgang um rund 5 bis 8 Tage mit regionalen Unterschieden ist über den Zeitraum 1951 bis 2014 zu verzeichnen.

Mit der Erwärmung gekoppelte Entwicklungen finden sich auch bezüglich

der Zahl der Tage, an denen 25 °C oder mehr erreicht werden (**Sommertage**). Diese nahmen im Mittel um 10 bis 15 Tage zu. Selbst auf dem Brocken ist ein vermehrtes Auftreten dieser Sommertage in den letzten Jahren zu verzeichnen: Während solche Ereignisse vor dem Jahr 2000 nur sehr selten waren, traten dort danach durchaus 2 bis 4 Sommertage pro Jahr auf.

Auch für die Zahl der **Tage mit Schwüle** zeigt sich eine ausgeprägte Zunahme: Während in den Jahren bis 2000 solche Tage im Mittel rund dreimal pro Jahr auftraten, nimmt ihre Zahl danach auf 6 und mehr zu.

Untersuchungen der Zahl der **Tropennächte**, in denen die Temperatur nicht unter 20 °C zurückgeht, ergaben: Diese Ereignisse sind relativ selten und Trendaussagen haben somit eine geringe Belastbarkeit. Allerdings ist festzustellen, dass sie in den Jahren nach 2000 häufiger auftreten. In einigen Jahren gab es seitdem 3 oder mehr Tropennächte. Es gibt zudem starke räumliche Unterschiede: In den Regionen um Gardelegen oder Wittenberg sind die Veränderungen kaum nachweisbar, während die Zunahmen in Halle oder Magdeburg deutlicher sind.

Ein weiterer Hinweis auf Auswirkungen der Erwärmung ist die Zunahme der **Anzahl der Hitzeperioden**. Dabei häufen sich beispielsweise Perioden mit 3 und mehr Hitzetagen in den Jahren nach 1990. Maximale Längen solcher Perioden von 10 und mehr Tagen werden ebenfalls häufiger, wiewohl hier die Aussage zur Trendentwicklung von geringerer Belastbarkeit ist als andere mit Hitze verbundene Trendaussagen. Ein weiteres Maß für die Erwärmung sind die so genannten **Kühlgradtage**. In ihnen werden besonders warme Zeiträume summarisch erfasst. Dies ist zum Beispiel besonders wichtig, um den Energiebedarf für den Einsatz von Klimatisierungstechnik abzuschätzen. Während in den 1950er bis 1980er Jahren ein relativ stabiles Wertenniveau von rund 100 im Mittel vorherrschte, wird nach 1990 eine starke Zunahme auf ein Wertenniveau von rund 150 verzeichnet.

Ein spiegelbildliches Maß für die Kühlgradtage sind die so genannten **Heizgradtage**. Mit dieser ebenfalls summarischen Größe wird der Heizbedarf von Gebäuden in Zahlen gefasst. Sie kann zur Beschreibung der Winterstrenge genutzt werden. Auch hier sind die Jahre bis etwa 1990 durch ein relativ stabiles Wertenniveau charakterisiert, während seitdem ein Rückgang um rund 25 % registriert wurde.

Beim **Niederschlag** sind die gefundenen Trendentwicklungen unterschiedlich. Auffällig ist eine jahreszeitliche Differenzierung. Es gibt an einigen Stationen Anzeichen von Frühjahrestrockenheit. Im Sommer dominieren Abnahmetrends, während im Winter überwiegend Zunahmetrends auftreten. Hoch gelegene Stationen, wie der Brocken, zeigen hingegen eine davon abweichende Klimaentwicklungen: Dort sind die Veränderungen im Sommer relativ gering und in den übrigen Jahreszeiten deutlicher. Wird das Auftreten von Starkregen (bestimmt aus Tageswerten) analysiert, so zeigen sich dort ebenfalls deutliche Zunahmen: Die mittlere Zahl der Tage mit mehr als 10 mm Niederschlag steigt von rund 50 in den 1950er Jahren auf rund 65 nach 2000. Die Zahl der Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag nimmt dort im gleichen Zeitraum von rund

15 auf rund 25 zu. An den tiefer gelegenen Stationen sind die entsprechenden Starkniederschlagstrends nur gering oder nicht vorhanden.

Der **Jahresgang der Niederschläge** wurde an den Stationen mit mindestens 60-jähriger Beobachtungsdauer berechnet. Es wurde ein Vergleich zwischen dem mittleren Jahresgang 1951–1980 und 1981–2010 durchgeführt. An allen Stationen ging die Niederschlagsmenge in Vegetationsperiode I (April–Juni) zurück, teilweise um bis zu 25 %. In der Vegetationsperiode II (Juli–September) ist kein systematischer Unterschied erkennbar. Die Station Brocken verzeichnet als einzige deutliche Zunahmen im Jahresniederschlag. In den Sommermonaten (Juni–August), in denen die höchsten Niederschläge im Jahr fallen (Ausnahme: Brocken), wurde im Mittel ein geringerer Wert gemessen.

Extremniederschläge kürzerer Dauer (5 Minuten bis 3 Stunden) zeigen weder in den jeweiligen partiellen Serien ihrer Dauerstufen noch bei Verwendung eines gleitenden 30-jährigen Fensters Trends. Damit gibt es auch keine beobachteten Veränderungen in den stadthydrologischen Bemessungsgrößen.

Eine weitere bedeutungsvolle, sowohl mit Niederschlag als auch mit Temperatur verknüpfte Größe, wird verwendet, um die **Waldbrandgefahr** aus Beobachtungen zu ermitteln. Ein Waldbrandindex teilt die Ergebnisse in Warnstufen verschiedener Intensität ein. Die Untersuchungen ergaben Zunahmen, die bei den mittleren und starken Stufen deutlich ausgeprägt sind; die höchste Stufe verzeichnet ebenfalls Zunahmetrends, jedoch von geringerer Größenordnung.

Für die **Klimatische Wasserbilanz** werden im Untersuchungszeitraum nur sehr geringe oder keine Trendentwicklungen festgestellt. Dies umfasst sowohl Analysen der hydrologischen Halbjahre als auch das gesamte Jahr.

Trends der **relativen Feuchte** geben Hinweise auf leichte Abnahmen bis rund 6 % gegenüber den klimatischen Verhältnissen vor 60 Jahren. Das Bild ist aber nicht einheitlich, denn es gibt auch Stationen, an denen Entwicklungen deutlich geringer sind. Ergebnisse mit räumlich und jahreszeitlich wenig einheitlichen Trendentwicklungen finden sich für die meteorologischen Größen **Sonnenschein und Bedeckung**.

Beim **Wind** sowie den Windextremen stellt sich die Frage, ob die sehr vielschichtige Kette von Instrumentierungsänderungen und Auswerteverfahren über die Zeit Artefakte in den Reihen hinterlassen haben. Das Gesamtbild ist uneinheitlich: Es wurden sowohl Zu- als auch Abnahmetrends gefunden.

Für die **Phänologie** zeigen sich in den Trends statistisch signifikante Veränderungen für den Beginn der verschiedenen phänologischen Jahreszeiten und der dazugehörigen Leitphasen.

Die Leitphasen für die phänologischen Jahreszeiten des Frühlings setzen im Durchschnitt 2 bis 3 Tage pro Dekade früher ein. Ähnliche Tendenzen zeigen die Leitphasen für den Sommer und den Früh- bzw. Vollherbst. Im Spätherbst ist dagegen ein späterer Eintritt von 1 bis 2 Tagen pro Dekade zu beobachten. Die phänologische **Vegetationsperiode** verlängert sich im Mittel um 11 Tage, vergleicht man den Zeitraum 1981 bis 2014 mit dem Zeitraum 1951 bis 1980.

Viele dieser Trends lassen sich durch die beobachteten **Veränderungen in der Temperatur** erklären. Das Niederschlagsdargebot und die Klimatische Wasser-

bilanz haben dagegen nur einen geringen bis keinen Einfluss auf die Veränderungen in den phänologischen Phasen. Ein weiterer starker Zusammenhang zeigt sich zur Nordatlantischen Oszillation (NAO). Die NAO hat unter anderem Einfluss auf das Temperaturverhalten und wirkt dadurch indirekt auf die Eintrittszeiten der phänologischen Phasen. Die Analysen zeigen, dass sich ein Teil der Trends, vor allem bis Ende der 90er Jahre, durch die Variabilität innerhalb der NAO erklären lässt. Danach gibt es Hinweise auf weitere klimatische Veränderungen.

Literaturverzeichnis

- ANGEL, R., W. EASTERLING, S. KIRTSCHE, 1993: Towards defining appropriate averaging periods for climate normals. – *Clim. Bull.* **27**, 29–44.
- ATV-DVWK, 1996: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblatt M 238. Bericht, Deutsche Vereinigung für Abfallwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- BECKER, A., T. SOMMER, B. PFÜTZNER, 2004: Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet, Kapitel Das Unstrutgebiet – Modellierungen des Wasser- und Stoffhaushalts unter dem Einfluss des Globalen Wandels, 198–207 Weißensee.
- BENDER, S., M. SCHALLER, 2014: Vergleichendes Lexikon. – Wichtige Definitionen, Schwellenwerte und Indices aus den Bereichen Klima, Klimafolgenforschung und Naturgefahren. Bericht, Climate Service Center, Hamburg.
- BERNHOFER, C., V. GOLDBERG, 2001: CLISAX – Statistische Untersuchungen regionaler Klimatrends in Sachsen. Tharandt, Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Bericht, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- BERNHOFER, C., V. GOLDBERG [HRSG.], 2008: Sachsen im Klimawandel – Eine Analyse. Bericht, Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Freistaat Sachsen.
- BERNHOFER, C., V. GOLDBERG, J. FRANKE, 2003: REKLI – Aufbau einer Klimadatenbank für Thüringen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Bericht, Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie.
- BERNHOFER, C., V. GOLDBERG, J. FRANKE, 2005a: REKLI II – Optimierung der Klimadatenbank REKLI für Auswertungen im Bereich der Wasserwirtschaft. Abschlussbericht zum Vorhaben. Bericht, Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt sowie Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie.
- BERNHOFER, C., V. GOLDBERG, J. FRANKE, 2005b: REKLI III – Optimierung der Klimadatenbank REKLI für die Auswertung temperaturbezogener Klimagrößen und Erweiterung für wetterlagenabhängige Analysen von Klimaelementen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Bericht, Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt sowie Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie.

- BERNHOFER, C., V. GOLDBERG, J. FRANKE, M. SURKE, 2007: REKLI Sachsen-Anhalt. Aufbau einer Klimadatenbank für Sachsen-Anhalt. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Bericht, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt.
- BERNHOFER, C., V. GOLDBERG, J. FRANKE, M. SURKE, J. ADAM, 2008: Regionale Klimadiagnose für Sachsen-Anhalt (REKLI-Sachsen-Anhalt II). Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Bericht, Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt.
- CHMIELEWSKI, F.-M., 2007: Phänologie. Ein Indikator zur Beurteilung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biosphäre. – *promet - meteorologische Fortbildung* 33, 28–35.
- CHMIELEWSKI, F.-M., A. MÜLLER, W. KÜCHLER, 2004: Mögliche Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Vegetationsentwicklung in Sachsen (KLIVEG) – Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, gefördert vom Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie. Bericht, Humboldt-Universität zu Berlin.
- CRAMER, W., G. YOHE, M. AUFFHAMMER, C. HUGGEL, U. MOLAU, M. DA SILVA DIAS, A. SOLOW, D. STONE, L. TIBIG, 2014: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change. Detection and Attribution of Observed Impacts*, Kapitel 18, 979–1038 Cambridge University Press.
- DAVISON, A., D. HINKLEY, 2009: *Bootstrap Methods and their Application*, 11th Printing – Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics.
- DIN, 1994: DIN 4049-3, Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Bericht, Deutsches Institut für Normung e.V. 80 S. [<http://www.bgr.bund.de>].
- EEA, 2004: *Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment*. Bericht EEA Report 2/2004, European Environment Agency.
- EEA, 2008: *Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator-based assessment*. Bericht EEA Report 4/2008, European Environment Agency.
- EFRON, B., 1982: *The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans* – Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pennsylvania.
- FIELD, C., V. B. K. MACH, M. MASTRANDREA, VAN M. AALST, W. ADGER, D. ARENT, J. BARNETT, R. BETTS, T. BILIR, J. BIRKMAN, J. CARMIN, D. CHANDEE, A. CHALLINOR, M. CHATTERJEE, W. CRAMER, D. DAVIDSON, Y. ESTRADA, J. GATTUSO, Y. HIJIOKA, O. HOEGH-GULDBERG, H. HUANG,

- G. INSAROV, R. JONES, R. KOVATS, P. ROMERO-LANKAO, J. LARSEN, I. LOSADA, J. MARENGO, R. MCLEAN, L. MEARNS, R. MECHLER, J. MORTON, I. NIANG, T. OKI, J. OLWOCH, M. OPONDO, E. POLOCZANSKA, H.-O. PÖRTNER, M. REDSTEER, A. REISINGER, A. REVI, D. SCHMIDT, M. SHAW, W. SOLECKI, D. STONE, J. STONE, K. STRZEPEK, A. SUAREZ, P. TSCHAKERT, R. VALENTINI, S. V. NA, A. VILLAMIZAR, K. VINCENT, R. WARREN, L. WHITE, T. WILBANKS, P. WONG, G. YOHE, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change. Technical Summary, Kapitel TS, 35–94 Cambridge University Press.
- FLATO, G., J. MAROTZKE, B. ABIODUN, P. BRACONNOT, S. CHOU, W. COLLINS, P. COX, F. DRIQUECH, S. EMORI, V. EYRING, C. FOREST, P. GLECKLER, E. GUILYARDI, C. JACOB, V. KATTSOV, C. REASON, M. RUMMUKAINEN, 2013: Climate Change 2013, The Physical Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Evaluation Of Climate Models, Kapitel 9, 741–866 Cambridge University.
- FRANKE, J., 2010: Klimawandel in Mitteldeutschland und Risiken für die Land- und Forstwirtschaft. – *Nyctalus (N.F.)* **15**, 101–112.
- FRANKE, J., B. KÖSTNER, 2007: Effects of recent climate trends on the distribution of potential natural vegetation in Central Germany. – *Int. J. Biomet.* **52**, 139–147.
- FRANKE, J., V. GOLDBERG, U. MELLENTIN, C. BERNHOFER, 2006: Risiken des regionalen Klimawandels in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. – *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* **55**, 97–104.
- GLOWIENKA-HENSE, R., 1990: The North Atlantic Oscillation in the Atlantic European SLP. – *Tellus* **42A**, 497–507.
- HENSE, A., R. GLOWIENKA-HENSE, 2008: Auswirkungen der Nordatlantischen Oszillation. – *promet - meteorologische Fortbildung* **34**, 89–94.
- HUGLIN, P., 1978: Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. – *CR Acad. Agric.* 1117–1126.
- HUGLIN, P., 1986: *Biologie et écologie de la vigne* – Payot, Lausanne, Paris.
- HURRELL, J., NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH STAFF (EDS.), 2015: The Climate Data Guide: Hurrell North Atlantic Oscillation (NAO) Index (station-based). Bericht, NOAA <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>.

- HYDRO & METEO GMBH & CO. KG, 2007a: Software zur Plausibilisierung meteorologischer Messdaten – Fachliche Dokumentation zur Parameterprüfung und -festlegung. Bericht, Im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Mainz.
- HYDRO & METEO GMBH & CO. KG, 2007b: Softwaredokumentation NIKLAS. Bericht, Im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Mainz.
- JUNGE, C., 1989: Mitteilung zur Tagestemperaturmittelbildung. – Z. Meteorol. **89**, 231–233.
- KENDALL, M., 1970: Rank correlation methods, 4th edition – Griffin, London.
- KLEIN TANK, A., F. ZWIERS, X. ZHANG, 2009: Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. Bericht, WMO WMO-TD No. 1500 – Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72.
- KOŁODZIEJ, A., 2007: Klimawandel in Sachsen-Anhalt: Auswirkungen auf die phänologischen Phasen wildwachsender Pflanzen. Bericht, Ber. d. Dt. Wetterdienstes 231.
- KOŁODZIEJ, A., M. FRÜHAUF, 2008: Phenological changes of wild-growing plants in Saxony-Anhalt 1962–2005. – *Hercyna N.F.* **41**, 23–37.
- KREIENKAMP, F., A. SPEKAT, W. ENKE, B. PFÜTZNER, B. KLÖCKING, A. SCHUMANN, P. HESSE, V. THIELE, B. DEGEN, A. BERLIN, J. NIEDERSTRASSER, A. LUTTMANN, J. VON DEM BUSSCHE, A. LIPINSKI, K. LIEBE EDLE VON KREUTZNER, 2012: Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt: Klima und Extreme, Wasser und Naturschutz. Bericht, Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH, Büro für Angewandte Hydrologie und biota - Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrage des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt unter fachlicher Begleitung des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale) 802 S.
- KROPP, J., A. BLOCK, F. REUSSWIG, K. ZICKFELD, H. J. SCHELLNHUBER, 2006: Semiquantitative assessment of regional climate vulnerability: The north-rhine westphalia study. – *Climatic Change* **76**, 265–290.
- KROPP, J., A. HOLSTEN, T. LISSER, O. ROITHMEIER, F. HATTERMANN, S. HUANG, J. ROCK, F. WECHSUNG, A. LÜTTGER, S. POMPE, I. KÜHN, L. COSTA, M. STEINHÄUSER, C. WALTHER, M. KLAUS, S. RITCHIE, M. METZGER, 2009a: Klimawandel in Nordrhein-Westfalen–regionale Abschätzungen der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren. Bericht, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) für das Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen.

- KROPP, J., O. ROITHMEIER, F. HATTERMANN, C. RACHIMOW, A. LÜTTGER, F. WECHSUNG, P. LASCH, E. CHRISTIANSEN, C. REYER, F. SUCKOW, M. GUTSCH, A. HOLSTEN, T. KARTSCHALL, M. WODINSKI, Y. HAUF, T. CONRADT, H. ÖSTERLE, C. WALTHER, T. LISSNER, N. LUX, V. TEKKE, S. RITCHIE, J. KOSSAK, M. KLAUS, L. C. L., T. VETTER, M. KLOSE, 2009b: Klimawandel in Sachsen-Anhalt – Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. Bericht, Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK).
- LASCH, P., F. SUCKOW, 2007: Reaktionen von Kiefernbeständen unter Klimaänderungen – eine Analyse mit dem Waldwachstumsmodell 4C. Bericht, Die Kiefer im nordostdeutschen Tiefland - Ökologie und Bewirtschaftung [Landesforstanstalt Eberswalde(Hrsg.)], Eberswalder forstliche Schriftenreihe XXXIII.
- LATIF, M., 2012: Globale Erwärmung – UTB Profile. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 117.
- LAU, 2008: Regionale Klimaänderungen auf der Basis des statistischen Regionalisierungsmodells WETTREG, Analysen und Trends für Sachsen-Anhalt. Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt; Sonderheft 3/2008. Bericht, Landesamt für Umweltschutz (LAU) Sachsen-Anhalt (Hrsg.) http://www.lau.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LAU/Klima/AG_Klimawandel/Fachberichte/Dateien/szenarien_mit_wettreg-bericht_lsa_09_2008.pdf.
- LECKEBUSCH, G., A. KAPLA, H. MÄCHEL, J. PINTO, M. REYES, 2008: Die Nordatlantische Oszillation. – *promet - meteorologische Fortbildung* **34**, 95–100.
- LLOYD-HUGHES, B., M. SAUNDERS, 2002: A Draught Climatology for Europe. – *Int. J. Climatol.* **22**, 1571–1592, doi: 10.1002/joc.846.
- MANN, H., 1945: Nonparametric test against trends. – *Econometrica* **13**, 245–259.
- MCKEE, T. B., N. J. DOESKEN, J. KLEIST, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. – In: Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California.
- MENZEL, A., 2002: Phenology: its importance to the Global Change community – An Editorial Comment. – *Clim. Change* **54**, 379–385.
- MENZEL, A., 2007: Phänologische Modelle. – *promet* **33**, 20–27.
- MEYNEN, E., J. SCHMITHÜSEN, 1953-1962: Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands – Selbstverlag der Bundesanstalt für Landeskunde, Remagen, 1339 S.

- RAPP, J., 2000: Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 212.
- RAPP, J., C.-D. SCHÖNWIESE, 1995: Klimatrend – Atlas Deutschland 1891-1990. Bericht, Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Band 5, Univ. Frankfurt/M.
- RICHTER, D., 1995: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. – In: Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 194, Deutscher Wetterdienst, Offenbach ISBN: 3-88148-309-8.
- ROYSTON, P., 1982: An extension of Shapiro and Wilk's W test for normality to large samples. – Appl. Stat. **31**, 115–124.
- RUTISHAUSER, T., S. STUDER, 2007: Klimawandel und der Einfluss auf die Frühlingsphänologie. – Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen **158**, 105–111.
- SACHS, L., 1968: Statistische Auswertungsmethoden – Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York.
- SACHS, L., J. HEDDERICH, 2009: Angewandte Statistik, 13. Auflage. Methodensammlung mit R – Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 813 S.
- SCHEFFLER, A., 2010: Phänologische Daten im Vergleich mit der Klimadatenbank Sachsen-Anhalt und möglicher Einfluss des Klimawandels auf die Pflanzenphänologie Diplomarbeit, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- SCHEFFLER, A., M. FRÜHAUF, 2011: Veränderungen der Pflanzenphänologie in unterschiedlichen Naturräumen Sachsen-Anhalts unter Berücksichtigung ihrer wesentlichen Einflussfaktoren. – Hercyna N.F. **44**, 169–189.
- SCHÖNWIESE, C.-D., 2000: Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler – Gebrüder Bornträger Berlin Stuttgart.
- SCHWÄRTZEL, K., K.-H. FEGER, J. HÄNTZCHEL, A. MENZER, W. SPANK, F. CLAUSNITZER, B. KÖSTNER, C. BERNHOFER, 2009: A novel approach in model-based mapping of soilwater conditions at forest sites. – For. Ecol. Manag. **258**, 2163–2174.
- STOCK, M., F. BADECK, F.-W. GERSTENGARBE, D. HOPPMANN, T. KARTSCHALL, H. ÖSTERLE, P. WERNER, M. WODINSKI, 2007: Perspektiven der Klimaänderung bis 2050 für den Weinbau in Deutschland (KLIMA 2050). Bericht, PIK Potsdam, Report 106.

- STOCKS, B., B. LAWSON, M. ALEXANDER, C. VAN WAGNER, R. MCALPINE, T. LYNHAM, D. DUBE, 1989: The Canadian Forest Fire Danger Rating System: An Overview. – *Forestry Chronicle* **65**, 450–457.
- SUTMÖLLER, J., B. AHRENDTS, M. SCHMIDT, M. ALBERT, S. FLECK, P. PLAŠIL, J. HANSEN, M. OVERBECK, R.-V. NAGEL, H. SPELLMANN, H. MEESENBURG, 2012: Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt. Los 3: Forstwirtschaft. Bericht, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt.
- TURNER, J., B. LAWSON, 1978: Weather in the Canadian Forest Fire Danger Rating System. A user guide to national standards and practices. Bericht, Victoria, British Columbia: Environment Canada, Centre de recherches forestières du Pacifique.
- WALLACE, J., P. HOBBS, 2006: Atmospheric Science. An Introductory Survey. 2nd edition – Academic Press.
- WILLEMS, P., 2013: Multidecadal oscillatory behaviour of rainfall extremes in Europe. – *Clim. Change* **120**, 931–944.
- WMO, 2010: Guide to Climatological Practices, 3rd Edition. Bericht, World Meteorological Organization, WMO-No. 100 115 pp.
- WMO, 2014: Commission for Climatology, Sixteenth Session, Heidelberg, 3–8 July 2014, Abridged Final Report with Resolutions and Recommendations. Bericht, World Meteorological Organization, Genf WMO Report No. 1137.
- ZEBISCH, M., T. GRUNDMANN, D. SCHRÖTER, C. HASSE, U. FRISCH, W. CRAMER, 2005: Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien Klimasensitiver Systeme. Bericht, Umweltbundesamt, Dessau 203 S.

A Stationen

A.1 Liste der untersuchten Klima-Stationen in täglicher Auflösung

In dieser Liste sind Stationen aufgeführt, von denen Daten im Vorhaben verwendet wurden. Kreuze markieren, für welche Elemente Daten genutzt wurden und ob die Station ggf. für die Analyse abgeleiteter Größen zum Einsatz kam. Hinweis: Die Liste umfasst die von der Qualitätskontrolle mit NIKLAS (s. Anhang. C) auf Vollständigkeit und Plausibilität überprüften und zur weiteren Analyse freigegebenen Stationen. Ob konkret Trends oder Klimaindikatoren berechnet werden konnten, ist nicht in allen Fällen gegeben, da beispielsweise für die Aggregation der Tageswerte zu Monats- oder Jahreszeitenwerten weitere Vollständigkeitskriterien zur Anwendung kamen.

Anmerkung 1: Im Projekt wurden aus den Datenbeständen des DWD zusätzlich Stationen verwendet, für die mit zusätzlichem Vervollständigungsaufwand so gut wie keine Datenlücken enthalten sind. Diese werden in Abschnitt A.2 aufgelistet – allerdings beginnt keine der dort aufgeführten Stationszeitreihen im Jahr 1951.

Anmerkung 2: Mit den Analysedaten wird auch eine Tabelle ausgeliefert (`stationskoordinaten.xlsx`), in der sich die Stationsnamen und Koordinaten befinden.

Tabelle A.1: Liste der im Vorhaben verwendeten Stationen. In jeder Zeile sind Name und Nummer der Station ersichtlich. In Klammern steht hinter dem Stationsnamen das zugehörige Bundesland/der zugehörige Freistaat – BB: Brandenburg; MV: Mecklenburg-Vorpommern; NI: Niedersachsen; SN: Sachsen; ST: Sachsen-Anhalt; TH: Thüringen. Kreuze geben an, für welche Elemente Daten genutzt wurden – TX: Maximumtemperatur; TM: Mitteltemperatur; TN: Minimumtemperatur; RR: Niederschlag; RF: Relative Feuchte; SD: Sonnenscheindauer; NN: Bewölkung; FF: Windgeschwindigkeit. Die Spalte *Ind.* gibt an, ob für diese Station Klimaindikatoren berechnet wurden. Steht dort das Kreuz in Klammern so werden nur einige Klimaindikatoren für diese Station berechnet.

<i>Name</i>	<i>Nr</i>	<i>TX</i>	<i>TM</i>	<i>TN</i>	<i>RR</i>	<i>RF</i>	<i>SD</i>	<i>NN</i>	<i>FF</i>	<i>Ind</i>
Aderstedt (ST)	00033				×					
Aken/Elbe (ST)	00064				×					
Alperstedt (TH)	00087				×					
Altenau (NI)	00107				×					
Bibra (ST)	00124				×					

weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

Name	Nr	TX	TM	TN	RR	RF	SD	NN	FF	Ind
Altmoerbitz (SN)	00141				×					
Annaburg (ST)	00170				×					
Apolda (TH)	00180				×					
Arendsee/Altmark (ST)	00182				×					
Artern (TH)	00198	×	×	×	×	×	×	×	×	(×)
Aseleben (ST)	00208				×					
Auerstedt (TH)	00225				×					
Belgern (SN)	00338				×					
Bernburg/Saale (ST)	00445	×	×	×	×					
Bethau (ST)	00464				×					
Bibra (ST)	00477				×					
Blankenburg/Harz (ST)	00527				×					
Blankenhain (TH)	00530				×					
Boddin-Langnow-Heidelb. (BB)	00564				×					
Bodenteich (NI)	00571				×					
Boerln (SN)	00584				×					
Brandenburg-Goerden (BB)	00650				×					
Braunlage (NI)	00656	×	×	×	×	×	×		×	
Braunschweig-Gliesmar. (NI)	00660				×					
Braunschweig (NI)	00662	×	×	×	×	×	×	×	×	
Breese (BB)	00672				×					
Brocken (ST)	00722	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Brueck-Goemnick (BB)	00735				×					
Brumby (ST)	00746				×					
Burg-Blumenthal (ST)	00797				×					
Calvoerde (ST)	00836				×					
Clausthal-Zellerfeld I (NI)	00862				×					
Clausthal-Zellerfeld II (NI)	00863	×	×	×	×	×	×	×		
Daehre (ST)	00898				×					
Dahme (BB)	00905				×					
Danndorf (NI)	00911				×					
Doberlug-Kirchhain (BB)	01001	×	×	×	×	×			×	
Dolle (ST)	01015				×					
Duerrenberg (ST)	01074				×					
Ebeleben (TH)	01091				×					
Eckertal (NI)	01117				×					
Eckertalsperre (NI)	01118				×					
Ehra-Lessien (NI)	01147				×					
Eilenburg (SN)	01166				×					
Cremlingen-Destedt (NI)	01278				×					
Ettersburg (TH)	01314				×					

weiter auf der nächsten Seite

A.1 Liste der untersuchten Klima-Stationen in täglicher Auflösung

Fortsetzung

Name	Nr	TX	TM	TN	RR	RF	SD	NN	FF	Ind
Friedrichsthal (TH)	01317				×					
Etzleben (TH)	01320				×					
Fleetmark (ST)	01377				×					
Gardelegen (ST)	01544	×	×	×	×	×	×		×	×
Gebra-Niedergebra (TH)	01560				×					
Gera-Untermhaus (TH)	01610				×					
Gera-Leumnitz (TH)	01612	×	×	×	×	×	×	×	×	
Gittelde (NI)	01647				×					
Gladigau (ST)	01649				×					
Glindenberg (ST)	01661				×					
Goessnitz (TH)	01688				×					
Goldberg (MV)	01694								×	
Gorleben (NI)	01701				×					
Goslar (NI)	01704				×					
Grabow (MV)	01717				×					
Greussen (TH)	01765				×					
Grieben (ST)	01770				×					
Groebe (ST)	01781				×					
Sondershausen-Grossbernd. (TH)	01819				×					
Grosswechungen (TH)	01859				×					
Guenstedt (TH)	01881				×					
Guessefeld (ST)	01887				×					
Halberstadt (ST)	01949				×					
Halle-Doellnitz (ST)	01954				×					
Halle-Kroellwitz (ST)	01957								×	
Halle (ST)	01960	×	×	×	×		×		×	(×)
Harzburg (NI)	02039				×	×		×		
Harzgerode (ST)	02044		×			×				
Suedharz-Hayn/Harz (ST)	02073				×					
Helmstedt (NI)	02120	×	×	×	×	×		×		
Herrmannsacker (TH)	02163				×					
Herzberg-Scharzfeld (NI)	02176				×					
Herzberg/Elster (BB)	02177				×					
Heuckewalde-Giebelroth (ST)	02195				×					
Hitzacker (NI)	02237				×					
Hohenfier (NI)	02283				×					
Hoppenrade-Garz (BB)	02336				×					
Hummelshain (TH)	02370				×					
Ilsenburg/Harz (ST)	02398				×					
Jena-Isserstedt (TH)	02426				×					
Jena (TH)	02444	×	×	×	×	×	×	×		

weiter auf der nächsten Seite

Anhang A Stationen

Fortsetzung

Name	Nr	TX	TM	TN	RR	RF	SD	NN	FF	Ind
Jerxheim (NI)	02449				×					
Jueckelberg-Flemmingen (TH)	02468				×					
Jueterbog (BB)	02475				×					
Kahla (TH)	02481				×					
Kamschlacken (NI)	02510				×					
Karstaedt/Prignitz (BB)	02531				×					
Kelbra (ST)	02549				×					
Klettenberg (TH)	02626				×					
Kloetze/Altmark (ST)	02644				×					
Koelleda (TH)	02664				×					
Koelsa (SN)	02668				×					
Koenigslutter (NI)	02686				×					
Koenigslutter-Rhode (NI)	02687				×					
Kossdorf (BB)	02720				×					
Ladeburg (ST)	02807				×					
Langelsheim-Astfeld (NI)	02839				×					
Langelsheim-Lautenthal (NI)	02841				×					
Langenhagen (NI)	02852				×					
Lauchstaedt (ST)	02878				×					
Lauterberg (NI)	02891				×					
Leipzig-Holzhausen (SN)	02928	×	×	×	×	×				
Leipzig-Halle (SN)	02932	×	×	×	×		×	×	×	(×)
Lemgow-Hohenkrug (NI)	02937				×					
Lenzen/Elbe (BB)	02951				×					
Libehna (ST)	02974				×					
Lindau (ST)	03009				×					
Loburg (ST)	03036				×					
Luckenwalde (BB)	03071				×					
Luechow (NI)	03093				×					
Luetzen (ST)	03109				×					
Lutter (NI)	03116				×					
Magdala (TH)	03125				×					
Magdeburg (ST)	03126	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Marnitz (MV)	03196	×	×	×		×			×	
Aschersleben-Mehringen (ST)	03226				×					
Mellin (ST)	03240				×					
Merseburg (ST)	03259				×					
Meuselwitz (TH)	03279				×					
Freienbessingen (TH)	03304				×					
Mockrehna (SN)	03312				×					
Muecheln/Geiseltal-Stoebn. (ST)	03357				×					

weiter auf der nächsten Seite

A.1 Liste der untersuchten Klima-Stationen in täglicher Auflösung

Fortsetzung

Name	Nr	TX	TM	TN	RR	RF	SD	NN	FF	Ind
Lederhose (TH)	03392					×				
Menz (BB)	03509	×	×	×						
Neuruppin (BB)	03552	×	×		×	×	×	×	×	(×)
Neustadt-Eichsfeld (TH)	03562					×				
Neustadt/Dosse-Kampehl (BB)	03569					×				
Neustadt/Harz (Talsperre) (TH)	03570					×				
Neustadt/Orla (TH)	03573					×				
Loebejuen-Wettin-Neutz (ST)	03580					×				
Sondershausen-Oberspier (TH)	03726					×				
Oebisfelde (ST)	03757					×				
Oranienbaum (ST)	03804					×				
Oschersleben/Bode (ST)	03812					×				
Osterfeld (ST)	03822					×				
Eisleben-Osterhausen (ST)	03824					×				
Osterode/Harz (NI)	03829					×				
Osterode/Harz-Lerbach (ST)	03831					×				
Paewesin (BB)	03861					×				
Elbe-Parey-Guesen (ST)	03871					×				
Parsau (NI)	03874					×				
Petkus (BB)	03975					×				
Potsdam (BB)	03987	×	×	×		×	×	×	×	
Quedlinburg (ST)	04032					×				
Querenhorst (NI)	04035					×				
Questenberg-Agnesdorf (ST)	04037					×				
Kemberg-Radis (ST)	04052					×				
Rastenberg (TH)	04079					×				
Rathenow (BB)	04081					×				
Rehberger (NI)	04111					×				
Reinsdorf (ST)	04137					×				
Ribbesbuettel (NI)	04183					×				
Roecknitz (SN)	04227					×				
Ronneburg (TH)	04252					×				
Rothenburg (ST)	04286					×				
Oberharz (ST)	04305					×				
Salzgitter-Lichtenberg (NI)	04362					×				
Salzgitter-Ohlendorf (NI)	04363					×				
Salzgitter-Ringelheim (NI)	04364								×	
Sangerhausen (ST)	04381					×				
Sankt (NI)	04384					×				
Schladen (NI)	04455					×				
Schlossvippach (TH)	04475					×				

weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

Name	Nr	TX	TM	TN	RR	RF	SD	NN	FF	Ind
Schnega (NI)	04507					×				
Schoenewalde (BB)	04539					×				
Schoenewerda (TH)	04540					×				
Schoepfenstedt-Gross (NI)	04552					×				
Schraplau (ST)	04564					×				
Schwerin (MV)	04625	×	×	×			×	×	×	×
Seehausen (ST)	04642	×	×	×			×	×	×	(×)
Seehausen/Boerdekreis (ST)	04645					×				
Seesen (NI)	04651	×	×	×	×	×			×	
Sieber (NI)	04688					×				
Soesetalsperre (NI)	04738					×				
Sommerschenburg (ST)	04747					×				
Sondershausen (TH)	04748					×				
Sprakensehl-Hagen (NI)	04786					×				
Stadtroda (TH)	04812					×				
Steinhaleben (TH)	04864					×				
Rosche-Teyendorf (NI)	05019					×				
Treuenbrietzen (BB)	05092					×				
Udestedt (TH)	05137					×				
Uebigau (BB)	05140					×				
Unterluess (NI)	05165	×	×	×			×		×	
Uthleben (TH)	05184					×				
Vechelde-Vallstedt (NI)	05199					×				
Vienenburg-Lengde (NI)	05217					×				
Waddewitz (NI)	05269					×				
Wahrenholz (NI)	05283					×				
Weferlingen (ST)	05387					×				
Harth-Poellnitz (TH)	05395					×				
Buttelstedt-Weiden (TH)	05396					×				
Weimar (TH)	05419					×				
Werben/Elbe (ST)	05474					×				
Wernigerode (ST)	05490									×
Wernigerode-Hasserode (ST)	05495					×				
Wieda (NI)	05534					×				
Wildemann (NI)	05563					×				
Wittenberg (ST)	05629	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Dettum (NI)	05637					×				
Wolfenbuettel (NI)	05668					×				
Wolfsburg (NI)	05676					×				
Wolkramshausen (TH)	05683					×				
Wolmirsleben (ST)	05685					×				

weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

<i>Name</i>	<i>Nr</i>	<i>TX</i>	<i>TM</i>	<i>TN</i>	<i>RR</i>	<i>RF</i>	<i>SD</i>	<i>NN</i>	<i>FF</i>	<i>Ind</i>
Wrestedt-Stederdorf (NI)	05695					×				
Zahna (ST)	05737					×				
Zehdenick (BB)	05745	×	×	×			×			
Zerbst (ST)	05761					×				
Ziegelroda (ST)	05769					×				
Zwinge (TH)	05801					×				
Mansfeld-Annarode (ST)	05814					×				
Dannenberg (NI)	05833					×				

A.2 Liste der untersuchten Klima-Stationen (Kernbestand mit besonders wenigen Fehlwerten) in stündlicher Auflösung

In den meisten Stationszeitreihen finden sich Lücken von unterschiedlicher Länge. Für einen kleinen Teil der Reihen pflegt der DWD tägliche Zeitreihen auf der Basis von Stationen, die auch in der WMO-Meldepflicht liegen, in denen ggf. Lücken gefüllt werden. Allerdings sind diese Zeitreihen kürzer und beginnen erst 1961. Für Trenduntersuchungen und die Bestimmung anderer Größen sind sie jedoch sehr gut geeignet. Kleine Abstriche müssen lediglich bei der Station Seehausen gemacht werden: Da für diese erst ab 1976 Daten vorliegen, sind Niederschlagstrends (für die 50 Jahre Daten benötigt werden) nicht bestimmbar. Der so genannte Kernbestand ist in Tab. A.2 aufgelistet.

Tabelle A.2: Bestand an Stationszeitreihen mit besonders wenigen Fehlwerten

<i>Stationsname</i>	<i>WMO-Kennung</i>	<i>Beginn der Reihe</i>
<i>Seehausen</i>	10261	01.01.1976
<i>Neuruppin</i>	10270	01.01.1961
<i>Gardelegen</i>	10359	01.01.1961
<i>Magdeburg</i>	10361	01.01.1961
<i>Artern</i>	10460	01.01.1961
<i>Halle</i>	10466	01.01.1961
<i>Leipzig-Schkeuditz</i>	10469	01.01.1961
<i>Wittenberg</i>	10474	01.01.1961

Auch werden an den hier aufgeführten Stationen z.T. andere Größen erfasst oder berechnet. Zumindest für Teile des Zeitraums 1961–2014 erweitert sich dadurch der Bestand an analysierbaren Größen um

- Erdboden-Minimumtemperatur
- Anteil der 24 Termine, bei denen einen Luftfeuchtigkeit von 90 % oder mehr auftrat
- Sättigungsdefizit
- Haude-Verdunstung
- Globalstrahlung

A.3 Bestand an Stationslisten für die Windrichtung

Für einige Stationen liegen auch Zeitreihen der Windrichtung vor. Bei diesem Element ist es nicht sinnvoll, Tagesdaten zu analysieren – statt dessen werden stündliche Messungen untersucht. Auch sind Trendbestimmungen in diesem Fall nicht sinnvoll, weswegen Windrosen für verschiedene Tages- und Jahreszeiten sowie verschiedene Perioden (z.B. 1961–1990 oder 1971–2000) betrachtet werden. Die Liste dieser Stationen ist in Tab.A.3 aufgeführt.

Tabelle A.3: Bestand an Stationszeitreihen für die Windrichtung.

<i>Stationsname</i>	<i>Stat.-Nr.</i>	<i>Beginn der Reihe</i>
<i>Artern</i>	00198	01.01.1961
<i>Braunlage</i>	00656	01.01.1961
<i>Braunschweig</i>	00662	01.01.1961
<i>Brocken</i>	00722	01.01.1961
<i>Gardelegen</i>	01544	01.01.1961
<i>Leipzig/Halle</i>	02932	01.01.1961
<i>Lüchow</i>	03093	01.01.1961
<i>Magdeburg</i>	03126	01.01.1961
<i>Wittenberg</i>	05629	01.01.1961

A.4 Liste der untersuchten Klima-Stationen in stündlicher Auflösung

Tabelle A.4: Bestand an Stationszeitreihen in stündlicher Auflösung.

<i>Stationsname</i>	<i>DWD-Nr.</i>	<i>Von–bis</i>
<i>Artern</i>	00198	1.1.1961–1.1.2015
<i>Braunlage-Hohegeiß</i>	00656	1.1.1961–1.1.2015
<i>Braunschweig-Völkenrode</i>	00662	1.1.1958–1.1.2015
<i>Brocken</i>	00722	1.1.1961–1.1.2015
<i>Gardelegen</i>	01544	1.1.1961–1.1.2015
<i>Leipzig/Halle</i>	02932	1.1.1961–1.1.2015
<i>Lüchow</i>	03093	1.1.1961–1.1.2015
<i>Magdeburg</i>	03126	1.1.1961–1.1.2015
<i>Neuruppin</i>	03552	1.1.1961–1.1.2015
<i>Seehausen</i>	04642	1.1.1961–1.1.2015
<i>Wittenberg</i>	05629	1.1.1961–1.1.2015

A.5 Liste der untersuchten Klima-Stationen in 5-minütiger Auflösung

Tabelle A.5: Bestand an Stationszeitreihen in 5-minütiger Auflösung aus KOSTRA.

<i>Stationsname</i>	<i>DWD-Nr.</i>	<i>Stat.-Nr.</i>	<i>Von–bis</i>
<i>Wittenberg</i>	05629	41727	1955–2010
<i>Leipzig/Halle</i>	02932	42544	1951–2012
<i>Braunlage-Hohegeiß</i>	00656	43745	1955–1983
<i>Artern</i>	00198	44045	1959–2010
<i>Magdeburg</i>	03126	45060	1956–2010
<i>Neuruppin</i>	03552	46033	1958–2010
<i>Lüchow</i>	03093	48253	1994–2006
<i>Braunschweig-Völkenrode</i>	00662	54251	1952–2006

A.6 Liste der untersuchten Stationen mit Verdunstungsdaten nach Penman

Tabelle A.6: Bestand an Stationszeitreihen mit Verdunstungsdaten nach Penman.

<i>Stationsname</i>	<i>Stat.-Nr.</i>	<i>Von</i>	<i>Bis</i>
<i>Artern</i>	00198	1.1.1961	27.1.2015
<i>Braunlage-Hohegeiß</i>	00656	1.1.1947	28.1.2015
<i>Braunschweig-Völkenrode</i>	00662	1.1.1966	3.2.2015
<i>Brocken</i>	00722	1.1.1956	27.1.2015
<i>Gardelegen</i>	01544	1.1.1981	27.1.2015
<i>Gera-Leumnitz</i>	01612	1.1.1973	27.1.2015
<i>Leipzig/Halle</i>	02932	1.5.1972	27.1.2015
<i>Lüchow</i>	03093	1.1.1972	28.1.2015
<i>Magdeburg</i>	03126	1.8.1957	27.1.2015
<i>Neuruppin</i>	03552	1.1.1973	3.2.2015
<i>Potsdam</i>	03987	1.1.1950	3.2.2015
<i>Schwerin</i>	04625	1.1.1954	3.2.2015
<i>Seehausen</i>	04642	1.10.1976	27.1.2015
<i>Wittenberg</i>	05629	1.1.1962	27.1.2015

A.7 Liste der untersuchten Klima-Stationen aus dem Bestand des LÜSA

Für folgende Stationen (in Tab. [A.7](#) aufgelistet) des LÜSA-Messnetzes standen Daten zur Verfügung

Tabelle A.7: Von der LÜSA zur Verfügung gestellte Stationszeitreihen mit Angabe von deren Länge

<i>Station</i>	<i>Beginn der Reihe</i>	<i>Ende der Reihe</i>
<i>Bitterfeld-Wolfen</i>	09.12.1998	09.02.2015
<i>Burg</i>	03.01.1994	09.02.2015
<i>Magdeburg</i>	04.01.1994	05.09.1996
<i>Magdeburg</i>	01.01.1999	31.12.1999
<i>Wernigerode</i>	09.09.1993	31.12.1997
<i>Wernigerode</i>	01.01.1999	09.02.2015

B Klima-Indikatoren

Für das Vorhaben wurden neben den meteorologischen Standardgrößen auch zahlreiche abgeleitete Größen (Klima-Indikatoren) bestimmt. In diesem Teil des Anhangs werden sie vorgestellt.

Tabelle B.1: Indikatoren für Extremwerte und ihre Kurzdefinitionen sowie die Kapitel, in denen die Indikatoren beschrieben werden.

