

10. Annaberger Klimatage 2016

11. - 12. Mai 2016
in Annaberg-Buchholz

Tagungsband

mit Beiträgen anlässlich der Gründung
der Wetterwarte Fichtelberg vor 100 Jahren

Veranstalter:

Sächsische Landesstiftung Natur und Umwelt, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, TU Bergakademie Freiberg, TU Dresden, Erzgebirgskreis, Deutsche Meteorologische Gesellschaft e.V., Deutscher Wetterdienst





Annalen der Meteorologie

49

10. Annaberger Klimatage 2016

11. - 12. Mai 2016
in Annaberg-Buchholz

Tagungsband

mit Beiträgen anlässlich der Gründung
der Wetterwarte Fichtelberg vor 100 Jahren

Veranstalter:

Sächsische Landesstiftung Natur und Umwelt, Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, TU Bergakademie Freiberg, TU Dresden, Erzgebirgskreis, Deutsche Meteorologische Gesellschaft e.V., Deutscher Wetterdienst

Annaberger Klimatage im Internet:

<http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/klima/22721.htm>

ISSN der Online-Ausgabe: 2194-5934

ISSN der Druckausgabe: 0072-4122

ISBN der Online-Ausgabe: 978-3-88148-488-6

ISBN der Druck-Ausgabe: 978-3-88148-489-3

Nutzungsbedingungen:

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz:



Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden. Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Die in dieser Publikation veröffentlichten Texte werden allein von ihren jeweiligen Autoren verantwortet; die darin zum Ausdruck gebrachte Meinung entspricht nicht notwendig der Meinung des Herausgebers (Deutscher Wetterdienst).

Herausgeber und Verlag:

Deutscher Wetterdienst
Fachinformationsstelle und
Deutsche Meteorologische Bibliothek
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach am Main
www.dwd.de/bibliothek
bibliothek@dwd.de

Redaktion:

Falk Böttcher
Deutscher Wetterdienst
Abteilung Agrarmeteorologie
Kärnerstr. 68
04288 Leipzig
Falk.Boettcher@dwd.de

Druck und Bindung:

Druckerei des BMVI
Robert-Schumann-Platz 1
53175 Bonn

Vorwort

Wie sehr müssen wir differenzieren?

Der anthropogene Klimawandel ist eine sehr verzwickte Herausforderung – für die es keine einfachen Antworten gibt. Deshalb gilt es, sowohl in angemessener Weise zu differenzieren als auch die Thematik aus vielen unterschiedlichen Perspektiven zu beleuchten. Dafür stehen die Annaberger Klimatage von Anbeginn und begrüßen Sie jetzt zum zehnten Mal.

Die Annaberger Klimatage konnten bis heute 110 Beiträge aus neun Nationen einbinden. Das inhaltliche und fachliche Spektrum im Programm umfasst neben naturwissenschaftlich-technischen Aspekten stets auch sozialwissenschaftliche und gesellschaftspolitische Blickweisen. Neben Vertretern aus Universitäten und von staatlichen Fachbehörden aus dem In- und Ausland (zum Beispiel LfULG, CHMI, Staatsbetrieb Sachsenforst, DWD) werden regelmäßig Kolleginnen und Kollegen aus Fachinstitutionen wie zum Beispiel PIK-Potsdam, MPI für Meteorologie Hamburg, NCAR, GERICS, Tyndall Centre, Institut für Demoskopie Allensbach oder UNEP zu Vorträgen eingeladen. Wesentliche Beiträge kommen regelmäßig von Kollegen aus Großbritannien, Österreich, Polen, der Schweiz, Tschechien und den Vereinigten Staaten von Amerika.

Und es wird wieder spannend: Im ersten Tagungsblock diskutieren wir eingangs die Kernfrage der Tagung um gleich im Anschluss aus der Praxis zu hören, wie zukünftig klimatologische Aufgabenstellungen seitens des Deutschen Wetterdienstes gesehen werden. Mit welchen technologischen Fortschritten dürfen wir rechnen, die den Rückgang der menschlichen Beobachter kompensieren oder gar zu noch besseren Ergebnissen führen? Wir Naturwissenschaftler sind nur die eine Seite der Anstrengungen – ganz wesentlich ist die Aufbereitung der komplexen Informationen und deren kluge und sachgerechte Kommunikation – wesentliche Aufgaben von Klimageservicezentren, wie zum Beispiel das GERICS.

Danach fokussieren wir stärker auf die konkreten regionalen Verhältnisse in Sachsen und gehen zunächst auf die besonderen Herausforderungen von Klimastationen im Gebirge und auf die Rolle von Gebirgen für das Regionalklima ein. Hier steht Sachsen stellvertretend für eine Reihe von Ländern mit ähnlicher Charakteristik und ähnlichen Herausforderungen. Besonders die Begriffe Wasser, Mittelgebirge und Kommunen mittlerer Größe sind hier wichtige Stichworte.

In Mitteleuropa zeigen sich Konsequenzen von Klimawandel vor allem durch Extremereignisse. Deren Spektrum ist erheblich und deren Analyse alles andere als trivial. So ist der starke zweite Block ganz diesem Thema gewidmet und beleuchtet dies aus dem Erfahrungsschatz in Sachsen sowie benachbarter Regionen.

Das eingangs angesprochene Thema Kommunikation und Wissenstransfer wird im letzten Block der Tagung aufgenommen und speziell für die Region vertieft. Welche Erfahrungen wurden bereits gemacht? Was ist erfolgreich, was klappt nicht? Was können wir wie verbessern?

Es ist damit zu rechnen, dass alle Teilnehmer der Annaberger Klimatage bereichert und mit konkreten Hilfestellungen für ihre jeweiligen Arbeitsaufgaben versehen aus Annaberg-Buchholz zurückreisen werden. Das haben wir nicht nur den guten Beiträgen zu verdanken, sondern auch unseren Gastgebern, dem Gründer- und Dienstleistungszentrum Annaberg, dem Erzgebirgskreis sowie der Erzgebirgssparkasse.

Wir, die Veranstalter, wünschen Ihnen gute und wertvolle Tage und freuen uns mit Ihnen auf die nächsten Annaberger Klimatage – voraussichtlich vom 15. bis 17. Mai 2018.

Freiberg und Tharandt, im Februar 2016

Jörg Matschullat und Christian Bernhofer

Preface

How much do we need to differentiate?

Anthropogenic climate change is a wicked problem – with no simple answers in stock. Therefore, a highly differentiated approach needs to be taken and the issues elucidated from various perspectives. That is what the Annaberg Climate Days stand for – and what you can expect now at their 10th anniversary.

To date, the Annaberg Climate Days have attracted 110 contributions from nine nations. The content encompasses social and political science points of view next to natural science and technical aspects. Representatives from universities and state agencies (e.g. LfULG, CHMI, Staatsbetrieb Sachsenforst, DWD) are regularly invited for talks jointly with colleagues from research institutions such as PIK Potsdam, Max-Planck-Institute for Meteorology in Hamburg, NCAR, the German Climate Service Center, the Tyndall Centre in England, the Allensbach Institute, UNEP. This includes important contributions are regularly provided by colleagues from Austria, Czech Republic, United Kingdom, Poland, Switzerland and the United States of America.

And it is getting to be exciting: We will initially discuss the core topic of our conference and immediately thereafter, which future climatological tasks are being seen by our German Meteorological Survey (DWD). Which kind of technological progress can we expect, compensating for the loss of human observation and possibly delivering even better results? We scientists represent only one side of the efforts – compiling the complex information and communicating the core messages are critical tasks of climate service centres such as GERICS.

The concrete regional climate conditions of Saxony shall then be elucidated more closely and the particular challenges tackled of mountain climate stations and the role of mountains in forcing regional climate conditions.

Consequences of climate change express themselves in Central Europe mostly through extreme weather events. Their spectrum is rather large and their analysis everything but trivial. The large second block is completely dedicated to these questions and shall elucidate the topic from the experience gained in Saxony and neighbouring regions.

The initially mentioned topic communication and knowledge transfer will be taken up in the last block of the conference with particular emphasis on the region. Which experiences have been made already? What appears to be successful and what not? What can we improve and how?

It is highly likely that all participants of the Annaberg Climate Days will return to their home bases feeling enriched and with concrete support for their individual responsibilities. This is not only thanks to great contributions and discussions but also to our magnificent hosts, the Gründer- und Dienstleistungszentrum Annaberg, the County Erzgebirgskreis and the Erzgebirgs Savings Bank.

We, the organizers, wish you good and valuable days – and we look forward to the next Annaberg Climate Days, likely from May 15 to 17, 2018.

Freiberg and Tharandt, in February 2016

Jörg Matschullat and Christian Bernhofer

Inhaltsverzeichnis

1. Teil: Tagungsbeiträge zu den 10. Annaberger Klimatagen 2016

	Seite
Klimawandel und Klimaservices	
1.1 Hartmut GRASSL: Regionen im Klimawandel – Wie sehr müssen wir differenzieren ?	8
1.2 Paul BECKER: Klimatologie – heute, morgen, übermorgen	12
1.3 Daniela JACOB, Irene FISCHER-BRUNS, Peer SEIPOLD: Klimadienstleistungen GERICS/Climate services GERICS	15
1.4 Valeri GOLDBERG: Wie beeinflussen Mittelgebirge das Regionalklima in Sachsen – heute und in Zukunft ?	18
1.5 Gerd FRANZE: Besondere Herausforderungen einer Bergstation bei der Ermittlung meteorologischer Daten	21
Witterungs- und Klimaextreme	
1.6 Christian-Dietrich SCHÖNWIESE: Atmosphärische Extremereignisse: eine Einführung	30
1.7 Stephanie HÄNSEL, Dominic RUMPF, Jörg MATSCHULLAT: Bausteine eines regionalen Dürremonitorings	34
1.8 Johannes FRANKE: Raum-zeitliche Entwicklung des Starkregenverhaltens in Sachsen	41
1.9 Tanja WINTERRATH: Hochaufgelöste Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur nutzerspezifischen Analyse von Extremereignissen	43
1.10 Rico KRONENBERG: Bewertung radarabgeleiteter Niederschläge für klimatologische Anwendungen am Beispiel Sachsen	47
1.11 Irena OTOPIĆ, Mariusz ADYNKIEWICZ-PIRAGAS, Bartłomiej MISZUK: Observed and projected changes in air temperature in the Karkonosze Mountains	51
1.12 Michael HOFSTÄTTER, Annemarie LEXER, Barbara CHIMANI, Manfred GANEKIND, Jucundus JACOBET, Markus HOMANN, Andreas PHILIPP, Christoph BECK: Tiefdruckgebiete auf Vb-Zugbahnen im Klimawandel – Auswirkungen in den Flusseinzugsgebieten Elbe und Oder	55
1.13 Uwe MÜLLER: Herausforderungen im Hochwasserrisikomanagement (mit Berücksichtigung Klima)	59
1.14 Ellen MÜLLER, Walter SCHMIDT, Marcus SCHINDEWOLF, Phoebe HÄNSEL, Franziska KUNTH, Andreas KAISER: Klimawandel und Wassererosion – Planung von Schutzmaßnahmen mittels Radolan-Daten und hochauflösender Geländemodelle	63
1.15 Heike HÜBENER: ReKliEs-De: Wie können Informationen aus Klimamodell-Ensembles besser für Impaktforschung und Politikberatung nutzbar gemacht werden ?	67
Wissenstransfer und Kommunikation	
1.16 Christian KORNDÖRFER, Franziska REINFRIED: Drei Jahre nach Regklam: Was haben wir aus dem Klimaanpassungsprogramm gelernt - Wo stehen wir mit der Umsetzung ?	69
1.17 Frank BÖTTCHER: Hindernisse und Möglichkeiten der Kommunikation von Klimathemen	74
1.18 Werner SOMMER: Klimabildung in Sachsen – Herausforderung und Umsetzung	76

**2. Teil: Ergebnisse aus 100 Jahren meteorologischer Messungen
auf dem Fichtelberg (Sachsen) und am Tieflandstandort Radebeul-Wahnsdorf**

	Seite
2.1 Falk BÖTTCHER: Zum Klima des Erzgebirges	80
2.2 Falk BÖTTCHER und Eberhard FREYDANK: Einordnung der Bergwetterwarte Fichtelberg in das Netz meteorologischer Messstellen	83
2.3 Andreas HOY: Die Lufttemperatur auf dem Fichtelberg (1916–2015)	87
2.4 Falk BÖTTCHER und Holger KANTZ: Die Niederschläge auf dem Fichtelberg (1916-2015)	96
2.5 Gerd FRANZE: Schneedeckenbetrachtungen anhand der 100-jährigen Messreihe der Wetterwarte Fichtelberg	105
2.6 Stephanie SCHÜTTAUF: Sondermessungen auf dem Fichtelberg: Die chemische Zusammensetzung von Nebelwässern	110
2.7 Andrea HAUSMANN, Johannes FRANKE, Eberhard FREYDANK, Peter FLEISCHER, Horst-Günter KATH, Udo KÖNIG, Cornelia OELKE, Annette PAUSCH, Beate SCHIMMEL, Philipp SELINGER, Uwe WOLF, Thomas HEINRICH, Peter BÖRKE, Ralf ENDE, Falk NÜSSLER: Ergebnisse aus 100 Jahren Klima- und Umweltbeobachtung in Radebeul-Wahnsdorf	119
Abbildungsverzeichnis	137
Tabellenverzeichnis	142
Autorenverzeichnis	143