Kenntage		
Eis	B.1.1	Eistage Anzahl der Tage mit einer <i>Maximum</i> temperatur (TX) $< 0\text{ °C}$
Frost	B.1.2	Frosttage Anzahl der Tage mit einer <i>Minimum</i> temperatur (TN) $< 0\text{ °C}$
Sommer	B.1.3	Sommertage Anzahl der Tage, an denen TX $> 25\text{ °C}$ ist
Heiß	B.1.4	Heiße Tage Anzahl der Tage, an denen TX $> 30\text{ °C}$ ist
Trop	B.1.4	Tropennächte Anzahl der Tage, an denen TN $> 20\text{ °C}$ ist
Stark-R.	B.1.6	Starkregentage Anzahl der Tage, an denen RR $> 10\text{ mm}$ ist
Extrem-R.	B.1.7	Extremniederschlagstage Anzahl der Tage, an denen RR $> 20\text{ mm}$ ist
Stark-W.	B.1.8	Starkwindtage Anzahl der Tage, an denen FF $> 8\text{ m/s}$ ist
Schw.-W.	B.1.9	Schwachwindtage Anzahl der Tage, an denen FF $< 2\text{ m/s}$ ist

weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

Andere Indikatoren

Schwül	B.2	Schwüle Anzahl der Tage, an denen der mittlere Dampfdruck einen Wert von 18,8 hPa überschreitet.
WSUM	B.3	Wärmesummen Summe des Anteils von TM oberhalb einer Basistemperatur. <i>Verwendete Basistemperatur: 20 °C zur Einschätzung der Sommerwärme</i>
KGT	B.4	Kühlgradtage Kumulierten Temperaturabweichung zwischen einer Raumtemperatur T_R und dem Tagesmittelwert der Außentemperatur T_A , sofern T_A größer als T_R ist. Verbreitet ist die Verwendung von $T_R = 18\text{ °C}$
KSUM	B.5	Kältesummen Aufsummierung der Absolutbeträge der Temperatur unterhalb der Basistemperatur T_B <i>Verwendete Basistemperatur: 0 °C zur Einschätzung der Winterstrenge</i>
HGT	B.6	Heizgradtage Kumulierte Temperaturabweichung zwischen einer Raumtemperatur T_R und dem Tagesmittelwert der Außentemperatur T_A , sofern T_A kleiner als eine festgelegte Heizgrenztemperatur T_G ist. Verwendet wird $T_R = 20\text{ °C}$ und $T_G = 12\text{ °C}$
TNE	B.7	Erdbodenminimum der Temperatur Temperatur, gemessen in 5 cm Höhe über dem Erdboden, nicht wie bei der Lufttemperatur (Basis für TX, TN, und TM) in 2 m Höhe
T_{Spanne}	B.8	Tagesspanne der Lufttemperatur Differenz zwischen Maximum und Minimum der Lufttemperatur

weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

- VP_{therm} **B.9.1** **Thermische Vegetationsperiode**
Beginn: An sieben aufeinanderfolgenden Tagen tritt eine Tagesmitteltemperatur der Luft (TM) von mindestens 5 °C auf; Ende: An sieben aufeinanderfolgenden Tagen ist TM kleiner als 10 °C. Dauer: Differenz (in Kalendertagen) zwischen Ende und Beginn der Thermischen Vegetationsperiode.
- VP_{phaen} **B.9.2** **Phänologische Vegetationsperiode**
Beginn: Eintritt der phänologischen Phase „Blüte der Sal-Weide“; Ende: Eintritt der phänologischen Phase „Blattverfärbung der Stieleiche“. Dauer: Differenz (in Kalendertagen) zwischen Ende und Beginn der phänologischen Vegetationsperiode.
- $VP_{frostfrei}$ **B.9.3** **Vegetationsperiode aufgrund der frostfreien Zeit**
Beginn: Tag des Jahres nach dem Jahresanfang, an dem erstmals die Minimumtemperatur der Luft nicht unter 0 °C liegt; Ende: Tag des Jahres nach dem Sommer, an dem erstmals die Minimumtemperatur der Luft unter 0 °C liegt; Dauer: Differenz (in Kalendertagen) zwischen Ende und Beginn der frostfreien Zeit.
- H **B.10** **Huglin-Index**
Summarische Größe, die zwischen dem 1.4. und dem 30.9. eines Jahres folgende Größe auswertet: $K \cdot \sum [(TM + TM)/2 - 10]$ mit $K :=$ empirische Größe etwas über 1, in Abhängigkeit vom Breitengrad.
- P90TX **B.11.1** **90-Perzentil der Maximum-Temperatur**
Für die Sommermonate (Juni–August) jedes Jahres wird eine größensortierte Reihe der Tagesmaxima der Temperatur aufgestellt. In dieser Reihe wird die Temperatur desjenigen Rangplatzes, der die Grenze zwischen den unteren 90 % und den oberen 10 % der Reihe darstellt (90-Perzentil) bestimmt.

weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

Per _{P90TX}	B.11.2	<p>Anzahl von Perioden der Überschreitung des 90-Perzentil der Maximumtemperatur in den Sommermonaten</p> <p>Für die Sommermonate (Juni–August) jedes Jahres wird eine Reihe der Abweichungen der Tagesmaxima der Temperatur vom vieljährigen Mittel 1961–2014 bestimmt. In dieser Reihe werden Perioden gesucht, in denen die Temperaturabweichung oberhalb des 90-Perzentils liegen. Es werden Perioden von 6 und 3 Tagen Länge gezählt und ihre Häufigkeit für jedes Jahr analysiert.</p>
MaxPer _{P90TX}	B.11.3	<p>Maximale Länge von Perioden der Überschreitung des 90-Perzentil der Maximumtemperatur in den Sommermonaten</p> <p>Für die Sommermonate (Juni–August) jedes Jahres wird eine Reihe der Abweichungen der Tagesmaxima der Temperatur vom vieljährigen Mittel 1961–2014) bestimmt. In dieser Reihe werden Perioden gesucht, in denen die Temperaturabweichung oberhalb des 90-Perzentils liegen. Für jeden Sommer wird die maximale Länge dieser Perioden ermittelt.</p>
P90TN	B.11.4	<p>90-Perzentil der Minimum-Temperatur</p> <p>Für die Sommermonate (Juni–August) jedes Jahres wird eine größensortierte Reihe der Minima der Temperatur aufgestellt. In dieser Reihe wird die Temperatur desjenigen Rangplatzes, der die Grenze zwischen den unteren 90 % und den oberen 10 % der Reihe darstellt (90-Perzentil) bestimmt.</p>
NOAA-HI	B.12	<p>NOAA-Hitzeindex</p> <p>Mit einer empirischen Beziehung aus Temperatur und Luftfeuchte werden vier Stufen von Hitzestress definiert.</p>
Per _{L_{TX>30}}	B.13	<p>Länge von Hitzeperioden</p> <p>Anzahl von aufeinander folgenden Tagen, an denen TX > 30 °C (Heiße Tage) ist.</p>

weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

P10TX	B.14.1	10-Perzentil der Maximumtemperatur Für jeden Winter (Dezember–Februar) wird eine größen-sortierte Reihe der Tagesmaxima der Temperatur aufgestellt. In dieser Reihe wird die Temperatur desjenigen Rangplatzes, der die Grenze zwischen den unteren 10 % und den oberen 90 % der Reihe darstellt (10-Perzentil) bestimmt.
P10TN	B.14.2	10-Perzentil der Minimum-Temperatur Für jeden Winter (Dezember–Februar) wird eine größen-sortierte Reihe der Minima der Temperatur aufgestellt. In dieser Reihe wird die Temperatur desjenigen Rangplatzes, der die Grenze zwischen den unteren 10 % und den oberen 90 % der Reihe darstellt (10-Perzentil) bestimmt.
Per_{P10TN}	B.14.3	Anzahl von Perioden der Unterschreitung des 10-Perzentil der Minimumtemperatur in den Wintermonaten Für die Wintermonate (Dezember–Februar) wird eine größen-sortierte Reihe bestimmt. In dieser Reihe werden Perioden gesucht, in denen die Temperaturabweichung unterhalb des 10-Perzentils liegen. Es werden Perioden von 6 und 3 Tagen Länge gezählt und ihre Häufigkeit für jedes Jahr analysiert.
$MaxPer_{P10TN}$	B.14.4	Maximale Länge von Perioden der Unterschreitung des 10-Perzentil der Minimumtemperatur in den Wintermonaten Für die Wintermonate (Dezember–Februar) wird eine Reihe bestimmt. In dieser Reihe werden Perioden gesucht, in denen die Temperatur unterhalb des 10-Perzentils der Minimumtemperatur liegen. Für jeden Winter wird die maximale Länge dieser Perioden ermittelt.
GlobStr	B.15	Globalstrahlung Für jedes Jahr wird die mittlere Globalstrahlung über alle Monate berechnet.
RR_{korr}	B.16	Korrigierter Niederschlag Die Niederschlagskorrektur nach Richter wird auf die Niederschlagszeitreihen angewandt.

weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

PV	B.17	Potenzielle Verdunstung Maximal mögliche Verdunstung nach DIN 4049.
KWB	B.17	Klimatische Wasserbilanz Differenz aus Niederschlag und maximal mögliche Verdunstung nach DIN 4049.
SPI	B.18	Standardisierter Niederschlagsindex Kumulierter und normierter Niederschlag über Perioden verschiedener Länge (3 Monate bis 24 Monate)
PerL _{trock}	B.19	Länge von Trockenperioden Anzahl aufeinander folgender Tage mit höchstens 1 mm Niederschlag
RRmax	B.20	Mittlerer maximaler täglicher Niederschlag Für jedes Jahr wird der maximal aufgetretene Tagesniederschlag bestimmt. Danach erfolgt eine Mittelung über verschiedene Dekaden und andere Zeitabschnitte z.B. von 30 Jahren Länge.
RX5	B.21	Maximaler 5-tägiger Niederschlag Für jedes Jahr oder jede Jahreszeit wird mit einem gleitenden 5-Tagefenster ermittelt, wie viel Niederschlag in 5-tägigen Zeiträumen fiel.
PerL _{RR>10}	B.22	Länge von Starkniederschlagsperioden Für jedes Jahr oder jede Jahreszeit wird bestimmt, wie viele Abfolgen von Tagen mit 10 mm Niederschlag oder mehr auftraten.
f _{>>RR}	B.22	Anzahl von Starkniederschlagstage Für jedes Jahr wird bestimmt, wie oft Tage mit mindestens 25 oder 40 mm Niederschlag auftraten. Ergänzung zu den Kenntageuntersuchungen (Abschnitte B.1.6 und B.1.7) mit anderen Schwellen.
RH _{hoch}	B.23	Hohe Luftfeuchtigkeit Für jeden Tag wird bestimmt, an wie vielen Stunden 90 % und mehr relative Luftfeuchtigkeit registriert wurden. Die mittlere Stundenzahl wird für jedes Jahr und die Jahreszeiten ermittelt.

weiter auf der nächsten Seite

Fortsetzung

BOF	B.24	Bodenfeuchte Für jeden Tag wird mit Hilfe des Bodenwasserhaushaltsmodells METVER eine Reihe von Größen bestimmt, darunter die potenzielle und die reale Evapotranspiration, der Sickerwassergehalt, die Bodenfeuchte und der Gesamtwassergehalt in einer Berechnungsschicht.
FWI	B.25	Waldbrandgefahr – kanadischer Waldbrandindex Der kanadische Waldbrandindex benutzt Stundenwerte von Temperatur, Luftfeuchte, Wind und Niederschlag zur Erstellung eines 5-stufigen Warnsystems.

Vorbemerkung zur Datensituation

Welche Aussagen zu den Indikatoren sind für das Untersuchungsgebiet möglich? Wie schon bei den Untersuchungen zu den meteorologischen Standardgrößen (vgl. Abschnitt 4.2) ist die Erfahrung mit der Datensituation wie folgt:

- Im Hauptdatenbestand vom Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes finden sich relativ viele Zeitreihen für die Region Sachsen-Anhalt, die mindestens 30 Jahre (beim Niederschlag 50 Jahre) abdecken.
- Erste Einschränkungen werden nach der Qualitätskontrolle und Plausibilitätsprüfung im Rahmen des Vorhabens sichtbar (s. Abschnitt 4.1) – einige Reihen müssen dadurch entfallen.
- Weitere Einschränkungen treten im Verlauf der Trenduntersuchungen zu Tage, da die verwendeten Daten in einzelnen Monaten zu große Lücken aufweisen – weitere Reihen entfallen.
- Einige Größen, wie etwa die Temperatur oder die Windgeschwindigkeit, unterliegen so deutlichen Trends, dass darunter die Vergleichbarkeit der Trendanalysen leidet. Es ist bei diesen Größen besonders wichtig, ob die Trend-Zeiträume am Anfang oder am Ende des Gesamtuntersuchungszeitraums liegen.
- Als Konsequenz erfolgen viele vergleichende Analysen für eine kleine Gruppe von Stationen, die unter diesen Maßgaben identifiziert wurden:
 - die Reihen sollen möglichst lang sein;
 - die Reihen sollen möglichst dem gleichen Zeitraum abdecken;
 - die Stationen sollen möglichst repräsentativ für die verschiedenen Klimaregionen Sachsen-Anhalts sein.

- Es gibt einen zusätzlichen Datenbestand der DWD-Agrarmeteorologie. Dieser hat den Vorteil, besonders umfassend lückengefüllt zu sein und auch einige zusätzliche meteorologischen Parameter zu besitzen, aber es sind nur acht Stationen und die Reihen beginnen erst 1961.

B.1 Kenntage

Die Untersuchungen der Kenntage erfolgten mit dem „großen“ Datenbestand. Information dazu findet sich in Tab. C.3 und A.1. Je nach Art des Kenntags sind dafür Auswertungen von Maximumtemperatur (TX), Tagesmitteltemperatur (TM), Minimumtemperatur (TN), Niederschlag (RR) oder Windgeschwindigkeit (FF) notwendig.

Die zur Verfügung gestellten Dateien befinden sich im Archiv Kenntage/data. Die Namen der Dateien enthalten die Stationsnummer und eine Kennung des Zeitbereichs, also z.B. für den Brocken, Sommer Kenntage_00722_JJA oder Magdeburg, November Kenntage_03126_NOV.

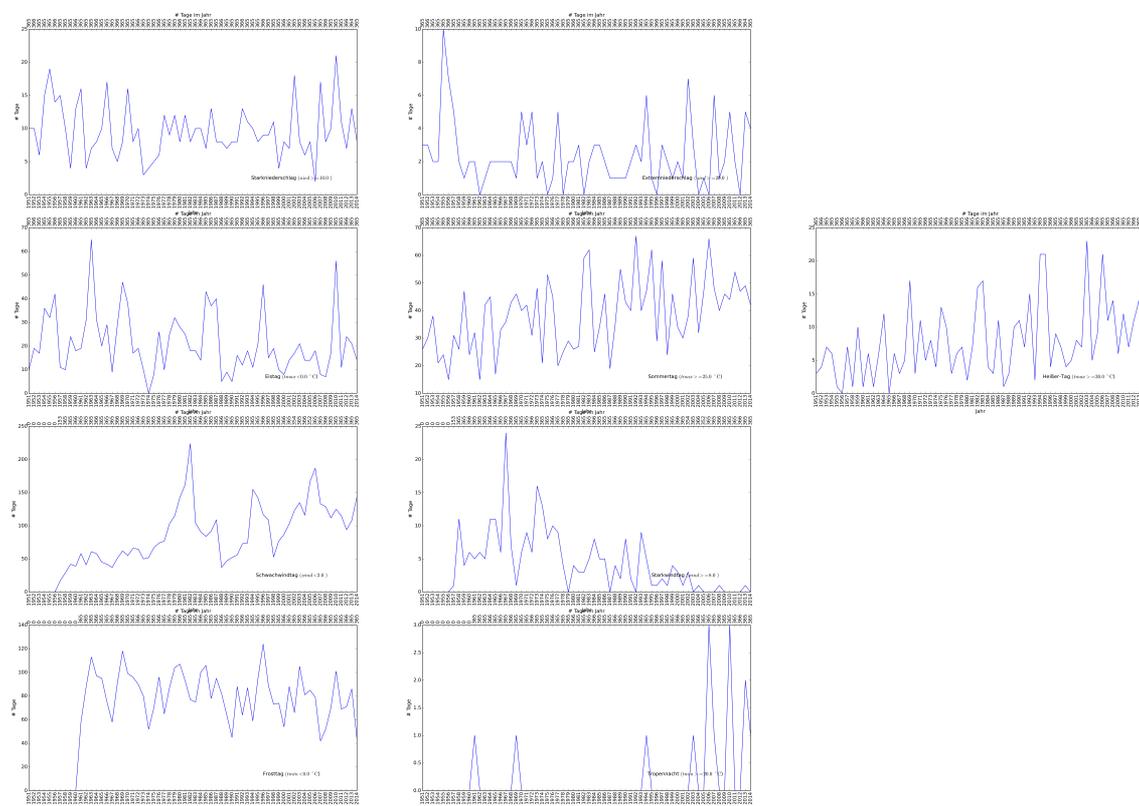


Abbildung B.1: Beispiel für eine Darstellung der verfügbaren Kenntage für die Station 03126 (Magdeburg) in der Datei kenntage_03126_annual. Die Abbildung dient der Veranschaulichung des Darstellungsprinzips für die Kenntage; daher sind die Teilfiguren relativ klein. Eine Ausschnittsvergrößerung findet sich in Abb. B.2.

Die Kenntage wurden für jedes der Jahre 1951–2014 ermittelt, sofern die entsprechenden Kenntage dort bestimmbar waren. Es erfolgten Auszählungen

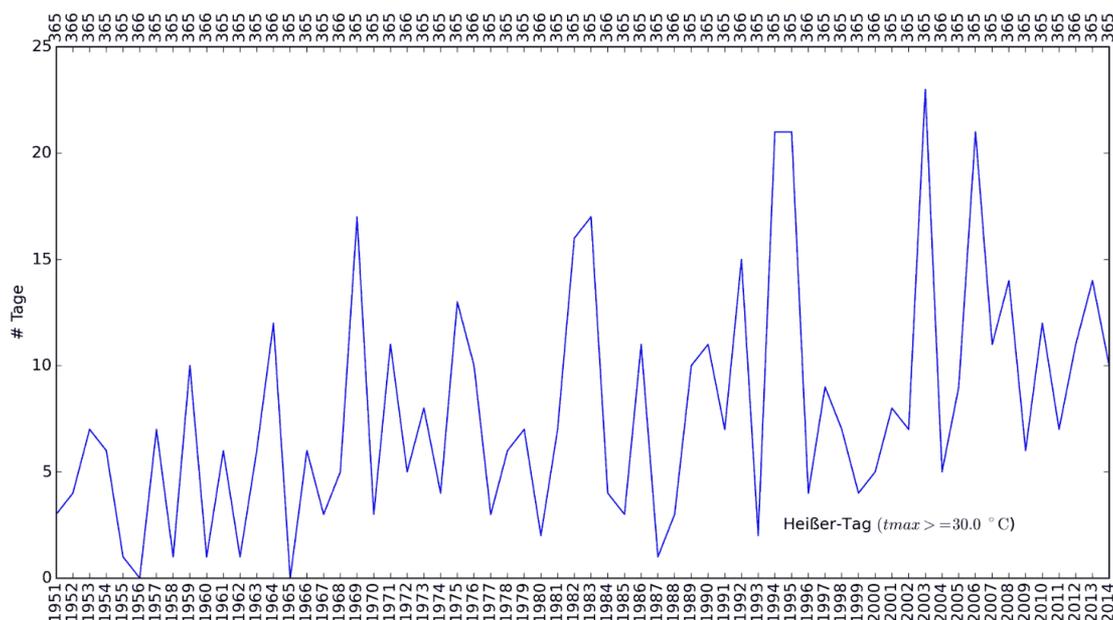


Abbildung B.2: Ausschnittsvergrößerung von Abb. B.1. Diagrammdarstellung für die heißen Tage.

für folgende Zeitbereiche: (i) Einzelne Monate (JAN bis DEZ), (ii) Jahreszeiten (Frühjahr: MAM; Sommer: JJA; Herbst: SON; Winter: DJF); (iii) Vegetationsperiode I (AMJ) und II (JAS) und (iv) gesamtes Jahr (annual). In den meisten Fällen sind nur die Kenntageangaben für das Jahr relevant, da die Bestimmungsregeln diesen Bezugszeitraum fordern. Lediglich für die Heißen Tage und die Sommertage sowie die Eistage und die Frosttage müssen hingegen die Dateien der Sommermonate (Namensbestandteil JJA statt annual) bzw. der Wintermonate (Namensbestandteil DJF statt annual) verwendet werden. Zudem könnte es für spezielle Untersuchungen auch interessant sein, Kenntage aus anderen Teilen des Jahres zu bestimmen.

Der Dateinhalt ist dynamisch gestaltet, d.h., bei einer Niederschlagsstation sind auch nur die Angaben zu Starkregentagen und Extremniederschlag nebst der Anzahl der jeweils ausgewerteten Tage pro Jahr vermerkt. Zu jedem Parameter gehören zudem zwei Spalten: Eine Datenspalte und eine Angabe, wie viele Tage im untersuchten Zeitraum verwendet wurden.

Ergänzend wurden die zeitlichen Verläufe der Kenntage grafisch aufbereitet. Im Verzeichnis Kenntage/pictures befinden sich .png-Dateien, die mit den Tabellen korrespondieren. Auch die Bilddateien enthalten unterschiedlich viele Diagramme (bis zu 9, s. Abb. B.1), je nach Vorhandensein der Variablen. Hinweis: Abb. B.1 soll lediglich das Aufbauprinzip einer Abbildung in Kenntage/pictures veranschaulichen, weshalb sie relativ klein wiedergegeben ist. Abb. B.2 zeigt die Ausschnittsvergrößerung des Diagramms am rechten Rand von Abb. B.1: Zeitlicher Verlauf der Zahl der heißen Tage. In den einzelnen Diagrammen wird für jedes Jahr ein Wert geplottet, auch wenn der Zeitraum unter Umständen nicht vollständig mit Daten belegt ist. Über jedem Diagramm ist jedoch angegeben, auf wie vielen Daten der Eintrag für ein Jahr fußt.

B.1.1 Zahl der Eistage in den Wintermonaten (Januar, Februar und Dezember) eines Jahres

Ein Eistag tritt auf, wenn die Maximumtemperatur $T_X < 0\text{ °C}$ ist – ein Beispiel mit Trendgerade und den Vertrauensbereichen ist in in Abb. B.3 gegeben.

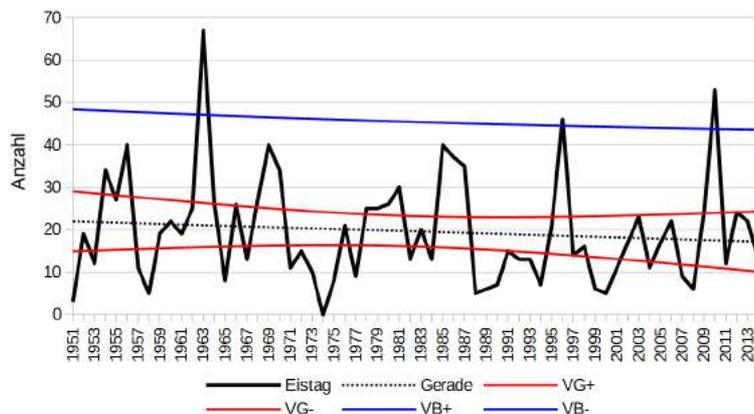


Abbildung B.3: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Eistage in den Wintermonaten (Januar, Februar und Dezember) eines Jahres an der Station 02928 (Leipzig-Holzhausen).

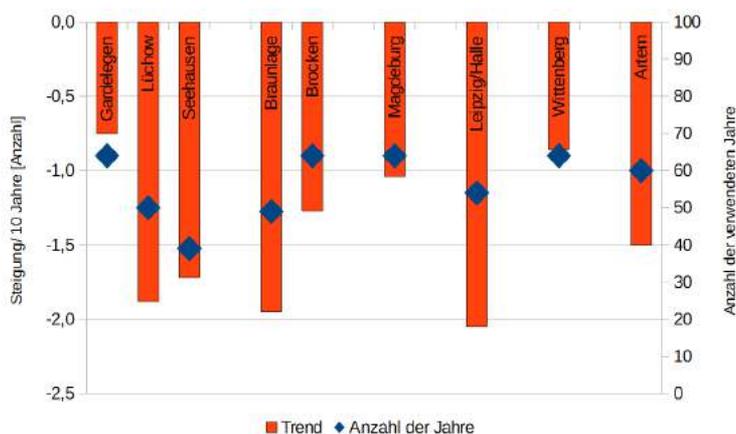


Abbildung B.4: Trends der Anzahl der Eistage für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Anstieg/Rückgang pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Ein Abnahmetrend ist zwar sichtbar, aber relativ schwach ausgeprägt. Der Vertrauensbereich des Trends VG in Abb. B.3 ist relativ breit und lässt auch einen leicht ansteigenden Trend zu. Die Breite der Vertrauensbereiche für die Trendgerade und die Zahl der Eistage rührt im Wesentlichen von der starken Variabilität der untersuchten Größe her. Auch nach 1990 gibt es sowohl Jahre mit mehr als 40 Eistagen aber auch Jahre mit weniger als 10 Eistagen. Der Mann-Kendall-Test ergibt, dass es zwar einen Abnahmetrend gibt, dieser aber

mit einem Q von $-0,75$ als *nicht abgesichert* zu bezeichnen ist. Der Vertrauensbereich VB des Wertebereichs weist zudem auf mögliche Ausreißer in den Jahren 1963, 1996 und 2010 hin; auch der sehr niedrige Wert des Jahres 1974 ist auffällig.

Es ist an dieser Stelle mit Blick auf Abb. B.3 ein Hinweis notwendig: Die Vertrauensbereiche sind ein mathematisch-statistisches Werkzeug. Zumindest rechnerisch, können untere Schranken kleiner als 0 bestimmt werden, die allerdings für die Realität keinen sinnvollen Sachverhalt darstellen. Die untere Schranke für den gesamten Wertebereich ist für den gesamten Zeitraum 1951–2014 unter 0, tritt also in Abb. B.3 nicht in Erscheinung.

Abb. B.4 gibt einen Vergleich der Zahl der Eistage an 9 Stationen in Sachsen-Anhalt und Umgebung wieder. Es bestätigt sich der Eindruck einer relativ deutlichen Abnahme der Zahl der Eistage. Sie beträgt bis zu 2 Tage pro Dekade aber wegen der hohen Variabilität der Zahl der Eistage auch bei den dort dargestellten Stationen sind diese Veränderung nur schwach oder gar nicht statistisch signifikant. Sie können aber dennoch als *Abnahmetendenz* erachtet werden.

B.1.2 Zahl der Frosttage in den Wintermonaten (Januar, Februar und Dezember) eines Jahres

Ein Frosttag wird verzeichnet, wenn die Minimumtemperatur $TN < 0\text{ °C}$ ist – ein Beispiel mit Trendgerade und den Vertrauensbereichen ist in in Abb. B.5 gegeben.

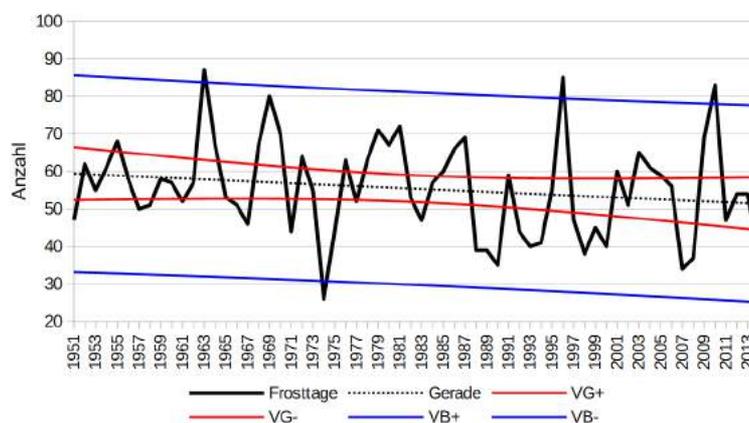


Abbildung B.5: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Frosttage in den Wintermonaten (Januar, Februar und Dezember) eines Jahres an der Station 05629 (Wittenberg).

Auch für die Frosttage ist, z.B. bei Betrachtung des Vertrauensbereichs der Trendgeraden (s. Abb. B.5), erkennbar, dass die Abnahme relativ schwach ausgeprägt ist. Wie die Zahl der Eistage (vgl. Abschnitt B.1.1) schwankt auch die Zahl der Frosttage stark von Jahr zu Jahr, was die Vertrauensbereiche verbreitert. Der Mann-Kendall-Test ergibt, dass es einen leichten Abnahmetrend gibt. Für diesen lässt sich ein Q von $-1,59$ feststellen; er ist damit etwas deutlicher,

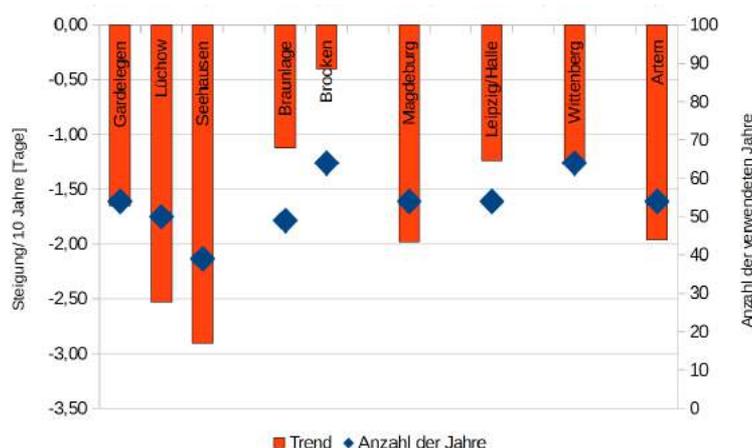


Abbildung B.6: Trends der Anzahl der Frosttage für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

als bei den Eistagen, erreicht jedoch das 95 %-Signifikanzniveau nicht. Der Vertrauensbereich VB des Wertebereichs weist zudem auf mögliche Ausreißer in den Jahren 1963, 1996 und 2010 nach oben und im Jahr 1974 nach unten hin.

Ein Vergleich der Entwicklungen für eine Stationsauswahl, wie in Abb. B.6 gezeigt, unterliegt den Beschränkungen der unterschiedlichen Zeitbereiche, die für die Trendbestimmungen benutzt werden mussten, aber eine *Tendenz* zum Rückgang der Frosttage ist ihnen dennoch abzulesen. Der Rückgang beträgt zwischen rund 1 und rund 3 Tagen pro Dekade.

B.1.3 Zahl der Sommertage in den Monaten Juni–August

Sommertage sind Tage in den Monaten des meteorologischen Sommers mit einer Maximaltemperatur $T_X \geq 25^\circ\text{C}$ – ein Beispiel mit Trendgerade und den Vertrauensbereichen ist in in Abb. B.7 gegeben.

Anders als bei Eis- und Frosttagen ist bei den Sommertagen ein Zunahmetrend zu erwarten. Im Beispiel der Station Wittenberg findet sich eine relativ deutliche Zunahme. Der Mann-Kendall-Test ergibt ebenfalls, dass es einen Zunahmetrend gibt. Die Testgröße Q beträgt +2,58, das heißt eine Signifikanz von über 95 % ist gegeben. Der Vertrauensbereich VB des Wertebereichs zeigt keine besonderen Auffälligkeiten; lediglich die Jahre 1983 und 1992 kommen in die Nähe des Ausreißerkriteriums.

Im Vergleich mit anderen Stationen (Abb. B.8) zeigt sich, dass verbreitet Anstiegstrends von 2–3 Tagen pro Jahrzehnt auftreten, die auch statistisch signifikant sind. Wie im Rahmen einer Betrachtung im Abschnitt 4.3.1 (s. Abb. 4.46 auf S. 55) dargestellt wurde, häufen sich selbst an der Station Brocken die Sommertage in den Jahren nach 2000. Aber diese Beobachtung betrifft nur einen relativ kurzen Zeitraum und ein im Grunde immer noch seltenes Ereignis auf dem Brocken und ist als *Tendenz* zu werten.

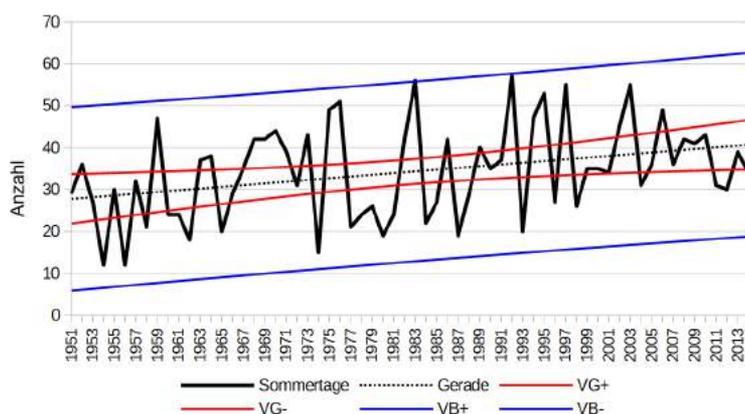


Abbildung B.7: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Sommertage an der Station 05629 (Wittenberg).

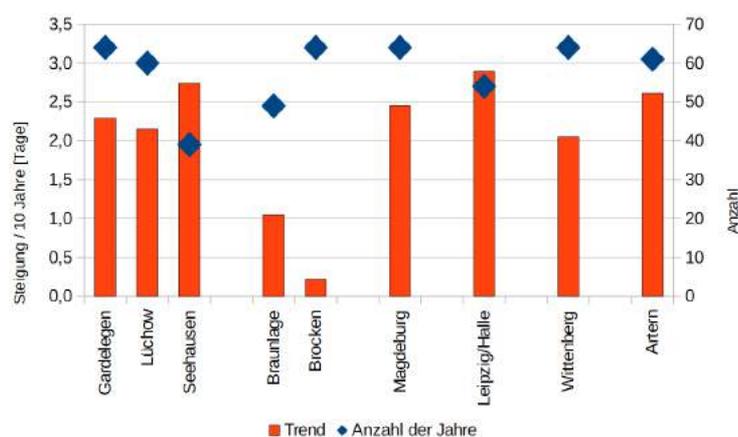


Abbildung B.8: Trends der Anzahl der Sommertage (Maximum über 25 °C) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

B.1.4 Zahl der heißen Tage in den Monaten Juni–August

Zur Ermittlung der heißen Tage wird die Anzahl der Tage mit $T_X \geq 30 \text{ °C}$ in den Monaten des meteorologischen Sommers bestimmt – ein Beispiel mit Trendgerade und den Vertrauensbereichen ist in in Abb. B.9 gegeben.

Heiße Tage sind ein gut geeignetes Werkzeug, Extreme aufzuspüren, allerdings treten sie auch nicht so oft auf; die statistischen Auswertungen sind also auf eine kleineren Datenmenge als bei den Sommertagen bezogen. Auch bei den heißen Tagen ist ein Zunahmetrend zu erwarten. Im Beispiel der Station Wittenberg findet sich eine deutliche Zunahme von rund 5 auf rund 13 Tage. Der Mann-Kendall-Test zeigt die Bedeutung dieses Zunahmetrends. Die Testgröße Q beträgt +2,95, ist also noch größer als bei den Sommertagen mit einer Signifikanz von über 99 %. Anhand des Vertrauensbereiches für die Werte (blaue Kurven in Abb. B.9) lassen sich für die Heißen Tage mehrere besondere Jahre

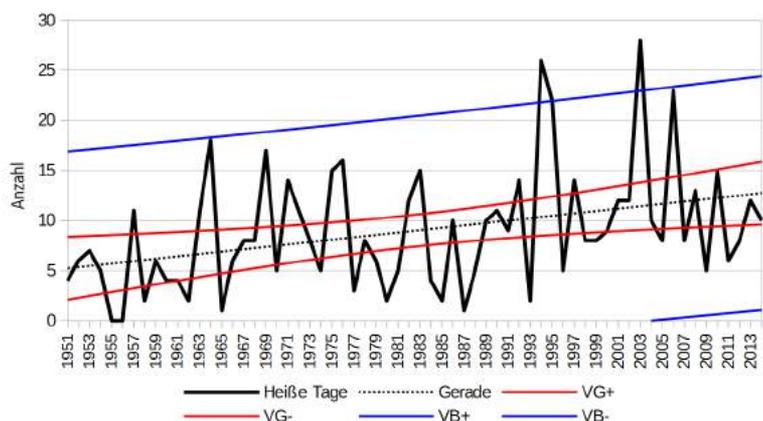


Abbildung B.9: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der heißen Tage an der Station 05629 (Wittenberg).

identifizieren – anders als bei der entsprechenden Untersuchung der Sommertage. Insbesondere die Jahre 1994, 1995 und der gut bekannte Rekordsommer im Jahr 2003 aber auch der Hitzesommer 2006 sind auffällig.

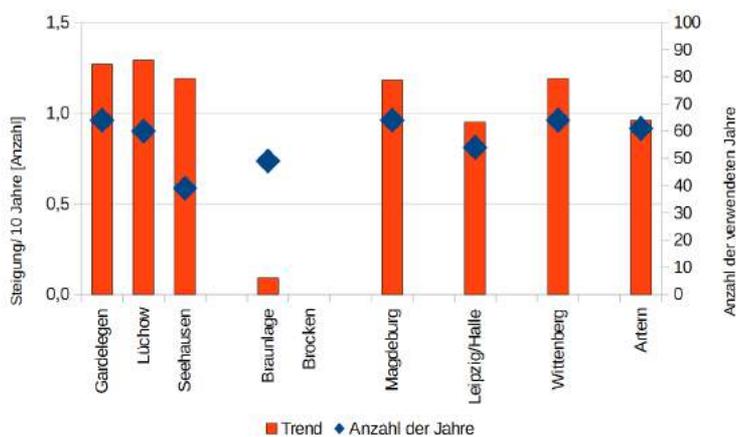


Abbildung B.10: Trends der Anzahl der heißen Tage (Maximum über 30 °C) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Auch an anderen Stationen sind die Trendentwicklungen sehr deutlich, wie Abb. B.10 zeigt. Die Trends weisen auf Zunahmen der Zahl der Heißen Tage von 1,0 und mehr pro Jahrzehnt hin, was Erhöhungen um 5–8 Tage (je nach Reihenlänge) anzeigt. An der Station Braunlage hört die Reihe bereits 1999 auf – die deutliche Weiterentwicklung der Heißen Tage in den darauf folgenden Jahren findet sich in ihr nicht wieder und der Trend ist entsprechend geringer. An der Station Brocken treten zwar Sommertage auf (vgl. Abschnitt B.1.3), aber Heiße Tage kommen dort nicht vor. An allen anderen in Abb. B.10 gezeigten Stationen sind die Trends statistisch signifikant und auf dem 95- bis 99 %-Niveau gesichert.

B.1.5 Zahl der Tropennächte pro Jahr

Tritt an einem Tag ein Lufttemperaturminimum $TN \geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$ auf, so besitzt dieser eine Tropennacht – ein Beispiel mit Trendgerade und den Vertrauensbereichen ist in in Abb. B.11 gegeben.

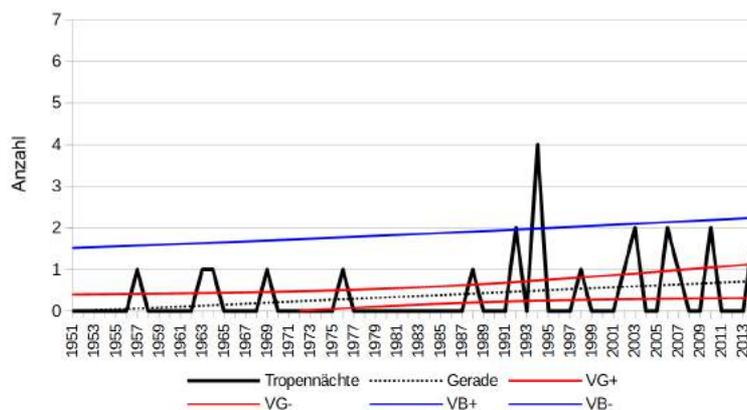


Abbildung B.11: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Tropennächte an der Station 05629 (Wittenberg).

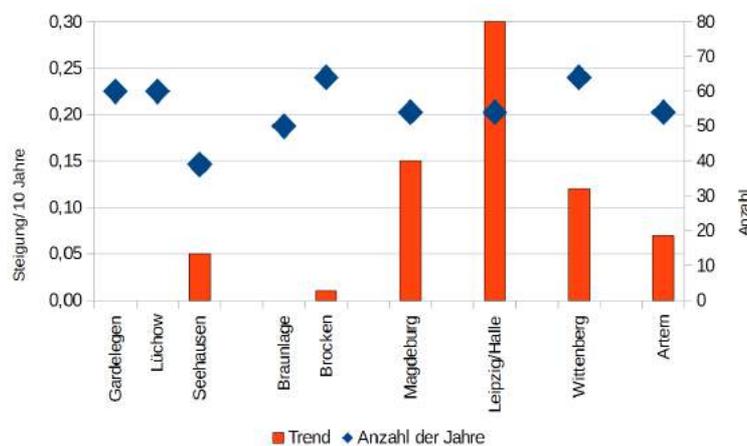


Abbildung B.12: Trends der Anzahl der Tropennächte (Minimum über $20 \text{ }^\circ\text{C}$) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Tropennächte besitzen besondere, beispielsweise medizinische Relevanz; sie kommen im Klima der Gegenwart relativ selten vor. Die Möglichkeit, Analysen trendartiger Entwicklungen durchzuführen, stößt hier an Grenzen, denn (i) es gibt viele Jahre, in denen diese Nächte nicht auftreten und (ii) selbst in besonderen Jahren liegt ihre Zahl relativ niedrig. Die statistischen Methoden werden in diesem Fall auf eine sehr kleinen Datenmenge angewandt. Bei Betrachtung der Auftretenshäufigkeit von Tropennächten zeigen sich allerdings *Zunahmetendenzen* seit der Mitte der 1980er Jahre.

Im Vergleich mit anderen Stationen (Abb. B.12) wird ebenfalls deutlich, dass die Zahl der Tropennächte eine hohe räumliche Variabilität besitzt. Überwärmungseffekte von städtischen Ballungsräumen und andere lokale Faktoren tragen zum Auftreten an einigen Orten bei.

Der Mann-Kendall-Test kann zwar angewandt werden (er würde erst bei Datenkollektiven unter 10 Datenpaaren seine Sinnhaftigkeit verlieren), aber der von ihm gestützte Zunahmetrend ist mit einer Testgröße Q von +1,93 in Wittenberg nicht auf der 95 %-Stufe signifikant. Ob das Jahr 1994 mit vier Tropennächten an der Station Wittenberg für die dortigen Klimaverhältnisse einen besonderen Zustand anzeigt, sollte mit Vorsicht interpretiert werden.

Wie schon bei den Eistagen erläutert (vgl. Abschnitt B.1.1) sind die Vertrauensbereiche ein mathematisch-statistisches Werkzeug. Zumindest rechnerisch können untere Schranken kleiner als 0 bestimmt werden, die keinen sinnvollen realen Sachverhalt darstellen. Die untere Schranke des Vertrauensbereichs der Trendgeraden (rote Kurve in Abb. B.11) erreicht erst in den frühen 1970er Jahren einen sinnvollen Betrag über 0. Die untere Schranke für den gesamten Wertebereich ist für den gesamten Zeitraum 1951–2014 unter 0, tritt also in Abb. B.11 nicht in Erscheinung.

B.1.6 Zahl der Starkregentage pro Jahr

Ein Starkregentag ist ein Tag mit einer Niederschlagsmenge $RR \geq 10$ mm – ein Beispiel mit Trendgerade und den Vertrauensbereichen ist in in Abb. B.13 gegeben.

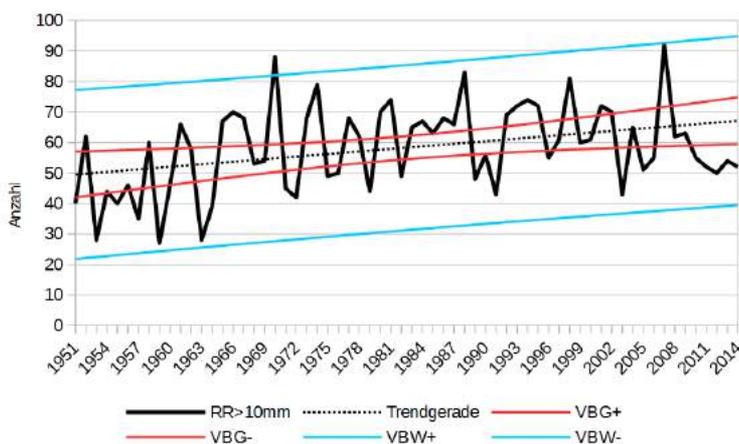


Abbildung B.13: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Tage mit einem Niederschlag über 10 mm an der Station 00722 (Brocken).

Zum Satz an Standard-Kenntagen gehören nicht nur thermische Indikatoren. Auch Niederschlagsereignisse werden beschrieben. Zwei Stufen sind dafür vorgesehen: Mindestens 10 mm (Starkregen) und mindestens 20 mm Niederschlag (Extremniederschlag). An der Station Brocken soll dies gezeigt werden. Es findet sich ein gut belegter Zunahmetrend – die Betrachtung des Vertrauensbe-

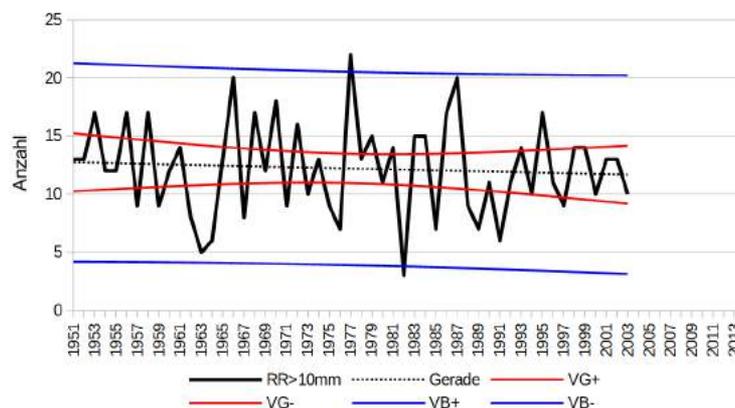


Abbildung B.14: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Tage mit einem Niederschlag über 10mm an der Station 00225 (Auerstedt).

reichs der Trendgeraden in Abb. B.13 (von roten Linien beschrieben) weist darauf hin, dass nur eine äußerst geringe Restwahrscheinlichkeit für einen Nicht-Zunahmetrend festzustellen ist; der Korridor lässt im Grunde nur aufwärts gerichtete Geradenverläufe zu. Der Mann-Kendall-Test ergibt eine Testgröße Q von +2,48, d.h. dieser Trend ist auf der 95 %-Stufe signifikant. „Kandidat“ für einen Ausreißer könnte das Jahr 1970 sein, mit knapp 90 Tagen, an denen es 10mm oder mehr Niederschlag gab.

An anderen Stationen ist dieses Trendverhalten nicht zu finden. Das Beispiel der Station Auerstedt (Abb. B.14) zeigt, dass dort aus den vorliegenden 53 Jahren (1951–2003) der Trend nur sehr schwach ist. Visuell scheint ein leichter Abnahmetrend vorzuliegen, aber der Mann-Kendall-Test ergibt bei der Reihe von Auerstedt eine Testgröße Q von $-0,51$, was außerhalb aller belastbaren Signifikanzaussagen liegt.

Anhand der Station Brocken werden die unterschiedlichen Trendentwicklungen innerhalb eines Jahres deutlich: Für das gesamte Jahr [ist ein, wie eingangs beschrieben, deutlicher Anstiegstrend vorhanden. Im Sommer [Juni–August, Abb. B.15 (a)] ist ein Trend nicht nachzuweisen, während im Winter [Dezember–Februar, Abb. B.15 (b)] ein deutlicher Anstiegstrend zu verzeichnen ist – von anfangs rund 14 winterlichen Starkniederschlagtagen geht die Entwicklung nahezu auf eine Verdoppelung am Ende des Zeitraums hin.

Wie schon für die täglichen Niederschlagssummen gezeigt (Abschnitt 4.2.2) kann es sinnvoll sein, die Analysen zusätzlich für die Vegetationsperiode I (April–Juni) und II (Juli–September) durchzuführen. Aus den Abbildungen B.15 (c) und (d) ist ersichtlich, dass in den Monaten April bis Juni keine Trendentwicklung der Starkniederschlagstage auftritt, während es in der zweiten Hälfte des Sommerhalbjahrs, der Vegetationsperiode II, einen klar erkennbaren Anstiegstrend gibt.

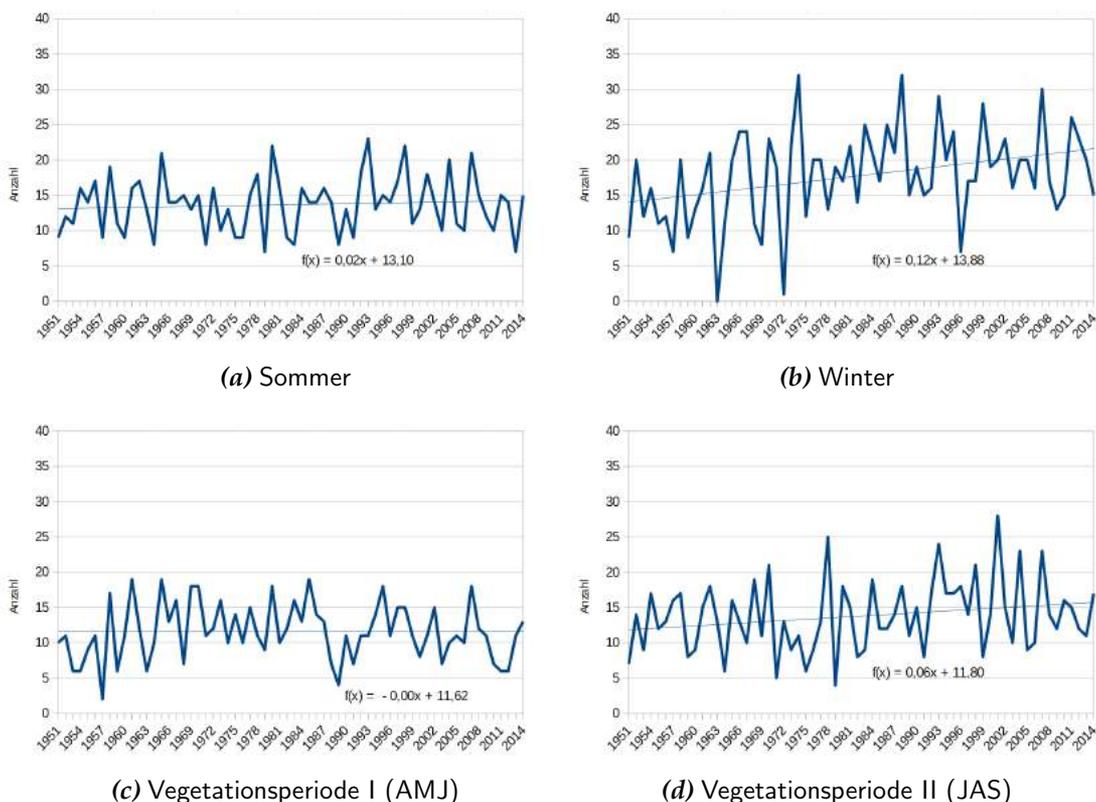


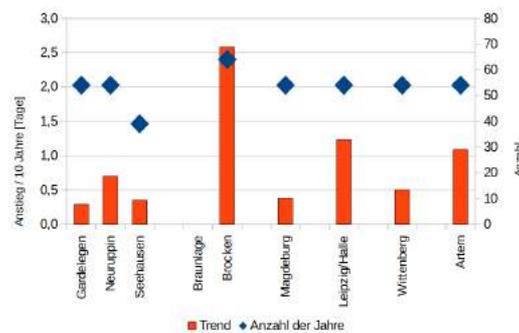
Abbildung B.15: Entwicklung der Zahl der Starkregentage ($RR > 10$ mm Niederschlag pro Tag) an der Station Brocken in verschiedenen Jahresabschnitten. Die gestrichelte Linie ist die Trendgerade.

Die Beobachtung einer relativ guten Differenzierung von Niederschlagsregimes im Jahr bei Verwendung der Vegetationsperioden I und II bestätigt sich auch, wenn andere Stationen in der Region Sachsen-Anhalt betrachtet werden (Abb. B.16).

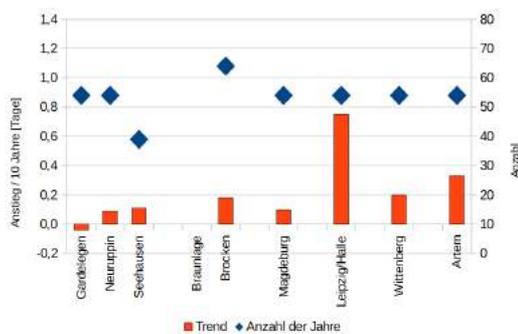
B.1.7 Zahl der Extremniederschlagstage pro Jahr

Es wird die Anzahl der Tage mit $RR \geq 20$ mm bestimmt – in Abb. B.17 und B.18 sind die Resultate für die beiden, auch schon für die Schwelle 10 mm betrachteten Stationen Brocken und Auerstedt wiedergegeben. Auch wenn bei diesem Schwellenwert deutlich weniger Fälle auftraten und die Statistik mit einem kleineren Kollektiv als bei der Überschreitung von 10 mm auskommen muss, sind die Aussagen ähnlich: Ein Zunahmetrend lässt sich für den Brocken zeigen und für Auerstedt ist ein Trend zu wenig belastbar.

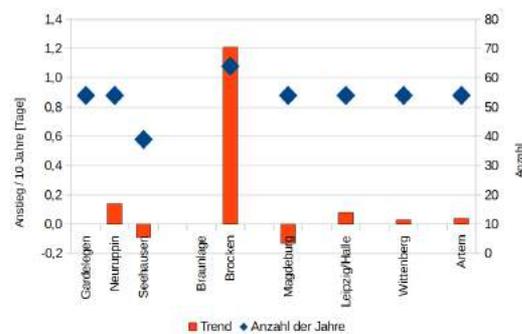
Mit einer Tagesniederschlagsmenge von 20 mm pro Tag wird für die Stationen im Flachland oder im Harzvorland das Auftreten von Extremniederschlag abgebildet. Für die Station Brocken, an der sehr hohe Niederschlagsmengen verzeichnet werden, ist eine Tagesniederschlagsmenge von 20 mm nicht ungewöhnlich – und zudem wird eine beachtliche Zunahme von rund 4 Tagen pro Dekade verzeichnet (s. Abb. B.19). Dies ist auf der 99 %-Stufe statistisch



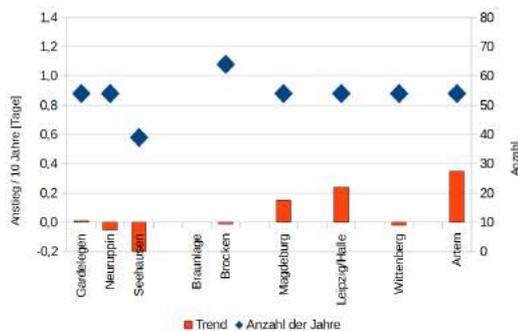
(a) Jahr



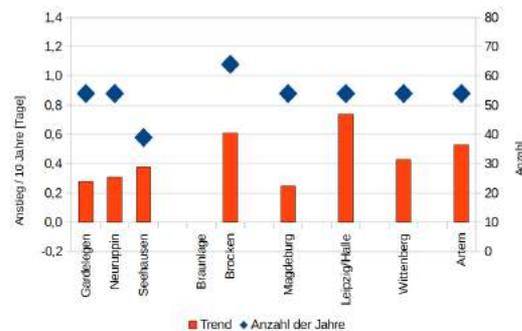
(b) Sommer



(c) Winter



(d) Vegetationsperiode I (AMJ)



(e) Vegetationsperiode II (JAS)

Abbildung B.16: Trends der Anzahl der Starkregentage (RR über 10 mm) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

signifikant. An anderen Stationen ist diese Entwicklung deutlich schwächer – im Flachland werden Veränderungen von 0,5 und weniger Tagen pro Dekade gefunden. An keiner dieser Stationen ist ein Trend signifikant.

Ergänzend wurde für die Station Brocken die Entwicklung der Tage mit mehr als 40 mm Niederschlag untersucht und in Abb B.84 auf S. LXXVII dargestellt.

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die Station Brocken eine Sonderstellung im regionalen Niederschlagsregime besitzt. Dort werden nicht nur die höchsten Niederschlagsmengen verzeichnet, auch sind die Entwicklun-

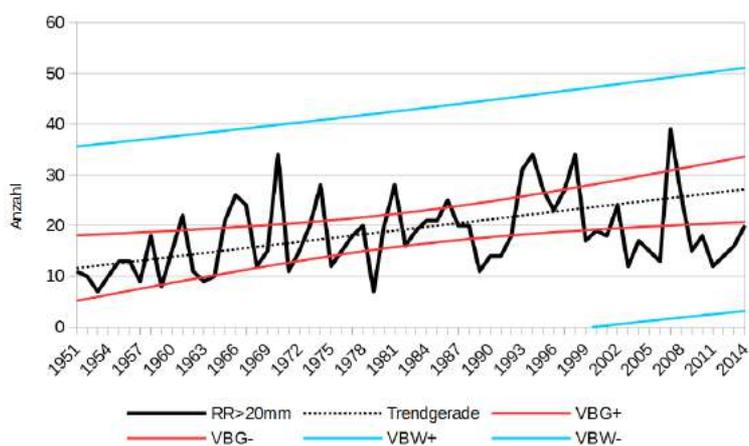


Abbildung B.17: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Tage mit einem Niederschlag über 20 mm an der Station 00722 (Brocken).

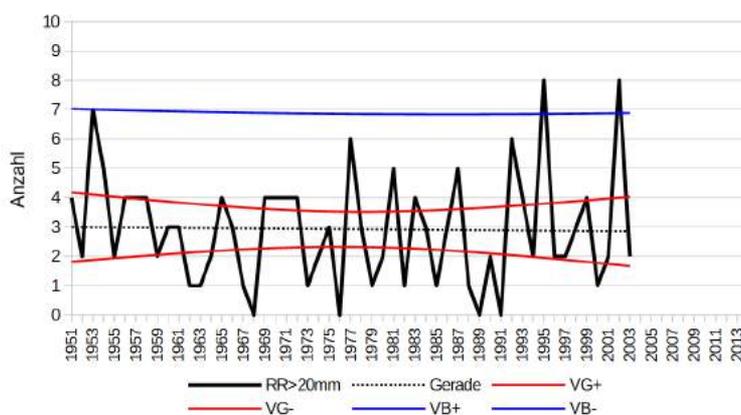


Abbildung B.18: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Tage mit einem Niederschlag über 20 mm an der Station 00225 (Auerstedt).

gen des Jahresniederschlags wesentlich deutlicher als an allen übrigen Stationen. Am Brocken treten aber auch ausgeprägte jahreszeitliche Spezifika der Trendentwicklung auf. So ist dort im Sommerniederschlag (Juni bis August) und während der Vegetationsperiode I (April bis Juni) praktisch kein Trend zu finden, während der Niederschlag im Winter (Dezember bis Februar) und der Vegetationsperiode II (Juli bis September) deutlich zunimmt.

B.1.8 Zahl der Starkwindtage pro Jahr

Ermittelt wird die Anzahl der Tage mit $FF \geq 8 \text{ m/s}$ – die zeitliche Entwicklung der Starkwindtage ist für vier Stationen in Abb. B.20 einander gegenüber gestellt.

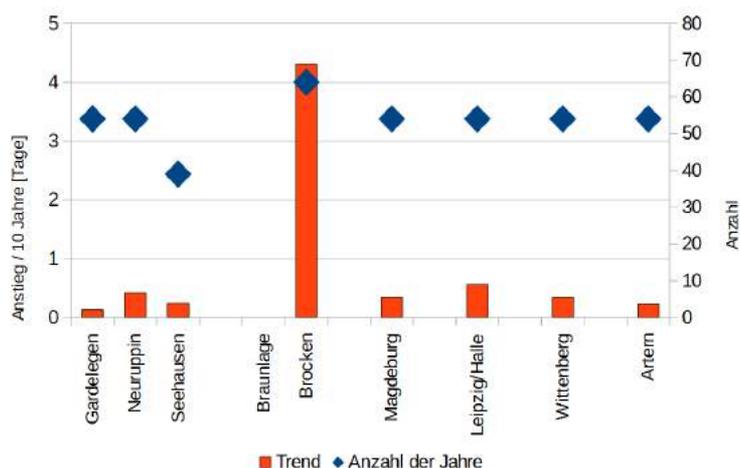


Abbildung B.19: Trends der Anzahl der Extremniederschlagstage (Tagesmenge über 20 mm) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

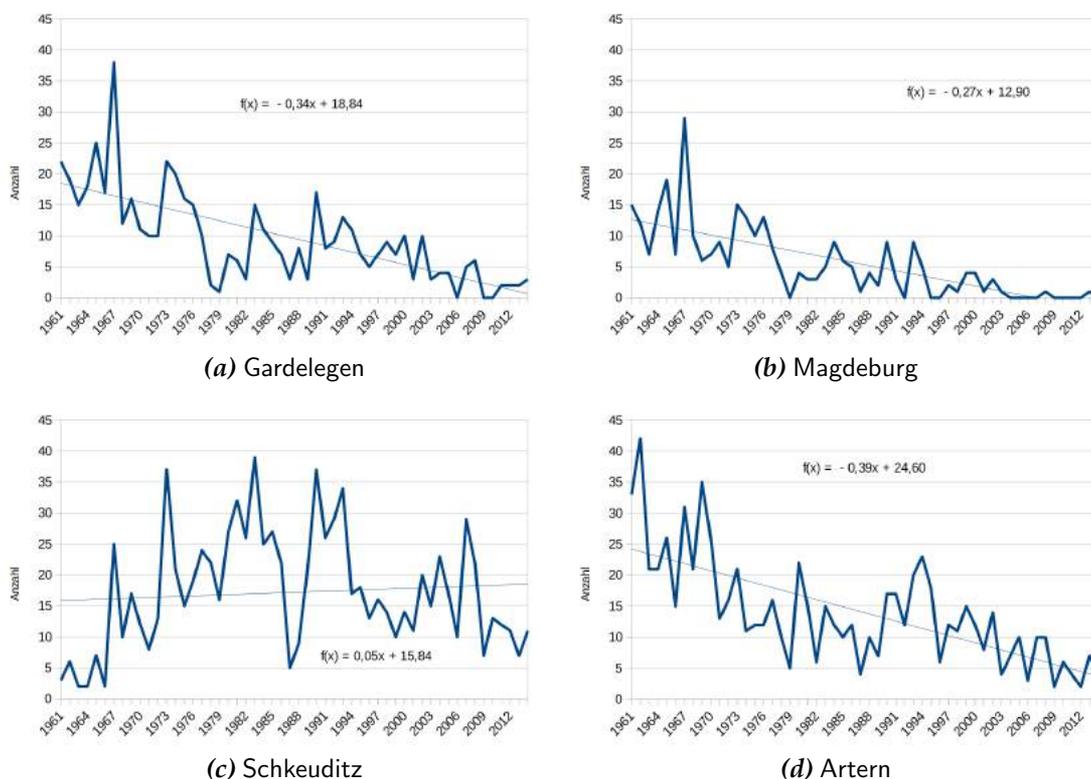


Abbildung B.20: Entwicklung der Zahl der Starkwindtage (Tagesmittel der Windgeschwindigkeit > 8 m/s) an den Stationen Gardelegen, Magdeburg, Schkeuditz und Artern. Die dünne Linie ist die Trendgerade.

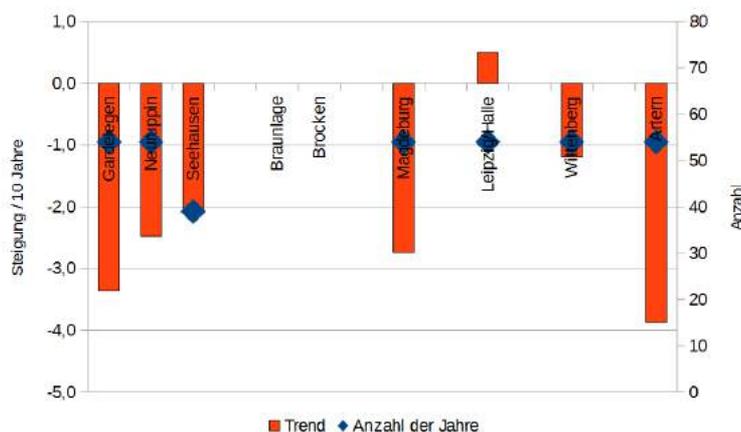


Abbildung B.21: Trends der Anzahl der Starkwindtage (Tagesmittel über 8 m/s) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Die Abnahmetrends sind an den Stationen Gardelegen, Magdeburg und Artern sehr deutlich und auch statistisch signifikant, während in Schkeuditz¹⁾ ein schwacher, nicht signifikanter Zunahmetrend vorgefunden wird.

Im Vergleich mit den anderen Stationen, für die für einen Zeitraum von rund 50 Jahren Daten verfügbar sind (Abb. B.21) zeigt sich, dass es verbreitet Abnahmetrends gibt und die leichte Tendenz zur Zunahme in Schkeuditz eine Ausnahme darstellt. Von der Richtung der Trendentwicklung her ist dies in Übereinstimmung mit den analysierten Entwicklungen bei der mittleren Windgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 4.2.6). Überraschend ist eher, dass die Trendentwicklungen beim Extremindikator „Starkwindtage“ zumeist noch deutlicher als beim Mittelwind sind.

Einige Anmerkungen zur Datenqualität: Windmessungen haben viele Messartefakte – die Interpretation der Ergebnisse sollte daher mit Vorsicht geschehen. Für die Windgeschwindigkeitsdaten der Station Halle wurde in Abschnitt 4.2.6 (ab S. 44) ein Teil der Problematik offenkundig.

An der Station Seehausen gab es eine Auffälligkeit am Anfang der Datenreihe: Das erste Jahr hat ein erhöhtes Wertenniveau, was sich insbesondere an den Windminima zeigt, die in diesem Zeitraum nicht unter 2 m/s fallen. Danach werden hingegen Tagesmittel der Windgeschwindigkeit von 0,5 m/s oder weniger bestimmt. Daher wurde versuchsweise das erste Jahr für die Trendanalysen ausgeblendet.

Die Auswirkungen auf den Trend der Starkwindtage mit und ohne Nutzung des Jahres 1976 wird in Abb. B.22 gezeigt. Hier kommt zusätzlich zum Tragen, dass aus mathematischen Gründen die Neigung der Trendgeraden²⁾ besonders empfindlich auf die Werte am Anfang und Ende des Messwertebereichs rea-

¹⁾In einigen Datensätzen wird diese Station als „Leipzig-Halle“ bezeichnet, in anderen als „Schkeuditz“. Es handelt sich um die Station am Flughafen von Leipzig und Halle.

²⁾Bestimmt nach dem statistischen Standard, der Methode der kleinsten Quadrate.

giert. In der Konsequenz wird aus einem Rückgang von 2 Tagen pro Dekade [0,2 Tage pro Jahr, wie die eingeblendete Formel der Trendgerade in Abb. B.22 (a) ausweist] ein Rückgang von 1,3 Tagen pro Dekade, wenn der zweifelhafte Anfang des Wertebereichs ausgeblendet wird.

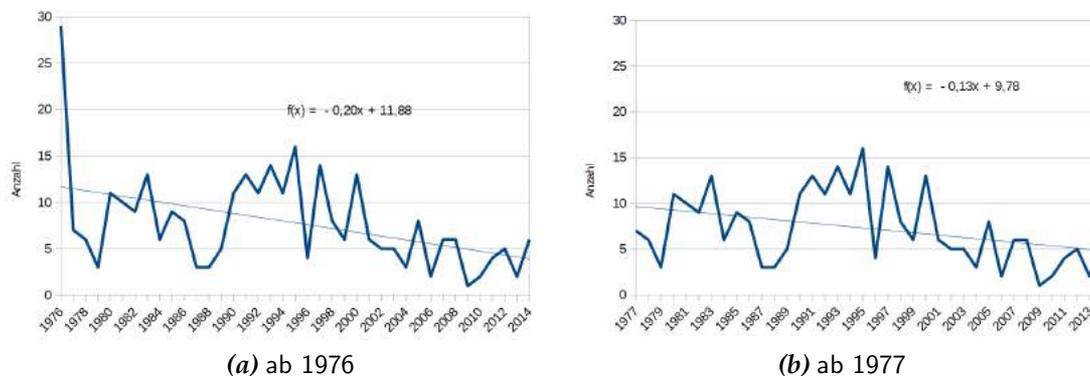


Abbildung B.22: Entwicklung der Zahl der Starkwindtage (Tagesmittel der Windgeschwindigkeit > 8 m/s) an der Station Seehausen bei Verwendung der Zeiträume 1976–2014 (links) bzw. 1977–2014 (rechts). Die dünne Linie ist die Trendgerade.

Ein weiteres Beispiel für mögliche Artefakte in den Winddaten im Zusammenhang mit den Schwachwindtagen wird am Ende von Abschnitt B.1.9 vorgestellt.

B.1.9 Zahl der Schwachwindtage pro Jahr

Als Schwachwindtage sind diejenigen definiert, bei denen die mittlere Windgeschwindigkeit $FF < 2$ m/s ist. Die zeitliche Entwicklung der Schwachwindtage ist für vier Stationen in Abb. B.23 dargestellt.

Die Veränderungen bei den Schwachwindtagen sind über die Zeit recht unterschiedlich. Die Neigung der Trendgeraden ist bei den meisten Stationen gering. Die Trends sind nicht oder nur sehr schwach statistisch signifikant. Anders verhält es sich an der Station Schkeuditz, wo ein sehr starker Rückgang der Schwachwindtage zu verzeichnen ist. Dies wäre mit dem spiegelbildlichen Verhalten bei den Starkwindtagen an dieser Station (vgl. Abschnitt B.1.8) in Einklang. Dennoch bleiben Zweifel, ob nicht Artefakte des Mess- und Aufbereitungsverfahrens einen Beitrag zu dem dargestellten Schwachwindverhalten in Schkeuditz liefern.

Ein Vergleich der ermittelten Trendentwicklungen für den Schwachwind wird in Abb. B.24 für einige Stationen im Raum Sachsen-Anhalt wiedergegeben. Bis auf Schkeuditz und Seehausen sind die Entwicklungen, mit unterschiedlicher Stärke, in Richtung Zunahme der Schwachwindtage.

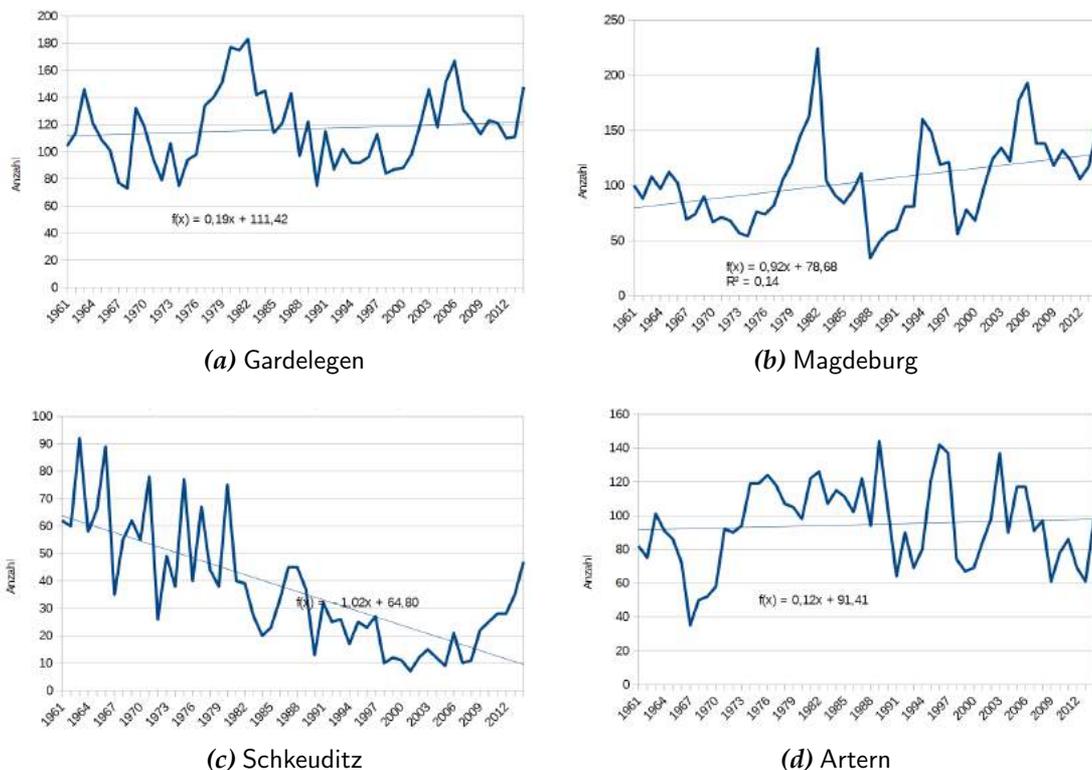


Abbildung B.23: Entwicklung der Zahl der Schwachwindtage (Tagesmittel der Windgeschwindigkeit < 2 m/s) an den Stationen Gardelegen, Magdeburg, Schkeuditz und Artern. Die dünne Linie ist die Trendgerade.

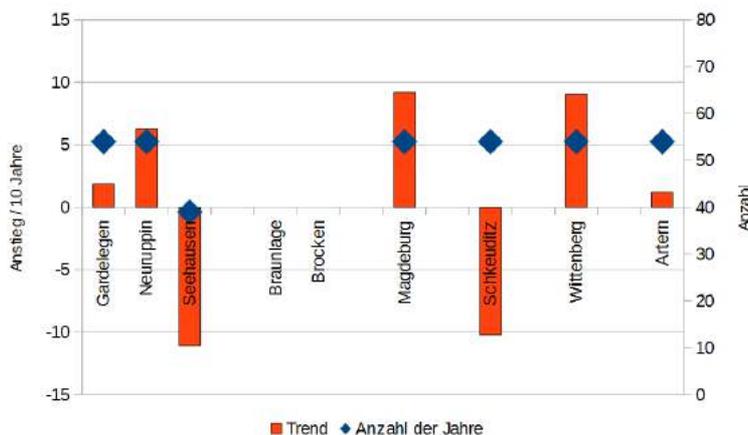


Abbildung B.24: Trends der Anzahl der Schwachwindtage (Tagesmittel unter 2 m/s) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Abgesehen von der Auffälligkeit im letzten Drittel der Zeitreihe ist bei Schkeuditz kein offenkundiges Problem diagnostizierbar. Anders ist dies in Seehausen, wie Abb. B.25 zeigt.

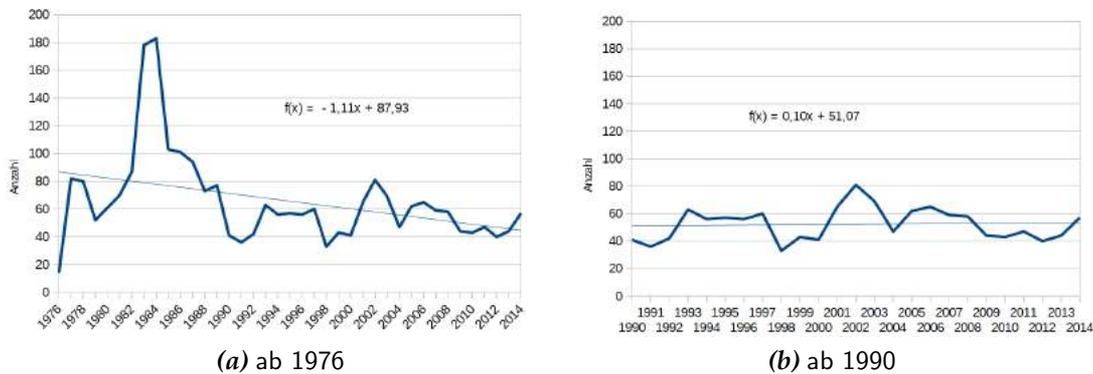


Abbildung B.25: Entwicklung der Zahl der Schwachwindtage (Tagesmittel der Windgeschwindigkeit < 2 m/s) an der Station Seehausen bei Verwendung der Zeiträume 1976–2014 (links) bzw. 1990–2014 (rechts). Die dünne Linie ist die Trendgerade.

An dieser Station tritt in den 1980er Jahren ein starker Wertesprung in der Zahl der Schwachwindtage auf. Dies könnte ein Artefakt der Umstellung in der Mess-Apparatur aber auch ein in der Weiterverarbeitung der Daten entstandenes Problem sein. Tatsache ist, dass sich der Trend deutlich ändert, wenn seine Ermittlung erst nach diesem Zeitraum beginnt. Der Abnahmetrend von 11,1 Tagen pro Dekade [1,11 Tagen pro Jahr, wie es die in Abb. B.25 (a) eingeblendete Trendgeradengleichung ausweist] verschwindet völlig, wenn die Reihe versuchsweise erst nach 1990 analysiert wird. Anmerkung: Das ist nur ein Experiment, denn ein so kurzer Zeitraum soll im Grunde nicht zur Trendbestimmung verwendet werden.

B.2 Zahl der Tage mit Schwüle

Es wird die Anzahl der Tage in den Sommermonaten (Juni-August) mit einem Dampfdruck über 18,8 hPa ermittelt. Zunächst wurde mit der Magnus-Formel der Sättigungsdampfdruck E für die Temperatur T (hier: Tagesmitteltemperatur in $^{\circ}\text{C}$) berechnet

$$E = 6,112 \cdot \exp \left[\frac{17,62 \cdot T}{243,12 + T} \right]$$

Durch Multiplikation von E mit der relativen Feuchte (und Division durch 100) wird der Dampfdruck e bestimmt. Danach erfolgte die Auszählung, wie oft eine Schwelle von $e = 18,8$ hPa erreicht oder überschritten wurde.

Diese Untersuchungen erfolgten mit dem Kern-Datenbestand (vgl. Anhang A.2), da dort die relevanten Daten zur Bestimmung des Dampfdrucks vorlagen.

Die zur Verfügung gestellten Dateien befinden sich im Archiv Schwuele/data. Die Namen der Dateien enthalten die Stationsnummer (mit Konkordanz zur Liste in Tab. A.1), eine Kennung des Zeitbereichs (Fru, Som, Her, Win oder Jahr) – Angaben zu Tagen mit hoher Schwüle sind aber im Grunde nur bei Sommer und Jahr sinnvoll.

Zudem gibt es pro Station zwei Dateien: `trends_<statnr>_<zeitbereich>` und `tidlong_<statnr>_<zeitbereich>` also beispielsweise `tidlong_10270_Jahr` für die Angaben zum Schwületrend der Station Neuruppin (10270) für das Jahr. Der Inhalt der Dateien wird ausführlich in Anhang D.2.2 beschrieben.

Am Beispiel der Station Gardelegen (Abb. B.26) sei die analysierte Trendentwicklung der Tage mit Schwüle an einer Station veranschaulicht.

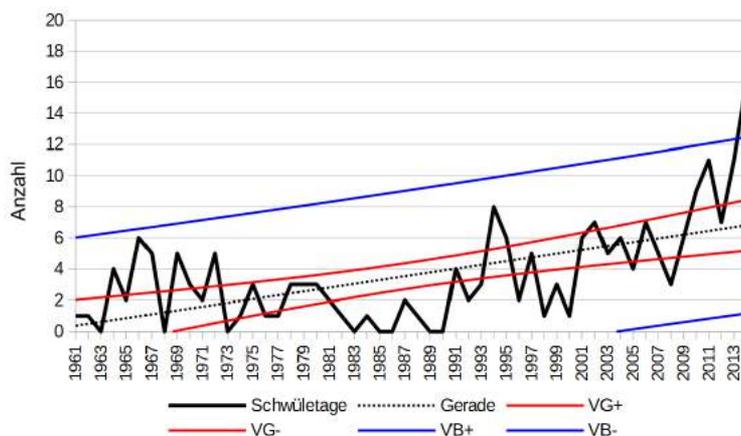


Abbildung B.26: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Zahl der Tage mit Schwüle an der Station Gardelegen.

Die Zahl der Tage pro Jahr an denen Schwüle auftritt, ist relativ gering. Es gibt Jahre, in denen das Kriterium an keinem der Tage zutrifft. Auffällig ist jedoch auch die Häufung von Schwüle-Tage in den Jahren nach 1990. Ein Anstiegstrend ist hoch signifikant mit einer Mann-Kendall-Testgröße Q von 3,92.

Um zu testen, ob dieser deutliche Trend Substanz hat, wurde eine andere Größe benutzt, die im Datenbestand der DWD-Agrarmeteorologie vorhanden ist, aber nicht zum Kern des Vorhabens gehört: Das Sättigungsdefizit³⁾. Wie weiter oben gezeigt, bestimmt sich die Schwüle aus dem Sättigungsdampfdruck, der wiederum als Funktion der Temperatur bestimmt wird. Es stellt sich die

³⁾Diese Größe misst, wie viel Wasserdampf aktuell „fehlt“, damit Sättigung auftreten kann. Sie ist also ein Maß, wie weit der aktuelle Zustand von einer maximalen Wasserdampfaufnahme (z.B. bei Nebelbildung) entfernt ist. Der Sättigungsdampfdruck selbst ist, wie das Sättigungsdefizit, von der aktuellen Lufttemperatur abhängig.

Frage, ob ein ähnlich starker Trend beim Sättigungsdefizit auftritt. Abb. B.27 zeigt dies für die selbe Station.

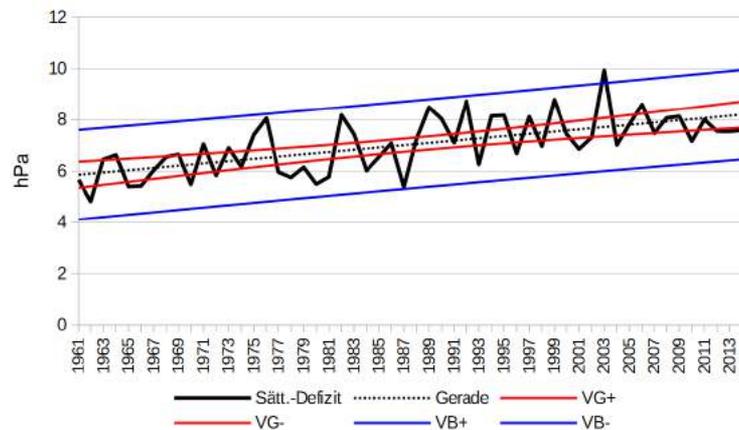


Abbildung B.27: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung des Sättigungsdefizits an der Station Gardelegen.

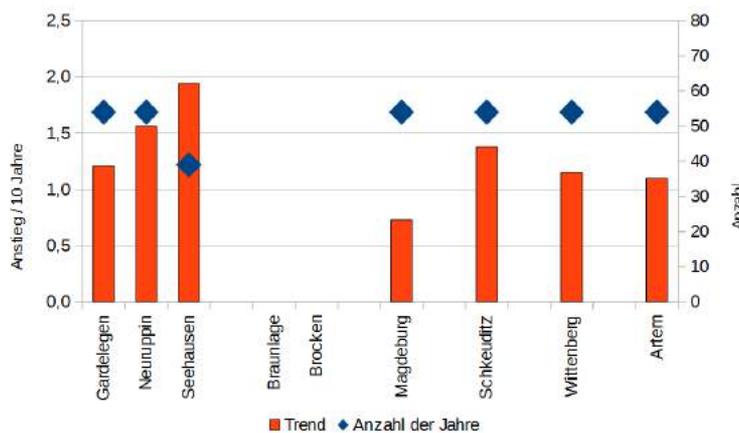


Abbildung B.28: Trends der Anzahl der Schwületage (Dampfdruck über 18,8 hPa) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Der Anstiegstrend ist beim Sättigungsdefizit vorhanden und sogar stärker als bei den Schwületagen. Im Vergleich der Anstiegstrends (Abb. B.28) ist festzustellen, dass Anstiegstrends der Schwüle von rund 0,8 bis 1,5 Tagen pro Dekade zu finden sind. Diese sind in der Regel auf dem 95 %-Niveau statistisch signifikant – lediglich der etwas geringere Anstieg an der Station Magdeburg ist auf dem 90 %-Niveau signifikant.

B.3 Wärmesumme

Dieser Indikator berechnet sich aus der Summe des Anteils von TM oberhalb einer Basistemperatur T_B . Für T_B wird $20\text{ }^\circ\text{C}$ gewählt, damit eine Größe zur Abschätzung von Wärmestress entsteht. Ein Beispiel ist in Abb. B.29 für die Station Wittenberg gegeben.

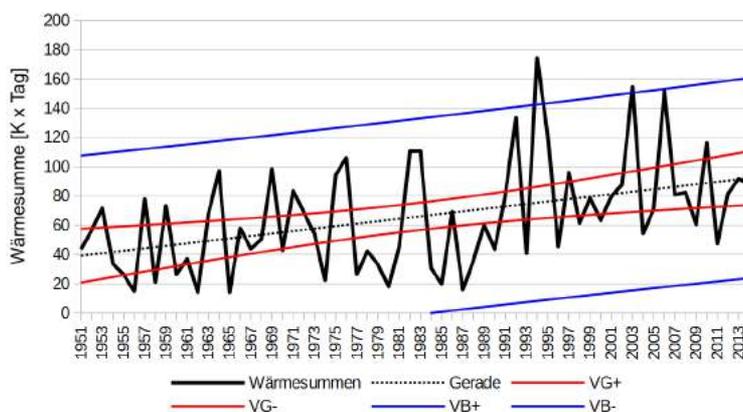


Abbildung B.29: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Wärmesumme an der Station Wittenberg.

Der Anstiegstrend ist sehr deutlich. Der Vertrauensbereich der Trendgeraden zeigt, dass keine alternative Lage dieser Geraden mit Abwärtsneigung anzunehmen ist. Für die Mann-Kendall-Testgröße Q wird ein Wert von $+3,54$ ermittelt; der Trend ist somit hochsignifikant. Kandidaten für Ausreißer werden in den Jahren 1994, 2003 und 2006 identifiziert, wobei interessant ist, dass das Jahr 2003 mit seinem Hitzesommer nicht die größte Wärmesumme aufweist, jedoch bezüglich dieses Indikators unter den drei wärmsten Jahren ist.

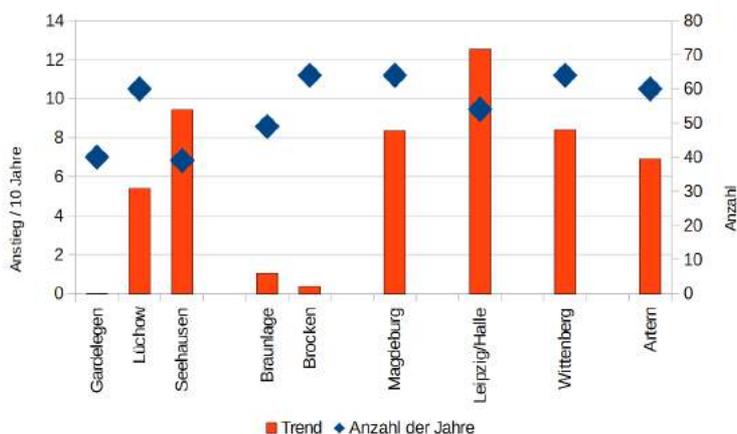


Abbildung B.30: Trends der Wärmesummen für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Für einige Stationen mit relativ guter Datenbelegung wurden die Trends der Wärmesummen ebenfalls berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. B.30 dargestellt. Es dominieren Zunahmen von rund 6 bis rund 12 K · Tagen. In der Regel verdoppelt sich der Betrag der Wärmesumme im Beobachtungszeitraum oder steigt noch stärker an. Die Station Gardelegen fällt wegen einer Datenlücke nach 1990 aus und der Trend zeigt nur die schwache Entwicklung der Anfangsjahre. Der Trend in Seehausen ist überproportional stark. Das ist auf den späten Beginn (1976) zurückzuführen, weshalb in Seehausen überwiegend die starke Trendentwicklung der letzten Jahre aufscheint. In der Harzregion sind sowohl Beträge als auch Entwicklungstrends der Wärmesummen geringer.

B.4 Kühlgradtage

Mit diesem Indikator wird der Bedarf, Räume zu kühlen, gemessen. Er bestimmt sich aus der kumulierten Temperaturabweichung zwischen einer Raumtemperatur T_R und dem Tagesmittelwert der Außentemperatur T_A , sofern T_A größer als T_R ist. Verbreitet ist die Verwendung von $T_R = 18\text{ °C}$ – diese Schwelle wurde in Analogie zu den Untersuchungen in [BERNHOFER und GOLDBERG \[HRSG.\] \(2008\)](#) hier ebenfalls benutzt. Eine Bestimmung der Veränderung der Kühlgradtage ist bedeutungsvoll, da ein wachsender Energiebedarf für Klimatisierungszwecke entsteht. Es steht zu erwarten, dass dies die potenziellen Einsparungen durch einen im Mittel geringeren Heizungsbedarf überkompensiert.

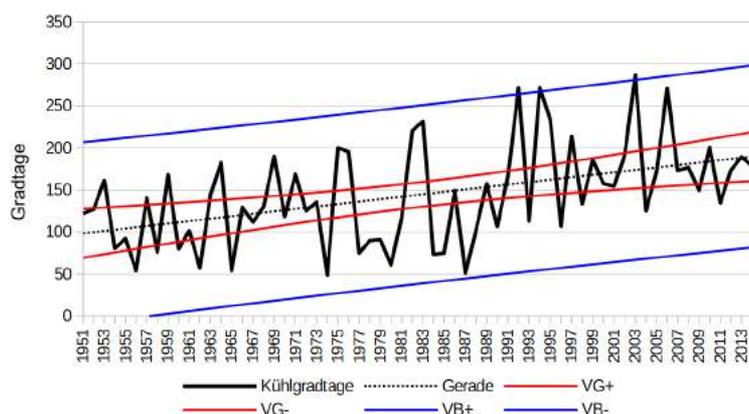


Abbildung B.31: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Kühlgradtage an der Station Wittenberg.

Veranschaulicht wird die Entwicklung durch die Verhältnisse an der Station Wittenberg (Abb. B.31). Der Anstiegstrend ist sehr deutlich und der Mann-Kendall-Test ergibt ein Q von +3,67 – ein hoch signifikanter Trend. Besonders warme Jahre werden verstärkt seit den 1990ern beobachtet. Die Kühlgradtage identifizieren 1992, 1994, 2003 und 2006 als Jahre mit hohem Bedarf. Vergleichsweise geringer Kühlbedarf herrschte hingegen in den Jahren 1956, 1962, 1965, 1974, 1980 und 1987.

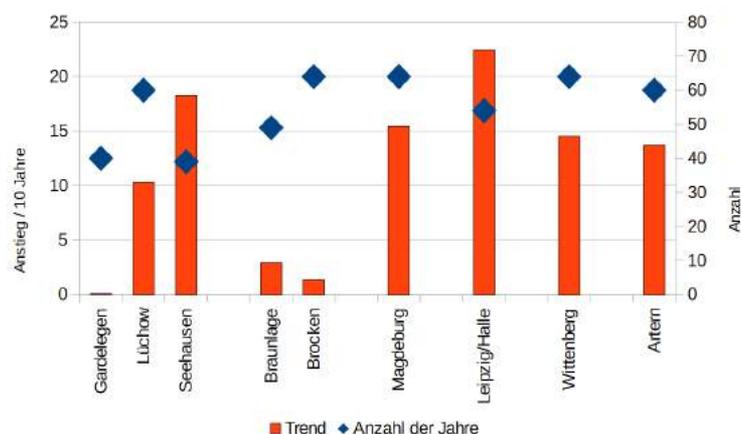


Abbildung B.32: Trends der Kühlgradtage für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Auch für die Kühlgradtage werden im Zeitraum 1951–2014 starke Anstiegsraten gefunden, was der in Abb. B.32 gezeigte Vergleich verdeutlicht. Ähnlich der Entwicklung bei den Wärmesummen (vgl. Abschnitt B.3) zeigt sich verbreitet mehr als ein Verdoppelung der Gradtage im Beobachtungszeitraum. Im Harz sind sowohl die Werte als auch die Entwicklungen der Kühlgradtage geringer. Die verhältnismäßig geringen bzw. verhältnismäßig starken Trends an den Stationen Gardelegen bzw. Seehausen hängen damit zusammen, dass jeweils nur Teile des Gesamtzeitraums analysiert werden können.

B.5 Kältesumme

Die Kältesumme ist ein Indikator, der durch Aufsummierung der Absolutbeträge der Temperatur unterhalb der Basistemperatur T_B von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ berechnet wird. Mit dieser Größe kann die Winterstrenge abgeschätzt werden. Ein Beispiel ist in in Abb. B.33 für die Station Wittenberg gegeben.

Es ist ein Rückgangstrend der Kältesumme an der Station Wittenberg (Abb. B.33) zu verzeichnen. Die Variabilität von Jahr zu Jahr ist sehr groß, was einen Einfluss auf die Breite der Vertrauensbereiche besitzt. Der Vertrauensbereich der Trendgeraden (rote Linien in Abb. B.33) lässt auch alternative Lagen dieser Geraden ohne Neigung oder mit Aufwärtsneigung zu. Für die Mann-Kendall-Testgröße Q wird ein Wert von $-1,49$ ermittelt; der Trend ist somit schwach signifikant, wobei das 95 %-Level nicht erreicht wird. Als besonders strenge Winter erweisen sich 1962/63, 1969/70 und 1986/87. Besonders mild waren hingegen die Winter 1974/75 und 2006/07.

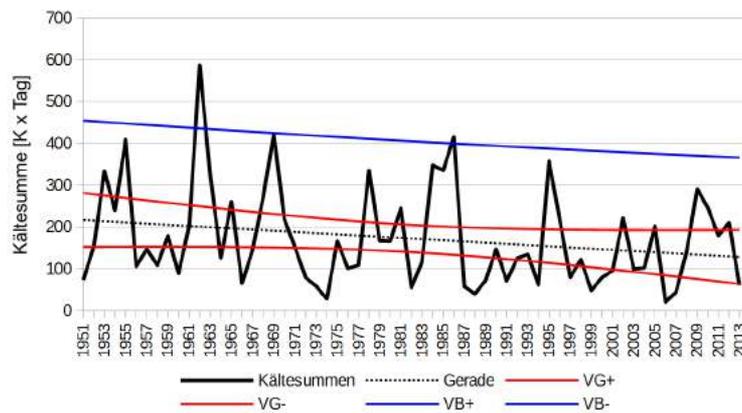


Abbildung B.33: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Kältesumme an der Station Wittenberg.

Im Stationsvergleich (Abb. B.34) zeigen sich Abnahmeraten von rund 10 bis 20 K · Tagen pro Dekade, was verbreitet einer Halbierung innerhalb des Beobachtungszeitraums entspricht. In der Harzregion sind die Abnahmen besonders groß.

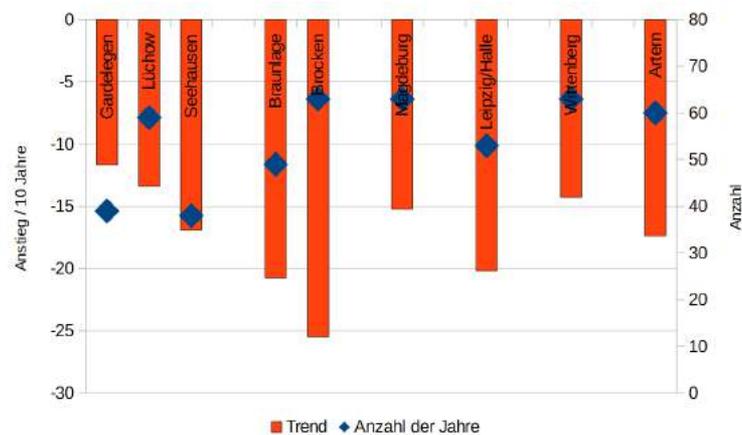


Abbildung B.34: Trends der Kältesummen für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

B.6 Heizgradtage

Auch dieser Indikator ist ein Maß zur Untersuchung der Winterstrenge. Bestimmt wird die kumulierte Temperaturabweichung zwischen einer Raumtemperatur T_R und dem Tagesmittelwert der Außentemperatur T_A , sofern T_A kleiner als eine festgelegte Heizgrenztemperatur T_G ist. Verwendet wird $T_R = 20\text{ °C}$ und $T_G = 12\text{ °C}$. Ein Veranschaulichungsbeispiel ist für die Station Magdeburg in Abb. B.35 gegeben.