1. Teil

Tagungsbeiträge zu den 10. Annaberger Klimatagen 2016

Annaberger Klimatage im Internet:

www.umwelt.sachsen.de/umwelt/klima/22721.htm

Klimawandel und Klimageschichte

1.1 Regionen im Klimawandel – Wie sehr müssen wir differenzieren ?

Hartmut GRASSL

Einleitung

Die thermodynamischen Gesetze lehren uns, dass bei erhöhter Temperatur in der unteren Atmosphäre und sonst gleichbleibender Dynamik der Atmosphäre insgesamt mehr Niederschlag fallen sollte. Im globalen Mittel sollte das auch bei nicht gleichbleibender Dynamik gelten, also ist mit der beobachteten Erwärmung seit 1900, die jetzt annähernd 1°C erreicht hat (WMO 2016, NOAA 2016), auch die Gesamtniederschlagsmenge angestiegen. Basis für diese physikalisch begründete Aussage ist die Clausius-Clapeyronsche Gleichung, nach der der Sättigungsdampfdruck des eindeutig wichtigsten Treibhausgases der Erdatmosphäre, des Wasserdampfes, bei einer Temperaturerhöhung um nur 1 K bei einer Ausgangstemperatur von 0°C um 8 % ansteigt. Warum reden dann die Klimatologen von der Zunahme der Häufigkeit von Dürren eher als von der Zunahme der Jahresniederschlagsmenge? Weil stets Dynamik und Thermodynamik und veränderte Oberflächeneigenschaften auf einem unterschiedlich von der Sonne bestrahlten, fast kugelförmigen Planeten zusammenwirken und sowohl die Atmosphäre als auch der Ozean sich vergleichsweise rasch bewegen sowie Extrema eher interessieren als Mittelwerte. Diese Bewegungen sind aber zusätzlich durch recht unterschiedliche typische Zeitskalen charakterisiert, nämlich Wochen bis wenige Jahre für die Atmosphäre und Jahrzehnte bis einige Jahrhunderte für den Weltozean. So braucht Luft zur Umrundung entlang eines Breitengürtels, zum Beispiel in mittleren Breitengraden, nur einige Wochen oder für den Austausch zwischen den Erdhälften 1 bis 2 Jahre und nur wenige Jahre für den vertikalen Austausch zwischen der oberen Stratosphäre und der Troposphäre. Diese unterschiedlich schnellen Prozesse führen zu einer jedem bekannten hohen regionalen Klimavariabilität mit einer dann Jahrhundertssommer genannten positiven Temperaturanomalie wie 2003 in Mittel- und Westeuropa und einem „Jahr ohne Sommer“ in großen Teilen Europas wie 1816 nach einem sehr heftigen explosiven Vulkanausbruch des Tambora im Jahre 2015 bei einer starken negativen Anomalie der Temperatur, wenn sie in beiden Fällen über mindestens der doppelten oder sogar der dreifachen Standardabweichung liegt.

Weil das Rückstreuvermögen für Sonnenstrahlung bei natürlichen Oberflächen zwischen wenigen Prozent für Wasser bei wolkenlosem Himmel und sogar über 80 Prozent bei frischer Pulverschneedecke schwankt, werden auch diese Unterschiede wesentlich in die Regionalisierung bei mittlerer globaler Erwärmung als Folge des erhöhten Treibhauseffektes eingreifen. Es wird also Regionen mit verschwindend geringer und besonders starker Erwärmung geben, so ist zum Beispiel südlich von Island seit 1900 keine Erwärmung beobachtet worden aber in Teilen Sibiriens bereits die 3°C-Marke überschritten. Und diese Muster sollten sich je nach Niveau der mittleren Erwärmung auch noch im Laufe dieses Jahrhunderts räumlich verschieben.

Mindestens ebenso wichtig wie diese physikalisch begründeten Differenzierungen sind aber die Unterschiede in der Verletzbarkeit der Gesellschaften oder von Teilen der Gesellschaft in den verschiedenen Regionen. Während in Deutschland bei einem Rekordhochwasser mit neuen absoluten Höchstpegeln an einigen Flüssen wie 2013 keine Todesopfer zu beklagen sind, sterben in vielen Entwicklungsländern bei einer sogenannten 20jährigen Flut, zum Beispiel in Bangladesch, viele Tausende. Im Folgenden werden beide Aspekte beispielhaft betrachtet.

Beispiele für geänderte Klimaparameter

a) Hat die Niederschlagsmenge wirklich zugenommen?

Im jüngsten bewertenden Bericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses über Klimaänderungen der Vereinten Nationen (IPCC 2013a) heißt es dazu: „Das Vertrauen in Niederschlagsänderungen über den Landoberflächen seit 1901 ist bis 1951 niedrig und nur mittelmäßig danach. In mittleren Breiten der nördlichen Erdhälfte hat die Niederschlagsmenge seit 1901 zugenommen (mittleres Vertrauen vor 1951 und hohes Vertrauen danach). Für andere Breitenzonen sind die positiven oder negativen Trends nur wenig

vertrauenswürdig.“ Die ernüchternde Aussage zeigt wie wichtig kontinuierliche Beobachtungen gewesen wären.

b) Hat sich der mittlere Meeresspiegelanstieg seit 1900 beschleunigt?

Die Antwort ist ein klares Ja. Von $1,7 \pm 0,2$ mm/a für den Zeitraum von 1901 bis 2010 stieg er auf $2,0 \pm 0,3$ mm/a für den Zeitraum 1970 bis 2010 und weiter auf $3,2 \pm 0,4$ mm/a von 1993 bis 2010, wobei für die letzte kürzere Periode Pegel- und Satellitenmessungen übereinstimmen. Es ist auch wahrscheinlich, dass von 1920 bis 1950 ähnlich hohe Anstiegsraten wie in den vergangenen Jahrzehnten existierten (IPCC 2013a); denn damals stieg die mittlere bodennahe Lufttemperatur ebenfalls systematisch an.

c) Welche Vorgänge lassen den Meeresspiegel ansteigen?

Seit den 1970er Jahren tragen die Ausdehnung des Meerwassers und das Abschmelzen der Gebirgsgletscher etwa mit 75 % zum Anstieg bei. Seit 1993 allerdings gilt dies nicht mehr in diesem Ausmaß. $1,1 \pm 0,3$ mm/a stammen von der Ausdehnung des Meerwassers, weil die Erwärmung in den Ozean immer tiefer eindringt, Gletscher tragen mit $0,76 \pm 0,37$ mm/a bei, das Grönlandeis mit $0,33 \pm 0,08$ mm/a und die Antarktis mit $0,27 \pm 0,11$ mm/a. Die Summe aller Beiträge ist mit $2,8 \pm 0,5$ mm/a konsistent mit der Beobachtung des Meeresspiegelanstieges (IPCC 2013a). Seit 2010 liefert der Europäische Forschungssatellit Cryosat2 präzisere Daten und in den vergangenen wenigen Jahren ist der Beitrag der Antarktis auf etwa 0,5 mm/a angestiegen (MAC MILLAN et al. 2014).

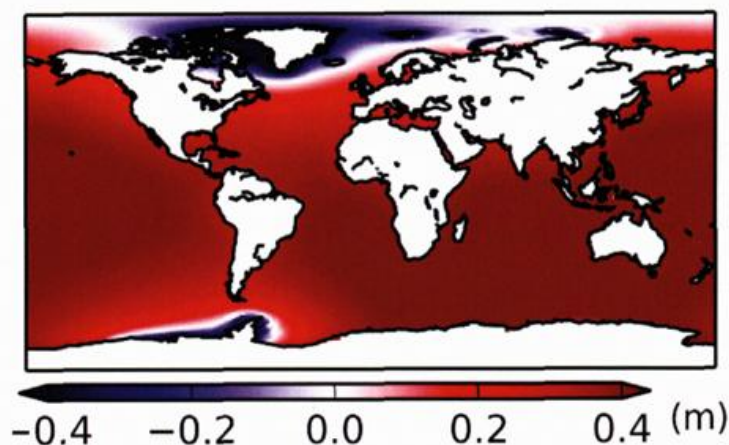


Abbildung 1: Regionaler Meeresspiegelanstieg bis zum Zeitraum 2081-2100 durch Abschmelzen von Gebirgsgletschern, des grönländischen und antarktischen Eisschildes, bezogen auf 1986-2005; nach SLANGEN et al. 2014, aus LOZAN, GRASSL, KASANG, NOTZ, ESCHER-VETTER (Herausgeber): Das Eis der Erde.

Diese Beobachtungen eines verstärkt ansteigenden Meeresspiegels bedeuten auch, dass auch dann, wenn die Intensität der Winterstürme mittlerer Breiten nicht zunimmt (das gilt zum Beispiel für die Deutsche Bucht), Sturmfluten systematisch höher auflaufen, weshalb die Norddeutschen Küstenländer an der Nordsee erneute Deichverstärkungen beschlossen haben (+80 cm in Hamburg).

Wie hoch war der Meeresspiegel in der Eem-Zwischeneiszeit?

Für die Extrapolation des Meeresspiegelanstiegs in die kommenden Jahrhunderte sind zwei Fragen zu beantworten: Erstens, wie lange hält der erhöhte Treibhauseffekt an und zweitens, wie hoch war er in der etwas wärmeren vorletzten Zwischeneiszeit vor 129 000 bis 116 000 Jahren? Er war in der Eem-Zwischeneiszeit einige Jahrtausende lang um mindestens 5 Meter höher als heute, lag aber mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht 10 Meter höher (IPCC, 2013a). Die Temperatur lag dabei in hohen Breiten mindestens um 2°C über den heutigen Werten. Es wird also wesentlich von den Andauer der anthropogenen Störung der Zusammensetzung der Atmosphäre abhängen, ob ein Ziel, wie das jetzt in Paris bei COP21

verschärft formulierte Ziel die global gemittelte Erwärmung wesentlich unter 2°C zu halten, eine gefährliche Störung des Klimasystems vermeiden hilft (UNFCCC 2015). Wir Wissenschaftler sind aufgefordert worden bis 2018 durch IPCC eine weitere besondere Bewertung für die Vertragsstaaten der UNFCCC zu liefern, auf deren Basis erneut über die weitere Verfeinerung der Definition einer „gefährlichen“ Klimaänderung diskutiert und Entsprechendes beschlossen werden soll. Eine der zu beantwortenden wichtigen Fragen lautet: Bei welchem Verhalten der Menschheit, sprich bei welcher mittleren Erwärmung wird das Abschmelzen des grönländischen Eises zur existenziellen Bedrohung der Inselstaaten und der Marschniederungen mit vielen Millionen Menschen. In anderen Worten: Wie weit nähern wir uns der aus der Klimageschichte bekannten Relation: $\pm 1^\circ\text{C}$ ist äquivalent zu ± 20 m Meeresspiegeländerung in den nächsten Jahrhunderten. Besondere Beachtung muss dabei der Umverteilung der Masse des Schmelzwassers der Inlandeisgebiete geschenkt werden. Wie Abbildung 1 zeigt, landet das Schmelzwasser überwiegend in niederen Breiten, weil die verminderte Erdanziehung in den vom Eis teilweise befreiten Eisschilden das Schmelzwasser nicht in der Region halten kann.

Differenzierte Empfindlichkeit

Eine gute aber sicher nicht die beste Vorkehrung für eine geringere Verletzlichkeit einer Gesellschaft gegenüber Klimaänderungen ist zunächst eine gute Anpassung an die Klimavariabilität, also der Schutz der anthropogenen Infrastruktur bei Wetterextremen. Leider lässt sogar diese Anpassung an die Klimavariabilität in vielen Ländern sehr zu wünschen übrig, so dass weiterhin viele Menschen bei Wetterextremen und Erdbeben sterben müssen. Während schleichend veränderliche Mittelwerte von Klimaparametern die Schutzfunktion der Infrastruktur wenig betreffen, findet der Test einer staatlichen und privaten Daseinsvorsorge bei Wetterextremen oder starken Klima-anomalien statt. Der unzureichende Schutz bei solchen Ereignissen trifft nicht nur auf die Entwicklungsländer zu, sondern gilt auch für manche OECD-Mitglieder. Hierzu ein Vergleich zweier ähnlicher Hochwasserereignisse nämlich dem 2013er Hochwasser im östlichen Mitteleuropa und dem 2014er Hochwasser im nördlichen Balkan. Dazu schreibt die Rückversicherungsgesellschaft Munich Re (2015): „Bemerkenswert sind die Ähnlichkeiten zum Hochwasser in Mitteleuropa im Vorjahr. Dazu zählen die hohe Bodenfeuchte zu Beginn der Niederschläge und ein weitgehend ortsfestes Tief, dessen Regenintensität durch Gebirgszüge verstärkt wurde. Bei allen Parallelen gab es jedoch einen wesentlichen Unterschied: Obwohl der flächengemittelte Niederschlag in der im Mai 2014 betroffenen Region mit rund 100 Millimetern insgesamt deutlich niedriger ausfiel als in Mitteleuropa im Mai/Juni 2013 (mehr als 200 Millimeter), waren die Folgen gravierender. Dies deutet darauf hin, dass Deutschland, Österreich und die Tschechische Republik über einen wesentlich effektiveren Hochwasserschutz verfügen als die ärmeren südlichen Staaten. Daneben trugen Abholzungen, Eingriffe in die Flussläufe und der Wildwuchs ungenehmigter Siedlungen in gefährdeten Bereichen mit zum Teil erschreckender Bauqualität zum Schadenausmaß bei. Der Wiederaufbau in den Ländern bietet nun neben der hohen finanziellen Bürde die Chance, einige strukturelle Defizite zu beseitigen.“ Je ärmer ein Land und je korrupter seine Eliten umso höher sind die Opferzahlen bei Wetterextremen und anderen Naturgefahren. Da jedoch viele der Entwicklungsländer zur globalen Erwärmung nur unwesentlich beigetragen haben, hat die 21. Vertragsstaatenkonferenz in Paris (COP21) zu diesem Thema folgendes beschlossen: „53. Entscheidet dass ...eine finanzielle Unterstützung für die Entwicklungsländer die Umsetzung ihrer Politiken, Strategien, Regulierungen und Aktionspläne sowie ihre Klimaänderungsaktionspläne sowohl für Klimaschutz als auch Anpassung verstärken soll, um zur Erreichung des Zwecks dieser Vereinbarung, wie in Artikel 2 definiert, beizutragen.“ Dazu wird ebenfalls beschlossen, dass über die bisher vereinbarten 100 Milliarden USD hinaus pro Jahr gegeben werden, und dies spätestens 2025 der Fall sein soll.

Differenzierung ist viel mehr als unterschiedliche Klimaänderungssignale!

Sicherlich erwärmen sich die Land- und die Meeresoberfläche recht unterschiedlich und es wird auch die Niederschlagsmenge je nach Klimazone schrumpfen oder wachsen, auch wird wegen variierender Bewölkung mehr oder weniger Sonnenenergie die Erdoberfläche erreichen, aber der lokale oder regionale Leidensdruck durch die Klimaänderung und auch die regionalen Klimaänderungsvorteile hängen ganz wesentlich vom Zustand einer Gesellschaft ab. Je demokratischer umso besser, denn dann sind die Einkommensunterschiede wenigstens etwas gedämpft und die Daseinsvorsorge des Staates wird von der Bevölkerung eingefordert. Die 2015 beschlossenen Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen sind deshalb genauso wichtig wie das „Paris Agreement“.

Literatur

- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- MACMILLAN, M., et al., 2014: Increased ice losses from Antarctica detected by CryoSat-2, Geophysical Research Letters DOI: 10.1002/2014GL060111.
- MUNICH RE, 2015: Topics Geo 2014 – Analysen, Bewertungen und Positionen zum Jahr der Naturkatastrophen (kann von der Website von Munich Re heruntergeladen werden).
- NOAA, 2016: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201513>
- SLANGEN, A.B.A., CARSON, M., KATSMAN, C.A., VAN DE WAL, R.S.W., KÖHL, A., VERMEERSEN, L.L.A., STAMMER, D., 2014: Projecting twenty-first century regional sea-level changes; Climatic Change (2014) 124:317–332, DOI 10.1007/s10584-014-1080-9.
- UNFCCC, 2015: zu erhalten unter: FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1
- WMO, 2016: <https://www.wmo.int/media/news> (26 January 2016).

1.2 Klimatologie – heute, morgen, übermorgen

Paul BECKER

Der Vortrag stellt Elemente des Konzeptes zur nationalen Umsetzung des Global Framework for Climate Services (GFCS) vor. Im Fokus stehen dabei nicht die Implementierung und Vernetzung der hierfür notwendigen organisatorischen Infrastruktur in Deutschland, sondern vielmehr die praktische Unterfütterung der von der WMO geführten Initiative mit geeigneten Daten und Produkten für die Versorgung und Beratung der Nutzer von Klimadienstleistungen. Es werden sowohl aktueller Stand als auch Zukunftsperspektiven der beiden fachlichen Säulen „Klimabeobachtung und -überwachung“ sowie „Klimamodellierung und -vorhersage“ vorgestellt.

Eine hohe Notwendigkeit zur Weiterentwicklung und Ergänzung der derzeit verwendeten Methoden und Verfahren besteht im Bereich des Klimamonitorings. Die traditionellen Punktmessungen meteorologischer Messstationen genügen mittlerweile in vielerlei Hinsicht nicht mehr den Anforderungen. Das gilt zunächst für deren räumliche Abdeckung, und zwar sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung. So werden in der Regel kleinräumige Extremereignisse wie Starkregenfälle oft nur unzureichend oder gar überhaupt nicht erfasst, wodurch unter anderem die Bestimmung des langfristigen Trendverhaltens solcher Ereignisse zumindest erschwert wird. Darüber hinaus liefern diese ausschließlich bodennahen Messungen keine Informationen über die Verhältnisse in den darüber liegenden Luftschichten. Wissenschaft und Technik benötigen aber im zunehmenden Maße auch solche Daten, so zum Beispiel Unternehmen der Windkraftindustrie, deren Windenergieanlagen eine zunehmend größere Nabenhöhe aufweisen, auf welche sich die zumeist in zehn Metern Höhe gemessenen Bodenwinde kaum noch sinnvoll übertragen lassen.

Traditionell können zumindest die Datenlücken in horizontaler Richtung mittels mehr oder minder komplexer statistischer Regionalisierungsverfahren für viele Anwendungen brauchbar geschlossen werden. Mit dem Fortschritt der Technik von Wetterradaren und -satelliten sowie den rasant zunehmenden Speicherkapazitäten gewinnen aber auch die meteorologischen Fernerkundungsverfahren mittlerweile, über die Wettervorhersage hinaus, auch in der Klimatologie immer mehr an Bedeutung. Hier gilt es, die bereits vorhandenen Methoden und Verfahren zur Ableitung qualitätsoptimierter Daten aus den tatsächlich gemessenen Rohdaten weiter zu verbessern. Ein Schwerpunkt der aktuellen Forschung ist dabei die Verschneidung der bereits mittels Retrievalverfahren oder Reflektivitätsbeziehung (Z-R-Beziehung) prozessierten Daten mit zusätzlichen Datenquellen. Als Beispiel seien hier die laufenden Aktivitäten des Deutschen Wetterdienstes im Rahmen eines gemeinsamen Projektes der strategischen Behördenallianz von UBA, BBSR, DWD, THW und BBK (SCHMITT 2015) zur „Anpassung an den Klimawandel“ angeführt, wobei mit einer offline Version des so genannten RADOLAN-Verfahrens eine raumzeitlich homogene Niederschlagsklimatologie seit dem Jahr 2001 erstellt wird (JUNGHÄNEL et al. 2015). Bei diesem Verfahren werden radarbasierte Niederschlagsmessungen an die mit Ombrometern am Erdboden gemessenen Niederschlagsmengen angeeicht, wodurch sich eine deutlich erhöhte Genauigkeit in Bezug auf die Quantität der Niederschläge erzielen lässt. Im Rahmen der klimatologischen Anwendung wird dieses grundsätzlich für den Vorhersage-, also Echtzeitbetrieb entwickelte Verfahren nun unter Einbeziehung weiterer Messstationen rückwirkend noch einmal durchgerechnet. Diese neue und zukünftig regelmäßig aktualisierte Datenbasis ermöglicht zum ersten Mal deutschlandweit die klimatologische Erfassung und Analyse kleinräumiger Extremniederschläge nicht nur in ihrer Intensität, sondern auch in ihrer räumlichen Struktur, Lage, Ausdehnung und sogar hinsichtlich ihrer Zugbahn.

Eine hinsichtlich der Wahl der Mittel gänzlich andere, in Bezug auf die grundsätzliche Vorgehensweise jedoch quasianaloge Möglichkeit bietet die Verwendung von Wettervorhersagemodellen in Form so genannter Reanalysen. Hierbei werden die jedem Vorhersagelauf vorangestellten Analysen, also die Bestimmung des aktuellen atmosphärischen Zustandes unter Einbeziehung von Beobachtungsdaten verschiedener Quellen als Randbedingungen für die Modellsimulation, möglichst weit in die Vergangenheit zurück nochmals neu berechnet. Durch die Verwendung einer einheitlichen Modellvariante lassen sich somit konsistente dreidimensionale Klimatologien in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung erzeugen. Die anwendungsnahe Forschung konzentriert sich dabei derzeit auf zwei Fragen: Wie weit in die Vergangenheit

zurück lassen sich die klimatischen Zustände mit diesem Verfahren tatsächlich zuverlässig rekonstruieren und bis zu welcher zeitlichen und räumlichen Auflösung bleiben die Informationen belastbar? Darüber hinaus erstrecken sich die grundlegenden Aktivitäten zur Verbesserung der Qualität von Reanalysen auf die Bereiche neue Methoden der Datenassimilation, Integration bisher ungenutzter Datenquellen, Verbesserung der Modellparametrisierungen sowie auf die Kopplung der atmosphärischen Modelle mit Ozean-, Eis-, und Landmodellen (Boden, Vegetation).

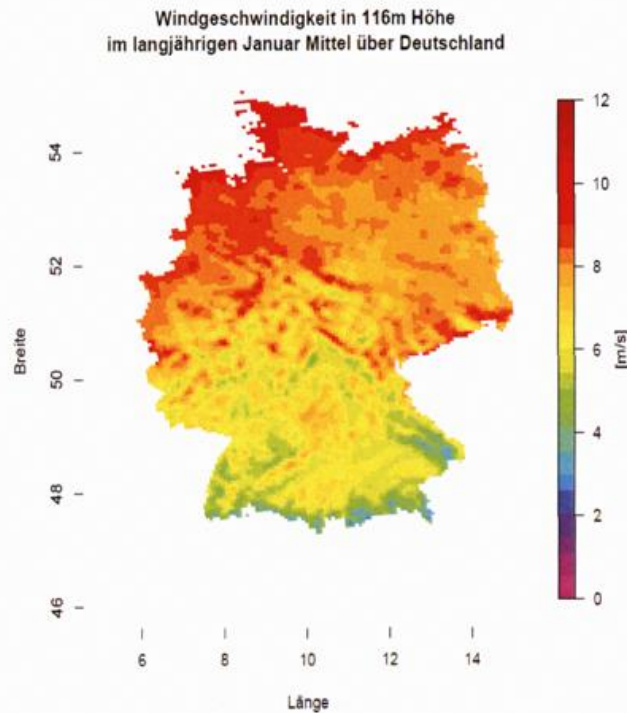


Abbildung 1: Vieljährige Mittel der Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 116 m über Grund im Monat Januar für den 20-jährigen Zeitraum 1995-2014 (BORSCHKE et al. 2016).

Als aktuelles Anwendungsbeispiel für den potenziellen Mehrwert von Reanalysen sei an dieser Stelle auf eine auf Basis der im Rahmen des UERRA-Projektes durchgeführten Rechnungen erzeugte Windklimatologie verwiesen. Abbildung 1 zeigt hieraus das vieljährige Mittel der Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 116 m über Grund im Monat Januar für den 20-jährigen Zeitraum 1995-2014 (BORSCHKE et al. 2016). Diese Simulationen wurden mit dem COSMO-EU-Modell mit einer nominalen Auflösung von rund 6 km durchgeführt (COSMO-REA6, HErZ). Vor dem Hintergrund der Bedeutung des Themas Windenergie untersucht der DWD dabei derzeit insbesondere die Qualität der auf diese Weise bestimmten Windgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Höhen. Der Vergleich mit Messungen an Windmasten an ausgewählten Standorten zeigt, dass die verfügbaren Reanalysen durchaus Aussagen in geeigneter Qualität für anwendungsrelevante Fragestellungen bereitstellen können.

Neben den Bemühungen um eine verbesserte räumliche Abdeckung von Beobachtungsdaten stehen derzeit noch zwei weitere Themenkomplexe im Zusammenhang mit stationsbasierten Messungen auf der Agenda. Für die weitere Erforschung des Klimasystems werden dringend möglichst viele und insbesondere lange Datenzeitreihen benötigt, zum Beispiel zur Erlangung einer verbesserten Kenntnis der natürlichen Klimavariabilität in Ergänzung zu dem aus Klimasimulationen abgeleiteten Wissen. Hierfür sollen – über bereits bestehende Aktivitäten wie dem KLIDADIGI-Projekt hinaus – sämtliche potenziellen Datenquellen identifiziert und vollständig ausgeschöpft werden. Vor dem Hintergrund des anhaltenden Kostendrucks muss letztlich auch intensiv an der Entwicklung und Erprobung automatischer Messtechnik weitergearbeitet

werden. Hier ist es das Ziel, die Qualität aller Wetterbeobachtungen auch langfristig aufrecht zu erhalten und soweit wie möglich zu steigern.

Im Bereich Modellierung werden die Schwerpunkte neben den mittlerweile bereits weitestgehend etablierten jahreszeitlichen und dekadischen Klimavorhersagen sowie den Bemühungen, die Anzahl der vorhandenen regionalen Projektionsläufe für die neuen RCP-Szenarien weiter zu erhöhen, derzeit auch wieder verstärkt beim Themengebiet anwendungsoptimierte Datenerzeugung und -aufbereitung gesetzt.

Als Folge des europäischen Zweiges der CORDEX-Initiative des Welt-Klimaforschungsprogramms (WCRP) liegen für Europa regionale Simulationen in einer Auflösung von 12,5 km für die drei Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 vor. Für das Szenario RCP2.6, das teilweise auch als Klimaschutz-Szenario bezeichnet wird, stehen dabei derzeit jedoch nur wenige Rechnungen zur Verfügung. Speziell im Nachgang zur Klimakonferenz von Paris (COP21) müssen hier dringend zusätzliche Läufe erzeugt werden. Nur so lassen sich die auf Basis exakt dieser sozioökonomischen und politischen Rahmenbedingungen zu erwartenden Klimaänderungen sinnvoll, das heißt unter Abschätzung einer adäquaten Unsicherheitspanne, angeben.