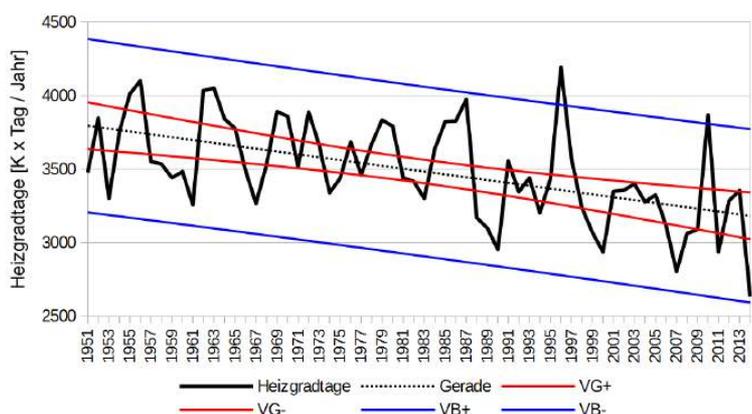


Abbildung B.35: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung der Heizgradtage an der Station Magdeburg.

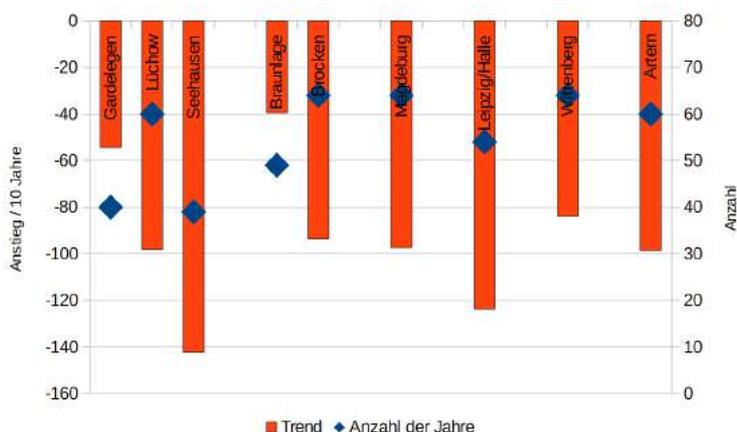


Abbildung B.36: Trends der Heizgradtage für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Der Rückgangstrend der Heizgradtage am Beispiel Magdeburg ist relativ stark (s. Abb. B.35), auch wenn in jüngster Zeit gelegentlich besonders kalte Winter auftraten. Der Mann-Kendall-Test ergibt ein Q von $-4,56$, was den Rückgangstrend als hoch signifikant einstuft. Die Heizgradtage messen dabei durchaus andere Eigenschaften des Winters, als die Kältesummen. Das zeigt sich im Vergleich mit Abschnitt B.5. Als besonders strenge Winter aufgrund der Heizgradtage erweisen sich 1996/97 und 2010/11. Derartige Niveaus wurden auch in den Anfangsjahren – die im Mittel kältere Winter hatten – nicht erreicht.

Im Vergleich der Stationen mit relativ langen Reihen (Abb. B.36) zeigen sich durchweg starke Abnahmeraten, die alle auf dem 95 % oder 99 %-Niveau statistisch signifikant sind.

B.7 Erdbodenminimum der Temperatur

Das Erdbodenminimum der Temperatur ist im Grunde keine abgeleitete Klimagröße. Sie ist andererseits auch im Sinne der Untersuchungen in diesem Vorhaben keine meteorologische Standardgröße. Zudem ist sie nur an einer geringen Zahl von Stationen (vgl. Abschnitt A.2) und auch nur für den Zeitraum 1961–2014 (oder kürzer) verfügbar. Für die Beispiele wurde die Station Artern benutzt. Einen ersten Einblick geben die Untersuchungen der Erdbodenminimumtemperatur im gesamten Jahr (Abb. B.37).

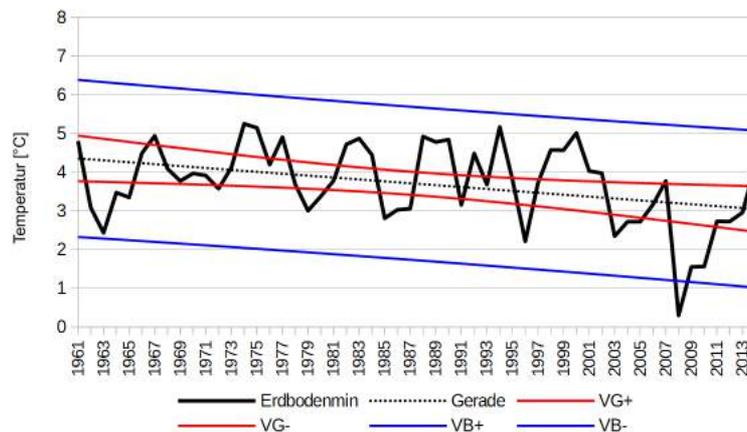


Abbildung B.37: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung des Temperaturminimums am Erdboden an der Station Artern. Dargestellt sind die Verhältnisse für das gesamte Jahr.

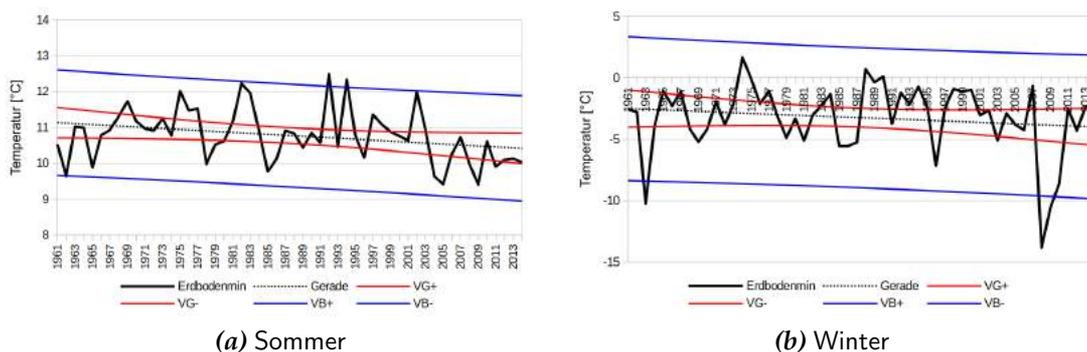


Abbildung B.38: Entwicklung des Erdbodenminimums der Temperatur an der Station Artern. Dargestellt sind die Verhältnisse für (a) die Sommermonate (JJA) und (b) die Wintermonate (DJF).

Ein Rückgangstrend beim Erdbodenminimum? Dieses Ergebnis überrascht. Die Analyse der Daten zeigt einen Trend, der mit einem Mann-Kendall Q von $-2,32$ als signifikant zum 95 %-Niveau zu bezeichnen ist. Laut BÖTTCHER (pers. Komm.) ist dabei zu beachten, dass Erdbodenmessungen der Temperatur jahreszeitliche Besonderheiten haben. Vielfach ist die Messeinrichtung für

die Erdboden-Minimumtemperatur starr montiert und für einen Teil des Winters von Schnee bedeckt. Dies verfälscht die Messungen, so dass die Erdbodenminimumtemperatur wegen der Isolierung durch den Schnee durchaus höher liegen kann als die „reguläre“ Minimumtemperatur, die in der Wetterhütte in 2m Höhe gemessen wird.

Daher wurde die Erdboden-Minimumtemperatur separat für Sommer und Winter untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. B.38 dargestellt.

Im Sommer, wenn der o.g. Effekt auszuschließen ist, findet sich der recht gut ausgeprägte Abnahmetrend ebenfalls in der Zeitreihe von Artern. Der Mann-Kendall-Test bestimmt ein Q von $-2,84$ also ähnlich klar wie für das gesamte Jahr. Im Winter [Abb. B.38 (b)] ist der Trend hingegen abgeschwächt, resp. nicht erkennbar und das Q wird zu $-0,67$ bestimmt. Zum Vergleich sind in Abb. B.39 die Trends des *Minimums der 2 m-Temperatur* für das Jahr sowie den Sommer und den Winter dargestellt. Diese entwickeln sich, erwartungsgemäß, aufwärts. Das heißt die Minima der 2 m-Temperatur liegen am Anfang des 21. Jahrhunderts klar über dem Niveau der 1960er Jahre. Es ist aber auch auffällig, dass die Trends der 2 m-Minimumtemperatur im Winter geringer sind als im Sommer.

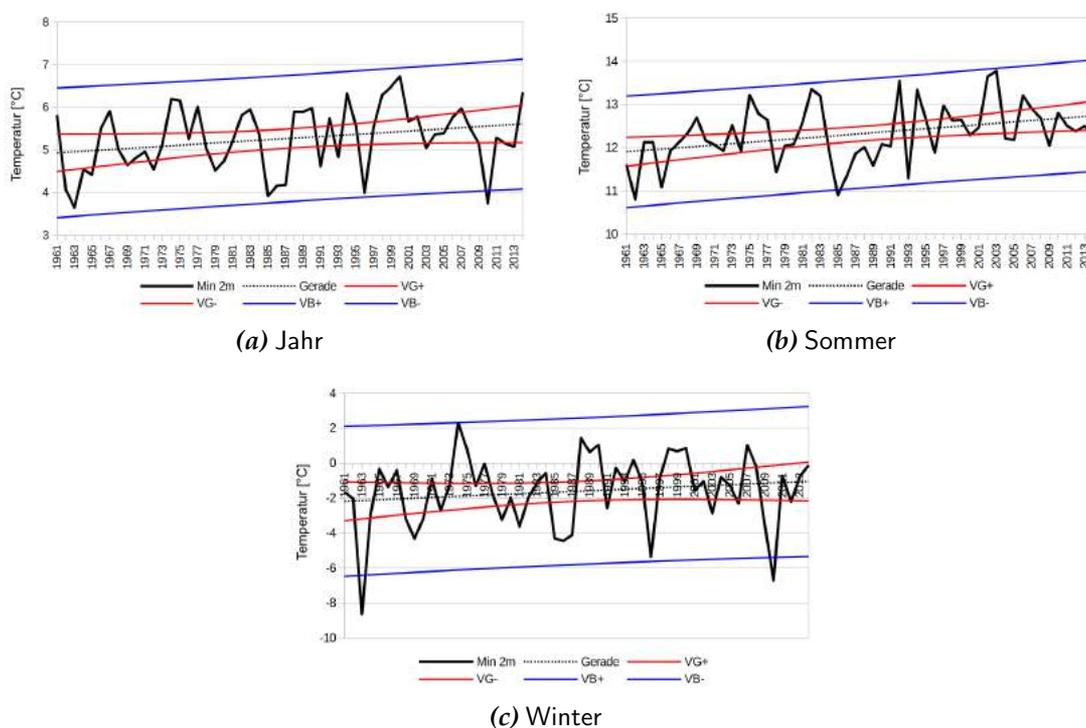


Abbildung B.39: Entwicklung des Temperaturminimums in 2 m Höhe an der Station Artern. Dargestellt sind die Verhältnisse für (a) das gesamte Jahr, (b) die Sommermonate (JJA) und (c) die Wintermonate (DJF).

Des Weiteren wurden für eine Auswahl von Stationen mit möglichst langen Reihen und mit Blick auf eine gute Abdeckung die Trends der

Erdbodenminimum-Temperatur und der 2 m-Minimumtemperatur einander gegenüber gestellt. Dies ist in Abb. B.40–B.42 für das Jahr, den Sommer und den Winter gezeigt. Es ist festzustellen, dass die Trendentwicklungen beider Größen unterschiedlich sind. Im Winter tritt dies im verstärkten Maße auf, aber auch im Sommer gibt es an einigen Stationen klare Unterschiede. Eine Gegenläufigkeit der Trends der Erdboden- und der Lufttemperatur ist dabei nicht überall zu finden.

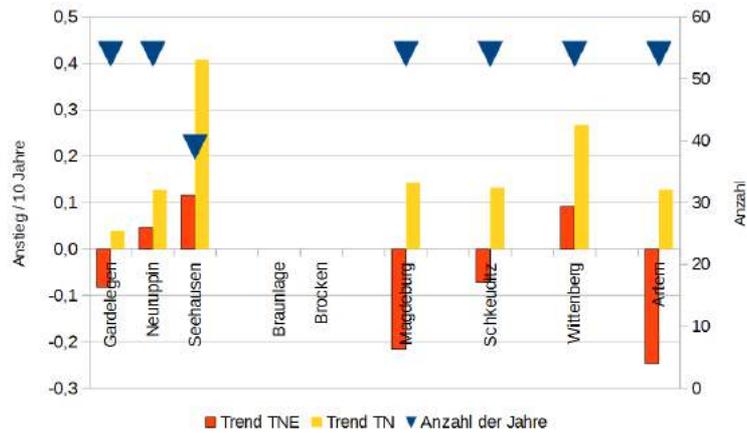


Abbildung B.40: Trends der Erdbodenminimumtemperatur (TNE, rote Balken) und der Minimumtemperatur der Luft, gemessen in 2 m Höhe (TN, gelbe Balken) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Dreiecke stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

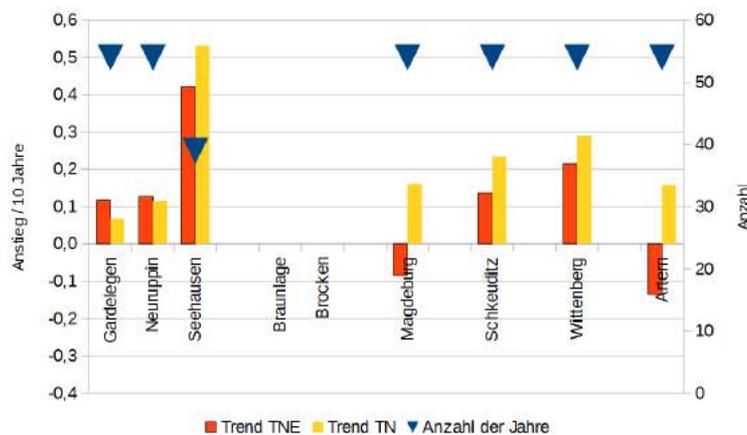


Abbildung B.41: Wie Abb. B.40, jedoch für den Sommer (Juni–August).

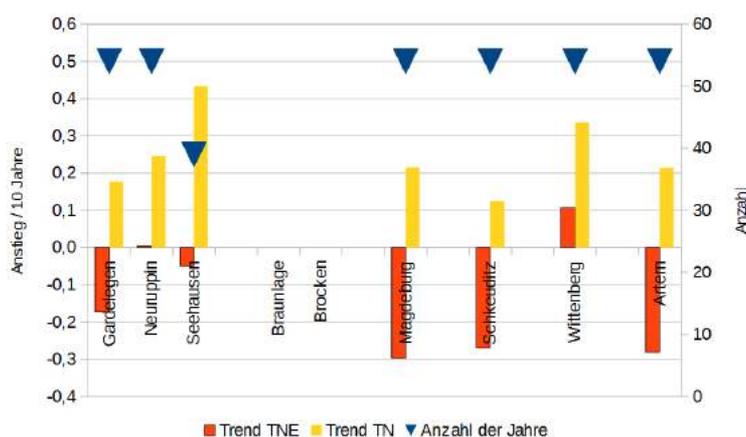


Abbildung B.42: Wie Abb. B.40, jedoch für den Winter (Dezember–Februar).

B.8 Tagesspanne der Lufttemperatur

Für eine Auswahl der Stationen (Artern, Gardedelegen, Magdeburg, Neuruppin, Schkeuditz, Seehausen, Wittenberg) wurde aus stündlichen Daten des Zeitraums 1961–2014⁴⁾ das Maximum und das Minimum des Tages bestimmt. Danach erfolgten Trendanalysen.

Auch hier ist das Ergebnis überraschend. Die Analyse der Daten zeigt deutlich ausgeprägte Zunahmetrends der Tagesspanne, dargestellt in Abb. B.43.

Sie sind alle signifikant auf dem Niveau von 99 %. Die Ursache für solche Trends liegt in unterschiedlich starkem Trendverhalten der beteiligten Größen, d.h. der Trend der Tageshöchsttemperatur „eilt voraus“ und in der Folge treten immer höhere Maxima auf während der Trend der Tagestiefsttemperatur nicht so starke Veränderungsraten zeigt. Dies wird durch die Untersuchungen der Maximal- und Minimaltemperatur (s. Abschnitte 4.2.1.1 und 4.2.1.2).

Außerdem kann die Änderung der Tagesspanne auch über den *Jahresgang* dieser Größe veranschaulicht werden, wie Abb. B.44 zeigt. Für diese Größe wird nur selten ein Jahresgang erzeugt – erst recht nicht als Vergleich der Zustände in mehreren 20-jährigen Zeitabschnitten. Der Jahresgang wurde für jeweils 20 bzw. 14 Jahre (1961–80, 1981–2000, 2001–2014) ermittelt. Da die Temperaturspanne für so relativ kurze Zeiträume stark streut, wurde ein gleitendes 21-tägiges Mittel benutzt. Einerseits ist es interessant, zu erkennen, wie unterschiedlich der Tagesgang über das Jahr ist – von einer Größenordnung um 5 °C im Winter zu einer Größenordnung von 10 °C im Sommer. Auch ist der gleichmäßige Anstieg des Niveaus zwischen 1961–80 und 2001–2014 auffallend.

Ein Vergleich der Trendstärken für ausgewählte Stationen mit möglichst langen Datenreihen und möglichst guter regionaler Repräsentativität findet sich in Abb. B.45–B.47. Es bestätigt sich der Befund anhand der Analyse der Temperaturspannen an der Station Artern: Auch bei anderen Zeitreihen sind fast

⁴⁾Bei Seehausen ist der Zeitraum 1976–2014

ausnahmslos Zunahmetrends erkennbar, wobei die Trends tendenziell im Winter geringer ausgeprägt sind.

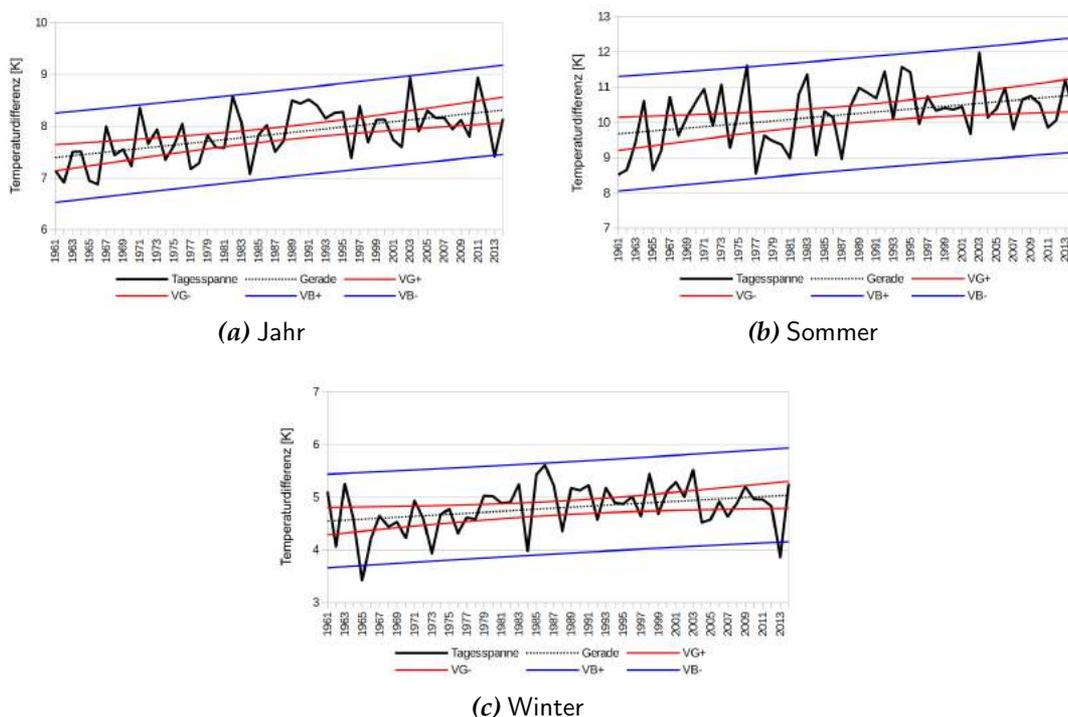


Abbildung B.43: Entwicklung der Tagesspanne der Temperatur an der Station Artern. Dargestellt sind die Verhältnisse für (a) das gesamte Jahr, (b) die Sommermonate (JJA) und (c) die Wintermonate (DJF).

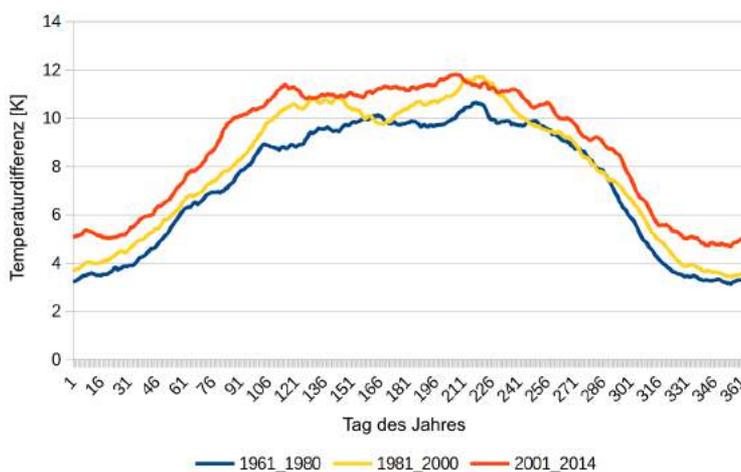


Abbildung B.44: Jahresgang der Tagesspanne der Temperatur an der Station Artern für drei 20- resp. 14-jährige Perioden. Dargestellt sind 21-fach übergreifende Mittel.

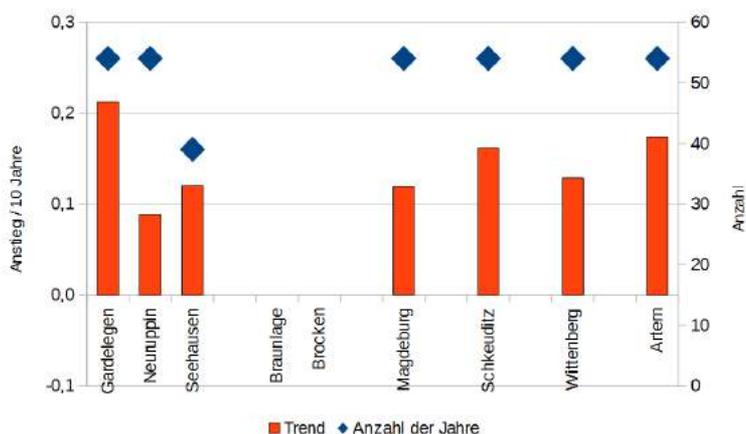


Abbildung B.45: Trends der Tagesspanne der Temperatur (Differenz zwischen Tagesmaximum und Tagesminimum) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Betrachtungszeitraum: Jahr. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

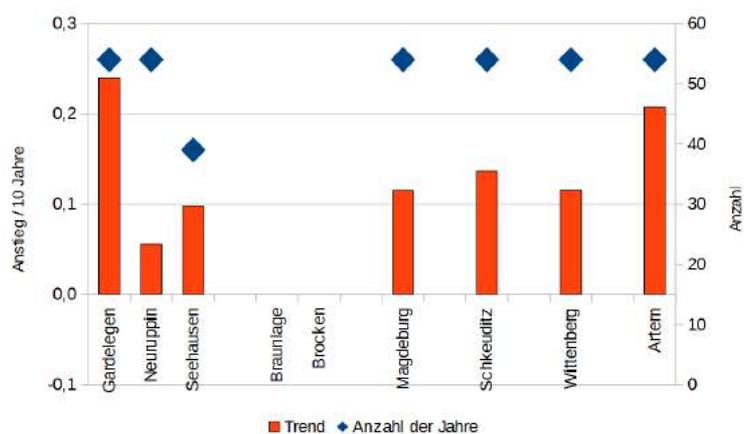


Abbildung B.46: Wie Abb. B.45, jedoch für den Sommer (Juni–August).

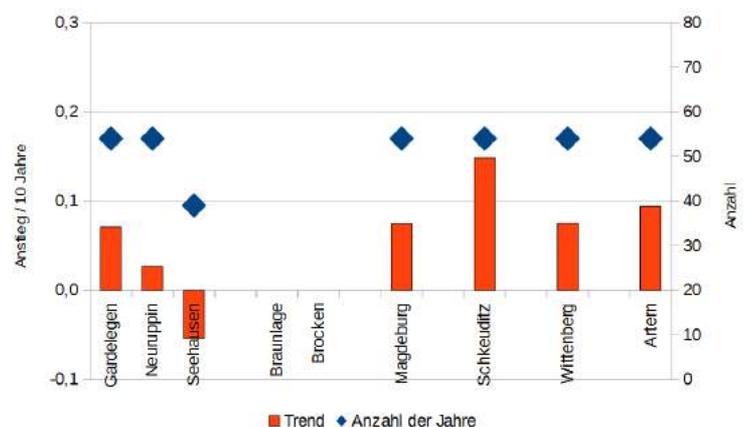


Abbildung B.47: Wie Abb. B.45, jedoch für den Winter (Dezember–Februar).

B.9 Vegetationsperiode

Im Vorhaben wird eine mehrgleisige Berechnungs- und Auswertestrategie eingesetzt:

- Einige meteorologischen Standardvariable werden neben den zeitlichen Aggregationen Jahr, Halbjahr, Jahreszeit auch zu den so genannten Vegetationsperioden I (April-Juni) und II (Juli-September) aggregiert. Diese teilen das Sommerhalbjahr in zwei gleich große Teile und können bei Niederschlagsanalysen Entwicklungen bisweilen besser erfassen, als Analysen der Monate des meteorologischen Sommers (Juni–August).
- Es werden thermische Indikatoren zur Bestimmung des Tages im Jahr für Beginn und Ende sowie zur Bestimmung der Dauer (in Tagen) der Vegetationsperiode verwendet. Es gibt eine Vielzahl von Umsetzungen dieses Prinzips. In [BENDER und SCHALLER \(2014\)](#) werden mehrere Methoden zur Bestimmung der Vegetationszeit vorgestellt. Im Kern geht es um die Bestimmung der Vegetationsperiode anhand von Temperaturschwellenwerten, die nach aufeinanderfolgenden Tagen erreicht werden müssen, um die Vegetationszeit einzuleiten oder zu beenden (thermische Vegetationszeit). In der Methode nach [BERNHOFER und GOLDBERG \[HRSG.\] \(2008\)](#) wird der Beginn der Vegetationsperiode so definiert, dass an sieben aufeinanderfolgenden Tagen eine Tagesmitteltemperatur von mindestens 5 °C auftreten muss. Das Ende ist erreicht, wenn an sieben aufeinanderfolgenden Tagen eine Tagesmitteltemperatur von weniger als 10 °C erreicht wird. Beispiele werden in Abschnitt [B.9.1](#) vorgestellt.
- Für den Beginn der phänologischen Vegetationsperiode wird das Eintreten der Phase „Blüte der Sal-Weide“ verwendet. Die Vegetationszeit endet mit der Phase „Blattverfärbung der Stieleiche“ ([CHMIELEWSKI, 2007](#)). Beispiele werden in Abschnitt [B.9.2](#) vorgestellt.
- Eine weitere für die Vegetation relevante Herangehensweise betrachtet die Länge der frostfreien Periode. Beispiele werden in Abschnitt [B.9.3](#) vorgestellt.

B.9.1 Thermische Vegetationsperiode

Die in der Einleitung dieses Abschnitts beschriebene Methode der Vegetationsindex-Bestimmung ergibt drei Zeitreihen: Beginn, Ende und Dauer der Vegetationsperiode.

Abb. [B.48](#) zeigt anhand der Station Wittenberg Charakteristika der Entwicklung auf. Die Dauer der Vegetationsperiode nimmt zu. Der Mann-Kendall Test bestimmt ein Q von +2,45 – damit ist der Zunahmetrend auf dem 95 %-Niveau statistisch gesichert. Dies ist allein eine Konsequenz der Entwicklung des *Beginns* der Vegetationsperiode (blaue Kurve in Abb. [B.48](#)). Dieser hat einen Trend

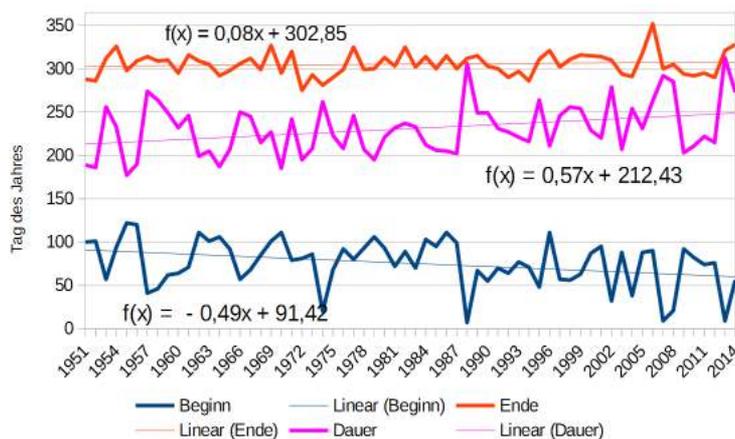


Abbildung B.48: Trenddarstellung von Anfang (blaue Kurve), Länge (magentafarbene Kurve) und Ende (rote Kurve) der Vegetationsperiode, berechnet nach den Maßgaben des thermischen Vegetationsindex an der Station Wittenberg.

zum immer früheren Zutreffen der Startkriterien, der mit einem Mann-Kendall Q von $-2,42$ ebenfalls auf dem 95 %-Niveau statistisch abgesichert ist. Das Ende der Vegetationsperiode (rote Kurve in Abb. B.48) hingegen besitzt so gut wie keinen Trend.

Für ausgewählte Stationen sind in Abb. B.49–B.51 die Trendentwicklung für Beginn, Ende und Dauer der thermischen Vegetationsperiode dargestellt.

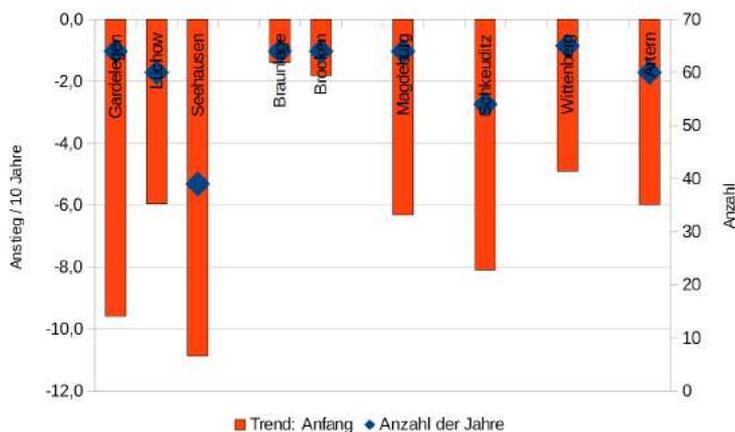


Abbildung B.49: Trends des Beginns der thermischen Vegetationsperiode für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Es bestätigt sich eine Grundstruktur, die schon in der Analyse der Station Wittenberg erkennbar ist: Die Vegetationsperiode wird tendenziell länger. Dies ist im Wesentlichen auf ihr früheres Eintreten zurückzuführen und weniger auf ein später eintretendes Ende (vgl. Abb. B.50). Die Stationen zeigen beim Ende oftmals sehr schwache Trends, während der Beginn und die Dauer von deutlichen Entwicklungen im Untersuchungszeitraum charakterisiert sind.

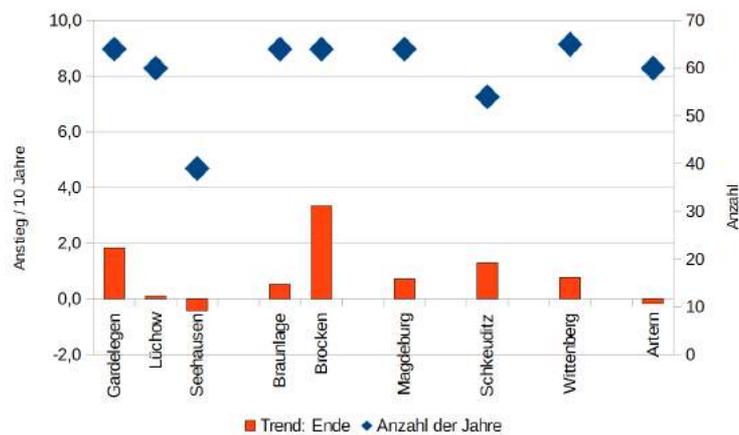


Abbildung B.50: Trends des Endes der thermischen Vegetationsperiode für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

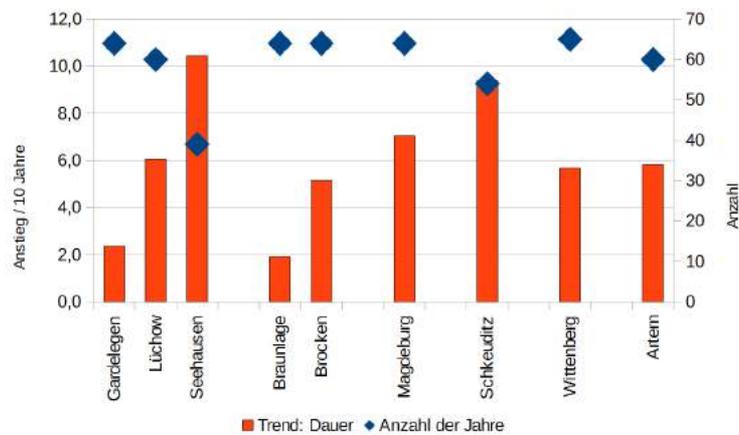


Abbildung B.51: Trends der Andauer der thermischen Vegetationsperiode für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Die Dauer liegt in einer Größenordnung von 200–250 Tagen.

B.9.2 Phänologische Vegetationsperiode

Wie in der Einleitung dieses Abschnitts erwähnt, ist es auch möglich, die Vegetationsperiode mit phänologischen Phasen zu definieren.

Die zeitliche Entwicklung von Beginn, Ende und Dauer der Vegetationsperiode, wenn sie aufgrund von Leitphasen definiert wird, ist in Abb. B.52 wiedergegeben. Die Naturraumgruppe 88 (Elbe-Mulde-Tiefland) enthält auch die Station Wittenberg. Insgesamt wird die Vegetationsperiode im Laufe der Zeit länger, was die aufwärts geneigte Trendgerade für die magentafarbene Kurve in Abb. B.52 anzeigt. Die Testgröße Q des Mann-Kendall-Test beträgt +3,61 was

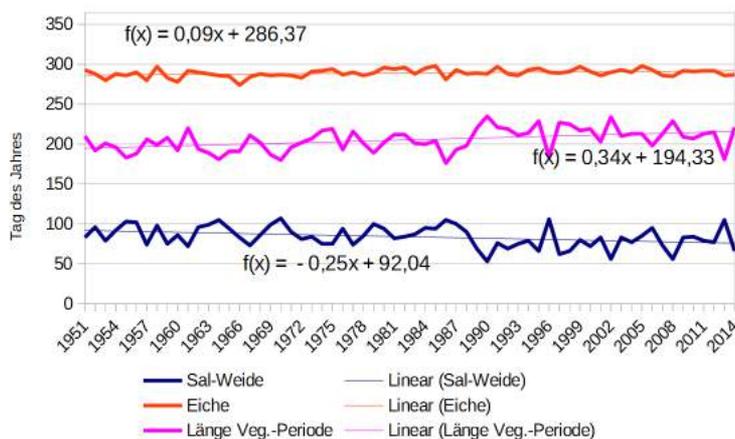


Abbildung B.52: Trenddarstellung von Anfang (blaue Kurve), Länge (magentafarbene Kurve) und Ende (rote Kurve) der phänologischen Vegetationsperiode, berechnet aus den Leitphase der Sal-Weide und der Stieleiche für die Naturraumgruppe 88 (Elbe-Mulde-Tiefland).

den Trend auf einem Niveau von 99 % statistisch sichert. Ein Rückgangstrend für den Beginn der Vegetationsperiode (verknüpft mit der Sal-Weide) ist visuell deutlich erkennbar und mit einem Mann-Kendall Q von $-2,60$ statistisch auf dem 95 %-Niveau gesichert. Das Ende der Vegetationsperiode unterliegt, wie auch bei der thermischen Vegetationsperiode, kaum zeitlichen Veränderungen.

Für ausgewählte Stationen sind in Abb. B.53–B.55 die Trendentwicklung für Beginn, Ende und Dauer der phänologischen Vegetationsperiode dargestellt.

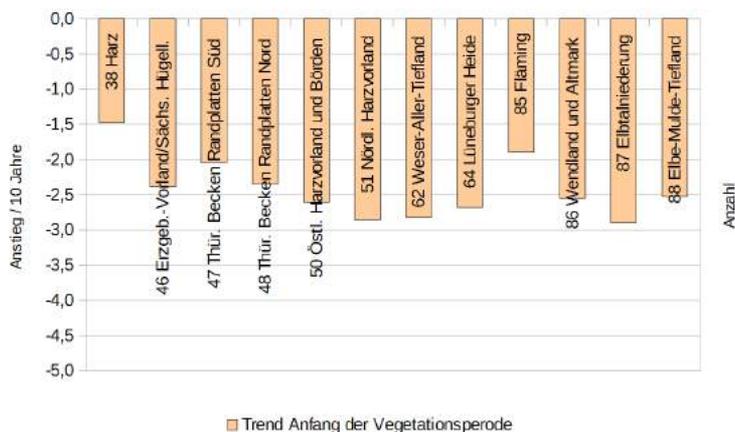


Abbildung B.53: Trends des Beginns der phänologischen Vegetationsperiode für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Die phänologische Vegetationsperiode zeigt Trendentwicklungen, die der thermischen Vegetationsperiode (vgl. Abschnitt B.9.1) ähnlich sind: Die Vegetationsperiode ist im Analysezeitraum länger geworden. Dies beruht stärker darauf, dass ihr Beginn sich verfrühte, während ihr Ende geringe Trendentwicklungen besitzt.

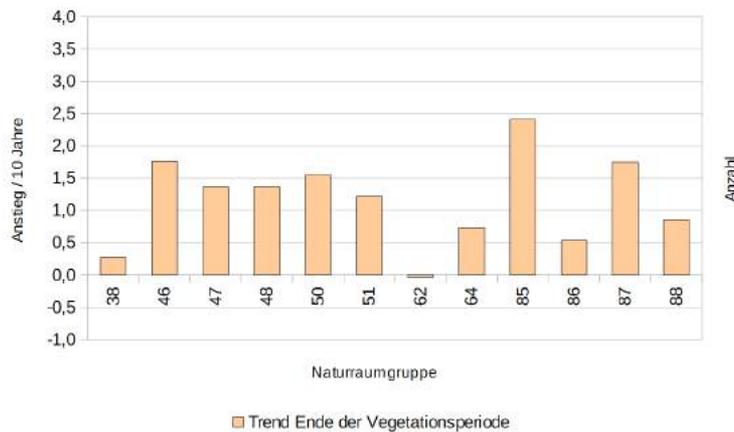


Abbildung B.54: Trends des Endes der phänologischen Vegetationsperiode für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

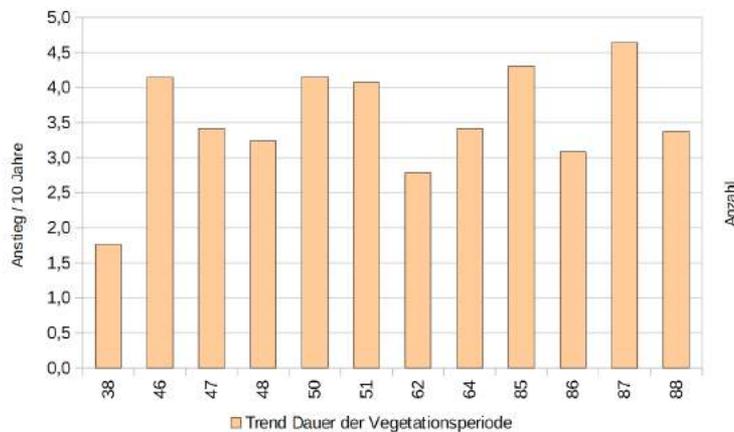


Abbildung B.55: Trends der Dauer der phänologischen Vegetationsperiode für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

B.9.3 Frostfreie Periode

In einem als optionales Zusatzpaket beauftragten Schwerpunkt erfolgte eine zusätzliche Fokussierung auf *vegetationsrelevante Indikatoren*. In diesem Rahmen entstanden Datensätze zu Beginn, Ende, Dauer und Anzahl von Perioden, in denen die Minimumtemperatur TN nicht unter 0 °C lag.

Diese dritte alternative Bestimmungsweise der Vegetationsperiode – ein Beispiel für die Station Wittenberg ist in Abb. B.56 dargestellt – weist Ähnlichkeiten zu den Ergebnissen der anderen Methoden aber auch Unterschiede auf. Ein wichtiger Faktor liegt auch hier im Trend des Eintritts der frostfreien Zeit. Er ist statistisch auf dem 95 %-Niveau abgesichert und zeigt eine im Laufe der Zeit früher beginnende Vegetationsperiode an. Ein ähnlicher, entgegen gesetzt auf-

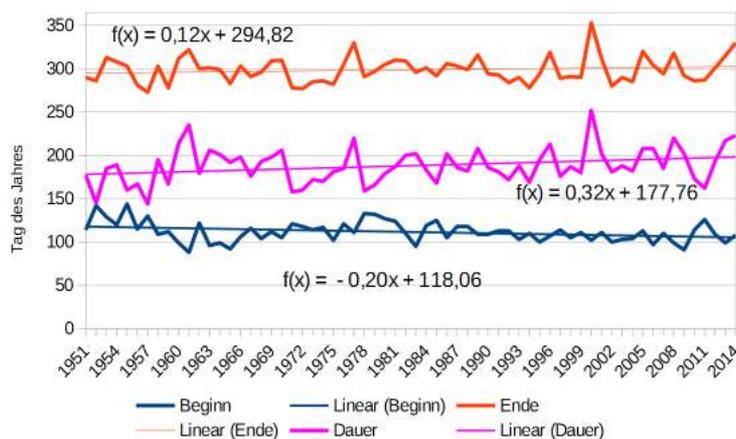


Abbildung B.56: Trenddarstellung von Anfang (blaue Kurve), Länge (magentafarbene Kurve) und Ende (rote Kurve) der frostfreien Zeit für die Station Wittenberg

retender Trend lässt sich für die Dauer der frostfreien Zeit identifizieren. Auch er ist auf dem 95 %-Niveau statistisch signifikant. Das Ende der frostfreien Zeit hat einen schwachen, wenn auch nicht signifikanten Zunahmetrend.

Wenn die frostfreie Zeit als Indikator für die Vegetationsperiode benutzt wird, zeigen sich Charakteristika der Ergebnisse, die sich bei den anderen Methoden ebenfalls finden. Auffällig ist die relativ geringe Länge der über die frostfreie Zeit bestimmten Vegetationsperiode – hauptsächlich bedingt durch das relativ späte Zutreffen des Kriteriums für deren *Beginn*.

Für ausgewählte Stationen sind in Abb. B.57–B.59 die Trendentwicklungen für Beginn, Ende und Dauer der Vegetationsperiode anhand der frostfreien Zeit dargestellt.

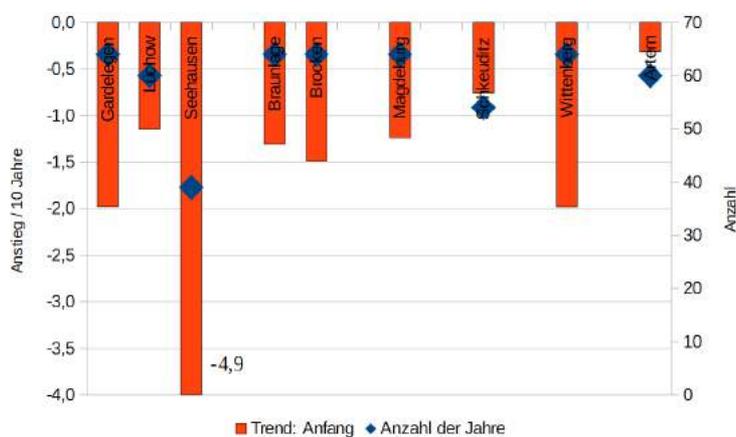


Abbildung B.57: Trends des Beginns der Vegetationsperiode auf Basis der frostfreien Zeit für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

In Abb. B.57–B.59 wurde die Skalierung der y-Achse so eingeschränkt, dass die Resultate an der Station Seehausen nicht berücksichtigt wurden. Der Grund

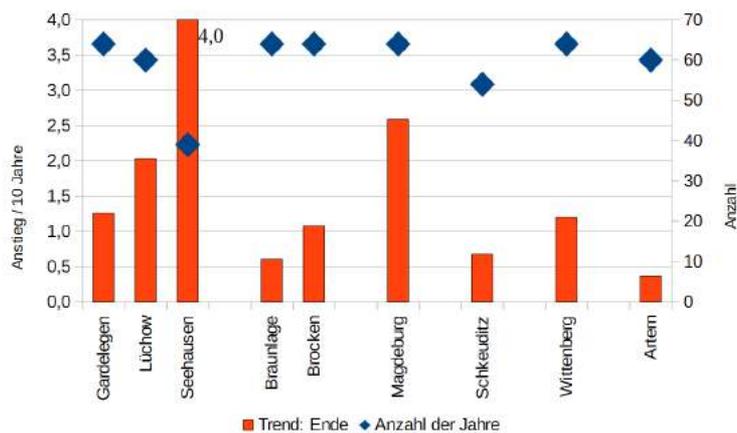


Abbildung B.58: Trends des Endes der Vegetationsperiode auf Basis der frostfreien Zeit für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

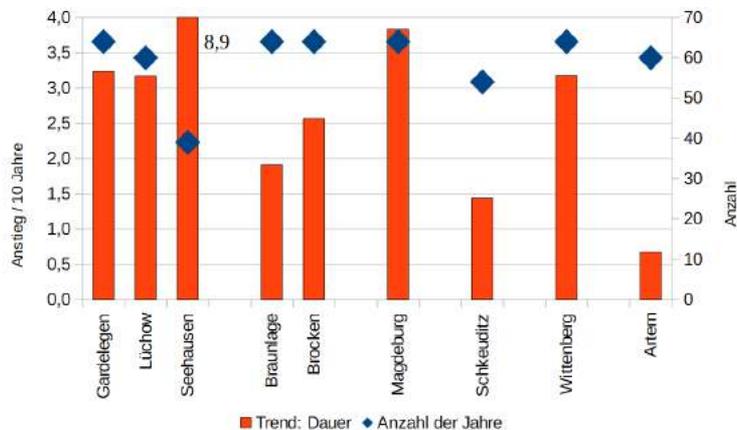


Abbildung B.59: Trends der Dauer der Vegetationsperiode auf Basis der frostfreien Zeit für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

ist, dass bei dieser Definition der Vegetationsperiode nur mit dem Parameter „Temperaturminimum“ gearbeitet wird. Wegen des Beginns der Zeitreihe von Seehausen im Jahr 1976 wird dort im Wesentlichen ein starker Temperaturänderung in der zweiten Hälfte des Gesamt-Untersuchungszeitraums (1951–2014) erfasst. Dieser Sachverhalt wird in Abschnitt 4.2.1.1 im Zusammenhang mit den Erläuterungen zu Abb. 4.9 dargestellt. Die für die Station Seehausen ermittelten Trendwerte sind in den Abbildungen jeweils als Zahl an das Ende des Farbbalkens gesetzt.