Im Hinblick auf die Bereitstellung nutzergerechter Klimadaten im Rahmen von Klimadienstleistungen werden zurzeit verbesserte Lösungen zur Minimierung der insbesondere den Folgenforschern nach wie vor Schwierigkeiten bereitenden systematischen Abweichungen der Projektionsdaten von den Beobachtungen diskutiert. Hier ist es Aufgabe, die Vielzahl der mittlerweile entwickelten Biaskorrektur-Verfahren an Hand problemspezifischer Fragestellungen systematisch zu bewerten, um möglichst klare Anwendungsempfehlungen für die Nutzergemeinschaft ausarbeiten zu können. In diesem Kontext spielt auch der korrekte Umgang mit den prinzipiellen Unterschieden zwischen den punktbezogenen Stationsbeobachtungen und den stets für eine Fläche gültigen Modelldaten eine Rolle.

Eine Alternative zu den dynamischen Modellen bieten seitjeher die so genannten ESD-Methoden, also die empirisch-statistischen Regionalisierungsverfahren. Mit einer EPISODES genannten Methode will auch der DWD den Nutzern schon bald ESD-basierte Datensätze zur Verfügung stellen. Damit können, mit nur geringem Aufwand, kurzfristig große Ensembles regional hoch aufgelöster Klimaprojektionen generiert werden. Die Ergebnisse sind, wie bei statistischen Methoden üblich, nur mit einem geringen Bias versehen. Bereitgestellt werden die Daten sowohl als stationsbasierte Zeitreihen als auch in Form gerasterter Datensätze. Durch eine neuartige Methodik zur Generierung der Zeitreihen in Kombination mit einer umfangreichen Analyse der klimatischen Bedingungen im globalen Klimamodell, ist zudem die Simulation neuer, bislang noch nicht beobachteter Extremwerte möglich.

Über diese Aktivitäten hinaus sind perspektivisch außerdem ein Forschungsprogramm zur Entwicklung von regionalen Klimasystemmodellen sowie Simulationen auf der konvektionserlaubenden Skala geplant.

Literatur

- BORSCHKE, M., KAISER-WEISS, A.K., KASPAR, F., 2016: Wind speed variability between 10m and 116m height from global and regional reanalyses compared to wind mast measurements over Northern Germany and The Netherlands. Eingereicht bei Advances in Science and Research.
- JUNGHÄNEL, T., BRENDL, C., WINTERRATH, T., SCHMITT, A., HAFER, M., WEIGL, E., BECKER, A., 2015: Towards a radar based precipitation climatology for Germany. First Results and Future Perspectives. Proceedings of 37th Conference on Radar Meteorology, 14 – 18 September 2015 Norman, OK, 4pp.
- SCHMITT, A., 2015: Dem Starkregen auf der Spur. Erstellung einer dekadischen Radarniederschlagsklimatologie für Deutschland. In BBK Bevölkerungsschutz 1, 18-20.

1.3 Klimadienstleistungen GERICS / Climate services GERICS

Daniela JACOB, Irene FISCHER-BRUNS, Peer SEIPOLD

Das Climate Service Center Germany, kurz GERICS, wurde mit dem Namen Climate Service Center im Jahr 2009 am Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH (HZG) ins Leben gerufen und aufgebaut. Seit 2014 ist GERICS eine selbstständige wissenschaftliche Organisationseinheit des HZG. GERICS beschäftigt ein interdisziplinäres Team von Naturwissenschaftlern und Sozio-ökonomern mit zurzeit rund 50 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Im Sinne einer Ideenschmiede oder eines „Think Tanks“ entwickelt GERICS wissenschaftlich fundiert Produkte und Services, um Entscheidungsträger aus Politik, Verwaltung und Wirtschaft bei der Anpassung an den Klimawandel zu unterstützen. Dabei arbeitet es strikt quellenneutral. Die Aktivitäten am GERICS können in drei Aufgabenbereiche eingeteilt werden: 1. Auf- und Ausbau von Netzwerken, 2. Prototypische Entwicklung von Klimageservice-Produkten und 3. Entwicklung und Durchführung von Weiterbildungsmaßnahmen. Zentral ist die prototypische Produktentwicklung, die von den anderen Bereichen sowie einer Infrastruktur aus Modellen und Daten gestützt wird.

Für den Klimageservice an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Anwendung ist die Arbeit in ganz unterschiedlichen, lebendigen Netzwerken mit unterschiedlichen Gruppen von Akteuren ausschlaggebend. Durch eine nationale und internationale Netzwerkstruktur werden die außerhalb des GERICS vorhandenen Kompetenzen im komplexen Themenfeld „Klimawandel“ gebündelt und die wesentlichen Akteure zusammengebracht. GERICS ist in zahlreichen nationalen und internationalen wissenschaftlichen Netzwerken als Initiator, Koordinator oder Partner engagiert, ebenso in serviceorientierten Netzwerken. So ist es Mitinitiator der „European Climate Service Partnership“ (ECSP) sowie der internationalen Climate Service Partnership (CSP), dessen Sekretariat es auch beherbergt. GERICS hat auch maßgeblich zur Erstellung der „European research and innovation Roadmap for Climate Services“ der EU beigetragen. Innerhalb Deutschlands ist GERICS in verschiedenen Netzwerken von Universitäten und außeruniversitären Einrichtungen aktiv. Darüber hinaus baut es seine Kunden und Partnernetzwerke innerhalb der Wissenschaft und im Bereich der Klimaanpassung in unterschiedlichen Sektoren stetig aus.

Sowohl Wirtschaftsunternehmen als auch der öffentliche Dienst haben die wachsende Bedeutung klimarelevanter Fragen erkannt, insbesondere hinsichtlich einer anzustrebenden Verringerung der Treibhausgasemissionen (Mitigation). Jedoch muss auch das Thema der Anpassung an den Klimawandel (Adaptation) in alle kurz- und langfristigen Planungen mit einbezogen werden. Dies wurde jüngst auch als ein Ergebnis der Pariser UN-Klimakonferenz COP 21 von Ende 2015 betont. Jedoch ist die Notwendigkeit einer Klimawandel-Anpassung in der Praxis oft bislang weder hinreichend verstanden, noch in den langfristigen Planungen berücksichtigt. Einerseits, weil die strategische Planung - beispielsweise von Unternehmen - normalerweise nur einen Zeithorizont von wenigen Jahren umfasst, andererseits weil Entscheidungsträger oft nicht die nötigen Kenntnisse zu diesem Themenkomplex haben. Hier setzt der Klimageservice an. GERICS fördert die Verbindung zwischen Wissenschaft und Praxis und baut mit seinem Wissens- und Dienstleistungsangebot eine Brücke zwischen beiden Bereichen. In enger Zusammenarbeit mit unseren Wissenschafts- und Praxispartnern entwickeln wir prototypische Klimageserviceprodukte und -dienstleistungen, die genau dem Bedarf des jeweiligen Nutzers entsprechen und als Grundlage für weitreichende strategische Entscheidungen dienen können. Dazu wurde ein Prozess entwickelt, der den Arbeitsablauf der Produktentwicklung, von der ersten Idee bis zum marktfähigen Prototyp, detailliert beschreibt. Dieses strukturierte Vorgehen bietet eine große Prozesstransparenz und gewährleistet wirksam die Einhaltung einer hohen Prozessqualität.

Die prototypische Entwicklung von Klimageserviceprodukten und -dienstleistungen durch GERICS läuft in vier Phasen ab: 1. Initiierungs- und Planungsphase, 2. Entwicklungsphase, 3. Erprobungsphase und 4. Operationalisierungsphase. Die einzelnen Phasen bestehen aus Teilprozessen, in die sowohl interne, als auch externe verantwortliche Akteure eingebunden sind. Die erste Phase der Initiierung und Planung beinhaltet die wesentlichen Schritte von der Ideengenerierung bis zur Projektplanung für Prototypen. Dabei können Ideen auf verschiedene Arten entstehen: Auf Anfrage (also gesteuert durch den Nutzerbedarf), problem-

gesteuert oder aus der eigenen Motivation von GERICS heraus. In der Entwicklungsphase entsteht das konkrete Produkt in einem iterativen Kooperationsprozess mit den Wissenschafts- und Praxispartnern. Am Ende dieser Phase liegt ein fertiger Prototyp vor, der dann in der Praxis geprüft wird: In dieser Erprobungsphase wird der Prototyp mit Praxispartnern und Kunden umfassend getestet, gegebenenfalls überarbeitet und adjustiert (Abbildung 1). Phasenübergreifend findet darüber hinaus eine umfassende Dokumentation der Entwicklung und Qualitätskontrolle des Prototypen statt.

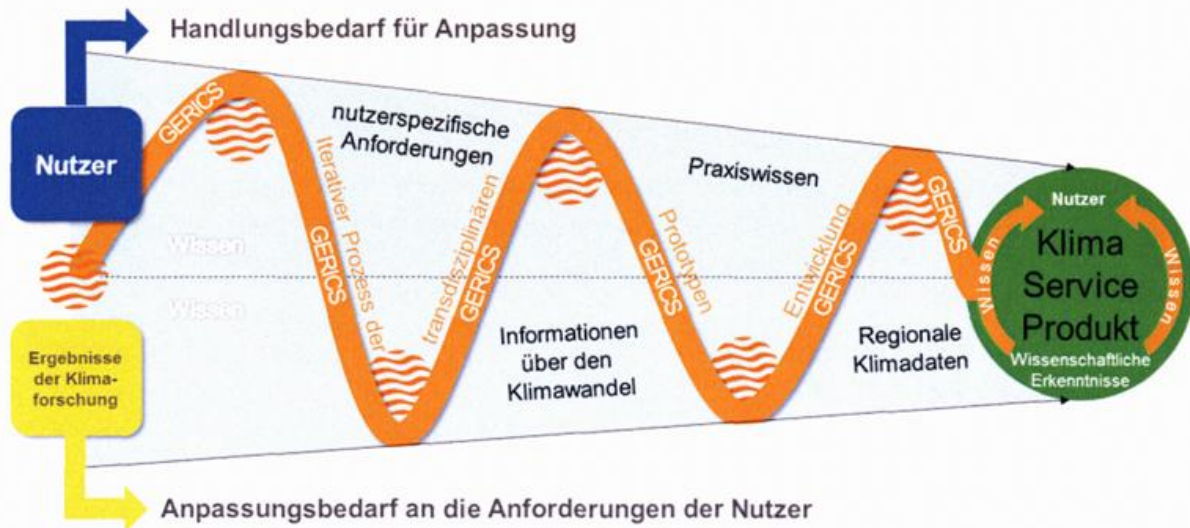


Abbildung 1: Nutzerspezifischer Wissenstransfers durch transdisziplinäres und iteratives Vorgehen

Nach erfolgreichem Abschluss der Erprobungsphase folgt die Phase der Operationalisierung. Hier wird der Prototyp in ein Produkt überführt. In dieser Phase wird auch entschieden, wie das Produkt dauerhaft weiterbetrieben werden soll. GERICS strebt hierbei eine Abgabe an Dritte an, die die Operationalisierung des Produktes übernehmen. Ganz wichtig dabei ist, dass die Produktqualität dauerhaft sichergestellt bleibt. Es werden zurzeit zwei wesentliche Prototypenbereiche bearbeitet. Ein Bereich umfasst verschiedene Formen von Fact-Sheets, die nach dem Fact-Sheet-Konzept entwickelt wurden, zum Beispiel die Climate-Fact-Sheets, Standortbezogene Climate-Fact-Sheets und Climate-Focus-Paper. Der andere Bereich umfasst modular aufgebaute „Beratungsbaukästen“, entwickelt nach dem Baukasten-Prinzip.

Die Climate-Fact-Sheets stellen die Informationen zu Klima und Klimawandel für Länder, Regionen und Klimazonen in standardisierter, komprimierter Form mit Texten, Tabellen und Diagrammen auf fünf bis sechs Seiten dar. Sie wurden von GERICS gemeinsam mit der Deutschen Entwicklungsbank KfW entwickelt und stehen zurzeit für 42 Länder Osteuropas, Asiens, Afrikas und Lateinamerikas zur Verfügung. Das zugehörige Konzept wurde mit anderen Partnern erweitert, z.B. für das sogenannte standortbezogene Climate-Fact-Sheet in Kooperation mit dem Chemiekonzern BASF SE für dessen Produktionsstandort Ludwigshafen. Mit der KfW entstand auch ein Konzept für das Format „Climate-Focus-Paper“ zu wissenschaftlichen Themen von großer Relevanz. Bisher sind drei Climate-Focus-Paper mit den Titeln "Cities and Climate Change", "Global Sea Level Rise" und "Regional Level Rise - South Asia" erschienen. Nach dem Baukasten-Prinzip entwickelt GERICS Beratungsangebote und -ansätze zur Integration des Themas Klimawandel in Entwicklungsstrategien. Für Städte und Kommunen wurde der „Stadtbaubaukasten“ als Unterstützung zur Anpassung an den Klimawandel entwickelt. Ein weiteres modulares Beratungstool namens „Unternehmerbaukasten“ unterstützt bei der Integration des Themas Klimawandel in Unternehmensstrategien unter individueller Berücksichtigung des jeweiligen Unternehmens (Abbildung 2).