Wie die Nutzung verschiedener Definitionen für die Vegetationsperiode zeigt, ist es bemerkenswert, welche unterschiedlichen Eintritts- und Endzeiten sowie Längen der Vegetationsperiode je nach Verfahren ermittelt werden. Verbindend ist jedoch, dass die Methoden die Art der Trends reproduzieren:

Der Anfang der Vegetationsperiode verfrüht sich, die Periode wird länger und die Trendentwicklung beim Ende der Vegetationsperiode sind meist relativ schwach. Vergleichsweise große Unterschiede zwischen den Methoden gibt es bei der Ermittlung der Dauer, nicht so sehr bei deren Trendverhalten.

B.10 Huglin-Index

Der Huglin-Index ist eine summarische Größe, die sich aus der Summe von Tagesmittel- und Tagesmaximumtemperatur in den Monaten April–September bestimmt.

$$H = K \cdot \sum_{01.04.}^{30.09.} \left[\left(\frac{TM + TX}{2} \right) - 10 \right]$$

mit $K :=$ Breitengrad-abhängige empirische Größe (z.B. in 40°N $K = 1,02$ und in 50°N $K = 1,06$).

Der Huglin-Index wurde für die Beurteilung von Klimaten, die für den Anbau bestimmter Rebsorten geeignet sind, entwickelt (HUGLIN, 1978, 1986; STOCK et al., 2007). Werte von H unter 1500 treten in Regionen auf, für die keine Weinanbauempfehlung ausgesprochen wird. Werte darüber erhalten Empfehlungen für unterschiedliche Rebsorten.

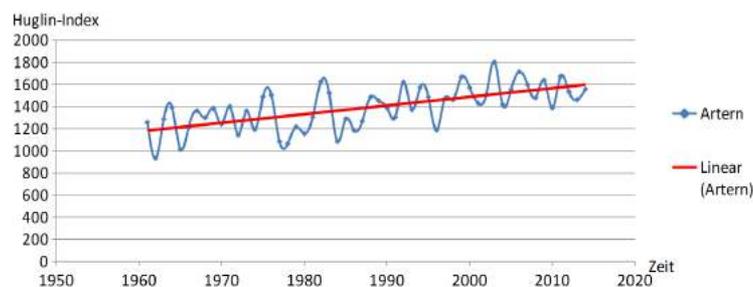


Abbildung B.60: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung des Huglin-Indexes an der Station Artern.

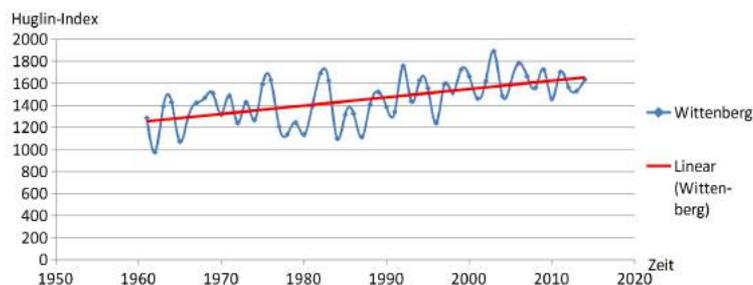


Abbildung B.61: Beispiel für eine Trenddarstellung der Entwicklung des Huglin-Indexes an der Station Wittenberg.

Gibt es Potenzial für Weinanbau in Sachsen-Anhalt? Der Trendverlauf für die Stationen Artern, mit seiner Nähe zum Saale-Unstrut Anbaugebiet und Wittenberg (Abb. B.60 und B.61) weisen ein relativ niedriges Niveau auf. Es ist interessant festzustellen, dass an beiden Stationen die wichtige Schwelle des Index von 1500 überschritten wurde.

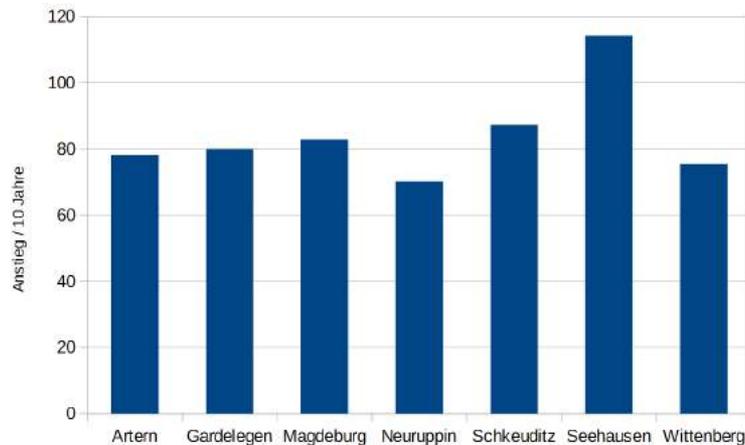


Abbildung B.62: Vergleich der Trendentwicklungen des Huglin-Indexes an ausgewählten Stationen der Region Sachsen-Anhalt. Die blauen Balken stellen den Betrag des Anstiegsterms der Trendgleichung pro Dekade in Einheiten des Huglin-Index dar.

Im Vergleich der Anstiegsraten pro Jahrzehnt (Abb. B.62), dass die Trendentwicklungen in den Reihen der Stationen Artern und Wittenberg keine Einzelfälle darstellen. An allen Stationen ist der bisherige Anstieg auf dem 95 %-Niveau oder höher statistisch signifikant. Dies ist aber nur ein Hinweis auf das *Potenzial des Weinanbaus* unter den Maßgaben eines Temperaturindex.

B.11 Hitze und warme Nächte

In einem als optionales Zusatzpaket beauftragten Schwerpunkt erfolgt eine weitere Fokussierung auf *medizinische und zivilschutzrelevante* Indikatoren. In diesem Zusammenhang werden vier Größen bestimmt und bezüglich ihres Trendverhaltens analysiert:

1. Betrag des 90-Perzentils der Maximumtemperatur, jahresweise für die Sommermonate (Juni-August);
2. Anzahl der Perioden von 6 und mehr Tagen Länge in den Sommermonaten (Juni-August), bei denen das 90-Perzentil der Maximumtemperatur überschritten wurde;
3. Maximale Länge der Periode in den Sommermonaten (Juni-August), in der das 90-Perzentil der Maximumtemperatur überschritten wurde;

4. Betrag des 90-Perzentils der Minimumtemperatur, jahresweise für die Sommermonate (Juni-August).

Die Perzentile von meteorologischen Standardgrößen werden in Form einer Kollektion von Dateien zur Verfügung gestellt. Analog zu den Kenntage-Daten, beschrieben in Abschnitt **B.1** wird ein Archiv `Quantile` ausgeliefert. Im Verzeichnis `Quantile/data` finden sich Dateien, die zum Ersten die Quantile in den verschiedenen Bestimmungszeiträumen (Monate, Jahreszeiten, Vegetationsperioden, Jahr) und zum Zweiten die verschiedenen meteorologischen Parameter (so verfügbar) angeben. Dies kann von Station zu Station unterschiedlich sein. So enthält z.B. die Datei `quantile_tmax_05629_JJA.dat` die Perzentile der Maximumtemperatur an der Station Wittenberg für die Sommermonate (Juni, Juli, August). Jede Datei besteht aus zahlreichen Spalten – in den ersten befindet sich das Jahr, in der zweiten Spalte die Zahl der im Bestimmungszeitraum vorhandenen Werte (z.B. 365 oder 366 wenn ein Jahr vollständig ist oder 92 wenn ein Sommer vollständig ist). Danach folgen 201 Spalten mit den Perzentile von 0 bis 100 in Stufen von 0,5. Anhand der Spaltenüberschrift können bestimmte Perzentile ausgewählt werden. Ergänzt wird dieses Archiv durch das Verzeichnis `Quantile/pictures`, in dem sich Abbildungen zu den jeweiligen Stationen, Elementen und Bestimmungszeiträumen im `png`-Format befinden.

Dieses Material liefert Eingangsgrößen für zahlreiche Untersuchungen, in diesem Vorhaben wurden aus dem Quantildateien-Archiv beispielsweise die stationsspezifischen 90-Perzentile (Untersuchung in diesem Abschnitt) und der Minimumtemperatur (Unterabschnitt **B.11.4**) ermittelt. Außerdem finden sich Ergebnisse, die auf Informationen aus den Quantildateien basieren im Abschnitt zu Kälte und kalten Nächten (Abschnitt **B.14**).

B.11.1 90-Perzentil der Maximumtemperatur

Aus dem `Quantile/data`-Archiv wurde als Beispiel die Maximumtemperatur an der Station Wittenberg ausgewählt. Die Information in der Spalte mit dem 90-Perzentil bildet die Basis für die Darstellung in Abb. **B.63**.

Ein Anstiegstrend dieses Perzentils ist gut erkennbar – der Mann-Kendall-Test liefert ein Q von +3,41 das heißt dieser Trend ist zu 99 %-Wahrscheinlichkeit signifikant.

B.11.2 Perioden der Überschreitung des 90-Perzentils der Maximumtemperatur in den Sommermonaten

Hierfür wird zunächst der Jahrgang 1961–2014 von den Maximumtemperaturwerten abgezogen. Dann wird in den so gewonnenen Anomalien vom Jahrgang das 90-Perzentil bestimmt. Eine starke Abweichung vom Jahrgang weist auf besondere Verhältnisse hin.

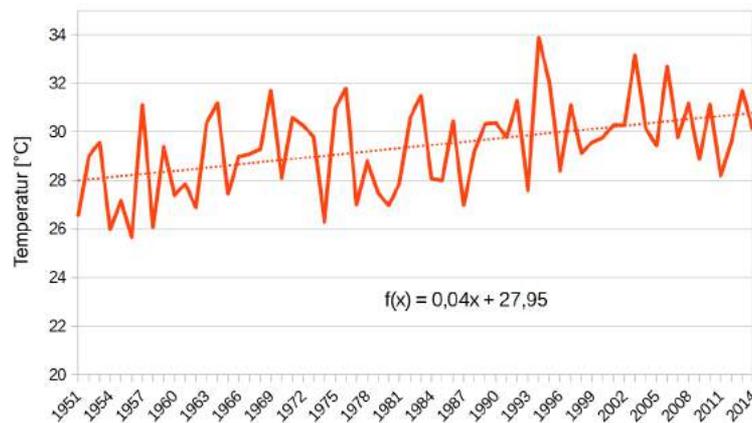


Abbildung B.63: Trenddarstellung der Entwicklung des 90-Perzents der Maximumtemperatur an der Station Wittenberg im Sommer (JJA).

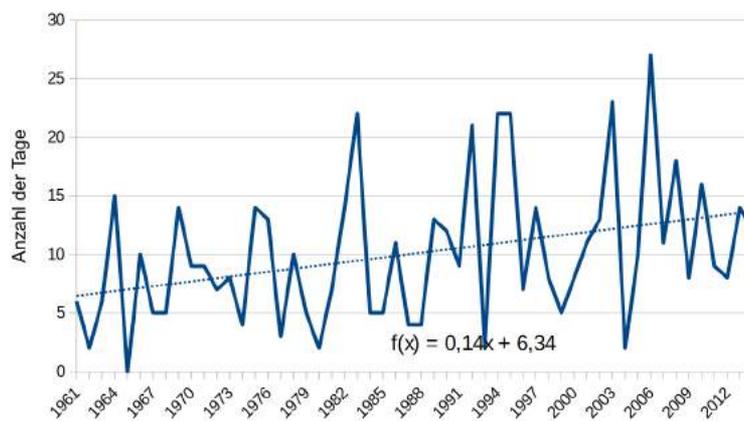


Abbildung B.64: Anzahl der Tage, an denen in den Sommermonaten (JJA), das 90-Perzentil der Maximumtemperatur (Abweichung vom Jahresgang) überschritten wird. Station: Magdeburg.

Für die Station Magdeburg sei ein Beispiel vorgestellt. Zunächst wird bestimmt, wie oft in den einzelnen Sommern der Jahre 1961–2014 das 90-Perzentil der Tagesmaximumtemperatur (Abweichung vom Jahresgang!) überschritten wird. Dies ist in Abb. B.64 wiedergegeben. In den Anfangsjahren sind es um 5 Tage. Das steigert sich bis zum Anfang des 21. Jahrhunderts auf rund 10–15 Fälle, eine sehr deutliche Zunahme, mit signifikantem Trend. Doch im Grunde geht es in der Untersuchung um das Andauerverhalten dieser Größe. Es werden Perioden mit einer Andauer von 6 und mehr Tagen solcher Verhältnisse gesucht.

Wie die Abb. B.65 (a) zeigt, ist dieses Kriterium zu streng gewählt. Es gibt zu wenige Jahre, in denen es eintritt, um damit eine akzeptable Entwicklungsanalyse durchführen zu können. Eine Modifikation, die nach Perioden von mindestens 3 Tagen Länge sucht [Abb. B.65 (b)], führt zwar zu einem etwas besser besetzten Datenkollektiv, aber ein gut abgesicherter Trend ist damit auch nicht zu ermitteln, wiewohl die Zunahmeneigung unübersehbar ist.

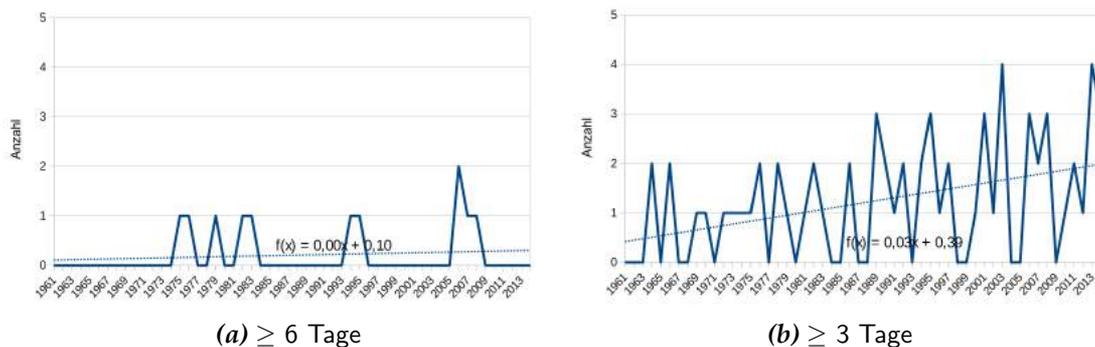


Abbildung B.65: Anzahl der Perioden von 6 (links) und 3 (rechts) Tagen Länge an denen eine Überschreitung des 90-Perzentils der Maximumtemperatur in den Sommermonaten auftrat. Station: Magdeburg.

B.11.3 Maximale Länge von Perioden der Überschreitung des 90-Perzentils der Maximumtemperatur in den Sommermonaten

Eine Untersuchung dieser Größe für jedes Jahr erscheint nicht sinnvoll, da das Kriterium zu selten eintritt. Es konnten aber Hitzewellen mit 12 Tagen Länge identifiziert werden: 21.7.–1.8.1994 und 17.7.–28.7.2006.

B.11.4 90-Perzentil der Minimumtemperatur

Mit dieser Größe kann dargestellt werden, welches Potenzial für warme Nächte in der Zeitreihe existiert. Die Zahl der Tropennächte (s. Abschnitt B.1.5) mag ein zu strenges Kriterium darstellen, denn sie fordert das Überschreiten einer fixen Schwelle (20 °C) ein. Die Untersuchung geht analog wie in Abschnitt B.11.1 vor, nur extrahiert sie die Information aus der entsprechenden t_{min} -Datei des Archivs.

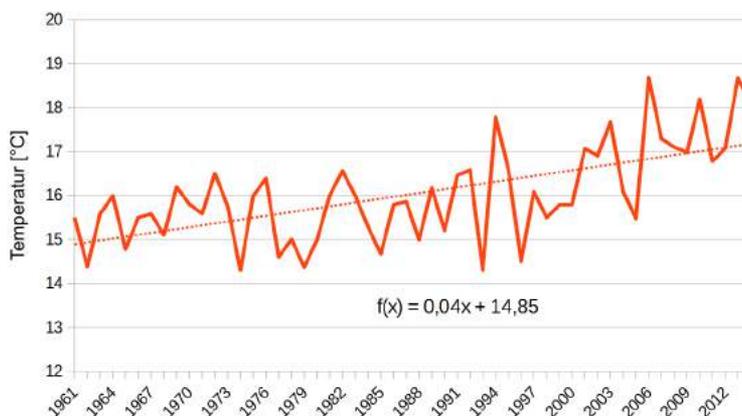


Abbildung B.66: Trenddarstellung der Entwicklung des 90-Perzentils der Minimumtemperatur an der Station Magdeburg.

Auch diese Größe besitzt einen sehr gut ausgeprägten Zunahmetrend, der auf dem 99 %-Niveau statistisch gesichert ist. Das 90-Perzentil liegt am Anfang des Untersuchungszeitraums um 15 °C und gegen Ende bei 17 °C. In der Konsequenz heißt das, dass eine Minimumtemperatur von 17 °C oder mehr in der jüngsten Vergangenheit im Mittel an 10 Prozent der Tage (rund 36 pro Jahr) zu erwarten ist.

B.12 NOAA-Hitzeindex

Für eine Auswahl von Stationen wurde der vierstufige NOAA-Hitzeindex in mehreren Dekaden bestimmt⁵⁾. Dieser Index ist eine empirische Größe, die auf der Basis der Maximumtemperatur und der Luftfeuchte berechnet wird.

Er wurde für das Fahrenheit-Temperatursystem entwickelt und wertet folgende Beziehung aus

$$\begin{aligned}
 HI = & -42.379 + 2.04901523 \cdot T + 10.14333127 \cdot RF - .22475541 \cdot T \cdot RF \\
 & - .00683783 \cdot T^2 - .05481717 \cdot RF^2 + .00122874 \cdot T^2 \cdot RF \\
 & + .00085282 \cdot T \cdot RH^2 - .00000199 \cdot T^2 \cdot RH^2
 \end{aligned}$$

mit $T :=$ Temperatur in Fahrenheit und $RF :=$ Relative Luftfeuchte in %. Das Berechnungsergebnis ist in Einheiten von Grad Fahrenheit und muss für die bessere Anwendbarkeit in Celsiusgrad konvertiert werden.

Der Index HI benennt 4 Stufen, wobei die Wertebereiche von HI bereits in das Celsius-System umgerechnet wurde – Achtung, es handelt sich nicht um Temperaturwerte in °C sondern um Werte von HI in Einheiten von °C:

1. – Vorsicht (HI 27–32)
2. – Extreme Vorsicht (HI 34–39)
3. – Gefahr (HI 40–51)
4. – Extreme Gefahr (HI 52 und größer)

Für die Untersuchung wurde der NOAA-Hitzeindex an zwei Stationen (Gardelegen und Artern) dekadeweise bestimmt und in Tab. B.2 und B.3 dargestellt.

Die Zunahme in der Stufe 1 (Vorsicht) ist deutlich, aber besonders auffällig ist bei beiden Stationen die Zunahme in der Stufe 2 (extreme Vorsicht). Die aufscheinenden Änderungen in Stufe 3 (Gefahr) weisen auf ein wachsendes Gefährdungspotenzial hin.

⁵⁾Details sind unter der Webadresse www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex_equation.shtml zu finden.

Tabelle B.2: NOAA-Hitzeindex für die Dekaden 1951–1960 bis 2001–2010 an der Station Gardelegen.

<i>Dekade</i>	<i>Stufe 1</i>	<i>Stufe 2</i>	<i>Stufe 3</i>	<i>Stufe 4</i>
1951–1960	15,1	4,5	0,7	0,0
1961–1970	15,5	5,8	0,9	0,0
1971–1980	14,0	8,1	0,9	0,0
1981–1990	19,2	5,9	0,4	0,0
1991–2000	18,3	6,9	0,6	0,0
2001–2010	21,7	12,1	0,9	0,1

Tabelle B.3: NOAA-Hitzeindex für die Dekaden 1951–1960 bis 2001–2010 an der Station Artern.

<i>Dekade</i>	<i>Stufe 1</i>	<i>Stufe 2</i>	<i>Stufe 3</i>	<i>Stufe 4</i>
1951–1960	9,6	2,3	0,7	0,0
1961–1970	14,6	7,4	0,9	0,0
1971–1980	14,9	6,7	0,5	0,0
1981–1990	21,3	5,9	0,5	0,0
1991–2000	22,7	7,7	1,1	0,0
2001–2010	22,8	11,3	1,0	0,0

B.13 Länge von Hitzeperioden

Für jedes Jahr (bzw. jede Jahreszeit oder ein anderer Teilzeitraum eines Jahres) wird die längste zusammenhängende Periode ermittelt, in der an jedem Tag eine Maximumtemperatur über 30 °C auftrat.

Die Information zu diesem Hitzewellen-Indikator findet sich im Archiv Andauern/data. Zum Beispiel enthält für die Station Magdeburg die Datei `andauern.03126_annual.dat` in diesem Archiv die Angaben für die Länge von Hitzeperioden⁶⁾ in der vorletzten Spalte; die letzte Spalte gibt an, wie viele Tage zur Auswertung zur Verfügung standen.

Eine Trendauswertung ist in Abb. B.67 für die Station Magdeburg dargestellt. Eine Zunahme ist erkennbar und mit einem Mann-Kendall Q von +2,36 statistisch auf dem 90 %-Niveau abgesichert. Auffällig ist, dass in Magdeburg die Hitzeperiode im Zusammenhang mit dem Sommer 2003 mit 7 Tagen verhältnismäßig kurz war. Die Jahre 1969, 1994 und 2006 weisen hingegen jeweils 12 Tage andauernde Hitzeperioden auf.

Im Vergleich mit anderen Stationen der Region (s. Abb. B.68) zeigen sich durchweg klare Zunahmetrends.

⁶⁾Die meisten Dateien im Archiv stellen Starkregenperioden-Informationen an Niederschlagsstationen zur Verfügung. Für Stationen, die auch Temperatur messen, ist eine Zusatzspalte mit der Länge von Hitzeperioden vorgesehen.

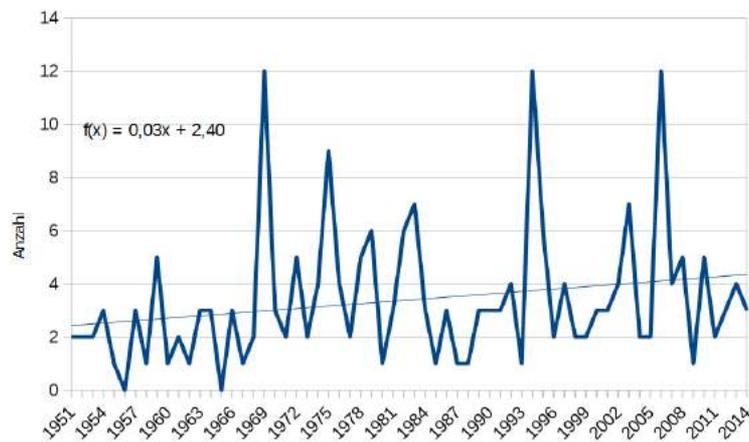


Abbildung B.67: Trenddarstellung der Entwicklung der Länge von Hitzewellen an der Station Magdeburg.

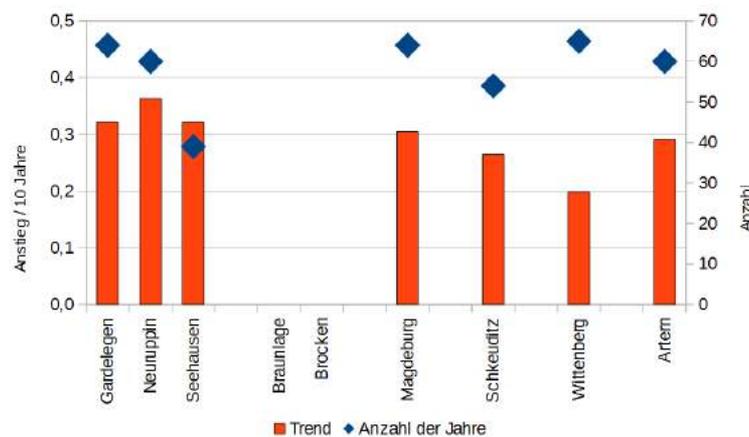


Abbildung B.68: Trends der Länge von Hitzewellen (Andauer von Perioden mit $T_X > 30\text{ °C}$) für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

B.14 Kälte und kalte Nächte

In einem als optionales Zusatzpaket beauftragten Schwerpunkt erfolgt eine weitere Fokussierung auf *vegetationsrelevante* Indikatoren. In diesem Zusammenhang werden vier Größen bestimmt und bezüglich ihres Trendverhaltens analysiert:

1. Betrag des 10-Perzentils der Maximumtemperatur, für die Monate jedes zusammenhängenden Winters (Dezember-Februar);
2. Betrag des 10-Perzentils der Minimumtemperatur, für die Monate jedes zusammenhängenden Winters (Dezember-Februar);
3. Anzahl der Perioden von 6 und mehr Tagen Länge in den Monaten jedes zusammenhängenden Winters (Dezember-Februar), bei denen das 10-

Perzentil der Minimumtemperatur unterschritten wurde;

4. Maximale Länge der Periode in den Monaten jedes zusammenhängenden Winters (Dezember-Februar), in der das 10-Perzentil der Minimumtemperatur unterschritten wurde.

Die Perzentile von meteorologischen Standardgrößen werden in Form einer Kollektion von Dateien zur Verfügung gestellt. Analog zu den Kenntage-Daten, beschrieben in Abschnitt B.1 wird ein Archiv `Quantile` ausgeliefert. Im Verzeichnis `Quantile/data` finden sich Dateien, die zum Ersten die Quantile in den verschiedenen Bestimmungszeiträumen (Monate, Jahreszeiten, Vegetationsperioden, Jahr) und zum Zweiten die verschiedenen meteorologischen Parameter (so verfügbar) angeben. Dies kann von Station zu Station unterschiedlich sein. So enthält z.B. die Datei `quantile_tmin_01544_DJF.dat` die Perzentile der Minimumtemperatur an der Station Gardelegen für die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar). Jede Datei besteht aus zahlreichen Spalten – in den ersten befindet sich das Jahr, in der zweiten Spalte die Zahl der im Bestimmungszeitraum vorhandenen Werte (z.B. 365 oder 366 wenn ein Jahr vollständig ist oder 90 bzw. 91 wenn ein Winter vollständig ist). Danach folgen 201 Spalten mit den Perzentilen von 0 bis 100 in Stufen von 0,5. Anhand der Spaltenüberschrift können bestimmte Perzentile ausgewählt werden. Ergänzt wird dieses Archiv durch das Verzeichnis `Quantile/pictures`, in dem sich Abbildungen zu den jeweiligen Stationen, Elementen und Bestimmungszeiträumen im png-Format befinden.

B.14.1 10-Perzentil der Maximumtemperatur

Aus dem `Quantile/data`-Archiv wurde als Beispiel die Maximumtemperatur an der Station Magdeburg ausgewählt. Die Information in der Spalte mit dem 10-Perzentil bildet die Basis für die Darstellung in Abb. B.69.

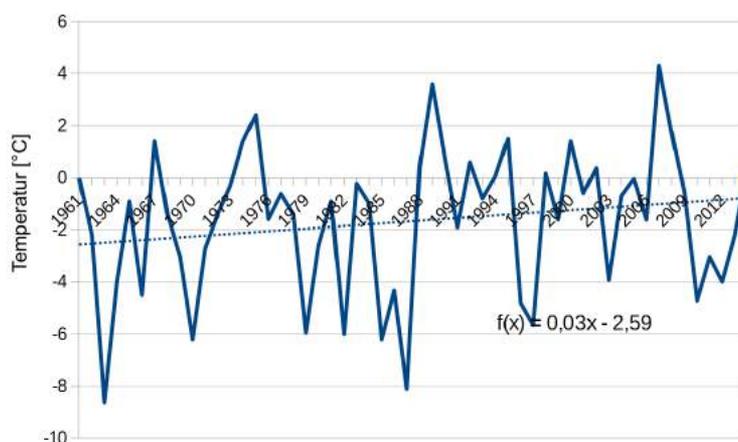


Abbildung B.69: Trenddarstellung der Entwicklung des 10-Perzentils der Maximumtemperatur an der Station Magdeburg.

Diese Größe beschreibt kalte Tage und die Analyse fokussiert auf die Wintermonate. Sie streut stark, aber die vom 10-Perzentil dargestellte Schwelle ändert sich von rund -3 auf rund -1 °C. Der Trend ist allerdings nicht auf dem 95 %-Niveau signifikant.

B.14.2 10-Perzentil der Minimumtemperatur

In diesem und den folgenden Unterabschnitten werden Charakteristika des Auftretens von kalten Nächten und Kältewellen herausgearbeitet.

Für diese spezielle Untersuchung wurde aus dem `Quantile/data`-Archiv die Minimumtemperatur an der Station Magdeburg ausgewählt. Die Information in der Spalte mit dem 10-Perzentil bildet die Basis für die Darstellung in Abb. B.70.

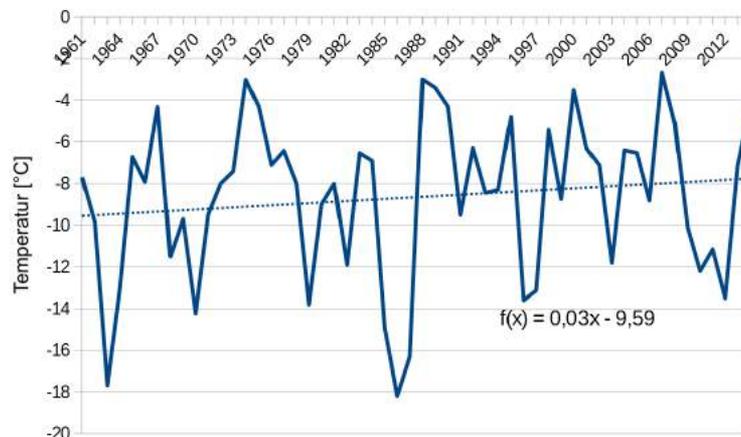


Abbildung B.70: Trenddarstellung der Entwicklung des 10-Perzentils der Minimumtemperatur an der Station Magdeburg.

Auch diese Größe folgt der generellen Temperaturzunahmeentwicklung und zeigt einen Anstiegstrend, der allerdings nicht auf dem 95 %-Niveau signifikant ist. Die Winter 1964/65 und eine Serie von weiteren Wintern (1986/87 bis 1988/89) werden durch dieses Kriterium als besonders streng eingestuft.

B.14.3 Perioden der Unterschreitung des 10-Perzentil der Minimumtemperatur in den Wintermonaten

Zunächst wurde ohne Betrachtung von Perioden ermittelt, an wie vielen Tagen der untersuchten Winter an der Station Magdeburg das 10-Perzentil der Minimumtemperatur unterschritten wird. Dies ist in Abb. B.71 dargestellt.

Die Anzahl der Tage mit Unterschreitung der Schwelle streut stark und nimmt in der Tendenz ab – dieser Trend ist auf dem 95 %-Niveau statistisch signifikant. Es fällt auf, dass es auch in den 1960er Jahren schon Winter gab, in

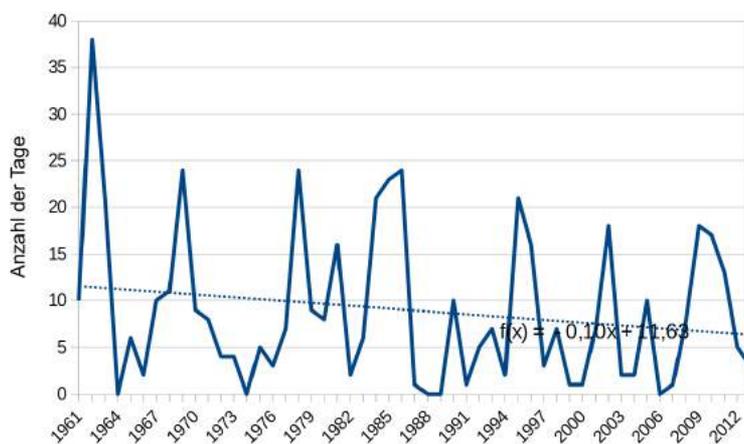


Abbildung B.71: Anzahl der Tage, die in jedem Winter zwischen 1961/62 und 2013/14 unterhalb des 10-Perzentils der Minimumtemperatur an der Station Magdeburg lagen.

denen das 10-Perzentil der Minimumtemperatur überhaupt nicht unterschritten wurde. Allerdings geht auch die Zahl der Winter mit sehr vielen Überschreitung mit der Zeit zurück.

Die zweite Teiluntersuchung befasst sich mit Perioden von aufeinander folgenden Tagen, an denen es nachts sehr kalt war. Die Ergebnisse für Magdeburg sind in Abb. B.72 dargestellt.

Schon bald stellte sich heraus, dass das Kriterium eines Auftretens an mindestens 6 aufeinander folgenden Tagen recht streng ist – eine analoge Erfahrung entstand auch bei der Betrachtung von Hitzewellen (vgl. Abschnitt B.11.2). Wie Abb. B.72 (a) zeigt, sind 6-tägige oder längere Perioden nur sporadisch vorhanden. Wird das Kriterium etwas weniger scharf gefasst und die Zahl von Perioden mit mindestens 3 Tagen Andauer untersucht, dann ist das Häufigkeitsbild und auch die zeitliche Entwicklung etwas deutlicher. Es sei allerdings angemerkt, dass die Abwärtsneigung der Trendgeraden durch die relativ große Zahl im Jahr 1962 unterstützt wird. Ohne dieses Jahr ist der Trend deutlich schwächer.

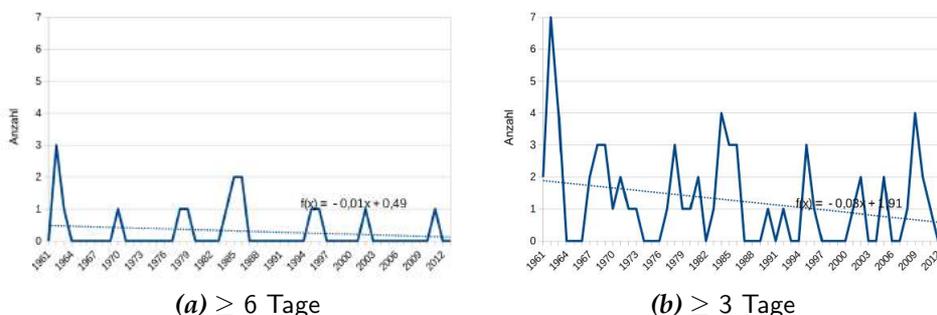


Abbildung B.72: Anzahl der Perioden von 6 (links) und 3 (rechts) Tagen Länge an denen eine Unterschreitung des 10-Perzentils der Minimumtemperatur in den Wintermonaten auftrat. Station: Magdeburg.

B.14.4 Maximale Länge von Perioden der Unterschreitung des 10-Perzentil der Minimumtemperatur in den Wintermonaten

Eine Untersuchung dieser Größe für jedes Jahr erscheint nicht sinnvoll, da das Kriterium zu selten eintritt. Es konnte aber im gesamten Zeitraum eine Kältewelle mit 14 Tagen Länge (21.12.1996–3.1.1997) identifiziert werden. Weitere lang anhaltende Kältewellen gab es vom 10.1.–21.1.1986 (12 Tage) und vom 31.1.–12.2.2011 (13 Tage).

B.15 Globalstrahlung

Einige der Stationen liefern Messungen der Globalstrahlung. In Abb. B.73 ist ein Beispiel für die Entwicklung des Jahresmittels an der Station Magdeburg dargestellt.

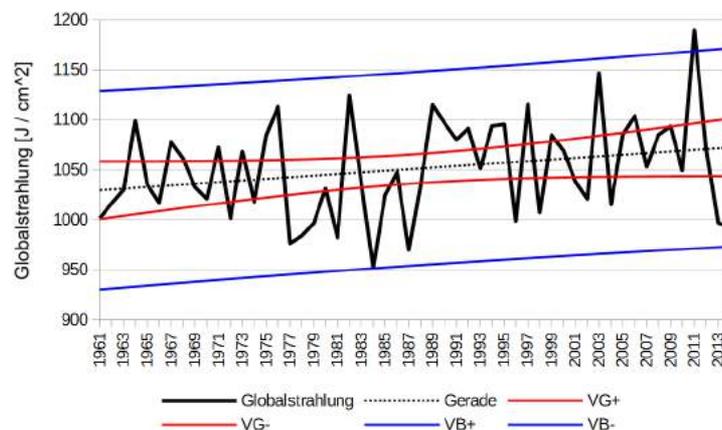


Abbildung B.73: Trenddarstellung der Entwicklung der Globalstrahlung im Jahr an der Station Magdeburg.

Die Globalstrahlung besitzt zwar einen Trend, der nach visuellen Maßgaben auf Zunahme schließen lässt. Allerdings ist der Vertrauensbereich der Trendgeraden wegen der relativ starken Streuung der Globalstrahlung breit, was auch andere Lagen dieser Geraden ermöglichen würde. Ein Zunahmetrend wird nach dem Mann-Kendall Test mit einem Q von +1,74 nicht ausgeschlossen, ist aber nur auf dem 90 %-Niveau statistisch abgesichert.

Es gibt Jahre mit extrem hoher Globalstrahlung, wie das Jahr 2011, dem im Anschluss drei Jahre mit besonders niedriger Globalstrahlung folgten.

Ein Trendvergleich (s. Abb. B.74) zeigt ebenfalls relativ schwache Trends – es ist anzunehmen, dass Unterschiede auf regionale Entwicklungen in der Umgebung der Station zurückzuführen sind. Der relativ starke Trend in Seehausen ist ein Effekt des zur Verfügung stehenden Zeitraums: Diese Reihe steht erst ab

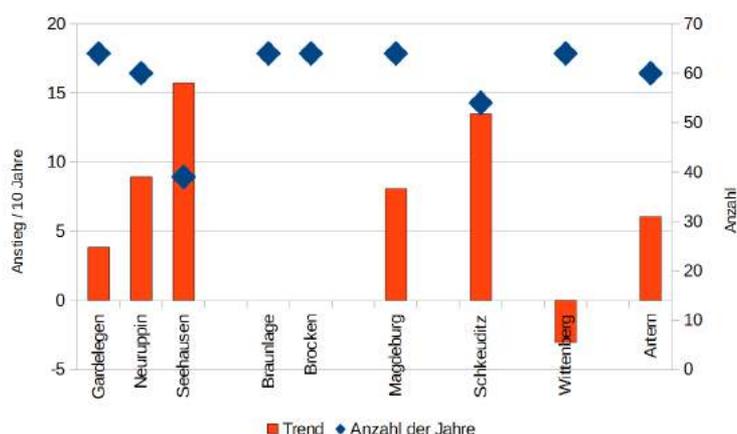


Abbildung B.74: Trends der mittleren jährlichen Globalstrahlung für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

1976 zur Verfügung und im Trend wird daher hauptsächlich die stärker Zunahmentwicklung der jüngsten Vergangenheit beschrieben.

B.16 Korrigierter Niederschlag

Niederschlagsmessungen erfolgen unter einer Vielzahl von fehlerverursachenden Einflussfaktoren, wie dem Verdunsten eines Teils des gesammelten Niederschlags bis zur Registrierung, dem Windfehler durch die Strömungsverhältnisse am Regenschirm oder der landschaftlichen Exposition der Messvorrichtung. Für den Regenschirm nach Hellmann, der in Deutschland verbreitet eingesetzt wird gibt es eine umfangreiche Studie der Einflussfaktoren mit einer Quantifizierung der Korrekturen (RICHTER, 1995). Die Korrekturen erfolgen anhand von empirischen Tabellen. Korrigierte Niederschlagszeitreihen können den Nutzern aus der REKIS-Datenbank zur Verfügung gestellt werden. Unkorrigierte und korrigierte Messreihen unterscheiden sich bezüglich des zu bestimmenden Klimatrends nur wenig, weshalb die Trendanalysen ohne Richter-Korrektur durchgeführt werden.

B.17 Potenzielle Verdunstung und klimatische Wasserbilanz

Die klimatische Wasserbilanz wird als Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung berechnet (nach DIN, 1994, Norm 4049-3).

Die Bestimmung der *realen* Verdunstung erfolgt nur an relativ wenigen Mess-einrichtungen, da sie mit hohem technischem und personellem Aufwand verbunden ist. Im Vorhaben werden statt dessen für eine größere Zahl von Stationszeitreihen Näherungsformeln für die so genannte potenzielle Verdunstung

nach [ATV-DVWK \(1996\)](#) verwendet, in dieser Studie das Verfahren nach Penman. Die potenzielle Verdunstung beschreibt die maximal mögliche Verdunstung in Abhängigkeit der klimatischen Bedingungen. Sie wird mit Hilfe von Basismessdaten von Wind, relativer Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Temperatur berechnet.

Die Messreihen der potenziellen Verdunstung weisen häufige Unterbrechungen auf. Trendbestimmungen aus einem langen Zeitraum, simultan für mehrere Stationen sind damit nicht möglich. Lediglich für Teilzeiträume lassen sich *Tendenzen* bestimmen, wenn die Kriterien der Zahl der Fehltag weniger streng gehandhabt werden.

In [Abb. B.75](#) ist die Entwicklung des Jahresmittels von Verdunstung und Klimatischer Wasserbilanz für die Station Magdeburg aufgezeigt. Während die Verdunstung einen leichten Zunahmetrend aufweist, der mit einem Mann-Kendall Q von +2,26 auf dem 95 %-Niveau statistisch signifikant ist, besitzt die klimatische Wasserbilanz keinen nachweisbaren Trend. Dies gilt auch für die einzelnen Jahreszeiten und Halbjahre.

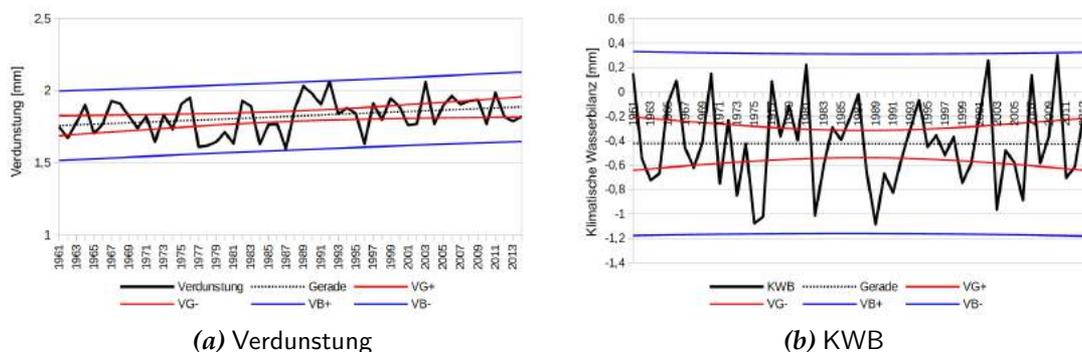


Abbildung B.75: Zeitliche Entwicklung der Verdunstung und der Klimatischen Wasserbilanz an der Station Magdeburg.

Die Möglichkeit, einen Trend bestimmen zu können, ist an der Station Magdeburg besonders gut. Abgesehen von zwei Jahren (2002 mit Daten an 352 Tagen und 2005 mit Daten an 344 Tagen) sind alle Jahre an dieser Station vollständig. Dies ist an anderen Stationen bei Weitem nicht der Fall.

[Abb. B.76](#) zeigt für die Station Artern, dass der Trend auf einer wenig belastbaren Datenbasis bestimmt wurde, denn es gibt mehrere Jahre, in denen deutliche Datenlücken vorhanden sind.

Bei anderen Stationen (z.B. Lüchow) beginnt die Verdunstungsmessung und damit die Bestimmbarkeit der Klimatischen Wasserbilanz erst in den 1970er Jahren und es gibt zudem Ausfälle zwischen 2000 und 2005. In Gardelegen fehlt nahezu das gesamte Jahr 1991 und die Nachfolgejahre besitzen ebenfalls große Lücken.

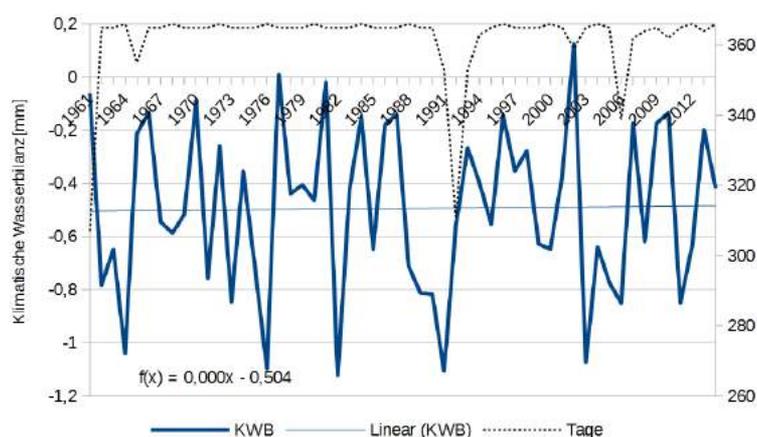


Abbildung B.76: Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz als Jahresmittel (blaue, durchgezogene Linie) an der Station Artern. Die dünne blaue Linie stellt den Trend über den Zeitraum 1961–2014 dar. Die beiden blauen Linien sind der linken y-Achse zugeordnet. Die gestrichelte schwarze Linie zeigt die verfügbare Zahl der Tage pro Jahr. Sie ist der rechten y-Achse zugeordnet.

Dennoch ist den Zeitreihen gemeinsam, dass die Tendenzen bei der Klimatischen Wasserbilanz weder auf Zu- noch auf Abnahmen zielen. Sowohl im hydrologische Sommer- als auch im hydrologischen Winterhalbjahr gibt es ähnliche Beobachtungen.

B.18 Standardisierter Niederschlagsindex (Standardized Precipitation Index, SPI)

Der standardisierte Niederschlagsindex (in der Fachliteratur oft Standardized Precipitation Index – abgekürzt SPI – genannt) wurde ursprünglich zur Identifikation von Trockenperioden entwickelt. Der SPI ist eine abgeleitete Größe aus dem kumulierten Niederschlag über Betrachtungszeiträume der zurückliegenden 3, 6, 12 oder 24 Monate. Damit kann eingeschätzt werden, ob Zeitabschnitte zu feucht, zu trocken oder durchschnittlich sind.

Die Berechnung des SPI erfordert (i) eine Bestimmung der statistischen Parameter der Niederschlags-Häufigkeitsverteilung für einen längeren Zeitraum und (ii) die Identifikation der Position eines zu untersuchenden Zeitraums (z.B. Sommermonate 1998 oder Jahr 2004) in der theoretischen Häufigkeitsverteilung. Im Grunde wird ermittelt, wie weit ein konkreter Wert vom Mittelwert entfernt ist; zur Quantifikation werden Bruchteile der Standardabweichung verwendet. Extrem trockene Perioden haben einen SPI unter -2 , extrem niederschlagsreiche Perioden haben einen SPI über $+2$. Grundlage für die Berechnung sind die Ausführungen in [LLOYD-HUGHES und SAUNDERS \(2002\)](#) und [MCKEE et al. \(1993\)](#).

Abb. [B.77](#) stellt den SPI mit 3-monatigem Analysezeitraum für die Station Gardelegen vor.