Abbildung 2: Prototypische Entwicklung nutzerspezifischer Klimaservices nach dem Baukasten-Prinzip

Der Bedarf der Praktiker an Schulungen und Trainings im Bereich „Anpassung an den Klimawandel“ wächst zunehmend. Ein für alle passendes "Universalkonzept" für Weiterbildung zu klimarelevanten Themen gibt es jedoch nicht. Um diesem Bedarf bestmöglich entgegenzukommen, entwickelt GERICS Weiterbildungsmaßnahmen entlang der Entstehung seiner prototypischen Produkte. Ziele sind der bedarfsgerechte Umgang mit den Klimateilservice-Produkten, eine Unterstützung bei ihrer Implementierung in die Praxis oder auch die Befähigung von Dritten zur Operationalisierung solcher Produkte. Außerdem werden zielgruppenspezifische Weiterbildungsprogramme entwickelt, die wiederum selbst prototypische Produkte sind. Zu den Zielgruppen gehören Entscheidungsträger aus unterschiedlichen Sektoren sowie aus der (Kommunal-) Politik und gemeindlichen Verwaltungen, Vertreter von Berufsverbänden, Finanzmanager und beratende Ingenieure wie zum Beispiel aus den Bereichen Bau, Tiefbau, Wasser und Energie.

1.4 Wie beeinflussen Mittelgebirge das Regionalklima in Sachsen – heute und in Zukunft?

Valeri GOLDBERG

Einleitung

Das Klima der Freistaates Sachsen ist das Resultat des Zusammenwirkens großräumiger, regionaler und lokaler Einflussgrößen. Das von West nach Ost zunehmend kontinentalere Übergangsklima Mitteleuropas wird in erheblichem Maße durch den Einfluss von Mittelgebirgen überprägt. Dieser Einfluss zeigt sich regional in der Niederschlagsverteilung durch Stau- beziehungsweise Abschattung an den windzu- beziehungsweise abgewandten Gebirgsseiten, der Ausprägung regionaler Windsysteme (wie dem böhmischen Wind in Sachsen) und Föhneffekten auf die Temperaturverteilung. Lokale Effekte wie unterschiedliche Exposition von Tälern, Hängen und Bergkuppen gegenüber Strahlung und Wind überlagern regionale und großräumige Klimaeinflüsse und führen zu einer weiteren Diversifizierung des Klimas von Sachsen.

Bereits in früheren Arbeiten zum Klima in Sachsen (siehe unter anderem GOLDSCHMIDT 1950, MD DDR/CHMU CSSR 1973, FLEMMING 1993, SMUL 2008) wurde die Bedeutung der Mittelgebirge für die Ausprägung regionaler Besonderheiten des Klimas von Sachsen hervorgehoben.

Der Mittelgebirgseinfluss entstammt dabei sowohl „bodenständigen“ Gebirgen (Elstergebirge, Vogtland, Erzgebirge, Elbsandsteingebirge, Lausitzer Bergland, Zittauer Gebirge) als auch aus umliegenden hohen Mittelgebirgen wie Böhmerwald und Fichtelgebirge. Die „Fernwirkung“ der außerhalb von Sachsen gelegenen Gebirge zeigt sich vor allem in der abschirmenden Wirkung auf den Niederschlag.

Mittelgebirgseinfluss auf den Niederschlag

Generell zeigt sich der Mittelgebirgseinfluss in Sachsen in einer Niederschlagszunahme mit der Höhe über Normalnull. Gleichzeitig sind mit der niederschlagsbringenden Hauptanströmungsrichtung West-Südwest sowohl Staueffekte (Verstärkung des Niederschlags) im Luv und Abschirmung (Abschwächung des Niederschlags) im Lee der Gebirge zu verzeichnen.

Abbildung 1 zeigt die Verteilung des korrigierten Jahresniederschlags für Sachsen in der Klimanormalperiode 1981-2010. Deutlich erkennbar ist, dass die maximalen Niederschlagswerte im Staugebiet des Auersberges im Westerzgebirge und nicht am höher gelegenen Fichtelberg zu finden sind. Gut erkennbar sind auch die von Abschirmungseffekten beeinflussten Gebiete im Tiefland Westsachsens (Regenschatten des Harz), im Osterzgebirge (Zinnwald, Regenschatten des Westerzgebirges). Die verhältnismäßig geringen Werte im Zittauer Gebirge sind vor allem auf den zunehmenden kontinentalen Einfluss zurückzuführen.

Mittelgebirgseinfluss auf die Lufttemperatur

Generell zeigt sich der Mittelgebirgseinfluss in Sachsen in einer Abnahme der Temperatur mit der Höhe über Normalnull. So beträgt die mittlere Temperaturabnahme vom sächsischen Tiefland zum Kamm des Erzgebirges für die letzten 21 Jahre rund $0,6\text{ °C} / 100\text{ m}$. Jedoch führen auch hier regionale und lokale Einflüsse zu Abweichungen gegenüber dem mittleren Temperaturgradienten. So bedingt die Häufung von Kaltluftseebildung in Tallagen bzw. die Ausprägung regionaler Kaltluftströmungen (Osterzgebirge, Oberlausitz) tiefere Temperaturwerte, während zeitweise föhnig beeinflusste Standorte an der Nordabdachung des mittleren Erzgebirges tendenziell höhere Jahreswerte als im Durchschnitt aufweisen. Diese regionalen Unterschiede werden auch in der mittleren Temperaturverteilung in Sachsen in der Normalperiode 1981-2010 sichtbar (Abbildung 2).

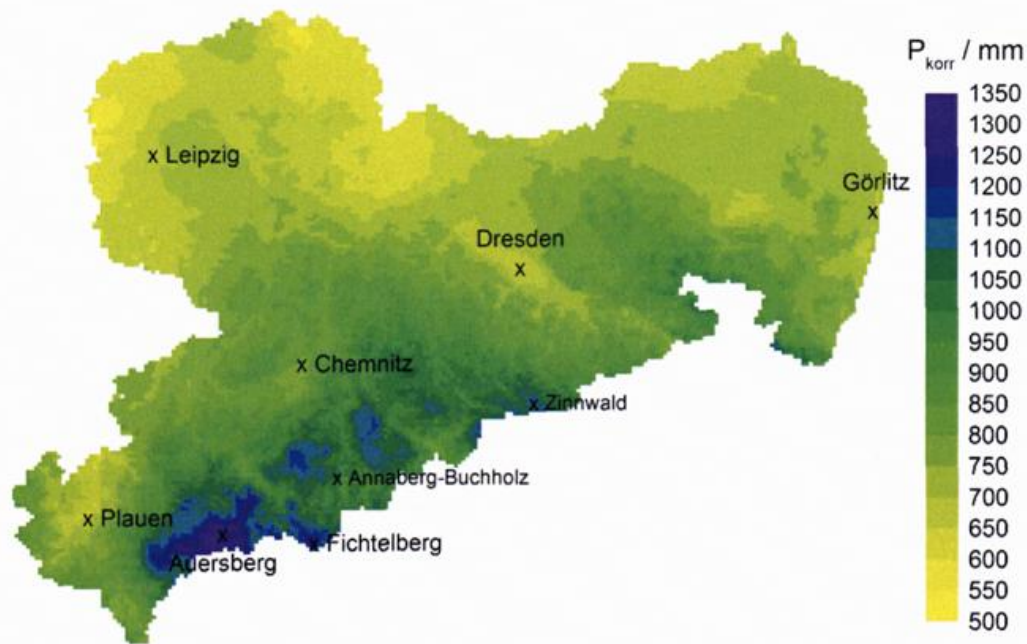


Abbildung 1: Mittlerer korrigierter Jahresniederschlag in Sachsen, Zeitraum 1981-2010 (Quelle: rekis-Datenbank).

Besonders in den Wintermonaten zeigt sich der Einfluss regionaler Phänomene wie Kaltluftflüsse (Böhmischer Wind) und Föhn (Nordabdachung mittleres Erzgebirge), aber auch die stärkere Kontinentalität in Ostsachsen. So ist die Wintertemperatur im Osterzgebirge, Lausitzer Bergland und Zittauer Gebirge in gleicher Höhenlage niedriger als im mittleren und westlichen Erzgebirge.

Die Station Zinnwald-Georgenfeld im Osterzgebirge ist beispielsweise bedingt durch Kaltluftzustrom aus dem Böhmischem Becken, in 25 Prozent aller Tage im Winter kälter als der um 330 Meter höher gelegene Fichtelberg.

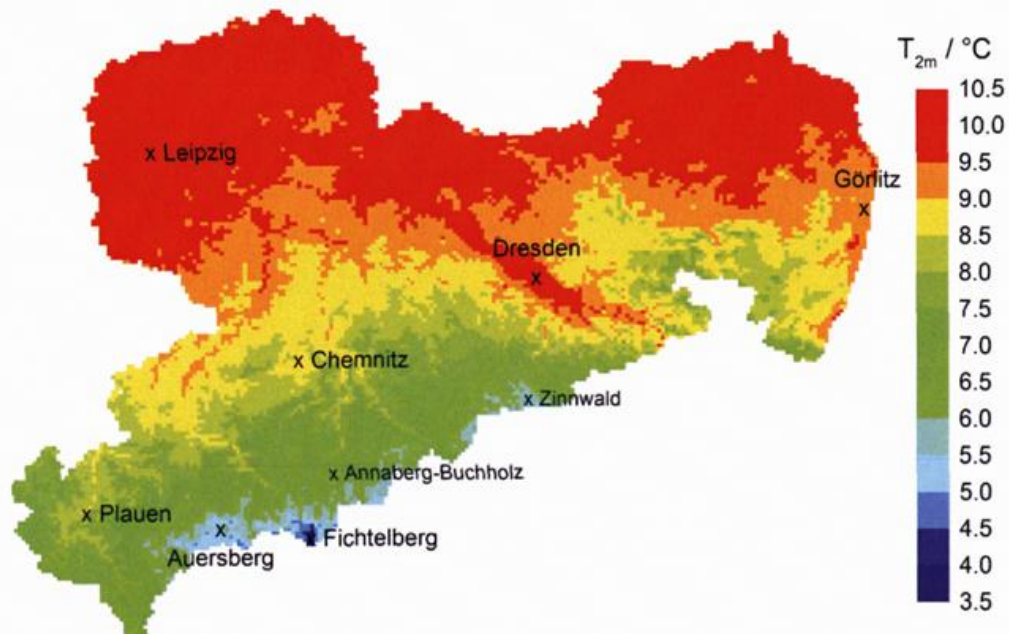


Abbildung 2: Mittlere Jahrestemperatur in Sachsen, Zeitraum 1981-2010 (Quelle: rekis-Datenbank).

Mittelgebirgseinfluss auf die Globalstrahlung

Der Gebirgseinfluss auf die Globalstrahlung zeigt sich durch zwei gegenläufige Höhenabhängigkeiten. Auf der einen Seite nimmt die solare Einstrahlung infolge der Dichteabnahme der Luft (und damit geringer werdender Abschwächung durch Luftstreuung) mit der Höhe zu. Auf der anderen Seite steigt die strahlungsmindernde Häufigkeit von tiefen Wolken und Nebel mit der Gebirgshöhe in Sachsen an. Diese gegenläufigen Höhenabhängigkeiten werden durch regionale Unterschiede in der Wolken- und Nebelhäufigkeit mit direkter Auswirkung auf die regionale Verteilung der Globalstrahlung überlagert. So befindet sich das Minimum der Jahressumme der Globalstrahlung im Kammgebiet des Osterzgebirges und das Maximum an der östlichen Grenze von Sachsen. Das regionale Minimum lässt sich mit der erhöhten Nebelhäufigkeit im Osterzgebirge bei erhöhter Südanströmung (Stundenwerte 1995-2013, Wind aus Süd bis Süd-Südost: Fichtelberg 9,3 %, Zinnwald-Georgenfeld 20,4 %) in Verbindung mit Kaltluftzufuhr aus dem Böhmischem Becken erklären. Das Maximum steht im Zusammenhang mit der abnehmenden Bewölkung infolge Zunahme der Kontinentalität von West nach Ost. Bei näherer Betrachtung der Globalstrahlungsverteilung in den Hauptjahreszeiten zeigt sich, dass der Kontinentalitätseinfluss mit einer West-Ost-Zunahme hauptsächlich im Sommer wirksam ist. Dort dominiert in den Mittelgebirgen die Abhängigkeit von der Höhe – mit einem Minimum der Globalstrahlung am Fichtelberg. Im Winter zeigen sich stärkere Unterschiede zwischen Westerzgebirge mit höheren Strahlungswerten im Vergleich zum Osterzgebirge und Zittauer Gebirge mit geringerer Globalstrahlung. Die Ursachen liegen in der größeren Häufigkeit von Inversionen und föhnartigen Erscheinungen mit tendenziell geringerer Bewölkung im Westerzgebirge und größerer Nebelhäufigkeit infolge des Böhmischem Windes in den Gebirgen Ostsachsens.

Mittelgebirgseinfluss auf den Wind

Wind ist sowohl in Richtung als auch Geschwindigkeit eine sehr stark vom kleinräumigen Gelände und der Landnutzung abhängige Größe. Dennoch lassen sich, ohne kleinräumige Details über zu bewerten, räumliche Verteilungsmuster der Windgeschwindigkeit in Sachsen festhalten:

- generelle Windzunahme mit der Höhe über NN um $0,3$ bis $0,4 \text{ ms}^{-1}$ auf 100 Höhenmeter
- Windschatten hinter größeren Gebirgszügen (zum Beispiel nördöstlich Fichtelberg-Auersberg)
- Windabnahme von West nach Ost (Kontinentalität)
- geringe Windgeschwindigkeit in Gebieten hoher Oberflächenrauigkeit (Waldgebiete der Lausitz, Elbsandsteingebirge)

Mittelgebirgseinfluss in der Zukunft

Die Veränderung des Mittelgebirgseinflusses auf das Klima von Sachsen in der Zukunft steht im Zusammenhang mit der Veränderung von mit der Topographie wechselwirkenden Klimaelementen. Generell ist davon auszugehen, dass die dominierende Höhenabhängigkeit der Klimaelemente erhalten bleibt. Dies betrifft jedoch nicht den Klimatrend. Hier zeigen sämtliche regionale Projektionen für Sachsen, dass zum Beispiel der Temperaturtrend keine Höhenabhängigkeit aufweist.

Die möglicherweise stärkste Auswirkung auf den Mittelgebirgseinfluss in der Zukunft hat die Änderung der Wetterlagenhäufigkeit. Diese Änderung wirkt sich direkt auf die Häufigkeit bestimmter Anströmrichtungen und damit auf die Ausprägung von Luv- und Leeeffekten an den Mittelgebirgen Sachsens aus. Eine wahrscheinliche Erhöhung des Anteils von West- und Südwestwetterlagen im Winter wird die Stau- und Abschirmungseffekte verstärken. Dies wird in Zukunft wahrscheinlich zu stärkeren regionalen Unterschieden in der Niederschlags- und Temperaturverteilung zwischen Ost- und Westsachsen führen.

Literatur

- METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR, HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV ČSSR, 1973: Klima und Witterung im Erzgebirge. Abh. des Meteorol. Dienstes DDR 104. Akademie-Verlag, Berlin, 166 S.
- FLEMMING, G., 1993b: Klima und Immissionsgefährdung des Waldes im Osterzgebirge. Arch. für Nat. - Lands. 32, 273-284.
- GOLDSCHMIDT, J., 1950: Das Klima von Sachsen. - Abh. des Meteorol. Dienstes d. DDR 3, 36 S.
- SMUL, 2008: Sachsen im Klimawandel – eine Analyse. Freistaat Sachsen. Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.), 211 S.

1.5 Besondere Herausforderungen einer Bergstation bei der Ermittlung meteorologischer Daten

Gerd FRANZE

Messfeld

Mit der Errichtung einer amtlichen Wetterwarte von 1914 bis 1915 und dem offiziellen Beginn der Messungen am 01.01.1916 war ein Messfeld eingerichtet. Weil man aus der Vergangenheit her meinte, man könne sich oft wegen der Wetterunbilden nicht zum Beobachten und Messen ins Freie begeben, wurden die psychrometrischen Werte in einer „Großhütte“ befindlichen Wetterhütte ermittelt, die über einen zirka zwei Meter langen Gang vom Arbeitszimmer des Hauptgebäudes aus erreichbar war. Auch der flüssige Niederschlag wurde anfangs von innen bestimmt. Man erkannte aber sehr bald, dass beide Aufbauten durch Gebäudeabschattungen zu erheblichen Fehlmessungen führten. Daher wurden in südlicher Richtung die normale „Englische Hütte“ zirka 20 m und der Niederschlagsmesser etwa 15 m vom Hauptgebäude aus entfernt aufgestellt. Im geophysikalischen Jahr 1957 wurde in südlicher Richtung der danach genannte fünf Meter hohe „IGJ-Turm“ zur Aufnahme verschiedenster Strahlungsmessgeräte errichtet. Das war notwendig, weil das alte Fichtelberghaus Abschattungen und daher Fehlmessungen zur Folge gehabt hätte. Die einhergehende Modernisierung, die weitere Automatisierung und die konsequente Umsetzung der Forderungen, der in der WMO geltenden Vorschriften, machte eine Angleichung des Messfeldes auch an der zu errichtenden Klimareferenzstation Fichtelberg erforderlich. So wurde 2005 begonnen, die Windmessung von 2m auf sechs Meter über Dachspitze durch einen neuen Mast anzuheben, einen Mast, der über zwei Stockwerke hinab im Gebäude verankert wurde. 2006 erhielten die Sonnenstrahlungsmessgeräte eine Traverse, die in einheitlicher Höhe nach Süden ausgerichtet, aufgebaut wurden. Im selben Jahr erfolgte der mustergültige Umbau des Messfeldes, wie es den Vorschriften einer Klimareferenzstation entspricht. Mit Abschluss dieser Umgestaltungen besitzt die Wetterwarte Fichtelberg seit 2006 das höchstgelegene Referenzmessfeld Deutschlands! Ebenfalls das Ansinnen möglichst lang und ohne Unterbrechungen am selben Ort Messwerte mit hoher Qualität zu gewinnen, erfüllt die Bergwetterwarte nun schon seit 100 Jahren. Aber trotz dieser aus heutiger Sicht glücklichen Umstände bleibt es nicht aus, dass Veränderungen in der näheren Umgebung des Messfeldes die Messreihen beeinflussen. Die forstwirtschaftlichen Einflüsse spielen hier eine nicht unerhebliche Rolle.

Luftdruckmessung

Seit Beginn an wird mit dem Quecksilberbarometer der Luftdruck bestimmt. Falsche Werte können nur entstehen, durch Falschablesung, manuelles Umrechnen, manuelle Reduktion oder falsches Abschreiben. Gerätetechnisch dürften Fehlmessungen bei fachgerechter Installation kaum vorkommen. Mit der Einführung der AFMS 2 im Jahre 1990 wurde erstmalig ein elektronischer Luftdruckmesser benutzt. Selbst dieses Gerät brachte bereits ausreichende Genauigkeit, wie Vergleichsmessungen ergaben. Mit der Weiterentwicklung wurden bis heute immer bessere Luftdrucksensoren (AIR-DB_1A) eingesetzt, die so präzise arbeiten, dass sie faktisch in ihrer Qualität, nicht mehr vom Quecksilberbarometer zu unterscheiden sind.

Parallel wurden wegen der kontinuierlichen Messwertregistrierungen und zu Vergleichszwecken Barographen betrieben, die im Routinebetrieb manuellen Aufwand in Form von wöchentlichem Registrierstreifenwechsel, das Nachfüllen von Tinte, das Aufziehen der Uhrwerkstrommel, Justierungs- und Wartungsarbeiten notwendig machten.

Wind

Für die Windmessung gibt es die verschiedensten Messverfahren. Die mechanischen wurden aus praktischen Gründen bevorzugt eingesetzt. Die größten Probleme entstehen aber vor allem in den Wintermonaten durch Vereisung der beweglichen Teile der Messanlagen, so dass in den ersten Jahren die Windgeschwindigkeit dann oft nur geschätzt werden konnte.

Das Anemometer von Prof. P. Schreiber für den Fichtelberg entwickelt, arbeitete nach dem Staudüsenprinzip. Leitungen, die bis ins Dienstzimmer führten, hätten erhebliche Druckverluste zur Folge gehabt.

Daher wurden diese so kurz wie möglich gehalten. Zur Bestimmung der Windwerte musste daher der Weg mehrmals täglich zu Fuß bis in den Turm der Wetterwarte erfolgen. Vor Inbetriebnahme klang der Wortlaut von Prof. Schreiber sehr hoffnungsvoll: „Man wird also mit großer Schärfe Richtung und Geschwindigkeit des Windes bestimmen können. Es wird auch leicht sein, die Vorrichtung selbst bei dem tollsten Winterwetter in Wirksamkeit zu erhalten.“



Abbildung 1: Extremes Klareis am Windsensor.

Mit der Inbetriebnahme des beheizbaren Fuess 82a-Gerätes (Staudüsenanemometer) 1943 konnten auch in den Wintermonaten die Winddaten kontinuierlich erfasst und endlich auch die Windspitzen gemessen werden, weil dieses Gerät beheizbar war. Vereisungen ließen sich dennoch nicht vermeiden. Dann musste die Heizung per Hand abgeschaltet werden, um ein Durchbrennen der Heizdrähte zu vermeiden. Immer gelang das nicht. Deshalb war auch wegen der immer öfter eintretenden Verschleißerscheinungen am Kompressor das Gerät im Winter nicht in Betrieb und wurde durch das nichtbeheizbare Schalensternanemometer Junkalor ersetzt und bei Eisansatz die Winddaten durch Ersatzhandmessungen oder Schätzungen ermittelt.

Um bei nicht oder nur teilweise funktionierender Heizung des Fuess-Anemometers doch einigermaßen Werte zu gewinnen, war es Aufgabe des Beobachters, mit Kleinwerkzeug bewaffnet, den Aufstieg zur zirka drei Meter über dem Turmdach befindlichen Windfahne zu wagen, um die Düsen von Schnee und Eis zu befreien, ein fragwürdiges und sehr abenteuerliches Unternehmen und heute aus arbeitsschutzrechtlichen Gründen undenkbar. In den 80er Jahren verschärfte sich das Problem der nichtfunktionierenden Geräteheizung zusehend, da keine Ersatzteile für die Beheizung mehr zu besorgen waren. Bemühungen aus dem „nichtsozialistischen Ausland“ beheizbare Schalensternanemometer zu erwerben, scheiterten leider.

Aber selbst bei funktionierendem Fuess-Anemometer war von Beginn an ein stündlicher Gang vom Dienstzimmer zum Turm und zurück notwendig, um das 10-Minuten-Mittel mit der stündlichen Windspitze vom Registrierstreifen abzulesen. Da ein Aufstellen des Registriergerätes im Erdgeschoss wegen der zu lang werdenden Luftleitungen und der daraus resultierenden zu großen Messfehler nicht möglich war, musste

diese „Körperertüchtigung“ besonderer Art, in Kauf genommen werden. Mit der Einführung der AFMS-2 und des Anschlusses des MIRIAM/ THIES Windgebers 1991 wurde das Staudüsenanemometer Fuess 82 ersetzt. Vor allem das Problem der Übertragung der Heizleistung auf die beweglichen Teile von Schalenstern und Windfahne wurde mit dem neuen Geber recht gut bewältigt. Mittlerweile sind diese für Bergstationen gefertigten Windmessgeräte rund 30 Jahre in Betrieb, ist die Heizelektronik anfällig geworden und es häufen sich, trotz der zweijährigen Wartungsintervalle, Ausfälle, so dass in den Wintermonaten Ersatzhandwindmessungen über Monate hinweg vorgenommen werden müssen. Weil mit diesem Gerät aufgrund der Windbestimmung als vektorielle Größe beide Sensoren gekoppelt wurden, ist bei Ausfall einer Komponente - Windrichtung oder Windgeschwindigkeit – die jeweils andere ebenfalls unbrauchbar.

Extreme Eisablagerungen im Dezember 2014 verursachten durch das Abbrechen von Schalenstern und Windfahne die teilweise Zerstörung der Messeinrichtung. Weil auch zahlreiche Waldschäden (Wipfelbrüche und Baumstürze) im näheren Umfeld auftraten, der Havariendienst und die Feuerwehr im Dauereinsatz waren, erkannte ich auch, dass die an dem sechs Meter langen Windmast zirka zwei Meter langen Klareisablagerungen und der herrschende Wind von Beaufort 6 ihn stark zum Schwanken brachten. Im Turminnenen zeigten sich bereits Risse. Um eventuelle Gefahren abzuwehren, beschloss ich, die Bergsteigerausrüstung anzulegen und den Eisansatz nach meinen Möglichkeiten zu entfernen. Zwei Drittel des Eises konnte ich so entfernen, mehr war nicht drin.

Als Test für den Wintereinsatz wurde ein Ultraschallanemometer an der Wetterwarte Fichtelberg bereits aufgebaut. Eisablagerungen, siehe Abbildung 1 erzeugen Verwirbelungen und Abschattungen, die aber der geforderten qualitativen Windmessung entgegenstehen. Eine ordentliche Schaftheizung wäre da dringend erforderlich. Mit dem in Aussicht stehenden 3-D-Ultraschallgeber, der auch Windgeschwindigkeiten bis 80 ms⁻¹ vorgibt zu messen, sollte eine ausreichend starke Heizung zu den Mindestanforderungen gehören.

Lufttemperatur- und Luftfeuchtemessung

Wetterhütte (Englische Hütte)

Wichtig ist eine sturmsichere Verankerung der Gestelle im Erdboden und Material, das mindestens 10 Jahre lang hält. Diese Messhütte wird bis heute eingesetzt, besteht aus Hartholz und ruht auf einem Edelstahlgestell. Weil im Winter der Einsatz der Wetterhütte vom Typ LAM 630 an einer Bergstation nicht möglich ist, wurde eine zweite „Englische Hütte“ zur Aufnahme der elektronischen Lufttemperatur- und Feuchtemessgeräte aufgebaut.

Durch Umwelteinflüsse ergraut der weiße Farbanstrich recht schnell, so dass er spätestens nach vier bis fünf Jahren erneuert werden muss. Das war früher Aufgabe der angestellten Beobachter in den Sommermonaten und wird heute durch den Servicedienst vorgenommen. Um eine einwandfreie Funktionalität (Durchlüftung) auch in den Wintermonaten zu gewährleisten, muss jedoch auch hier Eis und Schnee abgeklopft und abgekehrt werden. Geschieht das nicht, dann kann in Extremsituationen die Hütte von allen Seiten so dicht vereist sein, dass über Stunden, wenn nicht sogar über Tage hinweg, „Eisschrankverhältnisse“ gemessen werden. Manchmal ließ es sich trotz aller Vorsicht nicht vermeiden, dass bei Säuberungsaktionen die Wetterhütten Schaden nahmen.