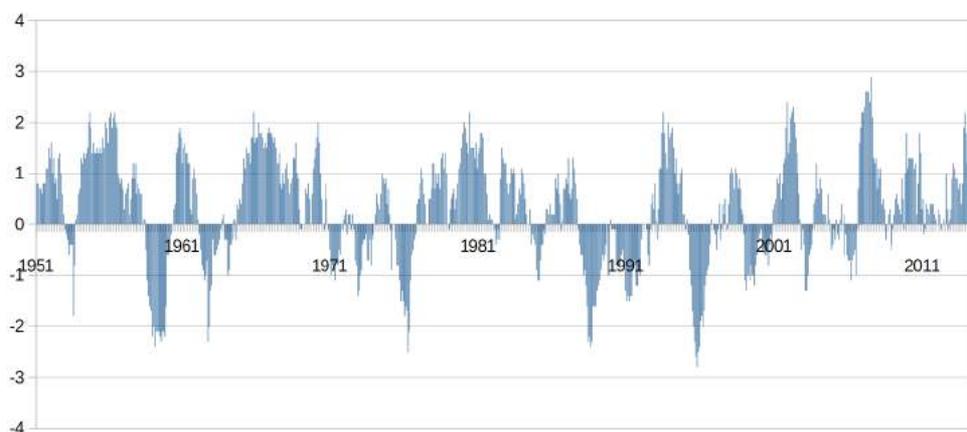
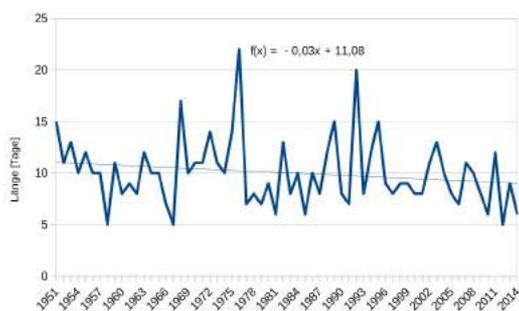


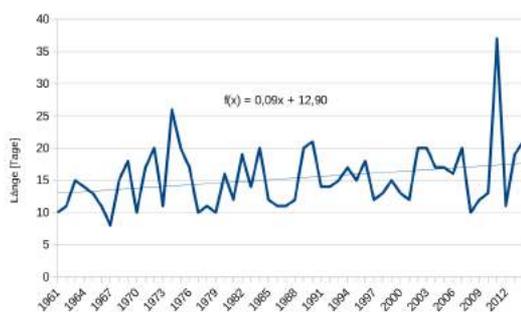
Abbildung B.77: Darstellung des Standardized Precipitation Index für einen 3-monatigen Analysezeitraum. Station: Gardelegen.

B.19 Länge von Trockenperioden

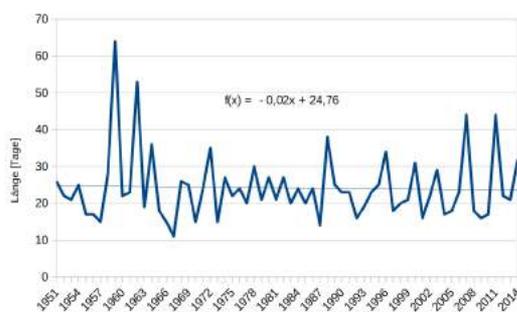
Für jedes Jahr (bzw. jede Jahreszeit oder ein anderer Teilzeitraum eines Jahres) wird die längste zusammenhängende Periode ermittelt, in der an jedem Tag weniger als 1 mm Niederschlag fielen.



(a) Brocken



(b) Schkeuditz



(c) Wittenberg

Abbildung B.78: Zeitliche Entwicklung der maximalen Länge von Trockenperioden an den Stationen Brocken, Schkeuditz und Wittenberg.

Zu diesem Zweck wurde das Archiv Andauern angelegt. Im Unterverzeichnis `Andauern/data` befinden sich Tabellendateien, die für jede Station die maximalen Periodenlängen für vier verschiedene Niederschlagscharakteristika auflisten:

1. Niederschlagsperioden: Serie von Tagen, an denen jeweils mindestens 1 mm Niederschlag fiel;
2. Starkniederschlagsperioden: Serien von Tagen mit 10 oder mehr mm Niederschlag;
3. Serien von Tagen, an denen weniger als 10 mm Niederschlag fiel;
4. Trockenperioden: Serien von Tagen, an denen weniger als 1 mm Niederschlag fiel.

Für die Auswertung wird 4. verwendet. Hinweis: Für Stationen mit Temperaturmessungen ist zusätzlich noch die Länge von Hitzeperioden in dieser Datei tabelliert (vgl. Abschnitt [B.13](#)).

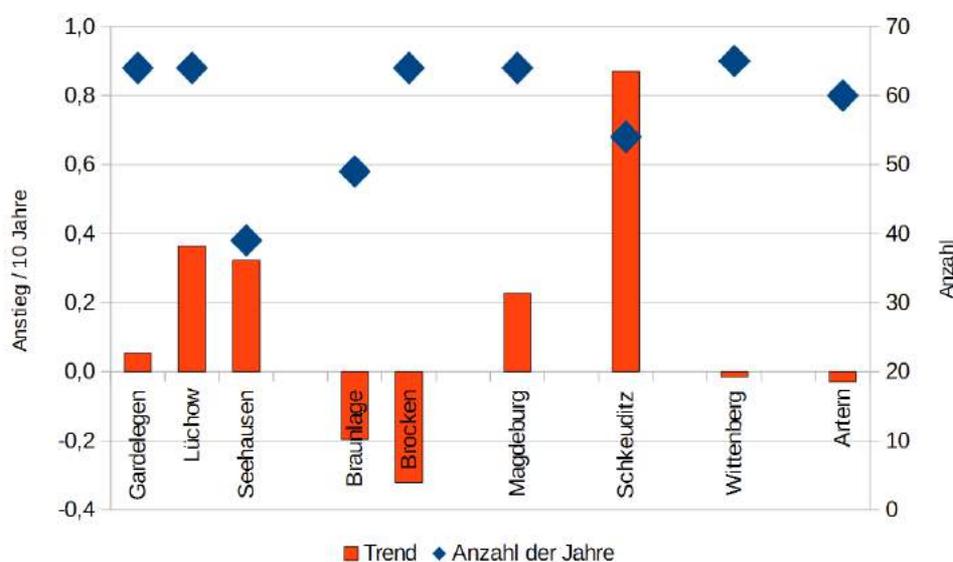


Abbildung B.79: Trends der maximalen Andauer von Trockenperioden für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Abb. [B.78](#) zeigt die zeitlichen Verläufe von drei Stationen. Es soll gezeigt werden, wie uneinheitlich das Bild bezüglich der Trockenperioden ist. Sowohl Anstiegs- als auch Rückgangstrends sind möglich, ebenso wie Reihen ohne Trend. Dieser Eindruck bestätigt sich, wenn an weiteren Stationen die Trends bestimmt werden (s. Abb. [B.79](#)).

Die maximale Länge der Trockenperioden besitzt eine starke Jahr-zu-Jahr-Streuung – es gibt Jahre mit 25-tägigen oder längeren Trockenperioden aber auch solche, in denen Trockenperioden von 10 und weniger Tagen auftreten.

B.20 Mittlerer maximaler täglicher Niederschlag

Table B.4: Mittlerer maximaler Niederschlag in verschiedenen Perioden. Station: Brocken. Die Beschreibung findet sich in Abschnitt B.20.

<i>Zeitraum</i>	<i>mittleres RRmax [mm]</i>	<i>Verwendete Tage</i>
1951–1960	58,5	3653
1961–1970	56,9	3652
1971–1980	46,5	3653
1981–1990	69,2	3652
1991–2000	65,3	3653
2001–2010	67,9	3652
1951–1970	57,7	7305
1961–1980	51,7	7305
1971–1990	57,9	7305
1981–2000	67,3	7305
1991–2010	66,6	7305
1951–1980	54,0	10958
1961–1990	57,6	10957
1971–2000	60,3	10958
1981–2010	67,5	10957
1951–1990	57,8	14610
1961–2000	59,5	14610
1971–2010	62,2	14610
1951–2000	59,3	18263
1961–2010	61,2	18262
1951–2010	60,7	21915
1951–2015 ^{*)}	60,0	23405

^{*)} Es wurde nicht das gesamte Jahr 2015 ausgewertet. Die Zeitreihe erstreckte sich an dieser Station bis in den Januar 2015.

Dazu wird in jedem Jahr (oder jeder Jahreszeit bzw. anderem Zeitraum) der aufgetretene maximale Tagesniederschlag bestimmt. Danach wird diese Größe über Dekaden oder 30-jährige oder andere Zeiträume gemittelt.

Im Archiv `mittleres_RRmax` werden die entsprechenden Tabellen zur Verfügung gestellt. Ein Beispiel für die Station Brocken ist in Tab. B.4 gegeben.

Zudem finden sich im Unterverzeichnis `mittleres_RRMax/pictures` zu jeder Station und jedem Untersuchungszeitraum (Monate, Jahreszeiten, Jahre) Box-Whiskerplots der in Tab. B.4 gelisteten Zeiträume.

B.21 Maximaler 5-tägiger Niederschlag

Diese Größe ist auch unter dem Kürzel RX5 bekannt. Mit einem gleitenden 5-Tage-Fenster wird in den Niederschlagszeitreihen für jedes Jahr bzw. jede Jahreszeit oder einen anderen Zeitraum ermittelt, wie viel Niederschlag an 5 Tagen fiel; dabei ist nicht zwingend, dass an *jedem* der 5 Tage Niederschlag auftrat.

Das Archiv RX5 enthält im Unterverzeichnis `data` für jede Station eine Gruppe Tabellendateien, in denen jeweils RX5 für Monate, Jahreszeiten, Vegetationsperioden und das gesamte Jahr aufgelistet ist. Außerdem befindet sich im Verzeichnis `pictures` eine grafische Aufbereitung dieser Dateien.

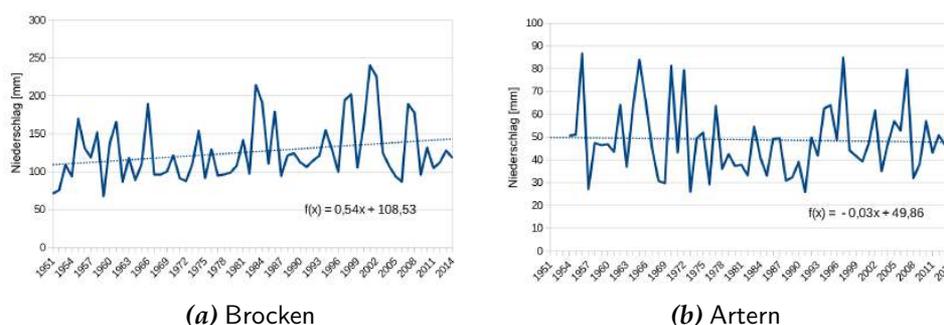


Abbildung B.80: Zeitliche Entwicklung des maximalen 5-Tage-Niederschlags an den Stationen Brocken und Artern.

Ein Beispiel für die Station Brocken ist in Abb. B.80 (a) gegeben. Dort findet sich ein relativ gut ausgeprägter Zunahmetrend, der mit einem Mann-Kendall Q von +2,32 auf dem 95 %-Niveau abgesichert ist. An der Station Artern [Abb. B.80 (b)] hingegen ist ein solcher Trend nicht festzustellen.

Ein Trendvergleich mit anderen Stationen in der Region (Abb. B.81) ergibt, dass insbesondere im Harz aber auch in Schkeuditz gut erkennbare Zunahmen des maximalen 5-tägigen Niederschlags auftreten. An anderen Stationen ist der Trend nur sehr schwach oder gar nicht vorhanden. An der Station Gardelegen wird wegen einer Datenlücke nur ein Teil der Reihe zur Trendbestimmung genutzt. In der verbleibenden Reihe ist ein von allen übrigen Stationen abweichender Trend zu finden.

B.22 Länge von Starkniederschlagsperioden und Häufigkeit von Tagen mit Starkniederschlag

Für jedes Jahr (bzw. jede Jahreszeit oder ein anderer Teilzeitraum eines Jahres) wird die längste zusammenhängende Periode ermittelt, in der an jedem Tag mindestens 10 mm Niederschlag fielen.

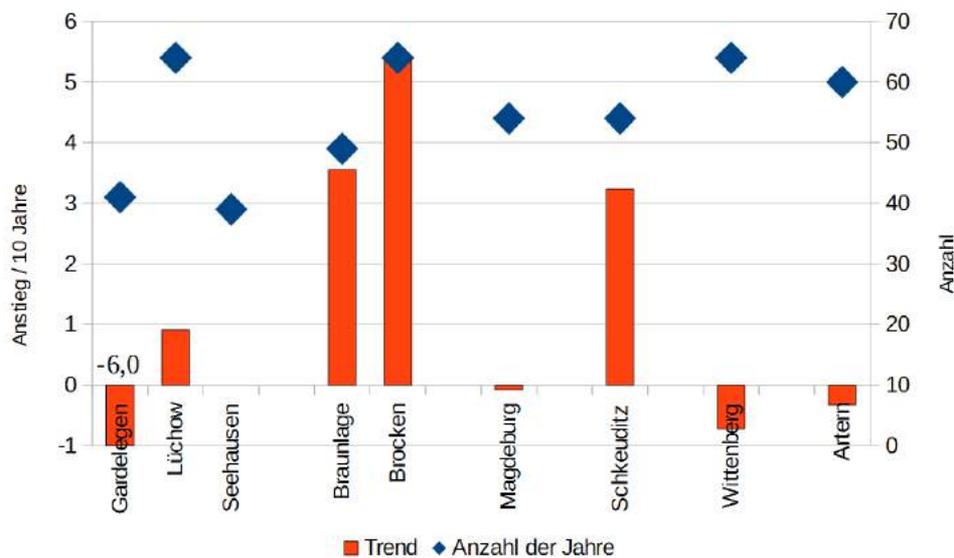


Abbildung B.81: Trends des maximalen 5-tägigen Niederschlags für ausgewählte Stationen im Raum Sachsen-Anhalt. Die Balken stellen den Anstiegsterm der Trendgleichung dar, umgerechnet als Veränderung pro 10 Jahre. Sie sind auf die linke y-Achse bezogen. Die blauen Rauten stellen die Anzahl der verfügbaren Jahre dar und sind auf die rechte y-Achse bezogen.

Zu diesem Zweck wurde das Archiv `Andauern` angelegt. Im Unterverzeichnis `Andauern/data` befinden sich Tabellendateien, die für jede Station die maximalen Periodenlängen für vier verschiedene Niederschlagscharakteristika auflisten:

1. Niederschlagsperioden: Serie von Tagen, an denen jeweils mindestens 1 mm Niederschlag fiel;
2. Starkniederschlagsperioden: Serien von Tagen mit 10 oder mehr mm Niederschlag;
3. Serien von Tagen an denen weniger als 10 mm Niederschlag fiel;
4. Trockenperioden: Serien von Tagen, an denen weniger als 1 mm Niederschlag fiel.

Für diese Auswertung wird 2. verwendet.

Hinweis: Für Stationen mit Temperaturmessungen ist zusätzlich noch die Länge von Hitzeperioden in dieser Datei tabelliert (vgl. Abschnitt B.13).

Des Weiteren werden Dateien ausgeliefert, in denen das Trendverhalten und die Vertrauensbereiche für die Schwellen 10, 20, 25 und 40 mm aufgelistet sind. Deren Struktur ist analog zu den Beschreibungen in Abschnitt D.2.2.

In Abb. B.82 ist die zeitliche Entwicklung für die Station Brocken gezeigt. Es gibt in dieser Zeitreihe eine interessante Auffälligkeit, denn der lineare Trend für den Zeitraum 1951–2014 ist nur schwach ausgeprägt. Das liegt hauptsächlich an den relativ niedrigen Werten in den Anfangsjahren. Würde

die Reihe vor 1961 nicht existieren und nur der Zeitraum 1961–2014 zur Untersuchung zur Verfügung stehen, wie in Abb. B.82 (b) dargestellt, so wäre ein klarer, statistisch auf dem 95 %-Niveau signifikanter Abwärtstrend zu verzeichnen.

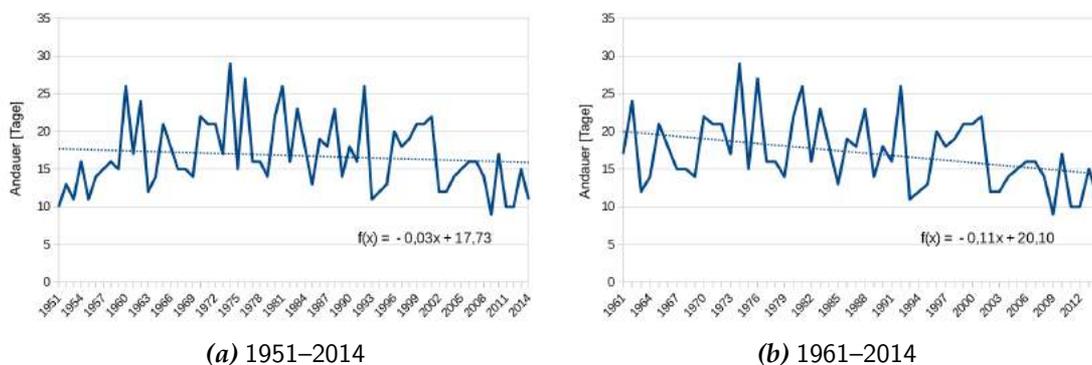


Abbildung B.82: Zeitliche Entwicklung der Andauer von Starkregenperioden (aufeinander folgende Tage mit 10 mm Niederschlag) an der Station Brocken. Die beiden Teilfiguren zeigen die Trendbetrachtung für die Zeiträume 1951–2014 und 1961–2014.

Eine analoge Untersuchung an der Station Artern identifiziert keinerlei Trend – allerdings sind die Starkniederschlagsperioden dort auch deutlich kürzer (3–11 Tage treten auf) und seltener.

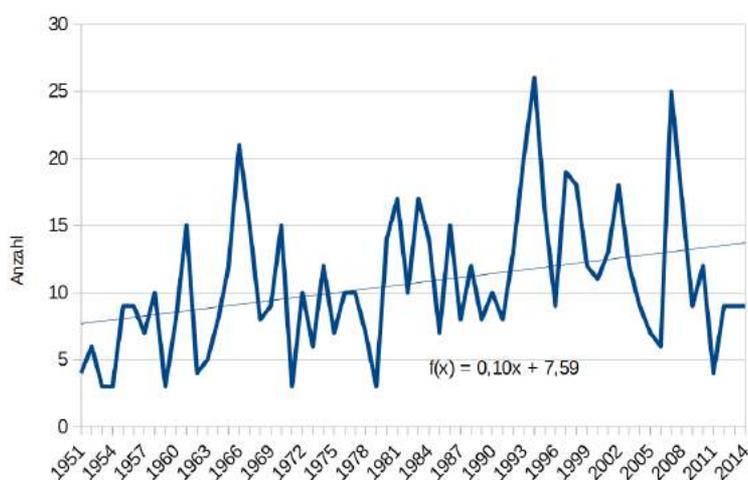


Abbildung B.83: Zeitliche Entwicklung der Anzahl der Tage im Jahr mit mehr als 25 mm Niederschlag an der Station Brocken.

Für Stationen mit hohen Niederschlagssummen ist es zudem lohnend, auch die Entwicklung von besonders extremen Tagesmengen zu betrachten. Für die Station Brocken ist in Abb. B.83 das Ergebnis einer solchen Untersuchung für

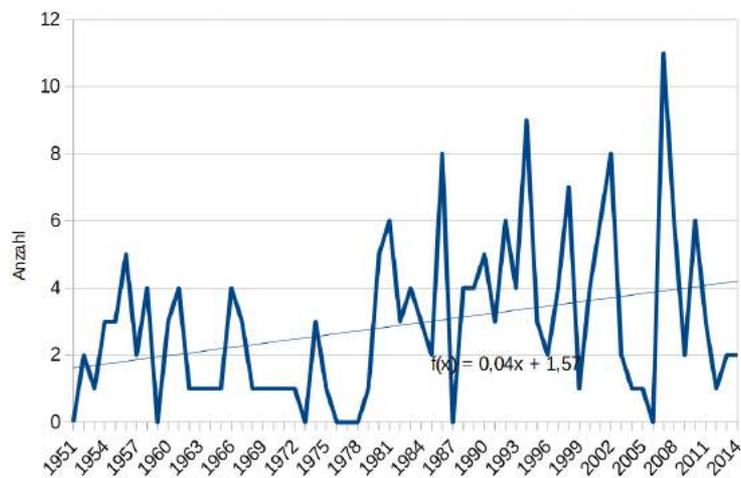


Abbildung B.84: Zeitliche Entwicklung der Anzahl der Tage im Jahr mit mehr als 40 mm Niederschlag an der Station Brocken.

Tage mit mehr als 25 mm und in Abb. B.84 40 mm Niederschlag dargestellt. Bei den Tagen mit mehr als 40 mm ist beispielsweise der Anstiegstrend ist mit einem Mann-Kendall Q von +2,86 auf dem 95 %-Niveau statistisch signifikant. Dies ergänzt die Informationen zu den Kenntagen mit 20 mm Niederschlag in Abschnitt B.1.7.

B.23 Hohe Luftfeuchte

Die Untersuchungen hierzu sind Teil des AP 6 und werden in Abschnitt 4.6.1 beschrieben.

B.24 Bodenfeuchte

Die Untersuchungen hierzu sind Teil des AP 6 und werden in Abschnitt 4.6.2 beschrieben.

B.25 Waldbrand

Für eine Auswahl von Stationen⁷⁾ wird der so genannte kanadische Waldbrandindex FWI (TURNER und LAWSON, 1978; STOCKS et al., 1989)⁸⁾ – zur Verfügung gestellt vom DWD – analysiert. Es handelt sich um ein fünfstufiges System, bei dem Stundendaten von Temperatur, Luftfeuchte, Wind und Niederschlag einbezogen werden. Ein Vergleich des FWI mit dem in Deutschland auch verwendeten M68-Index findet sich in SUTMÖLLER et al. (2012). Es sei angemerkt, dass

⁷⁾Artern, Brocken, Gardelegen, Lüchow, Magdeburg, Neuruppin, Schkeuditz und Wittenberg.

⁸⁾Die kanadische Website ist <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/home>

die Waldbrandgefahr in den Monaten November bis Februar von dem Modell nicht beschrieben wird.

Die einzelnen Waldbrandstufen treten mit unterschiedlicher Häufigkeit auf. Um die Vergleichbarkeit von Trends besser herauszuarbeiten, wurde jede Stufe mit dem aufgetretenen Maximum normiert. In der höchsten Stufe 1 gab es zum Beispiel in einem der Jahre 1961–2014 an einer der 8 Stationen einen höchsten Wert von 44. Mit diesem wurden alle Häufigkeiten der Stufe 1 normiert und das Verfahren mit den übrigen Stufen wiederholt. In den normierten Zählungen wurde der Trend ermittelt und die Neigung der Trendgeraden mit 100 multipliziert.

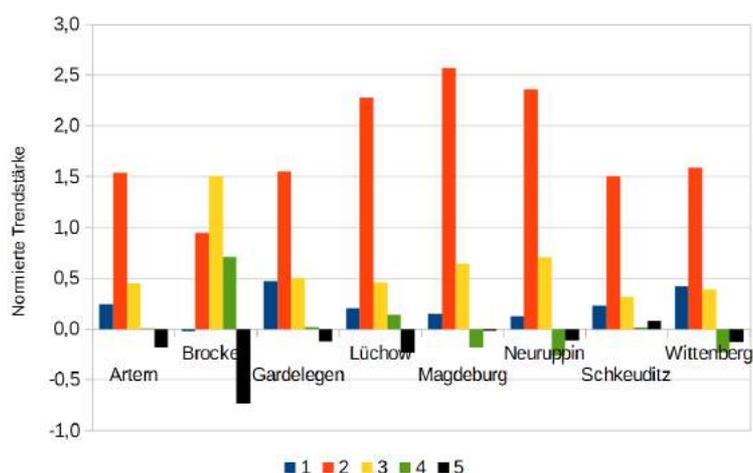


Abbildung B.85: Normierte Trends der fünf Stufen des FWI-Waldbrandindex für 8 Stationen in der Region Sachsen-Anhalt.

Das Ergebnis ist in Abb. B.85 dargestellt. Es zeigt sich, dass die stärksten Veränderungen in der zweithöchsten Waldbrandstufe auftraten: An allen Stationen bis auf den Brocken ist die Zunahme dieser Stufe am größten. Aber auch die höchste Stufe verzeichnet so gut wie überall einen Anstieg. Der Rückgang der Stufe 5 ist ein Kompensationseffekt, denn jedem Tag wird eine der fünf Stufen zugeordnet und daher mehren sich die Einstufungen in Klassen 1–4 „auf Kosten“ der Einstufungen in Klasse 5.

C Verfahren zur Qualitätskontrolle der Daten

Die Qualitätskontrolle fand mit unterschiedlichen Verfahren statt, je nach Parameter und zeitlicher Datenauflösung. Für den größeren Teil der Daten stand dabei auch das Prüfprogramm NIKLAS zur Verfügung. Daneben kamen auch einfache Verfahren, wie z.B. der Vergleich von Tagesminimum und Tagesmaximum zum Einsatz.

Im folgenden wird zunächst auf die Ergebnisse der Qualitätskontrolle eingegangen (Abschnitt C.1), und im Anschluss werden die Prüfverfahren und -ergebnisse mit NIKLAS dargestellt (Abschnitt C.2).

C.1 Ergebnisse der Qualitätskontrolle

C.1.1 Allgemeines

In mehreren Fällen lag nicht nur eine Datenreihe vor, sondern es gab bis zu drei Reihen: Aus der Klidadigi-Datenbank, dem CDC-GDS Portal und dem Datenbestand der DWD-Agrarmeteorologie¹⁾.

Die Auswahl der Reihe, die in der Folge näher untersucht wird, fand nach folgenden Kriterien statt:

- Beobachtungslänge zwischen 1951 und 2014;
- Lückenanzahl und -länge;
- Bei Unterschieden in den Werten wurden Nachbarstationen als Vergleich hinzugezogen.

Die in Abb. C.1 dargestellte Tabelle zeigt die Reihen der Niederschlagstageswerte, die für die weitere Arbeit ausgewählt wurden. Einige wichtige Leitgedanken zur Nutzung verschiedener Datensätze waren:

- Für Trendaussagen auf der Basis von Tages- Monats- oder Jahresdaten wurde vielfach auf die nicht-Agrardaten in Form von Tageswerten zurückgegriffen, um möglichst lange Zeitreihen untersuchen zu können²⁾.

¹⁾Die Daten aus dieser Quelle wurde zum Teil in Tages- und zum Teil in stündlicher Auflösung zur Verfügung gestellt.

²⁾Dennoch verfügen die Daten aus dem agrarmeteorologischen Bestand auch über Vorteile: (i) Es gibt

- Die Stationen des so genannten METD-Datensatzes der DWD-Agrarmeteorologie (Tagesdaten) sind trotzdem wichtig – nicht nur für die Analyse ansonsten nirgends enthaltener Größen sondern auch zum Abgleich verschiedener Datenquellen.
- Für Analysen auf der Basis von Stundendaten sind die Agrardaten eine wesentliche Eingangsgröße (insbesondere für Untersuchung des Tagesgangs).

Es fällt auf, dass in keinem Fall die Wahl auf die Station des agrarmeteorologischen Datenbestands fiel. Das liegt daran, dass die entsprechenden Daten entweder kürzer waren oder Unterschiede zu den Daten aus den anderen Datenquellen hatten. Durch Vergleich mit Nachbarstationen wurden sie dann als weniger verlässlich eingestuft.

Stations_id	Stationshoehe	geoBreite	geoLaenge	Stationsname	Bundesland	KLI (a)	GDS	agr	gewählt	Grund	Q - Qualität
2044	404	51.652	11.1367	Harzgerode	Sachsen-Anhalt	x	x	-		zu kurz	
198	164	51.3745	11.292	Artern	Thuringen	x	x	x	GDS	Q + L	
445	84	51.8218	11.7109	Bernburg/Saale (Nord)	Sachsen-Anhalt	x	x		GDS	L	
650	35	52.4136	12.5503	Brandenburg-Goerden	Brandenburg	x	x		GDS	L	
656	607	51.7234	10.6021	Braunlage	Niedersachsen	x	x		GDS	identisch	
722	1134	51.7986	10.6183	Brocken	Sachsen-Anhalt	x	x		GDS	identisch	
863	585	51.7904	10.347	Clausthal-Zellerfeld	Niedersachsen	x	x		GDS	L	
1544	47	52.5129	11.3941	Gardelegen	Sachsen-Anhalt	x	x	x	GDS	L	
1612	311	50.8813	12.1289	Gera-Leumnitz	Thuringen	x	x		GDS	identisch	
1617	210	51.7259	11.1317	Gernrode	Sachsen-Anhalt	x	x		GDS	L	
2039	201	51.9	10.5701	Harzburg, Bad	Niedersachsen	x	x		GDS	L	
2444	155	50.9251	11.583	Jena (Sternwarte)	Thuringen	x	x		GDS	L	
2878	119	51.3912	11.8785	Lauchstaedt, Bad	Sachsen-Anhalt	x	x		GDS	L	
2928	138	51.3151	12.4462	Leipzig-Holzhausen	Sachsen	x	x		GDS	L	
3093	17	52.9724	11.1374	Luechow	Niedersachsen	x	x		GDS	L	
3126	76	52.1029	11.5826	Magdeburg	Sachsen-Anhalt	x	x	x	GDS	L	
4878	494	51.6681	10.8823	Oberharz am Brocken-Stiege	Sachsen-Anhalt	x	x		GDS	L	
4079	200	51.1765	11.4183	Rastenber	Thuringen	x	x		GDS	L	
4642	21	52.8911	11.7297	Seehausen	Sachsen-Anhalt	x	x	x	GDS	L	
4651	186	51.9044	10.1888	Seesen	Niedersachsen	x	x		GDS	L	
4748	216	51.352	10.9059	Sondershausen	Thuringen	x	x		GDS	L	
5419	264	50.9744	11.308	Weimar	Thuringen	x	x		GDS	L	
5490	234	51.8454	10.7686	Wernigerode	Sachsen-Anhalt	x	x		GDS	L	
4445	609	51.7658	10.6533	Wernigerode-Schierke	Sachsen-Anhalt	x	x		GDS	L	
662	81	52.2914	10.4465	Braunschweig	Niedersachsen	x			KLI		
1001	97	51.6451	13.5747	Doberlug-Kirchhain	Brandenburg	x			KLI		
1694	58	53.606	12.1033	Goldberg	Mecklenburg-Vorpommern	x			KLI		
1957	93	51.5138	11.9499	Halle-Kroellwitz	Sachsen-Anhalt	x	x		KLI	L	
2120	140	52.2164	11.0219	Helmstedt	Niedersachsen	x	x		KLI	identisch	
2932	131	51.4348	12.2396	Leipzig/Halle	Sachsen	x	x	x	KLI	L + Q	
5146	50	52.9413	10.5287	Uelzen	Niedersachsen	x	x		KLI	identisch	
5629	105	51.8892	12.6445	Wittenberg	Sachsen-Anhalt	x	x	x	KLI	identisch	

Abbildung C.1: Auszug aus einer Tabellendatei: Ergebnis der Auswahl bei mehrfachen Datenreihen für das Beispiel Niederschlag.

Bestanden in einer Zeitreihe Lücken > 3 % der Reihenlänge, so wurde geprüft, ob die Reihe „gerettet“ werden konnte. Dieses war der Fall, wenn die Lücke vor dem Jahr 1980 oder nach dem Jahr 2000 lag und die Reihe durch Kürzen der Gesamtreihe noch eine genügend große Beobachtungsdauer aufwies. Bestand z.B. bei einer Reihe von 1951 bis 2014 eine Datenlücke von 2004 bis 2008, so wurde der Zeitraum 1951 bis 2003 dieser Reihe verwendet und der Zeitraum nach der Lücke verworfen.

quasi keine Datenlücken und (ii) es sind einige meteorologische Variable enthalten, die in anderen Datensätzen nicht vorhanden sind. Der Nachteil ist, dass diese Daten erst 1961 (bei Seehausen 1976) beginnen.

C.1.2 Lufttemperatur

C.1.2.1 Tageswerte

Bei den Temperaturtageswerten der agrarmeteorologischen Stationen gab es für einige Stationen Inkonsistenzen zwischen Tagesminimum (TN), Tagesmaximum (TX) und Tagesmittelwert (TM). Zu erwarten ist, dass das Tagesmaximum TX größer sein sollte als der Tagesmittelwert TM und das Tagesminimum TN, und TM wiederum größer als TN. Die Ergebnisse in Tab. C.1 zeigen, dass für 5 Stationen die Ergebnisse nicht zufriedenstellend sind. Als Konsequenz wurden TN und TX für diese Stationen aus den Stundenwerten neu berechnet.

Tabelle C.1: Anzahl der Inkonsistenzen in den agrarmeteorologischen Tageswerten.

<i>Station</i>	<i>TX < TM</i>	<i>TX < TN</i>	<i>TM < TN</i>
<i>Artern</i>	40	4	831
<i>Gardelegen</i>	42	5	1082
<i>Magdeburg</i>	19	0	845
<i>Neuruppin</i>	39	2	889
<i>Schkeuditz</i>	23	2	992
<i>Seehausen</i>	0	0	1
<i>Wittenberg</i>	1	0	5
<i>Halle (Stadt)</i>	4	4	23

Tagesmittelwert

Hier gab es vorbereitende Maßnahmen für NIKLAS:

- Station Seehausen: Daten aus Stundendaten, da in GDS nicht vorliegend;
- Station Halle (Stadt): Daten aus Stundendaten, da in GDS nicht vorliegend.

Damit bestand eine Auswahl von 111 vorliegenden Stationen mit Stationsinformationen. Davon hatten 70 Reihen eine Beobachtungsdauer von mindestens 30 Jahren zwischen 1951 und 2014 – diese wurden mit NIKLAS geprüft.

Nach Auswertung der Lückenanzahlen und einer visuellen Prüfung mit TimeView wurden zusätzlich 14 Stationen ausgeschlossen wegen eines nach der Prüfung vorhandenen Lückenanteils von mehr als 3 %.

Es verblieben somit 27 Stationsreihen, die den vorgegebenen Kriterien entsprachen (> 30 Jahre Beobachtung mit < 3 % Lücken).

Tagesmaximum

Zur Auswahl standen mehrere Datenreihen für Stationen, für die auch Stundenwerte vorliegen (agrarmeteorologische Stationen). Im einzelnen wurde folgendermaßen verfahren:

- Station Artern: Daten aus GDS;
- Station Neuruppin: Daten aus GDS;
- Station Gardelegen: Daten aus GDS, aber Zeitraum 1.1.1991 bis 31.10.1993 wurde mit aus Stundenwerten berechneten Tagesmaxima gefüllt;
- Station Magdeburg: Daten aus GDS;
- Station Schkeuditz: Daten aus Stundendaten, da der Zeitraum aus GDS mehr als 10 Jahre kürzer ist;
- Station Seehausen: Daten aus Stundendaten, da in GDS nicht vorliegend;
- Station Wittenberg: Daten aus GDS, aber Lückenzeiträume aus agrarmeteorologischen Tageswerten (die im betreffenden Zeitraum sonst identische Werte haben): 21.–23.11.2005; 16.–17.1.2006 und 3.–4.3.2006;
- Station Halle (Stadt): Daten aus Stundendaten, da in GDS nicht vorliegend.

Damit bestand eine Auswahl von 111 vorliegenden Stationen mit Stationsinformationen. Davon hatten 70 Reihen eine Beobachtungsdauer von mindestens 30 Jahren zwischen 1951 und 2014 – diese wurden mit NIKLAS geprüft.

Nach Auswertung der Lückenanzahlen und einer visuellen Prüfung mit TimeView wurden zusätzlich 15 Stationen ausgeschlossen wegen eines nach der Prüfung vorhandenen Lückenanteils von mehr als 3 %.

Es verblieben somit 26 Stationsreihen, die den vorgegebenen Kriterien entsprachen (> 30 Jahre Beobachtung mit < 3 % Lücken).

Tagesminimum

Diese Werte wurden auf Basis von Stundendaten neu berechnet, da es in einer Vorprüfung zu viele Fälle gab, in denen das Tagesminimum größer war als der Mittelwert. Im einzelnen wurden folgende Daten verwendet:

- Station Artern: Daten aus Stundendaten;
- Station Neuruppin: Daten aus GDS (Stundendaten nicht verlässlich);
- Station Gardelegen: Daten aus Stundendaten;
- Station Magdeburg: Daten aus Stundendaten;

- Station Schkeuditz: Daten aus Stundendaten;
- Station Seehausen: Daten aus Stundendaten;
- Station Wittenberg: Daten aus GDS, da Datenreihe über 10 Jahre länger;
- Station Halle (Stadt): Daten aus Stundendaten, da in GDS nicht vorliegend.

Damit bestand eine Auswahl von 111 vorliegenden Stationen mit Stationsinformationen. Davon hatten 70 Reihen eine Beobachtungsdauer von mindestens 30 Jahren zwischen 1951 und 2014 – diese wurden mit NIKLAS geprüft.

Nach Auswertung der Lückenanzahlen und einer visuellen Prüfung mit TimeView wurden zusätzlich 15 Stationen ausgeschlossen wegen eines nach der Prüfung vorhandenen Lückenanteils von mehr als 3 %.

Es verblieben somit 26 Stationsreihen, die den vorgegebenen Kriterien entsprachen (> 30 Jahre Beobachtung mit < 3 % Lücken).

Einzelheiten zu den Ergebnissen der Prüfung finden sich als ausführliche Tabellen auf dem projektbegleitenden Datenträger unter Anhang C.

C.1.3 Niederschlag

Für die Stationen, für die sowohl Stundenwerte als auch Tageswerte des Niederschlages vorlagen, wurde ein Vergleich der Jahressummen bzw. Gesamtsummen über den Beobachtungszeitraum durchgeführt.

C.1.3.1 Tageswerte

Ablauf der Stationsauswahl (Tageswerte):

- Auswahl der vorliegenden Stationen: 380 mit Stationsinformationen, 8 ohne (nicht berücksichtigt);
- NIKLAS-Prüfung der Stationen mit mindestens 50 Jahren Beobachtung zwischen 1951 und 2014, andere wurden nicht berücksichtigt (das sind 148 Stationsreihen);
- Setzen von Lücken für nicht deklarierte Zeiträume ohne Daten (201 Zeiträume), visuelle Prüfung mit TimeView;
- Löschen von 2 unplausiblen Werten aus der Extremwertauswertung;
- Setzen von Lücken für nicht plausible Zeiträume mit 0 mm Niederschlag (6 Zeiträume);
- Verkürzen der Zeiträume von 9 Stationen mit langen Lücken zu Anfang oder zu Ende

⇒ zusätzlich 21 Stationen mit gesetzten Lücken > 3 %, es verbleiben: 211 Stationsreihen > 50 Jahre mit < 3 % Lücken.

C.1.3.2 Zeitlich hochaufgelöste Stationswerte

Die Prüfung der hochaufgelösten Niederschlagsdaten für die Starkniederschlags- und Extremwertstatistik-Analysen ergab keine Auffälligkeiten. Zwei der Stationen wiesen eine für die Trenduntersuchung zu kurze Beobachtungsdauer auf (Lüchow und Braunlage-Hohegeiß).

C.1.4 Relative Feuchte

C.1.4.1 Tageswerte

Es lagen 42 Stationen mit Stationsinformationen und Daten vor, von denen 28 mindestens 30 Jahre Beobachtungsdauer aufwiesen. Es wurden folgende Daten bei mehreren vorliegenden Datenreihen gewählt:

- Auswahl der GDS-Daten (statt agrarmeteorologisch) für die Stationen Artern, Gardelegen, Magdeburg, Neuruppin, Wittenberg, Schkeuditz (Qualität) da die Datenreihen länger waren;
- Auswahl der agrarmeteorologischen Daten für Seehausen (nur dort vorhanden).

Nach der Bearbeitung mit NIKLAS fanden eine Auswertung von Lückenanzahlen und eine visuelle Prüfung mit TimeView statt. Dadurch wurde zusätzlich 3 Stationen wegen eines zu hohen Lückenanteils ausgeschlossen.

Schließlich verblieben 25 Stationsreihen, die den vorgegebenen Kriterien entsprachen (> 30 Jahre Beobachtung mit $< 3\%$ Lücken).

Einzelheiten zu den Ergebnissen der Prüfung finden sich als ausführliche Tabellen auf dem projektbegleitenden Datenträger unter Anhang C.

C.1.5 Sonnenscheindauer

C.1.5.1 Tageswerte

Es lagen 37 Stationen mit Stationsinformationen und Daten vor, von denen 18 mindestens 30 Jahre Beobachtungsdauer aufwiesen.

Es wurden folgende Daten bei mehreren vorliegenden Datenreihen gewählt:

- Auswahl der GDS-Daten (statt agrarmeteorologisch) für die Stationen Artern, Magdeburg, Neuruppin, Wittenberg, da die Datenreihen länger waren;
- Auswahl der agrarmeteorologischen Daten für Seehausen (nur dort vorhanden), Gardelegen (zu lange Lücke in GDS), Schkeuditz (längerer Zeitraum).

Nach der Bearbeitung mit NIKLAS fanden eine Auswertung von Lückenanzahlen und eine visuelle Prüfung mit TimeView statt.

Schließlich verblieben 18 Stationsreihen, die den vorgegebenen Kriterien entsprachen (> 30 Jahre Beobachtung mit < 3 % Lücken).

Einzelheiten zu den Ergebnissen der Prüfung finden sich als ausführliche Tabellen auf dem projektbegleitenden Datenträger unter Anhang C.

C.1.6 Windgeschwindigkeit

C.1.6.1 Tageswerte

Es lagen 48 Stationen mit Stationsinformationen und Daten vor, von denen nur 21 mindestens 30 Jahre Beobachtungsdauer aufwiesen.

Es wurden folgende Daten bei mehreren vorliegenden Datenreihen gewählt:

- Auswahl der GDS-Daten (statt der agrarmeteorologischen) für die Stationen Artern, Gardelegen und Magdeburg, da die Daten insbesondere zwischen 1961 und 1966 plausibler waren;
- Auswahl der agrarmeteorologischen Daten für Neuruppin, Seehausen, Wittenberg (zu lange Lücke) und Schkeuditz (größere Zeitreihenlänge) statt GDS.

Nach der Bearbeitung mit NIKLAS fanden eine Auswertung von Lückenanzahlen und eine visuelle Prüfung mit TimeView statt.

Schließlich verblieben 20 Stationsreihen, die den vorgegebenen Kriterien entsprachen (> 30 Jahre Beobachtung mit < 3 % Lücken).

Einzelheiten zu den Ergebnissen der Prüfung finden sich als ausführliche Tabellen auf dem projektbegleitenden Datenträger unter Anhang C.

C.1.7 Bedeckungsgrad

C.1.7.1 Tageswerte

Es lagen 114 Stationen mit Stationsinformationen und Daten vor, von denen nur 43 mindestens 30 Jahre Beobachtungsdauer aufwiesen. Es fanden ausschließlich eine Auswertung von Lückenanzahlen und eine visuelle Prüfung mit TimeView statt.

Schließlich verblieben 19 Stationsreihen, die den vorgegebenen Kriterien entsprachen (> 30 Jahre Beobachtung mit < 3 % Lücken). Einzelheiten zu den Ergebnissen der Prüfung finden sich als ausführliche Tabellen auf dem projektbegleitenden Datenträger unter Anhang C.

C.1.8 Windrichtung

C.1.8.1 Tageswerte

Für die Windrichtung lagen keine Tageswerte vor.

C.1.8.2 Stundenwerte

Es lagen 18 Stationen mit Stationsinformationen und Daten vor, von denen nur 9 mindestens 30 Jahre Beobachtungsdauer aufwiesen.

Es fanden ausschließlich eine Auswertung von Lückenanzahlen und eine visuelle Prüfung mit TimeView statt.

Schließlich verblieben 9 Stationsreihen, die den vorgegebenen Kriterien entsprachen (> 30 Jahre Beobachtung mit < 3 % Lücken).

Einzelheiten zu den Ergebnissen der Prüfung finden sich als ausführliche Tabellen auf dem projektbegleitenden Datenträger unter Anhang C.

C.1.9 Übersicht über eventuell nachzuarbeitende Stationen

Es wurde eine Tabelle mit Stationen erstellt, die in der Mitte der Reihe eine Lücke aufweisen. In solchen Reihen wird die Möglichkeit, Trends von mindestens 30 (bei Niederschlagsstationen 50) Jahren Länge zu bestimmen, vereitelt. Es könnte sein, dass es noch nicht bearbeitete analoge Datenarchive gibt, aus denen die Reihen vervollständigt werden könnten.

Die Information zu den Datenlücken existiert in Form von Tabellenkalkulationsdateien als Teilergebnis der Arbeiten im AP 2. Mit Hilfe von Einfärbungen wurde dort markiert, ob Monatsmittel einer Größe gebildet werden konnten. Dabei kam ein vierstufiges Beurteilungssystem zum Einsatz

1. QF3 – Reihe ist in dem Monat vollständig (grüne Markierung);
2. QF2 – bei der Reihe fehlen im untersuchten Monat maximal 2 Tage (gelbe Markierung)
3. QF1 – bei der Reihe fehlen im untersuchten Monat maximal 5 Tage (Fett-
druck der Zahl)
4. QF0 – bei der Reihe fehlen im untersuchten Monat mehr als 5 Tage, oft fehlt der gesamte Monat (rote Markierung)

In Abb. C.2 ist ein Teil einer solchen Tabellendarstellung abgebildet. Zur Erläuterung: Jede Zeile stellt ein Jahr dar. Die Spalten 1–12 zeigen (mit der oben eingeführten Farbcodierung) den Vollständigkeitszustand für die einzelnen Monate an. Die restlichen Spalten zeigen dies für die Jahreszeiten, die beiden Vegetationsperioden und das gesamte Jahr an. Ein solcher Block existiert in der Datei für jede Station. Deutlich erkennbar ist der relativ späte Beginn der Aufzeichnungen sowie die Datenlücken in den 1990er Jahren bei der Station Menz. Wie weitere Analysen ergeben, verhindern diese Lücken, dass an der Station Menz Trends von 30 oder mehr Jahren Länge gebildet werden können.

Diese Tabellenkalkulationsdateien werden mit den Projektergebnissen auf dem projektbegleitenden Datenträger unter Anhang C ausgeliefert.

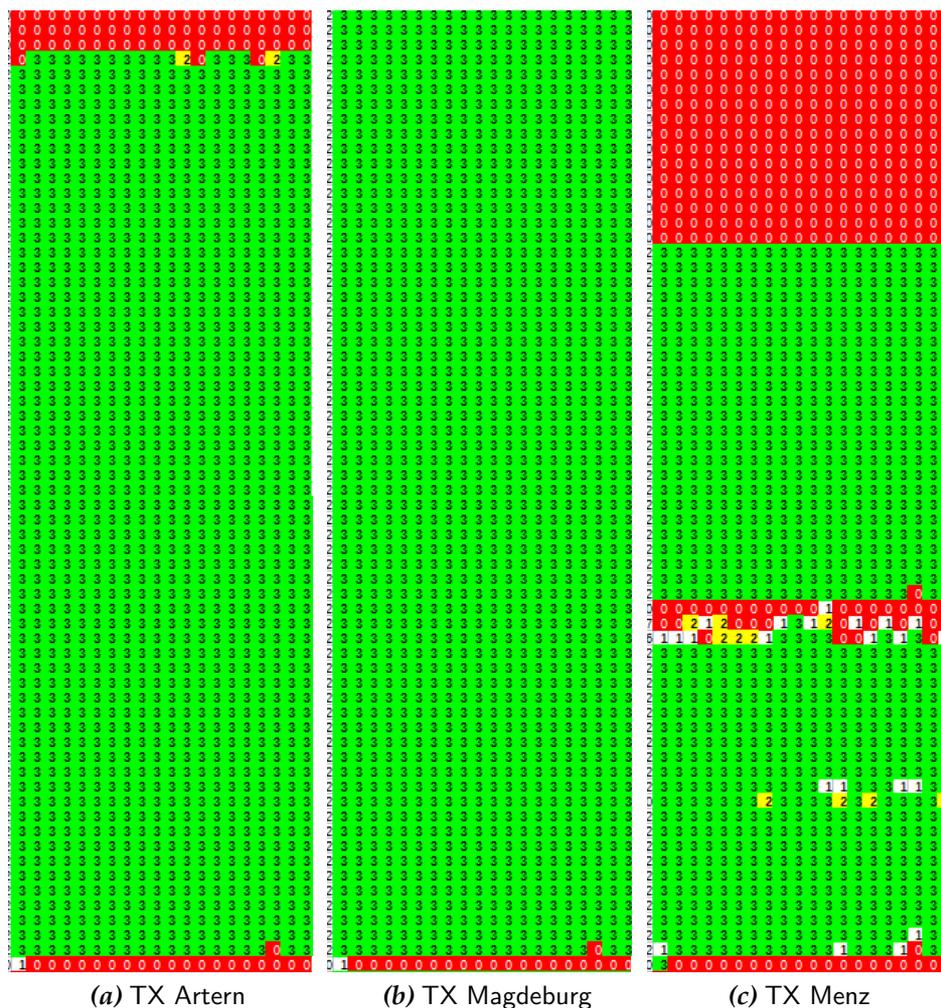


Abbildung C.2: Screenshots von Darstellungen der Vollständigkeit von Stationszeitreihen – Erläuterungen im Text.

C.2 NIKLAS

C.2.1 Software

NIKLAS ist ein Programm zum Prüfen von Stationsmessungen der Klimaparameter Niederschlag, Lufttemperatur, Taupunkttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer, Luftdruck und Windgeschwindigkeit.

Die Entwicklung des Programms NIKLAS wurde im Rahmen des Interreg III B Projektes TIMIS flood³⁾ durchgeführt und mit EU-Strukturmitteln gefördert.

Nähere Details zum Programm und den implementierten Prüfroutinen finden sich in der fachlichen Dokumentation (HYDRO & METEO GMBH & CO. KG, 2007a) und in der Softwaredokumentation (HYDRO & METEO GMBH & CO. KG, 2007b).

³⁾<http://www.timisflood.net/>

Für folgende Messparameter wurden im Auftrag Prüfungen eingerichtet und durchgeführt:

- Lufttemperatur 2 m ü. Grund [°C]
- Relative Luftfeuchte 2 m ü. Grund [%]
- Windgeschwindigkeit 10 m ü. Grund [m/s]
- Sonnenscheindauer [dezimale Stunde (oder Anteil an einer Stunde)]
- Niederschlag 1 m ü. Grund [mm]

Dabei wurde für den *Parameter Niederschlag* eine Grenzwertprüfung, eine Prüfung konstanter Werte sowie eine Prüfung auf räumliche Konsistenz durchgeführt. Für die Grenzwertprüfung wurde nach folgenden Auffälligkeiten gesucht:

- In 60 Minuten eine Niederschlagsmenge von 40 mm;
- in 1440 Minuten eine Niederschlagsmenge von 100 mm;
- in einem Monat eine Niederschlagsmenge von 400 mm.

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:

- 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

Die gewählten Prüfungen je Parameter sind in Abb. C.3 dargestellt. Tab. C.2 fasst die verwendeten Prüfparameter zusammen.

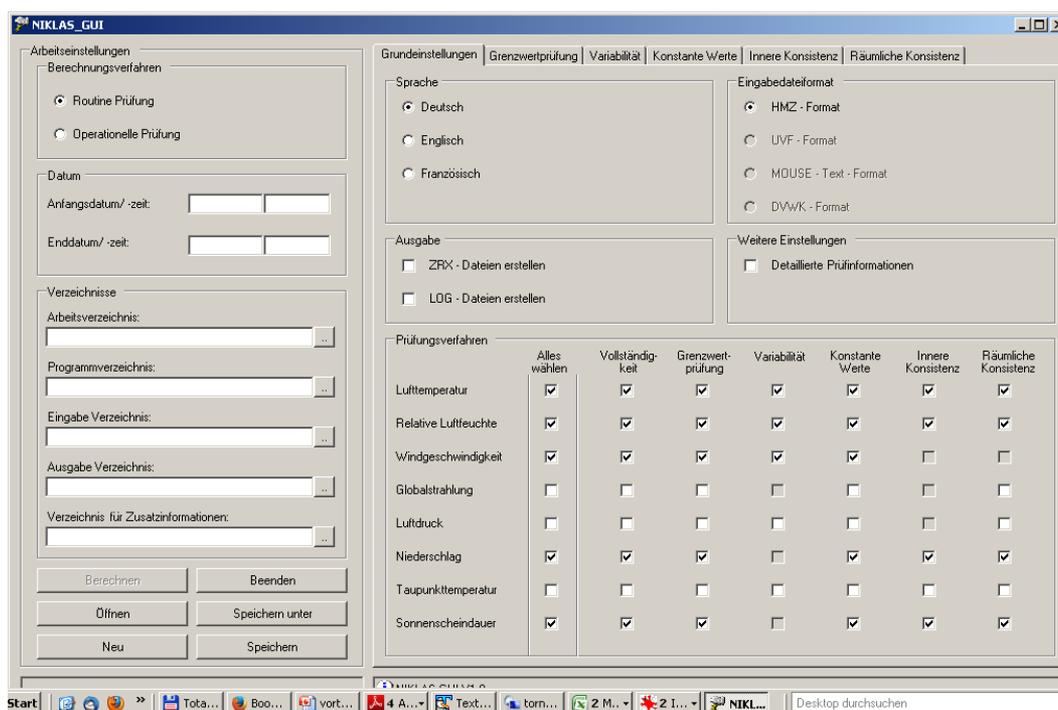


Abbildung C.3: Grafische Oberfläche von NIKLAS mit gewähltem Prüfungen für die vorliegenden Stationsdaten unterschiedlicher Parameter.

Tabelle C.2: Prüfparameter für NIKLAS

Prüfparameter	Niederschlag	Rel. Feuchte	Temperatur	Wind	Sonne
Grenzwert Minimum	0 mm	5	-40 °C	0 m/s	0
Grenzwert Maximum		100	50 °C	60 m/s	1
Grenzwert Stunde	60 mm				
Grenzwert Tag	100 mm				
Grenzwert Monat	400 mm				
Variabilität	80 % / Stunde 10,5 °C / Stunde				
konstante Werte	4	12 / 36	5	12 / 24	4
Innere Konsistenz	ja	ja			
Räumliche Konsistenz	ja	ja	ja		ja
Anzahl Stationen	4				
Abstand Höhe	200 m				
Abstand Distanz	40 km				
Wert: Mittel	5 mm				
Wert: Min	0,6 mm				
Wert: Max	1,5 mm	20 %	3 °C		20 %

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 Per-

sonal. So wurden alle gefundenen Auffälligkeiten anschließend ereignisweise mit Hilfe von geeigneten Nachbarstationen geprüft und die Ereignisse wurden verbessert, verworfen oder auch als plausibel bewertet und so belassen.

In Tab. C.3 ist wiedergegeben, wie viele Stationsreihen pro meteorologische Standardgröße mit NIKLAS bearbeitet wurden und wie viele danach für die Analysen in den AP 2 und 3 übergeben wurden, siehe dazu auch Abb. 4.1 im Hauptteil auf S. 20.

Tabelle C.3: Anzahl der bearbeiteten und zur weiteren Analyse im Projekt freigegebenen Stationszeitreihen (in täglicher Auflösung) je meteorologischer Parameter. Die Spalte „Prüfart“ gibt an ob die Prüfungen mit NIKLAS (N) oder visuell (V) vorgenommen wurden.

<i>Parameter</i>	<i>Input für NIKLAS</i>	<i>Output von NIKLAS</i>	<i>Prüfart</i>
<i>Maximumtemperatur (TX)</i>	41	26	N
<i>Mitteltemperatur (TM)</i>	41	27	N
<i>Minimumtemperatur (TN)</i>	41	25	N
<i>Relative Feuchte (RF)</i>	41	24	N
<i>Niederschlag (RR)</i>	388	206	N
<i>Sonnenscheindauer (SD)</i>	41	18	N
<i>Bedeckungsgrad (NN)</i>	41	19	V
<i>Windgeschwindigkeit (FF)</i>	41	20	N
<i>Windrichtung (DD)</i>	41	9	V

C.2.2 Ergebnisse

C.2.2.1 Übersicht

Für die Auswahl der Stationen für die weitere Bearbeitung war zunächst erforderlich, dass sie eine Länge von mindestens 20 Jahren (Niederschlag: 50 Jahre) aufwiesen und ihr Beobachtungsende im Jahr 2000 oder später lag. Damit ergaben sich die in Tab. C.4 dargestellten Reihenanzahlen für die verschiedenen Parameter.

NIKLAS prüft die Parameter für jede Station. Dabei entstehen Auswertetabellen wie in Abb. C.4 dargestellt. Die dort gefundenen Auffälligkeiten werden im Anschluss manuell überprüft und endgültig als plausibel oder unplausibel bewertet.

Tabelle C.4: Anzahl der bearbeiteten und zur weiteren Analyse im Projekt freigegebenen Stationszeitreihen (in täglicher, ggfs auch stündlicher oder 5-minütiger Auflösung) je meteorologischer Parameter. Die Spalte „Prüfart“ gibt an ob die Prüfungen mit NIKLAS (N) oder visuell (V) vorgenommen wurden.

Parameter	Auflösung	Anzahl der Stationen	Prüfart
Maximumtemperatur (TX)	Tag	41	N
Mitteltemperatur (TM)	Tag	41	N
Minimumtemperatur (TN)	Tag	41	N
Temperatur (TE)	Stunde	19	N
Relative Feuchte (RF)	Tag	41	N
Relative Feuchte (RF)	Stunde	19	N
Niederschlag (RR)	Tag	388	N
Niederschlag (RR)	Stunde	11	N
Niederschlag (RR)	5 Minuten	8	N
Sonnenscheindauer (SD)	Tag	41	
Sonnenscheindauer (SD)	Stunde	18	N
Bedeckungsgrad (NN)	Tag	41	V
Bedeckungsgrad (NN)	Stunde	18	V
Windgeschwindigkeit (FF)	Tag	41	N
Windgeschwindigkeit (FF)	Stunde	18	N
Windrichtung (DD)	Tag	41	V
Windrichtung (DD)	Stunde	18	V

TextPad - S:\projekt\work\out\logs\temp_0_201504011005.log

temp_0_201504011005.log

TIME RANGE ALL DATA
01.01.1961 00:00 - 31.12.2014 23:00

NO_STATION_INFO
NO_KEY_INFO

Station	Parameter	Von - Bis	Dauer	Wert(e)	FehlerID	Bemerkung
RECORDS_WITH_WARNINGS						
00198	IT	18.07.1983 16:01 - 18.07.1983 17:00	0:01:00	28.700 / 16.400	25	Variabilität (al)
00198	IT	04.07.1994 15:01 - 04.07.1994 16:00	0:01:00	30.800 / 19.800	25	Variabilität (al)
00198	IT	06.01.2008 22:01 - 06.01.2008 23:00	0:01:00	2.700 / -9.400	25	Variabilität (al)
00198	IT	06.08.2013 16:01 - 06.08.2013 17:00	0:01:00	28.500 / 16.500	25	Variabilität (al)
01544	IT	10.07.2002 16:01 - 10.07.2002 17:00	0:01:00	25.400 / 14.400	25	Variabilität (al)
01544	IT	08.06.2003 16:01 - 08.06.2003 17:00	0:01:00	29.800 / 18.200	25	Variabilität (al)
02932	IT	03.07.1982 09:01 - 03.07.1982 10:00	0:01:00	16.700 / 28.500	24	Variabilität (al)
02932	IT	20.06.2002 16:01 - 20.06.2002 17:00	0:01:00	27.800 / 16.500	25	Variabilität (al)
02932	IT	21.07.2003 13:01 - 21.07.2003 14:00	0:01:00	31.900 / 20.800	25	Variabilität (al)
02932	IT	06.01.2008 22:01 - 06.01.2008 23:00	0:01:00	2.800 / -9.400	25	Variabilität (al)
03126	IT	04.06.1984 15:01 - 04.06.1984 16:00	0:01:00	28.000 / 15.200	25	Variabilität (al)
03126	IT	10.07.2002 15:01 - 10.07.2002 16:00	0:01:00	29.000 / 17.300	25	Variabilität (al)
03126	IT	05.06.2003 13:01 - 05.06.2003 14:00	0:01:00	28.900 / 17.600	25	Variabilität (al)
03126	IT	26.03.2010 16:01 - 26.03.2010 17:00	0:01:00	19.400 / 8.800	25	Variabilität (al)
04642	IT	21.07.1992 16:01 - 21.07.1992 17:00	0:01:00	32.700 / 21.600	25	Variabilität (al)
04642	IT	17.05.2000 11:01 - 17.05.2000 12:00	0:01:00	25.700 / 19.100	25	Variabilität (al)
04642	IT	10.07.2002 16:01 - 10.07.2002 17:00	0:01:00	29.700 / 18.400	25	Variabilität (al)
04642	IT	25.06.2005 10:01 - 25.06.2005 11:00	0:01:00	31.900 / 20.200	25	Variabilität (al)
05629	IT	10.07.2002 16:01 - 10.07.2002 17:00	0:01:00	27.400 / 16.500	25	Variabilität (al)
05629	IT	25.06.2005 11:01 - 25.06.2005 12:00	0:01:00	31.900 / 19.300	25	Variabilität (al)
05629	IT	15.07.2005 15:01 - 15.07.2005 16:00	0:01:00	30.700 / 19.900	25	Variabilität (al)
RECORDS_WITH_WARNINGS						
RECORDS_WITH_ERRORS						
RECORDS_WITH_NODATA						
04642	IT	01.01.1961 00:00 - 31.12.1975 23:00	5477:23:00	-777	1	Datenlücke

Abbildung C.4: Beispiel für eine LOG-Datei einer Prüfung des Parameters Temperatur.

C.2.2.2 Parameter Lufttemperatur

Die Ergebnisse in den LOG-Dateien finden sich für den Parameter

- Temperaturtagesmaximum TX: Anhang_c/tabellen/log_tx.tw.log
- Temperaturtagesminimum TN: Anhang_c/tabellen/log_tn.tw.log
- Temperaturtagesmittelwert TM: Anhang_c/tabellen/log_tm.tw.log

auf dem projektbegleitenden Datenträger.

Erläuterungen zum Aufbau und zu den Inhalten der LOG-Datei finden sich in der NIKLAS-Dokumentation – dieser Bericht ([HYDRO & METEO GMBH & CO. KG, 2007a](#)) ist zusätzlich auf dem projektbegleitenden Datenträger verfügbar.

Die Folgerungen für die Stationen finden sich in der Tabelle KlimaST_stationen_temp_bericht.xlsx in anhang_c/tabellen auf dem projektbegleitenden Datenträger.

C.2.2.3 Parameter Niederschlag

Für den Parameter Niederschlag wurden Kriterien für die Bewertung der von NIKLAS gefundenen Auffälligkeiten festgelegt.

Für gefundene Extremwerte waren dies:

- in Ordnung, wenn 3 Stationen eine Schwellenüberschreitung zeigen;
- in Ordnung, wenn TimeView zeigt, dass in der Umgebung fast ebenso hohe Werte waren;
- in Ordnung, wenn der Fall im Sommer auftrat und mindestens zwei weitere Stationen mit deutlichem Niederschlag (mindestens 30 %) an diesem Tag vorhanden waren;
- in Ordnung bei Monatswerten: Ermittlung durch visuellen Vergleich mit Nachbarstationen.

Es gab bei 154 Auffälligkeiten genau einen Wert, der als unplausibel gelöscht wurde (zu finden in der mit ausgelieferten Tabelle `pruefung_extrema.txt`).

Bei der räumlichen Prüfung der Tageswerte und Monatswerte wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

- Zu kurze Stationenszeitreihen (< 50 Jahre) wurden nicht weiter betrachtet und von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen.
- Tageswerte im Sommer, die zu hoch waren, wurden als möglich (ok) bewertet.
- Monatswerte, die zu niedrig waren (Monatswerte < 10 mm), wurden einer visuellen Prüfung unterzogen.
- Monatswerte, die zu hoch waren, aber Niederschlagssummen < 100 mm aufwiesen (unabhängig von der Jahreszeit), wurden als möglich (ok) bewertet.

Es gab bei 872 Auffälligkeiten 9 Werte, die als unplausibel gelöscht wurden (zu finden in der mit ausgelieferten Tabelle `pruefung-raeumlich.txt`).

Die Ergebnisse der Prüfung sind in der Excel-Tabelle `pruefung-niederschlag.xlsx` festgehalten. Blatt 1 enthält summarisch das Ergebnis je Station und Blatt 2 für jede einzelne Prüfung an jeder Station die zugehörige Dokumentation.

C.2.2.4 Parameter relative Luftfeuchte

Die Ergebnisse in den LOG-Dateien finden sich für diesen Parameter in `anhang_c/tabellen/log_rel_hum_tw0.log` auf dem projektbegleitenden Datenträger.

Erläuterungen zum Aufbau und zu den Inhalten der LOG-Datei finden sich in der NIKLAS-Dokumentation – dieser Bericht ([HYDRO & METEO GMBH & CO. KG, 2007a](#)) ist zusätzlich auf dem projektbegleitenden Datenträger verfügbar.

Die Folgerungen für die Stationen finden sich in der Tabelle `KlimaST_stationen_feuchte_bericht.xlsx` in `anhang_c/tabellen` auf dem projektbegleitenden Datenträger.

C.2.2.5 Parameter Windgeschwindigkeit

Die Ergebnisse in den LOG-Dateien finden sich für diesen Parameter in `anhang_c/tabellen/log_wind_tw.log` auf dem projektbegleitenden Datenträger.

Erläuterungen zum Aufbau und zu den Inhalten der LOG-Datei finden sich in der NIKLAS-Dokumentation – dieser Bericht ([HYDRO & METEO GMBH & CO. KG, 2007a](#)) ist zusätzlich auf dem projektbegleitenden Datenträger verfügbar.

Die Folgerungen für die Stationen finden sich in der Tabelle `KlimaST_stationen_wind_bericht.xlsx` in `anhang_c/tabellen` auf dem projektbegleitenden Datenträger.

C.2.2.6 Parameter Sonnenscheindauer

Die Ergebnisse in den LOG-Dateien finden sich für diesen Parameter in `anhang_c/tabellen/log_sonne_tw0.log` auf dem projektbegleitenden Datenträger.

Erläuterungen zum Aufbau und zu den Inhalten der LOG-Datei finden sich in der NIKLAS-Dokumentation – dieser Bericht ([HYDRO & METEO GMBH & CO. KG, 2007a](#)) ist zusätzlich auf dem projektbegleitenden Datenträger verfügbar.

Die Folgerungen für die Stationen finden sich in der Tabelle `KlimaST_stationen_sonne_bericht.xlsx` in `anhang_c/tabellen` auf dem projektbegleitenden Datenträger.

C.2.2.7 Parameter Bedeckungsgrad

Es fand ausschließlich eine visuelle Prüfung statt. Die Prüfergebnisse für die Stationen finden sich in der Tabelle `KlimaST_stationen_bedeckung_bericht.xlsx` in `anhang_c/tabellen` auf dem projektbegleitenden Datenträger.

C.2.2.8 Parameter Windrichtung

Es fand ausschließlich eine visuelle Prüfung statt. Die Prüfergebnisse für die Stationen finden sich in der Tabelle `KlimaST_stationen_windrichtung_bericht.xlsx` in `anhang_c/tabellen` auf dem projektbegleitenden Datenträger.

C.3 Prüfung phänologischer Daten

C.3.1 Datenaufbereitung für die Analysen

Um einen homogenen Datensatz aus allen Datenquellen zu erhalten, wurden folgende Schritte durchlaufen: Formale Prüfung, grobe Grenzwertprüfung und eine statistische Überprüfung der Streuung der Phasen. Dabei wird bei allen Schritten überprüft, ob die Abfolge der einzelnen phänologischen Phasen korrekt ist (s. Abb. C.5).

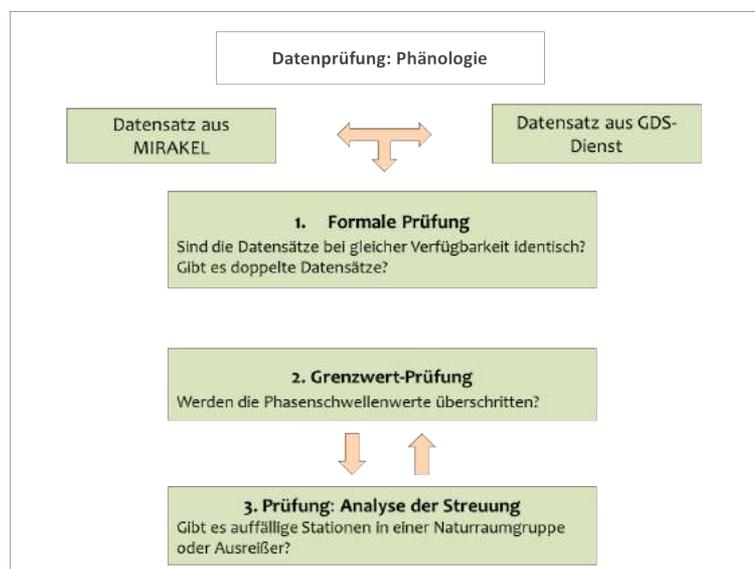


Abbildung C.5: Ablauf für die Prüfung der Phänologie-Daten.

C.3.2 Datenprüfung

C.3.2.1 Überprüfung, ob die Datensätze bei gleicher Verfügbarkeit identisch sind

In 55 Fällen gibt es bei einer übereinstimmenden Datenverfügbarkeit unterschiedliche Phasenwerte. Dabei wurde geprüft:

- Zeigen die Qualitätsbytes (QB), dass die Daten geprüft und korrekt sind?
- Zeigen beide Qualitätsbytes, dass die Daten ungeprüft und korrekt sind?
- Unterscheiden sich die Aussagen der QBs

Wenn z.B. ein Qualitätsbyte darauf hinweist, dass der Wert geprüft und falsch ist, ist es gut möglich, dass in einem Datensatz schon der bereits korrigierte Wert enthalten ist. In diesem Fall wird der korrekte Wert übernommen, wenn er plausibel erscheint. Sind beide Werte als korrekt eingestuft, wird durch einen räumlichen Abgleich ermittelt, welcher Wert eine höhere Plausibilität besitzt.

<i>Schneeglockchen</i>	Stations_ID	Jahr	MIRAKEL Tag im Jahr	Qualitätsbyte	DWD-GDS Tag im Jahr	Qualitätsniveau	Qualitätsbyte	Kommentar
2 (127/5)	13322	1956	270	9	-95	1	1	Werte ok, Aufzeichnung verschieden
2 (127/5)	13172	1965	75	0	45	1	1	Wert aus MIRAKEL übernommen
2 (127/5)	13223	1952	127	9	53	1	1	Wert aus GDS übernommen

Abbildung C.6: Tabellarische Beispieldarstellung für die Blüte des Schneeglöckchens.

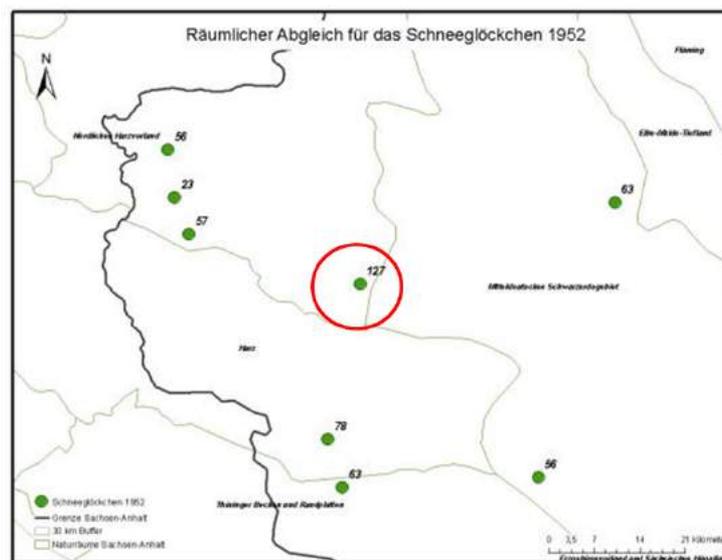


Abbildung C.7: Räumlicher Abgleich für die Phasenwerte 127 und 53 für die Blüte des Schneeglöckchens.

Im Fall des Beispiels aus Abb. C.6 und C.7 geht eindeutig hervor, dass der Wert 53 plausibler ist als der Wert 127, da er auch in dieser Größenordnung in

der Umgebung vorkommt. In manchen Fällen ist der Unterschied nicht so klar. In solchen Fällen werden folgende Sachverhalte zusätzlich geprüft:

- Hat die Station eine besondere räumliche Lage, z.B. eine besondere Höhenlage, die sich von der Umgebung unterscheidet?
- Wie sieht der Phaseneintritt bei parallel vorhandenen Phasen aus?
- Wie sieht der Phaseneintritt bei den anderen Phasen an der jeweiligen Station aus?

Weichen die Werte nur einen Tag voneinander ab, wird der Wert aus dem Datenbestand von Sachsen-Anhalt übernommen. Ist zusätzlich zum Jahresmelder auch der Sofortmelder vorhanden, wurde auch dieser Wert zur Prüfung hinzugezogen. Erläuterungen der Begriffe *Jahresmelder* und *Sofortmelder* finden sich in Abschnitt 2.1.4 des Berichtshauptteils.

C.3.2.2 Dopplungen im Datenbestand von Sachsen-Anhalt

In einigen Fällen (insgesamt 167 Fälle) gibt es Dopplungen in den Datensätzen. Betroffen waren die Jahre 1952 bis 1960. Bei der Prüfung wurde auch darauf geachtet, ob es an einer Station eventuell unterschiedliche Phänologie-Beobachtungsstandorte gibt, die eine Abweichung erklären würden. Das war jedoch bei keiner der Dopplungen der Fall.

Folgende Fälle wurden bereinigt:

- Datenreihen kommen komplett doppelt vor – doppelte Datenreihe wird gelöscht.
- Datenreihen kommen doppelt vor, QBs sind aber unterschiedlich, zeigen aber beide an, dass der Wert geprüft und korrekt ist (Möglichkeit zwischen 8 oder 9) – eine der doppelten Datenreihe wird gelöscht.
- Datenreihen kommen doppelt vor, aber Phasenwerte unterscheiden sich. Falls in diesem Fall parallel Werte vom CDC-GDS Portal verfügbar waren, wurde dieser (5-mal) und ansonsten der plausiblere Wert übernommen (1-mal).

C.3.2.3 Plausibilitätsprüfung mittels fester Grenzwerte

Da alle Daten eine Vorprüfung durch den Deutschen Wetterdienst durchlaufen haben, wird im ersten Schritt nur eine vereinfachte Grenzwertprüfung durchgeführt und getestet, ob sich die Phasenwerte in einem plausiblen Rahmen bewegen. Der Grenzwert orientiert sich an besonders extremen Durchschnittswerten, die in Deutschland seit 1951 aufgetreten sind. Da es aufgrund von klimatischen Unterschieden an den Standorten zu größeren räumlichen Abweichungen kommen kann, bedeutet eine Überschreitung des Grenzwertes nicht unbedingt, dass der Wert auch unplausibel ist. Tab. C.5 gibt einen Überblick über die verwendeten Phasengrenzwerte.

Tabelle C.5: Übersicht der verwendeten Grenzwerte für die einzelnen Phasen.

<i>Jahreszeit</i>	<i>Leitphasen</i>	<i>Kennung</i>	<i>Grenzwerte</i>
<i>Vorfrühling</i>	Schneeglöckchen (Blüte)	2	< 10 und > 120
<i>Erstfrühling</i>	Sal-Weide (Blüte)	4	< 30 und > 130
<i>Erstfrühling</i>	Löwenzahn (Blüte)	116	< 60 und > 140
<i>Vollfrühling</i>	Stieleiche (Blattentfaltung)	13	< 90 und > 150
<i>Frühsommer</i>	Schwarzer Holunder (Blüte)	18	< 120 und > 180
<i>Hochsommer</i>	Sommer-Linde (Blüte)	64	< 150 und > 210
<i>Spätsommer</i>	Heidekraut (Blüte)	65	< 180 und > 270
<i>Frühherbst</i>	Schwarzer Holunder (Fruchtreife)	67	< 210 und > 270
<i>Vollherbst</i>	Stieleiche (Fruchtreife)	72	< 240 und > 300
<i>Spätherbst</i>	Stieleiche (Blattverfärbung)	73	< 270 und > 310
<i>Winter</i>	Stieleiche (Blattfall)	226	< 270 und > 330

Die Prüfkriterien sind:

- Räumlicher Abgleich: Für die jeweilige Naturraumgruppe wird geschaut, ob die Phasenwerte in einem ähnlichen Bereich liegen (vgl. Abb. C.8). Dabei wird auch die Höhe von einzelnen Stationen berücksichtigt, wie z.B. bei der Station Brocken, die tendenziell spätere Phaseneintritte aufweist.
- Ablauf der Phasen: Um plausible Verzögerungen oder späte Eintritte der Phasen zu berücksichtigen, wird parallel der Ablauf der Phasen in einem Jahr an der jeweiligen Station geprüft (vgl. Abb. C.9).
- Vergleich mit Parallelphasen: Für die Phasen, für die auch Parallelphasen verfügbar sind, kann hier ein Abgleich erfolgen (z.B. das Schneeglöckchen und die Hasel).
- Qualitätsbytes: Die Angabe in den Qualitätsbytes (QBs) des Deutschen Wetterdienstes wird als weiteres Entscheidungskriterium für die Prüfung verwendet.

Die Prüfung mit festen Grenzwerten war nach ersten Analysen nicht ausreichend. Daher wurde eine Nachprüfung durchgeführt und die Streuung innerhalb der Phasen für eine Naturraumgruppe für jeweils ein Jahr untersucht.

C.3.2.4 Plausibilitätsprüfung mittels statistischer Streuung

Für diese Prüfung wird analysiert, wie groß die Streuung innerhalb eines Jahres und einer Naturraumgruppe ist und ob es Streuungswerte gibt, die besonders auffällig sind. Dafür wurden so genannte Quantil-Quantil-Plots erstellt, die z.B.

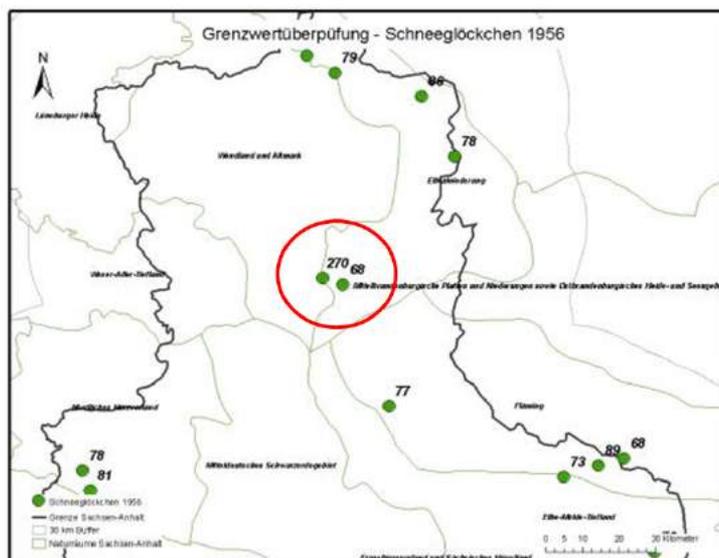


Abbildung C.8: Grenzwertüberprüfung am Beispiel des Schneeglöckchens für einen Beispielfall aus dem Jahr 1956.

		Vorfrühling			Erstfrühling		Vollfrühling	Frühsommer	
Schneeglockchen	Stations_ID	Hasel	Schneegl.	Sal-Weide	Forsythie	Löwenzahn	Eiche (Blattentf.)	Holunder (Blüte)	Robinie (Blüte)
2 (127/5)	13322	116	270	115	x	122	142	176	145
Hochsommer	Spätsommer	Spätsommer	Frühherbst	Vollherbst		Spätherbst		Winter	
Linde (Blüte)	Eberesche (Fruchtr.)	Heidekraut	Holunder (Fruchtr.)	Roskastanie	Eiche (Fruchtr.)	Eiche (Blattv.)	Eberesche (Blattf.)	Eiche (Blattfall)	
189	x	222	263	271	267	290	x	298	

Abbildung C.9: Beispielabbildung einer Tabelle zur Phasenabfolge an der Station Cröchern-Bläetz im Naturraum Elbtalniederung (in Abb. C.8 markiert).

auch dafür verwendet werden, um zu untersuchen, ob eine Stichprobe normalverteilt ist (vgl. Abb. C.10). Diese Methode vergleicht eine theoretische normalverteilte Stichprobe mit der zu prüfenden Stichprobe. Liegt eine Normalverteilung vor, werden alle Paare in einer Linie oder einer annähernden Linie aufgetragen. An der y-Achse ist zudem ersichtlich, wie stark die Werte streuen und ob es Werte gibt die sich deutlich abheben, wie in Abb. C.10 (c) und (d) erkennbar. Anhand dieser Graphiken wurden die Daten auf Plausibilität überprüft.

Im Idealfall verhalten sich die Phasenwerte wie in Abb. C.10 (a). Hier sind die Daten annähernd normalverteilt und streuen gleichmäßig. Auffällig sind Jahre, in denen die Streuung sehr hoch oder ungleichmäßig ist. Als Prüfkriterium werden hier 30 Tage festgelegt.

Abb. C.10 (d) ist besonders auffällig. Die Streuung ist dabei zwar ungleichmäßig, aber sie beträgt 30 Tage und somit müssen die Werte nicht zwangsläufig unplausibel sein, nur weil sie wie in diesem Fall nicht normalver-

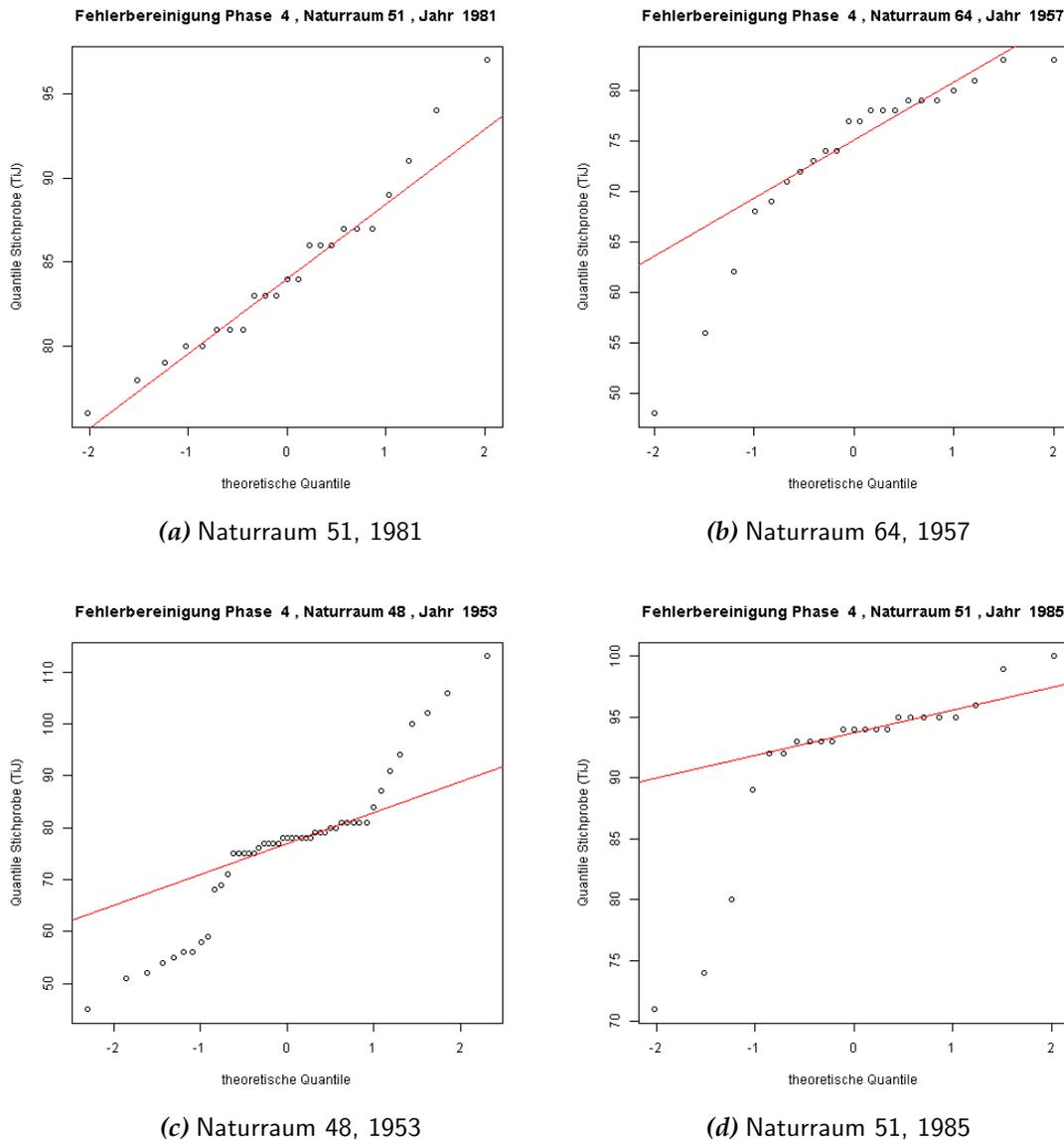


Abbildung C.10: Beispiele für die Prüfung mittels Quantil-Quantil-Plots. Phase: Sal-Weide (Blüte); (a) Thüringer Becken (NRG 48), 1981; (b) Lüneburger Heide 1957; (c) Thüringer Becken (NRG 48), 1953; (d) Nördliches Harzvorland, 1985

teilt sind. Wird ein Wert als potentiell falsch deklariert, wird er nach folgenden Maßstäben danach geprüft:

- Bewegt sich der Wert im Rahmen des Phasenablaufes?
Analog zur Grenzwertprüfung wird die Abfolge der Phasen überprüft und gelöscht, wenn er vor einer anderen Phase beginnt oder z.B. wie bei den Frühlingsphasen mit allen andere Phasen gleichzeitig beginnt.
- Wie hoch ist der Abstand zu den anderen Phasenwerten?
Ist der Abstand zwischen dem Ausreißer und allen anderen Phasen größer

als 20 Tage, wird er als kritisch eingestuft. Dieses Kriterium wird vor allem auch dann verwendet, wenn es keine Vergleichsphasen für den Zeitraum gibt. Ein Beispiel dafür findet sich in Abb. C.10 (b). Hier beträgt die Streuung 60 Tage mit einem Ausreißer bei Tag 112. Dieser Wert wurde entfernt, da er 30 Tage später einsetzt als alle anderen Phasen.

Stationen, die für bestimmte Leitphasen einen auffällig frühen oder späten Phaseneintritt aufwiesen, wurden für diese Phase aus der Betrachtung ausgeschlossen. Das kann ein Hinweis darauf sein, dass die Stationen eine besondere klimatische Lage haben und somit nicht repräsentativ für die entsprechende Naturraumgruppe sind.

Es gibt dennoch auch den Fall, dass eine hohe oder auffällige Streuung vorliegt, aber mit den Prüfkriterien nicht eindeutig geklärt werden kann, ob ein Wert plausibel ist oder nicht, wie Abb. C.10 (c) zeigt. Hier werden keine Daten entfernt. Für die spätere Aggregation der einzelnen Phasen auf die Ebene der Naturraumgruppen ist es daher sinnvoll den Median zu verwenden, da er robuster gegenüber noch potentiell vorhandenen Ausreißern ist. Alle Daten, die für nicht plausibel erachtet wurden, werden aus den Analysen ausgeschlossen. Eine vollständige Dokumentation der Datenprüfung ist auf dem projektbegleitenden Datenträger enthalten. Eine tabellarische Darstellung im Hauptteil des Berichts (Tab. 4.1 auf S. 23) gibt einen Überblick über den Datenbestand nach der Prüfung.

C.3.2.5 Vergleich Datenbestand mit und ohne Sofortmelder

Bei der Datenaufbereitung wurde für die Jahre, in denen kein Jahresmelder verfügbar ist, Daten aus dem Sofortmelder-Programm verwendet⁴⁾ und der Datenbestand so etwas erweitert. Lücken gibt es vor allem im Jahr 2014. Die Phaseneintritte aus dem Sofortmelderprogramm können tendenziell etwas früher liegen, da es eine etwas andere Beobachtungsanleitung gibt. Das Vermischen der Datensätze kann daher zu veränderten Trends führen. Um dies auszuschließen, wird die Trendentwicklung für den Datenbestand ohne Daten aus dem Sofortmelder getestet.

Der Vergleich der Trendentwicklung für den Datenbestand mit und ohne Sofortmelder, zeigt allerdings nur geringe Abweichungen. Am stärksten wirkt sich das Fehlen der Daten im Jahr 2014 aus. Es ist eine Eigenschaft von linearen Trends, die mit der verbreitet verwendeten Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden, dass diese relativ sensitiv gegenüber dem Verhalten des untersuchten Parametern am Anfang und am Ende der Kurve sind. Die Abweichungen beschränken sich, bis auf Einzelfälle, auf Änderungen in den Nachkommastellen. Die stärkste Abweichung ist in der Phase Sal-Weide mit einer

⁴⁾Die Unterschiede zwischen Jahresmeldern und Sofortmeldern werden in Abschnitt 2.1.4 des Berichtshauptteils erläutert.

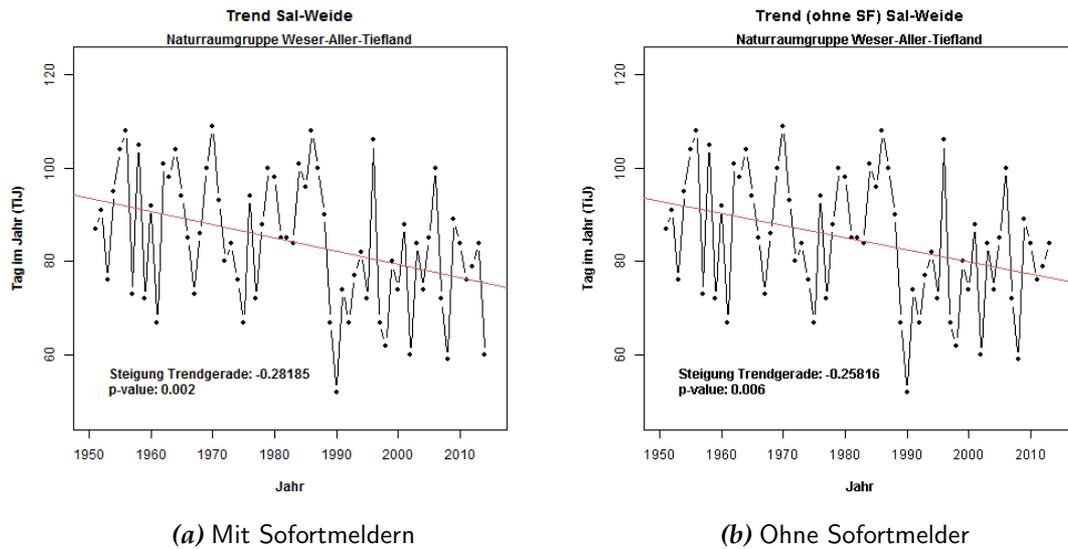


Abbildung C.11: Vergleich der Trends mit und ohne Verwendung des Sofortmelders für die Sal-Weide in der Naturraumgruppe Weser-Aller-Tiefland.

Änderung in der Abnahme von 2,8 Tage (mit Sofortmelder) auf 2,5 Tage (ohne Sofortmelder) pro Dekade in der Naturraumgruppe Weser-Aller-Tiefland zu finden (vgl. Abb. C.11). Die Änderung im Trend wird im Wesentlichen durch das Fehlen von Daten aus 2014 beeinflusst.

D Erläuterungen zu statistischen Verfahren

D.1 Zur Korrelationsanalyse

Essentielles über Korrelationen

Grundannahme beim Einsatz von Korrelationen ist, dass der Grad eines Zusammenhanges zwischen zwei Zeitreihen durch einfache Korrelationskoeffizienten beschrieben werden kann, wobei man im Allgemeinen zusätzlich davon ausgeht, dass die gefundenen Zusammenhänge ursächlicher Natur sind, d.h. einen physikalisch erklärbaren Hintergrund haben.

Korrelationen messen den Grad des Zusammenhangs zwischen Variablen. Die Stärke des Zusammenhangs wird dabei in Form einer Maßzahl, dem Korrelationskoeffizienten, angegeben. Sie kann Werte zwischen +1 und -1 annehmen, wobei ein Koeffizient von +1 eine perfekte Übereinstimmung anzeigt (in dem Sinne, dass eine Zunahme bei einer Variablen von einer Zunahme bei der anderen begleitet wird). Ein Korrelationskoeffizient von 0 zeigt an, dass keinerlei Zusammenhang zwischen den Variablen besteht und wenn der Koeffizient -1 beträgt, so besteht eine sehr starke, aber inverse Beziehung zwischen den Variablen. Streng mathematisch genommen ist mit Hilfe der Korrelationsanalyse kein Zusammenhang von Ursache und Wirkung beweisbar; erst durch zusätzliche Plausibilitätsbetrachtungen kann auf physikalische Zusammenhänge geschlossen werden.

In diesem Vorhaben wird der lineare Korrelationskoeffizient verwendet. Dies ist nicht etwa eine zu stark vereinfachende Vorgehensweise. Vielmehr folgt sie der Erkenntnis, dass Annahmen über einen linearen Zusammenhang zwischen den Datenreihen die „neutralstmögliche“ Beschreibung mit dem geringsten Fehlerpotenzial darstellen. Der Einsatz von nichtlinearen Korrelationskoeffizienten wäre nur gerechtfertigt, wenn ein Naturgesetz hinter dem Zusammenhang vermutet würde, das in dieser nichtlinearen Weise wirkt.

Im Grunde zeigt eine Korrelation zwischen zwei Zeitreihen also an, wie häufig in beiden Reihen *gleichzeitige* Spitzen und „Täler“ auftreten. Für die Korrelationen, wie sie im Vorhaben berechnet werden, liegt zusätzlich der Spezialfall vor, dass eine Größe (die Zeit) monoton zunimmt und nur die andere (z.B. die Zahl der Sommertage in den einzelnen Jahren) einen unregelmäßigen Verlauf besitzt.