Lufttemperatur

Von Anbeginn wurden Quecksilberthermometer verwendet. Seit 1987 hielten auch an der Wetterwarte Fichtelberg Widerstandsthermometer vom Typ (PT 100) Einzug. Mit der Automatisierung werden nun Lufttemperaturen kontinuierlich erfasst und Quecksilberthermometer nur noch zu Vergleichszwecken genutzt. Vor allem die Wintermonate verlangen personellen Einsatz. Die Belüftungsschächte der Quecksilberthermometer wurden verkorkt und nur zu den Messungen geöffnet. Das hatte den Vorteil, dass die Gefäße weitestgehend trocken und auch nicht vereist waren. Mit PT 100-Widerstandsthermometern wird nun kontinuierlich gemessen. Eine Reinigung vor der Messung ist logischerweise nicht möglich. Daher beschlägt bei Nebel der Messfühler oder vereist bei Temperaturen unter 0°C. Auch Schnee kann sich bei stürmischem Wetter auf dem Messfühler ablagern. Nach Beendigung des Nebels oft während des Übergangs zum Nebelmeer trocknet die Luft stark aus. Dann entspricht die Messung der Lufttemperatur oft über

Stunden hinweg eher dem eines vereisten Thermometers. Um dauerhafte Fehlmessungen zu vermeiden, wird hier gegebenenfalls mit einer in der Thermometerhütte befindlichen Bürste vorsichtig Eis und Schnee von den Messfühlern entfernt. Ohne Personal müssten diese Fehlmessungen einkalkuliert werden.

Gängige Praxis ist das tägliche Auslegen des Erdbodenglasthermometers zur Ermittlung des Minimums der Temperaturen 5 cm über dem unbewachsenen Erdboden in den Nachtstunden. Bei Winterwitterung wurde es auf die Schneedecke gelegt und die Stelle markiert, um das Thermometer bei Neuschnee wiederzufinden und es dann wieder über der Schneedecke zu platzieren. Mit der Einführung der Messung auch dieser Temperaturkomponente mit dem PT 100 wird mit ihm ebenso verfahren und die Positionierung je nach Schneelage angepasst. Bei vollautomatischem Betrieb verbleibt das Thermometer unter der Schneedecke und die wirklichen Temperaturen über der Schneedecke gehen damit verloren.

Luftfeuchtigkeit

Weil eine Luftfeuchtebestimmung immer gleichzeitig zur Temperaturmessung erfolgt, treffen die oben gemachten Aussagen in gleicher Weise auch hierfür zu. Erst mit der elektronischen Luftfeuchtemessung treten Unterschiede zutage, weil nun nicht mehr über eine Temperaturmessung die Feuchte bestimmt, sondern ab 1990 mit einem Taupunktfühler und ab 2006 mit einem kapazitiven Feuchtesensor die Luftfeuchtigkeit direkt gemessen wird.



Abbildung 2: PT 100-Widerstandsthermometer und HMP 45D-Feuchtesensor nach Schneesturm.

Jedes Messprinzip hat relativ große Schwierigkeiten Luftfeuchten bei sehr niedrigen Temperaturen zu bestimmen. In einem Vergleich wurde ein kapazitiv messender Feuchtesensor mit dem Hüttenpsychrometer durchgeführt. Im Ergebnis gleicht die Änderung des kapazitiven Fühlers dann eher der Änderung der Temperatur als der Feuchte. Wird es deutlich wärmer, verfliegt dieser Effekt.

Niederschlagsmessung

Niederschlagsmenge

Konventionelle Niederschlagsmessung

Mit dem Bau der Wetterwarte wurden die Niederschlagsmesser auf dem nach Süden ausgerichteten Vordach so aufgebaut, dass man zumindest flüssigen Niederschlag innen registriert und die Menge gleichzeitig durch das Öffnen eines Hahnverschlusses messen konnte, ohne ins Freie zu müssen. Weil die Gebäudenähe aber deutliche Fehlmessungen verursachte, wurde nach kurzer Zeit ein mit 500 cm² Auffangfläche ein bis heute eingesetzter Niederschlagsmesser nach Hellmann auf dem Messfeld platziert. Später wurde dieser mit einem

„Nipherschen Windschutzring“ versehen. Je nach Jahreszeit eingesetzt wurden die sogenannten Sommer- und Wintertöpfe. Mindestens einmal am Tag bei Niederschlag wurde die Messung vorgenommen. Bei festen Niederschlägen müssen die erheblich größeren und im Vergleich zu den 200er Messtöpfen schwereren Behälter ins Gebäude zum Auftauen gebracht und der Austauschbehälter wieder auf dem Gestell zur neuen Messung platziert werden. Weil das Auftauen bei viel Neuschnee Stunden bräuchte, wird im Ausnahmefall mit warmen Wasser nachgeholfen. Eine Niederschlagsmessung kann so bis zu zwanzig Minuten dauern.

Mehrfach wurden Vergleichsmessungen mit dem Hellmann Niederschlagsmesser 200 cm² unternommen. Immer zeigte sich, dass vor allem bei festen Niederschlägen deutlich weniger gemessen wurde als mit 500 cm²-Messtöpfen. Unterschiedliche Aufstellungshöhen beeinflussen ebenfalls das Messergebnis. Je tiefer die Aufstellungshöhe, umso höher ist der gemessene Niederschlag. Weil ein Einsatz von 200er Niederschlagsmessern nach Hellmann 100 cm über dem Erdboden vorschrieb, zeigten die Vergleichsmessungen, einen Kompensationseffekt gegenüber dem 500er, dessen Aufstellungshöhe immer 200 cm vom Erdboden betrug. Ab 2006 wurden auch die 200er Hellmann Niederschlagstöpfe mit Spezialhaltern auf zwei Meter angehoben. Der Einsatz von Schneekreuzen bei festen Niederschlägen verbessert die Messergebnisse deutlich bei beiden Geräten, vor allem dann, wenn starker Wind vorherrscht. Ins Gegenteil verkehren sich die Messergebnisse mit Schneekreuz vor allem bei Nebelnässen und Sprühregen, dann bewirkt der Einsatz von Schneekreuzen eine Verringerung des gemessenen Niederschlages.

Automatische Niederschlagsmessung

Mit der Einführung automatischer Messeinrichtungen 1989 wurde auch der NG 200 Niederschlagsmesser an der Wetterwarte Fichtelberg eingesetzt. Bei Regen lagen die Messergebnisse im Vergleich mit dem 200er Hellmann weitestgehend nah beieinander. Bei festem Niederschlag und der notwendig eingeschalteten Auftauheizung entstanden allerdings erhebliche Verdunstungsverluste und Messergebnisse, die nicht zu gebrauchen waren. Je niedriger die Temperaturen waren, umso mehr verstärkte sich dieser Effekt.

Die Ablösung dieses Gerätes erfolgte mit der Errichtung des neuen Messfeldes 2006 durch den Aufbau des „Pluvio Ott“, ebenfalls ein Niederschlagssensor mit 200 cm² Auffangfläche, dessen Messprinzip auf Wägung beruht. Damit war das Problem, dass nicht mehr kontinuierlich beheizt werden musste, gelöst. Beheizt wird nur der obere Rand, so dass der Messbehälter nicht festfriert. Damit verbesserte sich die Messgenauigkeit erheblich und kam der des 200er Hellmannniederschlagsmessers ziemlich nahe. Aber selbst dieses Messprinzip brachte einige Nachteile mit sich. Von Zeit zu Zeit muss der Messbehälter geleert werden, da keine automatische Entleerung bei gefrorenem Inhalt möglich ist. Gleichzeitig hat vor allem die unterschiedliche Füllstandshöhe in Bezug zum Wind Einfluss auf das Messergebnis. Unterschiede brachte auch das fehlende Schneekreuz. Anfangs hatte der Wind noch einen ganz anderen Effekt: Er versetzte das gesamte Gerät in Schwingungen, die dazu führten, dass viel zu viel Niederschlag gezählt wurde. Mit dem Einsatz eines „Deflektors“ konnte das Problem behoben werden.

Nicht selten kam es vor, dass ab Schneehöhen von 150 cm die Aufnahmegestelle samt der Messgeräte im Schnee versanken und ab 200 cm ganz unter der Schneedecke verschwanden. Die elektronischen Niederschlagsmesser waren fest installiert und konnten nicht, wie die Hellmanngeräte, auf Hilfgestelle angehoben werden. Weit vorher wurden bereits bei leichtem Schneefegen erhebliche und unrealistische Niederschlagsmengen ermittelt. Wegen dieser Schwierigkeiten und den Unterschieden zum 500er Hellmann Niederschlagsmesser mussten die dreistündigen Messwerte der Zwischentermine immer korrigiert werden. Deswegen wurde der „Pluvio Ott“ wieder abgebaut.

Niederschlagsdauer

Niederschlagsmelder „Kroneis“ oder „Thies“ können Beginn, Ende und Dauer des Niederschlages feststellen. Bei relativ unproblematischen Wetterlagen auch minutengenau und so besser als das manuell machbar wäre. Grenzen zur Erfassung von Niederschlagsereignissen zeigten sich immer bei Windeinflüssen. Umhergewirbelte Tropfen von Gebäuden, Gegenständen und Bäumen sowie aufgewirbelter Schnee bei Schneetreiben und die Hinterlassenschaften von Vögeln verursachten Niederschlagsereignisse, die im Nachhinein aus der Datenbank herauskorrigiert werden mussten. Dieser erhebliche Mehraufwand führte zur Einstellung der Messung dieser Komponente.

Schneedeckemessung

Schneehöhenmessung

Die Messung der Schneehöhe an einer Bergstation stellt immer eine Herausforderung dar. Sie ist deshalb so schwierig, weil sich eine Schneedecke sehr unterschiedlich aufbaut.

Viele Einflussfaktoren wirken jährlich unterschiedlich. Eine Schneehöhenbestimmung an nur einem Punkt kann daher nie die repräsentative Schneehöhe darstellen. So wurde schon ab 1916 an mehreren Stellen mit dem Handschneepegel gemessen und ein Mittelwert gebildet. In den 40er Jahren waren es 30 Einzelmessungen jeweils 10 Messungen in drei Himmelsrichtungen. Ab 1951 wurde auf 40 Einzelmessungen pro Haupthimmelsrichtung übergegangen und zusätzlich ein Standschneepegel zum Vergleich errichtet. Gekennzeichnet wurden die Messstrecken mit runden farbigen Scheiben, die des Öfteren als Souvenir der Skifahrer dienten. Das Problem der Handschneepegelmessungen war auch, dass vor allem bei Schneehöhen ab einem Meter kaum feststellbar war, ob man eine Zwischeneisdecke erwischt oder man bereits in den Erdboden gestochen hat. Erst mit der Errichtung von 40 Standschneepegeln ab 1990 wurde dieses Problem behoben. 2006 wurden diese auf 16 (4 pro Haupthimmelsrichtung) als ausreichend eingeschätzt und entsprechend reduziert. Selbst das Aufstellen dieser an den richtigen möglichst repräsentativen Standorten erwies sich schwieriger als gedacht. Nahe gelegene Skischneisen, Beschneiungsanlagen, möglichst Waldlage mit nicht zu dichtem, aber auch nicht zu offenem und zu hohem Baumbestand, genügend großer Abstand von Gebäuden, dem Fichtelbergplateau und dem Fremdenverkehr aber trotzdem für den Beobachter gut erreichbar, das waren Kriterien, die nach langem Suchen erfüllt worden sind. Mindestens einmal pro Woche wird eine Schneehöhenmessung durchgeführt und zwischendurch abschätzend angepasst. Bei viel Neuschnee oder starkem Tauwetter erfolgen Zwischenmessungen. Damit ist eine ausreichend genaue Schneehöhenbestimmung möglich.

Zu sämtlichen Messgängen ist man unter Umständen mehrere Stunden unterwegs, vor allem ist das dann immer ein Erlebnis, wenn viel Neuschnee selbst Ski oder Schneeschuhe bei jedem Schritt einsinken lassen und der Beobachter nach mehreren Stunden immer schwitznass wieder an der Wetterwarte ankommt.

Selbst die Entscheidung, bei den Standschneepegeln die richtigen zu benutzen, fiel nicht leicht. Nachdem Baulatten selbst beschriftet und nach wenigen Jahren ausgetauscht werden mussten, hatten sich diese doch noch als eine gute Wahl erwiesen.

Resümierend lässt sich feststellen, dass der Fichtelberg als Gipfelstation eine der genauesten Schneehöhenmessungen über Jahrzehnte hinweg durchführt. Das ist auch deshalb möglich, weil der Fichtelberg sich unter der Baumgrenze befindet. Anderenfalls wäre eine Schneehöhenbestimmung weitaus schwieriger.

Automatische Schneehöhenmessgeräte messen nur an einem Punkt oder heute an drei Punkten innerhalb eines Quadratmeters aber nahezu zentimetergenau, können aber trotzdem als Einzelgerät niemals ausreichend genau die wahre und repräsentative Schneehöhe für das Fichtelberggebiet abbilden. So bleibt aus heutiger Sicht eine manuelle Messung unerlässlich.

Schneedichtemessung

Benutzt man ein bestimmtes Volumen der Schneedecke wiegt es aus oder taut den Schnee auf und bestimmt die Wassermenge per Messglas, dann kann man den Wassergehalt und somit die Schneedichte bestimmen. In der Praxis wurde an der Wetterwarte Fichtelberg immer eine möglichst homogene und repräsentative Fläche für die ganze Wintersaison ausgesucht und die Schneedichte bestimmt. Auch heute wird noch eine 50 cm² Fläche Schnee ausgestochen, die Höhe und durch Auswiegen das Gewicht bestimmt. Anhand dieser gewonnenen Parameter werden bis heute der Wassergehalt und die Schneedichte errechnet.