Signifikanz von Korrelationen

In diesem Abschnitt wird kurz beleuchtet, wie groß der Vertrauensbereich (Konfidenzintervall) eines *Korrelationskoeffizienten* ist und wie hoch die Signifikanzschwelle für eine Korrelation ist. Zu Grunde liegt beiden das Konzept der Stichprobe, d.h. jede Berechnung findet auf der Basis einer begrenzten Zeitreihe (beispielsweise 65 Jahre des Zeitraums 1951–2014) statt und ist somit lediglich die Schätzung eines *wahren* Parameters. Ein Konfidenzintervall gibt dabei an, wie groß der Bereich ist, in dem mit vorgewählter, beispielsweise 95 %iger Sicherheit eine berechnete (geschätzte) Korrelation die wahre Korrelation trifft.

Die Intervallbreite hängt von zwei Eigenschaften der Stichprobe ab:

- Größe der Stichprobe und
- Betrag der berechneten Korrelation.

In [SACHS \(1968\)](#) findet sich eine ausführliche Abhandlung der Abhängigkeitsmaße Korrelation und Regression sowie von Prüfverfahren und Vertrauensgrenzen für Korrelationskoeffizienten (Nomogramm dort auf S. 328). Diese bedienen sich einer so genannten z-Transformation, bei der die Metrik des Korrelationskoeffizienten geändert wird. In diesem transformierten Raum wird das Konfidenzintervall berechnet und danach in Einheiten des Korrelationskoeffizienten zurücktransformiert. In [Tab. D.1](#) ist für verschieden große berechnete Korrelationskoeffizienten und Stichprobenumfänge wiedergegeben, wie groß das jeweilige 95 %-Konfidenzintervall ist.

Table D.1: 95 %-Konfidenzintervall zwischen dem oberen (r_o) und unteren (r_u) Wert des Korrelationskoeffizienten r bei verschiedenen Beträgen von r und Stichprobenumfängen N .

N	20		30		50		100		500	
	r_o	r_u								
$r: 0.5$	0.77	0.09	0.73	0.19	0.69	0.25	0.64	0.34	0.56	0.43
$r: 0.8$	0.90	0.52	0.89	0.56	0.88	0.67	0.86	0.72	0.83	0.77
$r: 0.9$	0.95	0.72	0.95	0.76	0.94	0.83	0.93	0.85	0.92	0.88
$r: 0.95$	0.98	0.82	0.98	0.85	0.97	0.91	0.97	0.93	0.96	0.94

Bei einem kleinen berechneten Korrelationskoeffizienten r ist der Vertrauensbereich verhältnismäßig groß, insbesondere, wenn auch er zusätzlich auf wenigen Werten fußt – im Extremfall, also z.B. bei sehr geringem Stichprobenumfang ($N = 3$, in [Tab. D.1](#) nicht dargestellt) kann der Vertrauensbereich eines Korrelationskoeffizienten von $r = 0.5$ zwischen -0.91 und $+0.98$ liegen, also praktisch keine Aussage zulassen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass hohe Korrelationskoeffizienten auf der Basis von vielen Daten einen engen Vertrauensbereich und damit eine höhere Aussagesicherheit mit sich bringen.

D.2 Konfidenzintervalle der Trendgeraden und des Wertekollektivs

Tabelle D.2: Signifikanzschranken auf dem 95 %-Niveau für den Korrelationskoeffizienten r bei verschiedenen Stichprobenumfängen N .

N	20	30	50	100	500
95 %Schranke von r	0.44	0.36	0.28	0.20	0.09

Eine Signifikanzuntersuchung ermöglicht einzugrenzen, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine statistische Beziehung überhaupt besteht. Dabei wird als Grundannahme eingesetzt, dass *gar keine Korrelation* existiert ($r = 0$) und analysiert, ab welchem Wert des Korrelationskoeffizienten bei welcher Menge (N) benutzter Werte (Stichprobenumfang) diese Grundannahme mit 95 %iger Sicherheit unhaltbar wird. Ebenfalls in [SACHS \(1968\)](#) sind dort auf S. 330 – in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang – diese Signifikanzschwellen angegeben. Eine Auswahl für verschiedene Stichprobenumfänge findet sich in Tab. [D.2](#) wieder. Auch wenn derart große Anzahlen von Werten im Vorhaben nicht analysiert werden, ist es lehrreich, nachzuvollziehen, dass für 500 Werte bereits ab einem sehr niedrigem Wert des Korrelationskoeffizienten ($r > 0.09$) eine Korrelation als wahrscheinlich erachtet werden kann, während z.B. bei 30 Werten zu dieser Aussage ein Korrelationskoeffizient von $r > 0.36$ benötigt wird. Den Ausführungen in [SACHS \(1968\)](#) ist zudem zu entnehmen, dass z.B. ein Korrelationskoeffizient von $r = 0.5$ bereits auf einer Datenbasis von 16 Werten signifikant auf dem 95 %-Niveau (s.o.) wäre.

Bei diesen Betrachtungen ist jedoch immer zu beachten, dass der errechnete Korrelationskoeffizient einen *wahren Koeffizienten* abschätzt (den wir nur aus unendlich vielen Werten bestimmen könnten). Wie bei den Ausführungen zum Konfidenzintervall beschrieben, liegt der vom errechneten Koeffizienten geschätzte wahre Wert in einem Bereich, der bei kleiner Datenbasis sehr breit sein kann.

D.2 Konfidenzintervalle der Trendgeraden und des Wertekollektivs

D.2.1 Berechnung der Konfidenzintervalle

Wird für eine Klimavariablen oder einen Klimaindikator ein Trend berechnet, so kann mit Hilfe eines Konfidenzintervalls die Sicherheit dieses Trends veranschaulicht und abgeschätzt werden.

Grundannahme für die Suche nach einem Trend ist, dass es eine lineare Zunahme oder Abnahme mit der Zeit gibt. Die Regression wurde dazu abgeschätzt mit

$$a = \frac{(\sum y \cdot \sum x^2) - (\sum y \cdot \sum xy)}{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (D.1)$$

(a: Achsenabschnitt der Regressionsgeraden; x: Jahre; y: Häufigkeit des Ereignisses; n: Zahl der Wertepaare) und

$$b = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad (D.2)$$

(b: Steigung der Regressionsgeraden; x: Jahre; y: Häufigkeit des Ereignisses; n: Zahl der Wertepaare), womit sich die Werte \hat{y} wie folgt abschätzen lassen:

$$\hat{y} = a + bx \quad (D.3)$$

Zusätzlich wird der Korrelationskoeffizient r als Maß der Stringenz des Zusammenhangs zwischen der Zeit und dem Klimaindikator wie folgt berechnet

$$r = \sqrt{b_{yx} \cdot b_{xy}} \quad (D.4)$$

mit der in Gleichung [D.2](#) bestimmten Steigung für b_{yx} und

$$b_{xy} = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}}{\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}}$$

Die Bestimmung der Konfidenzintervalle folgt der statistischen Praxis (siehe z.B. [SACHS und HEDDERICH, 2009](#)). Dabei wird postuliert, dass die Regressionsgerade sowohl eine Unsicherheit bezüglich der Lage in y-Richtung (mögliche Verschiebung nach oben bzw. unten) und Neigung besitzt. Es gilt also, eine *Einhüllende* zu konstruieren, in deren Bereich die Regressionsgerade mit einer vorher zu definierenden Irrtumswahrscheinlichkeit liegen *kann*.

Der Vertrauensbereich \hat{y}_G für die Trendgerade findet sich für das Jahr x in diesem Intervall

$$\hat{y}_G = \hat{y} \pm \sqrt{2 \cdot F_{(2,n-2)} \cdot s_{\hat{y}_G}} \quad (D.5)$$

$F_{(2,n-2)}$ ist die Schwelle der F -Verteilung mit den Freiheitsgraden $\nu_1 = 2$ und $\nu_2 = n - 2$ (n: Anzahl der untersuchten Datenpunkte). Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit α von 0,05 und 64 Datenpunkten ($n - 2 = 62$) besitzt $F_{(2,n-2)}$ beispielsweise einen Wert von 3,15 und $\sqrt{2 \cdot F_{(2,n-2)}}$ ist 2,51.

Die Intervallbreite $s_{\hat{y}_G}$ wird nach folgender Beziehung berechnet.

$$s_{\hat{y}_G}(x) = s_y \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{Q_x}} \quad (D.6)$$

darin

$$s_y = \sqrt{\frac{Q_y - (Q_{xy})^2}{Q_x}} \quad (D.7)$$

mit

$$Q_x = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}$$

$$Q_y = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}$$

$$Q_{xy} = \sum xy - \frac{\sum x \cdot \sum y}{n}$$

Ergebnis der Berechnungen ist für die Regressionsgerade (\hat{y}_G) ein gekrümmter „Korridor“, in dem die Gerade mit der Irrtumswahrscheinlichkeit α zu erwarten ist. Denkbar ist etwa, dass der Vertrauensbereich darauf hinweist, dass zwar die mittlere Schätzung der Geraden für beide Indikatoren einen aufwärts gerichteten Trend besitzt, aber auch eine Restwahrscheinlichkeit dafür besteht, dass die Gerade *abwärts* geneigt sein könnte.

Ein zweiter „Korridor“ wird vom Vertrauensbereich (\hat{y}_W), in dem sich mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit α die Werte des Klimaindikatoren selbst (also beispielsweise der Eistage, Sommertage, etc.) befinden, aufgespannt. Hiermit kann veranschaulicht werden, ob es in einzelnen Jahren ungewöhnliche starke Abweichungen gegeben hat, oder ob es kein Jahr gibt, das – mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % – *drastisch* „aus dem Rahmen fällt“.

$$y_W = \hat{y} \pm t_{n-2} \cdot s_{\hat{y}} \quad (D.8)$$

mit

$$s_{\hat{y}}(x) = s_y \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{Q_x}} \quad (D.9)$$

Zudem wird in den Ausgabedateien noch der Erwartungswert für y an der Stelle x $y_{\hat{E}W}$ bestimmt. Dieser findet sich für ein Jahr x in einem Intervall

$$y_{\hat{E}W} = \hat{y} \pm t_{n-2} \cdot s_{\hat{y}_G} \quad (D.10)$$

t_{n-2} ist die Schwelle der Student- t Verteilung mit dem Freiheitsgrad $n - 2$ (n : Anzahl der untersuchten Datenpunkte). Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit α

von 0,05 und 64 Datenpunkten ($n - 2 = 62$) besitzt t_{n-2} beispielsweise einen Wert von 2,00.

y_{EW} ist dem Vertrauensbereich der Regressionsgeraden relativ ähnlich – er wird zwar in den detaillierten Ausgabedateien (s. Abschnitt D.2.2 – Abschnitt „Informationsdatei“) zur Verfügung gestellt, in den grafischen Ausgaben wird y_{EW} jedoch nicht verwendet.

D.2.2 Inhalt der begleitenden Dateien

Bei der Berechnung der Konfidenzintervalle werden Dateien erzeugt, die im Rahmen des Vorhabens für die Nutzer zur Verfügung gestellt werden.

Pro Station entstehen zwei Dateien: `trends_<statnr>_<zeitbereich>` und `tidlong_<statnr>_<zeitbereich>`, also beispielsweise `tidlong_10270_Jahr` für die Angaben zum Trend der Station Neuruppin für das Jahr. In der ersten findet sich in Tabellenform der Verlauf der Trendgeraden und die in Anhang D.2 beschriebenen Konfidenzintervalle und in der zweiten finden sich statistische Parameter der Regression – insbesondere die `trends...`-Datei ist zur Weiterverarbeitung (beispielsweise in einem Tabellenkalkulationsprogramm) geeignet.

Die Trend-Datei

In dieser Datei wird der Trend nebst den Konfidenzintervallen tabelliert. In jeder Zeile finden sich dazu folgende Angaben:

1. Statusangabe, nur für spezielle Anwendungen relevant
2. Weitere Statusangabe, nur für spezielle Anwendungen relevant
3. Jahr (x)
4. Untersuchte Variable in diesem Jahr [$y(x)$]
5. Position der Trendgerade in diesem Jahr ($\hat{y}(x)$)
6. Konfidenzintervall oben für die Trendgerade [$\hat{y}_G(x)|^{oben}$]
7. Konfidenzintervall unten für die Trendgerade [$\hat{y}_G(x)|_{unten}$]
8. Konfidenzintervall oben für den Wertebereich [$\hat{y}_W(x)|^{oben}$]
9. Konfidenzintervall unten für den Wertebereich [$\hat{y}_W(x)|_{unten}$]
10. Konfidenzintervall oben für y an der Stelle x [$y_{EW}(x)|^{oben}$] – ergänzende Angabe

11. Konfidenzintervall unten für y an der Stelle x $\left[y_{EW}(x) \Big|^{oben} \right]$ – ergänzende Angabe

Eine Darstellung des Inhalts von 3.–9. ist in Abb. D.1 gegeben.

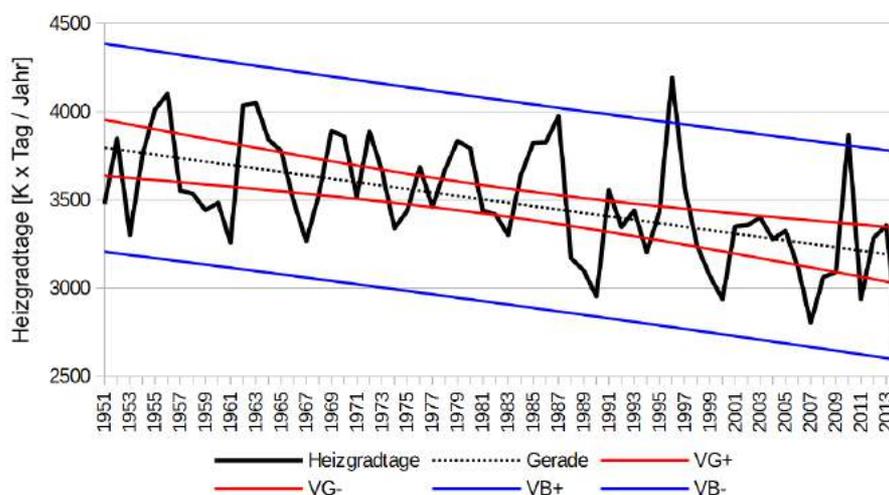


Abbildung D.1: Beispiel für eine Darstellung eines Klimaindiktors (hier: Heizgradtage an der Station Magdeburg für den Zeitraum 1951–2014) mit Trendgeraden (gestrichelt) und den Konfidenzintervallen für die Trendgerade (VG+ und VG-, rot) und den Wertebereich (VB+ und VB-, blau).

Die Informationsdatei

In dieser Datei finden sich in drei Zeilen Details der Trendauswertung und der Bestimmung der Konfidenzintervalle. Informativ für Nutzer dürfte dabei die erste Zeile sein, die weiteren Zeilen dokumentieren zumeist Hilfsgrößen.

- Zeile 1:
 1. Trendidentifikator¹⁾
 2. Monats- und Jahreszeitenkennung: 1–12 Monate Januar bis Dezember, 13–20 Jahreszeiten, Vegetationsperioden und gesamtes Jahr
 3. Jahr des Trendbeginns
 4. Jahr des Trendendes
 5. Anzahl der Jahre, für die der Trend bestimmt wurde
 6. y -Abschnitt der Trendgeraden (Koeffizient a in der Trendgleichung)
 7. Steigung der Trendgeraden (Koeffizient b in der Trendgleichung)
 8. Korrelationskoeffizient zwischen x - und y -Werten

¹⁾Für die meteorologischen Standardparameter erfolgt eine umfangreiche Trendsuche, bei der das Verfahren anstrebt, möglichst viele Teile der Stationszeitreihe zu analysieren – in den einzelnen Monaten, den Jahreszeiten, den Vegetationsperioden und im gesamten Jahr. Jeder gefundene Trend bekommt daher eine Identifikationsnummer.

9. Gesamtanstieg der Trendgerade

- Zeile 2:
 1. Standardabweichung von a
 2. Standardabweichung von b
 3. $Q_{xy} / \sqrt{Q_x \cdot Q_y}$
 4. r^* Hilfsgröße bei der Bestimmung des Konfidenzintervalls
 5. \hat{t} Hilfsgröße bei der Bestimmung des Konfidenzintervalls
 6. t Wert der t-Verteilung mit $n - 2$ Freiheitsgraden
 7. F Wert der F-Verteilung mit $(2, n - 2)$ Freiheitsgraden
- Zeile 3:
 1. Parameter für die obere Schranke des Konfidenzintervalls der Trendgeraden
 2. Parameter für die untere Schranke des Konfidenzintervalls der Trendgeraden
 3. Parameter für die obere Schranke des Konfidenzintervalls des Wertebereichs
 4. Parameter für die untere Schranke des Konfidenzintervalls des Wertebereichs
 5. Q_x
 6. Q_y
 7. Q_{xy}
 8. Standardabweichung von x
 9. Standardabweichung von y
 10. Standardabweichung von $x \cdot y$
 11. $s_{y\hat{G}}$

D.3 Der Mann-Kendall-Test

Dem Mann-Kendall-Test liegt folgende Überlegung zu Grunde: Wenn in einer Zeitreihe ein Trend, z.B. ein Anstieg, vorliegt, dann muss es zahlreiche Wertepaare aus der Zeitreihe geben, bei denen der spätere Wert größer als der frühere ist. Dabei ist nicht von Bedeutung, um wie viel der spätere Wert den früheren übertrifft.

Der Test wurde in Publikationen von [MANN \(1945\)](#) und [KENDALL \(1970\)](#) ausgearbeitet (auch beschrieben in [SCHÖNWIESE, 2000](#)). In der Umsetzung wird, ausgehend vom ersten Wert der Zeitreihe x_n , sukzessive bestimmt, ob für alle nachfolgenden i Werte die Differenz $a_{n+i} - a_n$ größer, gleich oder kleiner 0

ist. Des Weiteren erfolgt diese Bestimmung, ausgehend vom zweiten Wert der Zeitreihe x_{n+1} bis zu deren Ende, und weiter für a_{n+2} bis zum Ende der Reihe, usw. Es werden z.B. für $N = 64$ Jahre $N \cdot (N-1)/2 = 2016$ Wertepaare betrachtet. Es wird also ausgewertet

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \operatorname{sgn}(a_j - a_i) \quad (D.11)$$

mit sgn : $-1, 0$ oder $+1$ in Abhängigkeit von der Differenz zwischen den beiden Termen.

Die Testgröße Q beträgt für den Fall, dass alle Werte der Zeitreihe unterschiedlich sind und $\operatorname{sgn}(a) \neq 0$ werden kann, nach [KENDALL \(1970\)](#)

$$Q = \frac{S}{\sqrt{\frac{1}{18} \cdot [N \cdot (N-1) \cdot (2N+5)]}} \quad (D.12)$$

Treten in der untersuchten Reihe Bindungen auf, d.h. identische Werte, so ist eine Korrektur anzubringen. Dabei reduziert sich die zur Normierung benutzte Größe unter der Wurzel und Gleichung [D.3](#) wird zu

$$Q = \frac{S}{\sqrt{\frac{1}{18} \cdot [N \cdot (N-1) \cdot (2N+5) - B]}} \quad (D.13)$$

mit

$$B = \sum_k b_k \cdot (b_k - 1) \cdot (2b_k + 5)$$

worin k die Anzahl der aufgetretenen Bindungen ist.

Bei der Bestimmung von B wird wie folgt vorgegangen: Es wird eine Häufigkeitsverteilung aller analysierten $N \cdot (N-1)/2$ Werte von a gefertigt. Gibt es keine Bindungen, so sind die Häufigkeiten $b = H(a)$ entweder mit 0 oder mit 1 belegt. Treten Werte von a mehrmals auf so sind einige der Häufigkeiten mit Zahlen > 1 belegt. Nur für diese $b = H(a)$ wird $w = b \cdot (b-1) \cdot (2b+5)$ bestimmt²⁾. B wird durch Aufsummierung der einzelnen w berechnet.

Auch wenn der Test keinerlei Verteilungsannahmen für die Werte a macht, ist die Testgröße Q selbst angenähert normalverteilt und kann mit einer Standardtafel für Signifikanzniveaus in Irrtumswahrscheinlichkeit (zu finden z.B. in [BERNHOFER und GOLDBERG \[HRSG.\], 2008](#), dort S. 42) ausgewertet werden.

Zur Orientierung und Einordnung der Testwerte Q : Um eine Signifikanz auf dem 95 %-Niveau anzuzeigen, muss $Q > 1,96$ sein. Ist $Q > 2,57$ so ist eine Signifikanz auf dem 99 %-Niveau angezeigt; entsprechend steht ein $Q > 1,65$ für eine Signifikanz auf dem 90 %-Niveau.

²⁾Aus $b = 2 \Rightarrow w = 18$; $b = 3 \Rightarrow w = 66$; $b = 4 \Rightarrow w = 156$; $b = 5 \Rightarrow w = 300$ etc.

E Extremwertstatistische Auswertungen des Niederschlages

E.1 Tabellen der Auswertung nach DWA A-531 der betrachteten 6 Stationen

Es wurden extremwertstatistische Auswertungen des Niederschlages nach DWA A-531 durchgeführt. Die Ergebnisse werden für folgende Stationen zur Verfügung gestellt:

- Artern
- Braunlage
- Braunschweig
- Leipzig/Halle
- Magdeburg
- Neuruppin
- Wittenberg

Pro Station wird eine pdf-Datei ausgeliefert, die wie ein Datenblatt mit Tabellen und einer Grafik aufgebaut ist. Abb. E.1 gibt für die Station Artern die dort enthaltene Grafik wieder.

Alle Dateien, im PDF-Format, befinden sich auf dem projektbegleitenden Datenträger im Verzeichnis `anhang_e/e1`

E.2 Abbildungen der gleitenden 30-jährigen Auswertung

Die Auswertungen wurden jeweils für vollständig vorhandene Dekaden an den in Abschnitt E.1 benannten Stationen durchgeführt. Für diese wurden erstellt:

- Starkregenauswertung nach DWA A-531 (Verzeichnis `anhang_e/e2/dwa531` auf dem projektbegleitenden Datenträger)
- Tabellarische Darstellung der Ergebnisse (Verzeichnis `anhang_e/e2/vergleichstabellen` auf dem projektbegleitenden Datenträger) – ein Beispiel ist in Abb. E.2 wiedergegeben.

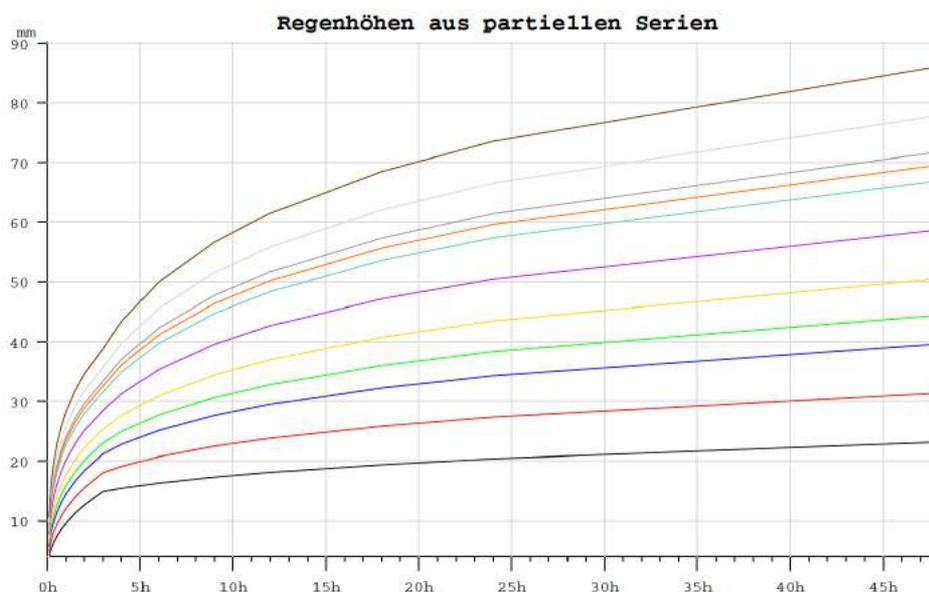


Abbildung E.1: Beispiel für eine Auswertung nach DWA A-531. Schar der Ausgleichskurven, berechnet aus den partiellen Serien an der Station Artern.

- Grafische Darstellung der Ergebnisse (Verzeichnis [anhang_e/e2/vergleichsgrafiken](#) auf dem projektbegleitenden Datenträger)

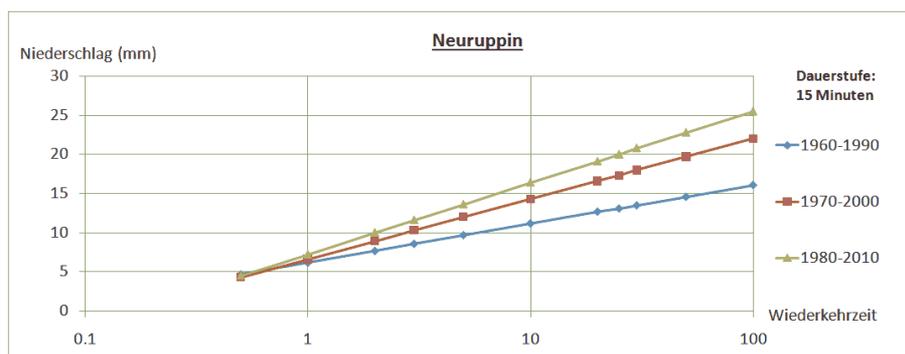


Abbildung E.2: Beispiel für eine gleitende 30-jährige Auswertung. Diagramm für die Dauerstufe 15 Minuten an der Station Neuruppin.

E.3 Weitere Partielle Serien

E.3.1 Abbildungen der partiellen Serien – Ereignishäufigkeiten pro Jahr

Die zugehörigen Dateien finden sich auf dem projektbegleitenden Datenträger im Verzeichnis [anhang_e/e3](#)

E.3.2 Abbildungen der partiellen Serien – durchschnittliche Ereignismengen pro Jahr

Die zugehörigen Dateien finden sich auf dem projektbegleitenden Datenträger
im Verzeichnis `anhang_e/e3`

F Tagesgänge, Jahresgänge und Tagesspannen

F.1 Grafiken der Tagesgänge der betrachteten Stationen

Im Abschnitt 4.5.2 werden die Tagesgänge an der Station Artern vorgestellt. Für weitere Stationen finden sich Dateien im PNG-Format sich auf dem projektbegleitenden Datenträger im Verzeichnis `anhang_f/f1`

F.2 Grafiken der Jahresgänge der betrachteten Stationen

Im Abschnitt 4.5.3 werden die Jahresverläufe für den Brocken und Gardelegen vorgestellt. Für weitere Stationen befinden sich Dateien im PNG-Format auf dem projektbegleitenden Datenträger im Verzeichnis `anhang_f/f2`

F.3 Grafiken der Tagesspannen der betrachteten Stationen

Im Abschnitt 4.5.1 werden die Spannen der Tagestemperatur für die Station Artern vorgestellt. Für weitere Stationen befinden sich Dateien im PNG-Format auf dem projektbegleitenden Datenträger im Verzeichnis `anhang_f/f3`

G Phänologische Datenbasis

G.1 Datengrundlage

Diese Daten liegen in der Regel als phänologisch-biologische Kenngrößen in jährlicher Auflösung vor.

Für die Auswertungen werden folgende Datenquellen verwendet:

- Datenbestand aus der Datenbank von Sachsen-Anhalt (MIRAKEL) bis 2011 (Datenlieferung im Oktober 2014);
- der Jahresmelder frei verfügbarer Daten über das CDC-GDS Portal;
- der Sofortmelder frei verfügbarer Daten über das CDC-GDS Portal.

Die Unterschiede zwischen Jahres- und Sofortmeldern sind im Abschnitt [2.1.4](#) des Hauptteils erläutert.

Der Datenbestand aus Sachsen-Anhalt wird als Datenbasis verwendet. Die Daten, die über das CDC-GDS Portal verfügbar sind, unterteilen sich in Daten aus dem Jahresmelder und Daten aus dem Sofortmelder.

Im Jahresmelder wird während der gesamten Vegetationsperiode und Jahr für Jahr an einem Objekt (Baum oder Strauch) bzw. einem Standort beobachtet. Die Jahresmelder-Daten sind für den Zeitraum ab 1951 archiviert. Im Sofortmelderprogramm wird an der Gesamtheit der Pflanzen im Beobachtungsgebiet und nicht nur an einem Objekt beobachtet. Gemeldet wird hier das früheste Auftreten einer Phase im Beobachtungsgebiet. Der Datenbestand des Sofortmelders beginnt erst ab 1991 und ist im CDC-GDS Portal nur für ausgewählte Phasen verfügbar. Diese Daten dienen vor allem dazu, bei eventuellen Unstimmigkeiten zwischen den anderen beiden Datenbeständen zur Klärung beizutragen und fehlende Daten zu ergänzen, vor allem für die Jahre 2013/2014. Da sich die Daten aus dem Jahresmelder und dem Sofortmelder zum Teil unterscheiden, wurden die Daten aus dem Jahresmelder bevorzugt. Diese werden als langjähriger Standarddatensatz als repräsentativer angesehen und zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Daten aus der Datenlieferung von Sachsen-Anhalt. Ob das Verwenden des Sofortmelders einen möglichen Einfluss auf Trends haben könnte, wird im weiteren Verlauf des Projektes untersucht und berücksichtigt.

Die Daten aus den verschiedenen Datenquellen wurden für die weitere Bearbeitung entsprechend umformatiert und am Ende zu einem Datensatz zusammengeführt. Da es für die verschiedenen Stationen zum Teil unterschiedliche Beobachtungspunkte gibt (Phäno-Kennung), die aber im CDC-GDS Portal

nicht mitgeführt werden, werden alle Phäno-Kennungen mit der dazugehörigen Stations-Kennung zusammengeführt.

G.2 Auswahl der phänologischen Phasen

Für die späteren Analysen und die Datenprüfung werden nach einer ersten Sichtung auf Datenvollständigkeit folgende Leitphasen bzw. Zeigerpflanzen ausgewählt.

- Vorfrühling: Schneeglöckchen (Blüte), Sal-Weide (Blüte)
- Erstfrühling: Löwenzahn (Blüte)
- Vollfrühling: Stieleiche (Blattentfaltung)
- Frúhsommer: Schwarzer Holunder (Blüte)
- Hochsommer: Sommer-Linde (Blüte)
- Spátsommer: Heidekraut (Blüte)
- Frúhherbst: Schwarzer Holunder (Fruchtreife)
- Vollherbst: Stieleiche (Fruchtreife)
- Spátherbst: Stieleiche (Blattverfárbung)
- Winter: Stieleiche (Blattfall)

Folgende Phasen werden für die weiteren Analysen nicht verwendet: Hasel (Blüte), Forsythie (Blüte), Eberesche (Fruchtreife), Kornelkirsche (Fruchtreife), Eberesche (Blattfall), Rosskastanie (Fruchtreife), Robinie (Blüte). Diese Daten wurden nur einer groben Prüfung unterzogen, da sie als Vergleich und für die Plausibilitátsprüfung gut verwendet werden können.

G.3 Räumliche Abgrenzung

Die ursprünglich vorgeschlagenen 52 Stationen wurden um weitere Stationen ergänzt, um die Naturraumgruppen etwas umfassender abzudecken. Analog zu den Klimadaten (aus AP 1) wurde ein 30 km-Puffer um die Grenze von Sachsen-Anhalt gelegt und im Rahmen dessen entsprechend weitere Stationen der zu untersuchenden Naturraumgruppen einbezogen.

Insgesamt gibt es 14 Naturraumgruppen, die in Sachsen-Anhalt liegen oder an das Bundesland grenzen (MEYNEN und SCHMITHÜSEN, 1962) und in Abb. G.1 dargestellt sind. Für die Auswertung werden davon folgende Naturraumgruppen betrachtet (Bezeichnungen nach dem BfN, in Klammern abweichende Bezeichnungen in der Graphik):

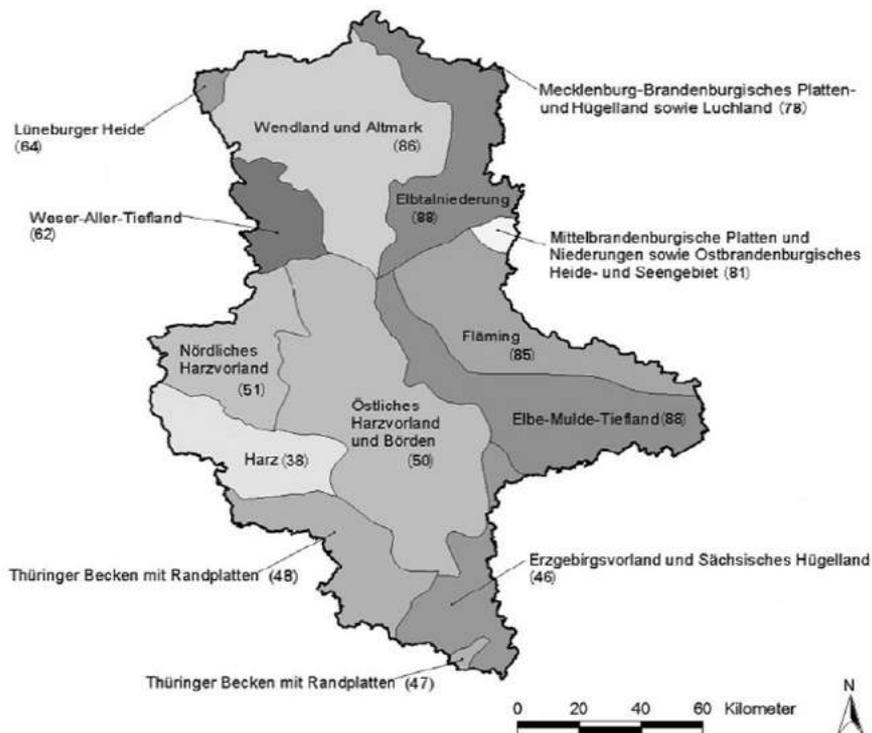


Abbildung G.1: Naturraumgruppen Sachsen-Anhalts (nach SCHEFFLER und FRÜHAUF, 2011).

- 38: Harz
- 46: Erzgebirgsvorland und Sächsisches Hügelland
- 47/48: Thüringer Becken und Randplatten
- 50: Mitteldeutsches Schwarzerdegebiet (Östliches Harzvorland und Börden)
- 51: Nördliches Harzvorland
- 62: Weser-Aller-Tiefland
- 64: Lüneburger Heide
- 85: Fläming
- 86: Wendland und Altmark
- 87: Elbtalniederung
- 88: Elbe-Mulde-Tiefland

Die Naturraumgruppen 47 und 48 (Thüringer Becken mit Randplatten) werden oft zusammengefasst betrachtet. Da die Datenlage sehr umfangreich

ist, werden in den Analysen beide Naturraumgruppen getrennt aufgeführt. Die Naturraumgruppe 81 (Mittelbrandenburgische Platten) wird in den Ergebnissen nicht berücksichtigt, da der Datenbestand in allen phänologischen Phasen zu gering ist. Ebenso wird die Naturraumgruppe 78 (Mecklenburg-Brandenburgisches Platten) vernachlässigt, da die Naturraumgruppe nur an Sachsen-Anhalt grenzt und keine repräsentative Fläche einnimmt.

Als weitere räumliche Abgrenzung für die Stationsauswahl gelten zusätzlich die Grenzen der Naturraumgruppen. Insgesamt wurden 717 Stationen in die Untersuchung einbezogen (vgl. Abb. G.2).

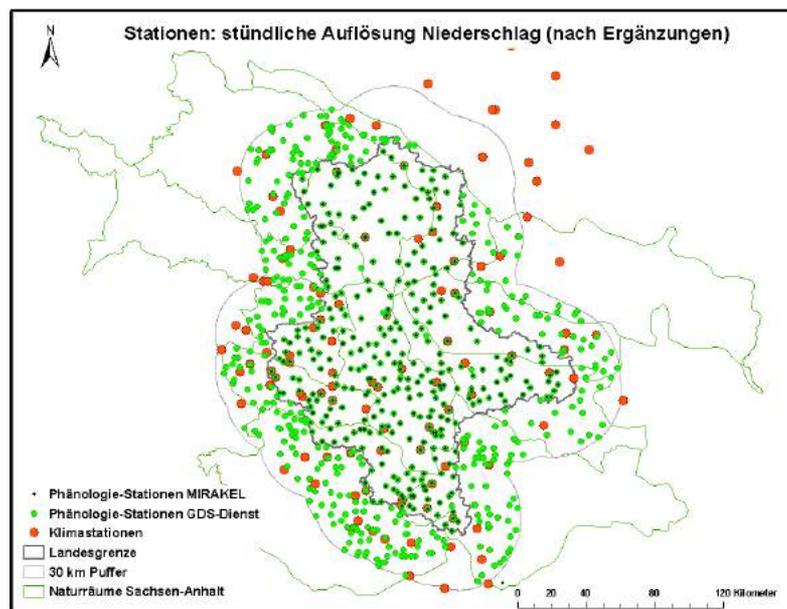


Abbildung G.2: Räumliche Verteilung der Phänologie-Stationen.

G.4 Weitere vorgenommene Änderungen

Die Station Wilkau–Haßlau (Stationsnr. 13035, Phäno-Kennung 150484400) wurde aus den weiteren Analysen ausgeschlossen, da sie außerhalb des Bereiches liegt. In den unterschiedlichen Datenquellen und Stationsinformationen gibt es uneinheitliche Benennungen der Stationen. Hier haben die Stationen Pratau und Salzwedel unterschiedliche Stationsnummern: Pratau (MIRAKEL: 3992; CDC: 13313) und Salzwedel (MIRAKEL: 4373; CDC: 15451). Die Stationsnummerierung des CDC-Dienstes wurde übernommen, um eine Verschneidung der beiden Datensätze möglich zu machen. Bei den Stationen 13182, 13183, 13184 gibt es ebenfalls Unterschiede in der Benennung und im Beobachtungsort. Die folgende Benennung wird übernommen: 13182 – Kösen; 13183 – Kösen, Bad Fränkenau; 13184 – Möllern-Obermöllern.

G.5 Übersicht der Trendentwicklung in verschiedenen Naturraumgruppen

Die Karten in diesem Abschnitt stellen die Trends für den Eintritt der jeweiligen phänologischen Phase im Zeitraum von 1951 bis 2014 für die verschiedenen Naturraumgruppen dar. Dabei wurden die Naturraumgruppen des „Thüringers Beckens und Randplatten“ in der Darstellung zusammengefasst. Die Angaben zur Trendentwicklung beziehen sich auf eine Dekade, d.h. um wie viel Tage sich der Phasenbeginn pro 10 Jahre verschiebt.

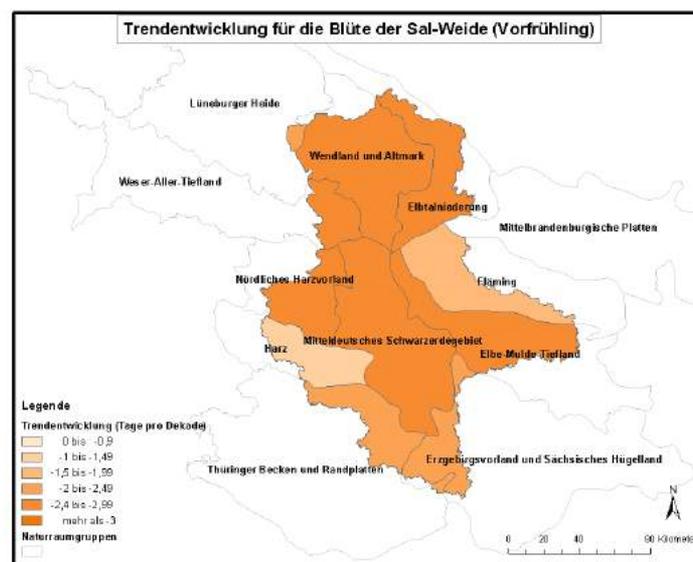


Abbildung G.3: Trendentwicklung der Vorfrühlingsphase „Blüte der Sal-Weide“ in den Naturraumgruppen Sachsen-Anhalts.



Abbildung G.4: Trendentwicklung der Erstfrühlingsphase „Blüte des Löwenzahns“ in den Naturraumgruppen Sachsen-Anhalts.



Abbildung G.5: Trendentwicklung der Vollfrühlingsphase „Blattentfaltung der Stieische“ in den Naturraumgruppen Sachsen-Anhalts.

G.5 Übersicht der Trendentwicklung in verschiedenen Naturraumgruppen

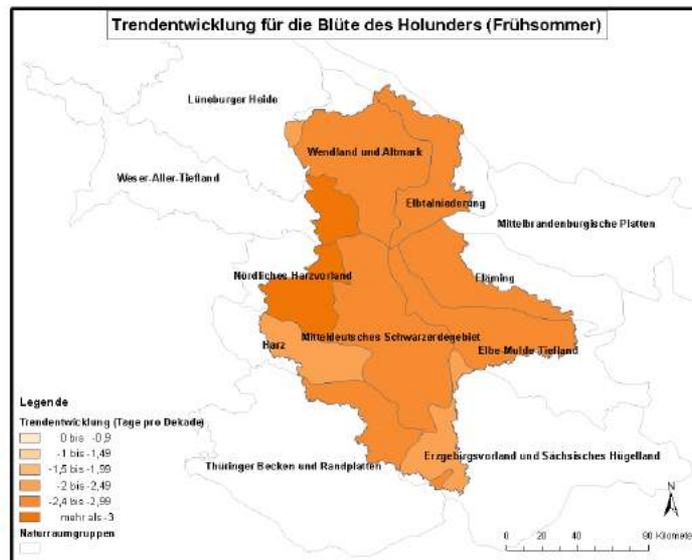


Abbildung G.6: Trendentwicklung der Frühsommerphase „Blüte des Schwarzen Holunders“ in den Naturraumgruppen Sachsen-Anhalts.

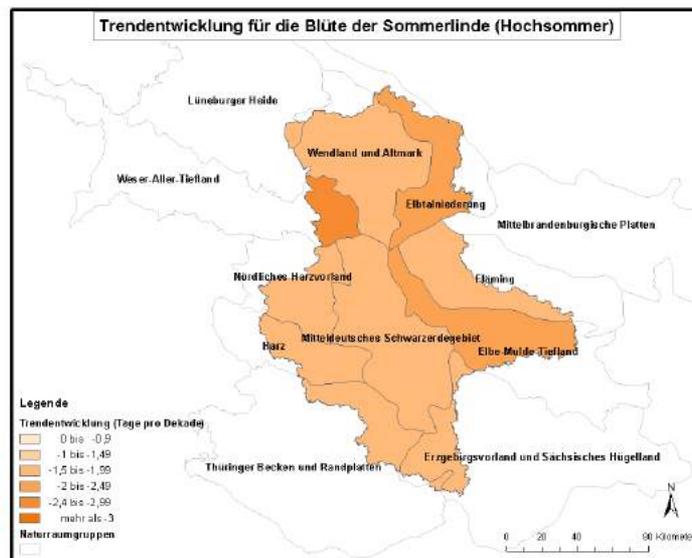


Abbildung G.7: Trendentwicklung der Hochsommerphase „Blüte der Sommer-Linde“ in den Naturraumgruppen Sachsen-Anhalts.



Abbildung G.8: Trendentwicklung der Spätsommerphase „Blüte des Heidekrauts“ in den Naturraumgruppen Sachsen-Anhalts.

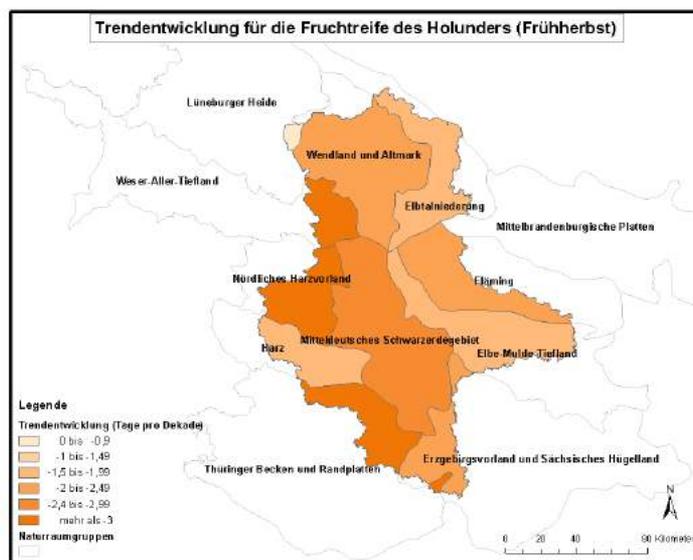


Abbildung G.9: Trendentwicklung der Frühherbstphase „Fruchtreife des Schwarzen Holunders“ in den Naturraumgruppen Sachsen-Anhalts.

G.5 Übersicht der Trendentwicklung in verschiedenen Naturraumgruppen

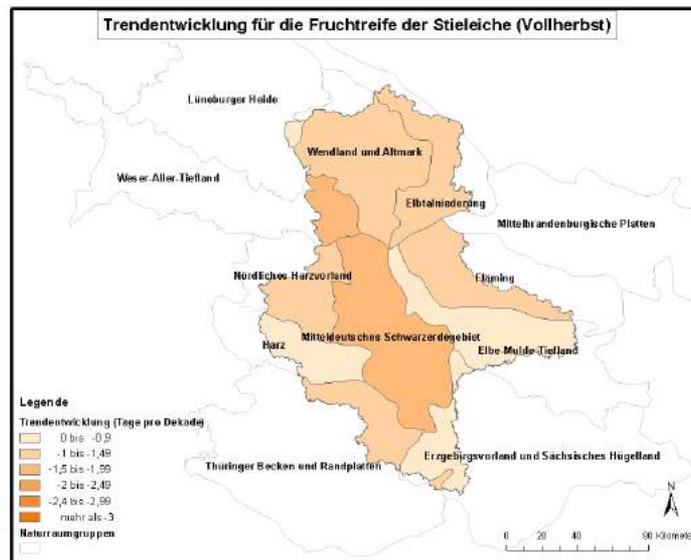


Abbildung G.10: Trendentwicklung der Vollherbstphase „Fruchtreife der Stieleiche“ in den Naturraumgruppen Sachsen-Anhalts.

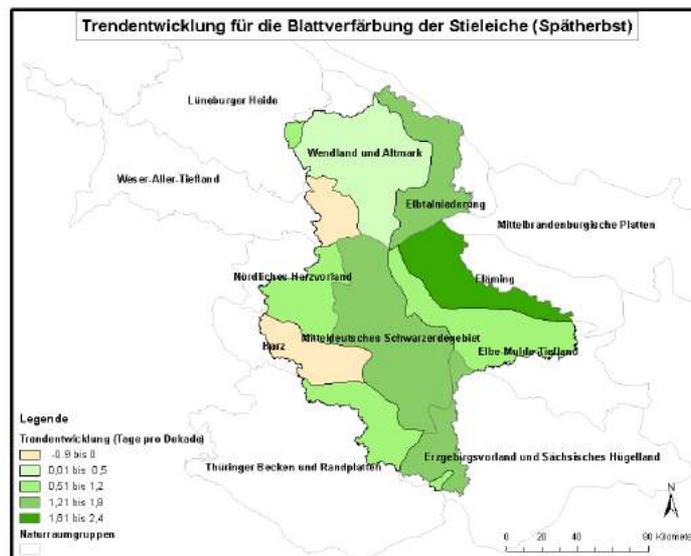


Abbildung G.11: Trendentwicklung der Spätherbstphase „Blattverfärbung der Stieleiche“ in den Naturraumgruppen Sachsen-Anhalts.