Messung von Strahlungswerten

Campbell-Stokes

Mit der Aufstellung des Sonnenscheinautographen (Campbell-Stokes) war es möglich, eine Komponente der Sonnenstrahlung einigermaßen genau zu messen, die Sonnenscheindauer. Beeinflusst in den Sommermonaten wird die Messung allenfalls dann, wenn die benutzten Streifen feucht oder nass sind und die Brennglaswirkung erst später einsetzt und somit die Sonnenscheindauer vermindert aufgezeichnet wird. Bei Temperaturen unter 0°C und an Bergstationen mit häufigem Nebel bilden sich schnell Ablagerungen, die sich an Glaskugel und Registrierstreifen absetzen. Selbst bei voller Sonne und geringen Ablagerungen wird nichts mehr registriert. Daher ist es hier nicht möglich, das Gerät ständig mit Streifen am Aufstellungsort zu belassen. In der Praxis konnte sich auf dem Fichtelberg dieses Gerät nur bewähren, wenn es möglichst rasch aufgestellt oder ins Gebäude geholt werden konnte, das hieß aber, dass der Beobachter immer dann, wenn die Sonne sich zeigt, auf den Turm steigen musste, um den Campbell-Stokes in Position zu bringen und bei wieder einsetzendem Nebelfrost dann wieder ins Gebäude zu holen. Im Extremfall war der Diensthabe dann mehrmals am Tag auf und ab unterwegs. Von 01.11.1921 war dieses Gerät im dauerhaften Einsatz und lieferte gute Dienste. Im Vergleich mit dem SONI registrierte es in den Wintermonaten zu wenig und in den Sommermonaten zu viel Sonnenscheindauer. Mit dem Ende der Klimareferenzstation der Wetterwarte Fichtelberg am 31.12.2014 endete auch die Messung der Sonnenscheindauer mit diesem Gerät.

SONI

Ab Januar 2000 wurde der elektronische Sensor (SONI) zur Messung der Sonnenscheindauer eingesetzt. Zum Abtauen von Tau- oder Reifbeschlag besitzt das Gerät eine Heizung mit der Leistung von 16 W. Diese reicht für die Extremlagen von Bergwetterstationen bei weitem nicht aus. Es ist bei entsprechender Witterung oft täglicher manueller Aufwand notwendig, das heißt, es wird mit geeignetem Werkzeug die Glaskuppel möglichst ohne Kratzspuren zu hinterlassen, von Eis, Reif und Schneeablagerungen befreit. Im vollautomatischen Betrieb würde dieses Gerät in den Wintermonaten oft nicht die erforderliche Qualität der Messwerte erbringen und bei stärkerer Vereisung keine Strahlen mehr durchlassen. Auch muss wöchentlich die geräteeigene Drehzahl von mindestens zwanzig Umdrehungen pro Minute kontrolliert werden. Sinkt diese deutlich unter die geforderte Umdrehungszahl ab, muss der SONI getauscht werden. Weil das im Dauereinsatz langsam geschieht, wäre das aus der Ferne nicht unmittelbar zu erkennen, ebenso das Bilden von Kondenswasser am Inneren der Glaskuppel. Regelmäßige Kontrollen mindestens einmal wöchentlich sind daher unerlässlich!

Pyranometer

Das unter anderem auch zur Sonnenforschung ausgerufene Internationale Geophysikalische Jahr 1957 war Anlass, auch auf dem Fichtelberg dazu eine Messstelle einzurichten. Es werden die Globalstrahlung und diffuse Himmelsstrahlung heute noch gemessen und bilden nun eine über 50-jährige Messreihe. Um diese beiden Elemente möglichst qualitätsgerecht messen zu können, war anfangs erhöhter personeller Aufwand erforderlich. Bis 1990 war es Aufgabe des Beobachters mindestens 14-tägig bei Sonnenschein eine Vergleichsmessung durchzuführen. Hierzu kam das Bimetall-Pyrheliometer nach Michelson und Marten zum Einsatz. Die Benutzung elektromechanischer Schreiber erforderte zusätzlichen Aufwand, um durch Papierrollenwechsel, Nachfüllung von Registriertinte und dauernde Kleinreparaturen die Mechanik am Laufen zu halten. Keine Registrierung hieß: kein manuelles Auslesen der Messwerte möglich und somit Datenausfall. Trotz großer Bemühungen war es nicht immer möglich, Daten kontinuierlich zu erfassen. Daher ist die Messreihe zu Global- und diffuser Himmelsstrahlung lückenhaft.

Weil das Messprinzip auf Temperaturmessung basiert, sind diese Geräte nur belüft- aber nicht beheizbar. Somit war in den Sommermonaten täglich mindestens ein Kontrollgang zum IGJ-Turm notwendig. Bei Schnee-, Eis- und Nebelfrostansatz musste mehrmals täglich der Kontroll- und Reinigungsgang zu den Messgeräten erfolgen. Selbst heute muss mit Bürste und Lappen eine möglichst schonende Reinigung von Schnee und Eis erfolgen, um die Kalotten vor Kratzern zu schützen, um so eine möglichst genaue qualitativ hochwertige Messung zu garantieren. Außerdem ist es für die diffuse Himmelsstrahlung auch heute noch notwendig, den Schattenring wöchentlich manuell entsprechend dem Sonnenstand nachzuführen. Mit der Anbindung der Sensoren an die AFMS II und später an die AMDA war das Auslesen der Strahlungsdaten

wesentlich komfortabler. Ausfälle sind so gut, wie nicht mehr zu verzeichnen, in der Hauptsache deshalb, weil Personal vor Ort die tägliche Gerätebetreuung übernahm.

Sichtweite

2006 wurde der automatische Sichtweitenmesser „Degreane DF20+“ aufgebaut und an die Miriam angeschlossen. Seither dient er als Sekundärgerät. Die vom Beobachter manuell ermittelte Sichtweite wird auch heute noch primär für die synoptischen Wettermeldungen und für die Klimareihe benutzt.

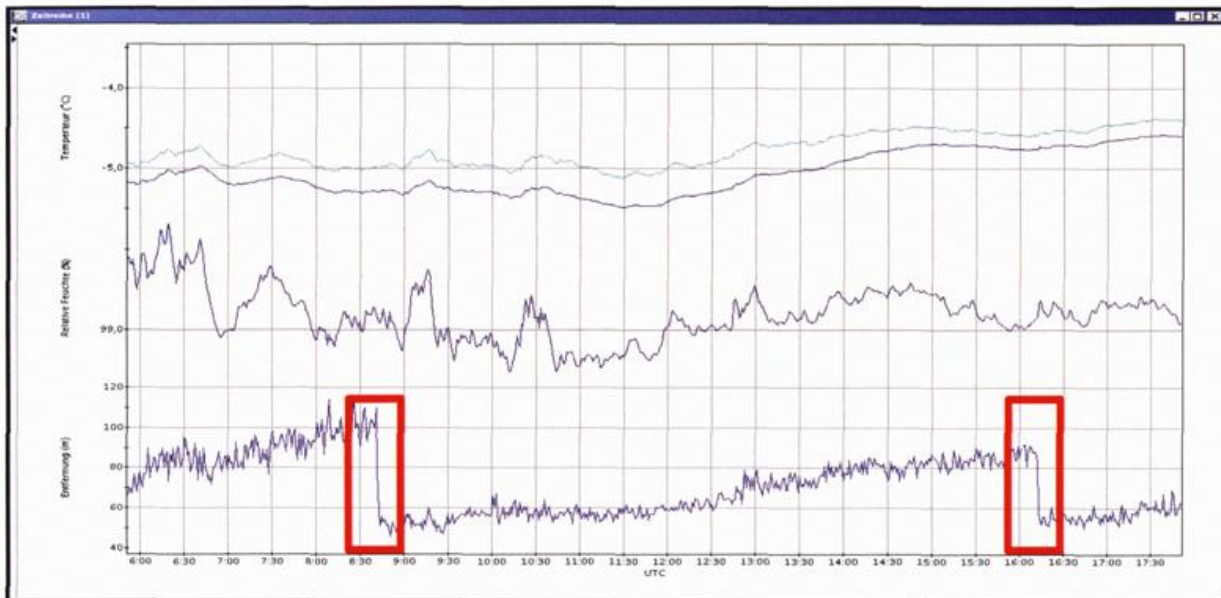


Abbildung 3: Automatische Sichtweitenmessung vor und nach der Reinigung von Eisablagerungen.

Nach 10-jährigem Einsatz des DF20+ kann eingeschätzt werden, dass ein vollautomatischer Einsatz zum Qualitätsverlust der Sichtweitenbestimmung führen würde. Dieses Gerät misst nicht die Sichtweite, sondern berechnet diese anhand der Lichtstreuung an einer zirka einen Meter langen Messstrecke. Der maximal ermittelbare Wert liegt bei 70 km, weitab von den hier möglichen 200 km. Vergleichsuntersuchungen zur Genauigkeit haben ergeben, dass das Gerät, wenn kein Sonnenschein zu verzeichnen war, bis zirka 20 km recht gute Berechnungsergebnisse liefert. Über diese 20 km hinaus streuen die Ergebnisse exponentiell. An Strahlungstagen (Sonnenschein von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang) wird deutlich, dass wenn sich die Sonne bis in Richtung Süden bewegt, die Messwerte deutlich geringer werden und nach Westen dann wieder ansteigen, das heißt die direkte Sonnenstrahlung eine Verfälschung (Minderung) der Messwerte mit sich bringt. In allen Jahreszeiten lässt sich dieser Effekt nachweisen. Auch die eingebaute Heizung zum Abtauen von Eis- und Schnee ist nicht ausreichend. Daher wird manuell mit einem Besen vorsichtig gereinigt. An Abbildung 3 wird deutlich, dass bei Nebelfrostsituationen mindestens aller zwölf Stunden diese Prozedur durchgeführt werden muss!

Resümee

2016 feiert die Wetterwarte Fichtelberg ihr 100-jähriges Bestehen und damit auch eine 100-jährige ununterbrochene Datenreihe, die aus unzähligen Mess- und Beobachtungsergebnissen besteht. Dass das so ist, haben wir dem Bemühen all derjenigen zu verdanken, die vor über 100 Jahren begannen, die Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass auf Sachsens höchster Erhebung ein Gebäude errichtet wurde, das damals wie heute den modernen Ansprüchen genügt, hier oben Meteorologie zu betreiben. Trotz Wetterunbilden, schlechter Verkehrsverbindungen war der hier Diensthabende oft wochenlang allein verantwortlich zur Durchführung der Wetterbeobachtung und gleichzeitig auch als Hausmeister tätig, um das Gebäude in Betrieb zu halten. In den Wintermonaten wurde der Weg von Oberwiesenthal zum Berg und zurück meistens nur zu Fuß bewältigt, mitsamt Rucksack, gefüllt mit Dingen, die zum Überleben auf dem Berg unum-

gänglich waren. Erst mit dem immer stärkeren Aufkommen des Fremdenverkehrs wurden Fichtelberghaus und Seilschwebbahn mehr frequentiert, damit die Zufahrtsstraße zum Berg ausgebaut und in jüngerer Zeit regelmäßig von Schnee geräumt. Die stufenweise Aufstockung des Personals von bis zu sechs Mitarbeitern an der Wetterwarte ab den 1970er Jahren macht deutlich, welche Anstrengungen es bedurfte, Messgeräte funktionstüchtig zu halten, manuelle Messungen und Beobachtungen durchzuführen. Nimmt man beispielsweise nur eine Zahl - den Mittelwert der Schneedecke für einen Tag - und vergleicht den Aufwand, der zur Gewinnung dieses einen Wertes notwendig war, dann wird abschätzbar, welchen Wert die gesamten gesammelten Daten der Wetterwarte Fichtelberg besitzen. Es ist selbst heute bei Anerkennung der deutlichen Fortschritte vieler meteorologischer Sensoren unvorstellbar, eine Bergwetterwarte vollautomatisch mit gleichbleibender Qualität zu betreiben.

Witterungs- und Klimaextreme

1.6 Atmosphärische Extremereignisse: eine Einführung

Christian-Dietrich SCHÖNWIESE

Einleitung

In der Öffentlichkeit finden Extremereignisse noch mehr Aufmerksamkeit als der allmähliche und somit über längere Zeitspannen wirksame Klimawandel. Das hängt damit zusammen, dass solche Ereignisse oft sehr plötzlich über uns hereinbrechen und immer wieder viele Todesfälle und enorme wirtschaftliche Schäden zur Folge haben. Es liegt daher nahe, sich dem Problem der atmosphärischen Extremereignisse zunächst aus sozioökonomischer Sicht zu nähern. Aber auch die Frage, welche synoptisch-meteorologischen und somit Wetterlagen-Situationen zum Eintreten solcher Ereignisse geführt haben, ist von Interesse. Besonders wichtig aber ist, zu klären, ob atmosphärische Extremereignisse im Laufe der Jahre, Jahrzehnte usw. häufiger beziehungsweise intensiver beziehungsweise beides geworden sind. Diesem Ziel dienen statistisch-klimatologische Analysen.

Mit Blick auf ein einzelnes Extremereignis ist die räumliche Größenordnung selten global, obwohl der neue Wärmerekord des Jahres 2015 (global gemittelte bodennahe Lufttemperatur) oder des letzten Jahrzehnts durchaus Objekt solcher Betrachtungen sein kann (Klima). Häufiger stehen zum Beispiel ein extremer Hitzesommer (Europa, Deutschland; somit Witterung) oder ein räumlich und zeitlich relativ eng begrenzter Starkniederschlag oder Sturm (Wetter) im Blickpunkt. Am kurzen Ende dieser Zeitskala stehen die Tornados (Turbulenzphänomene).

Sozioökonomischer Aspekt

Die Medien berichten immer wieder von atmosphärischen Extremereignissen wie Starkniederschlägen, die zu Überschwemmungen führen, Dürren, die zu Ernteaussfällen und Hungersnöten, nicht selten auch zu Waldbränden führen können, Hitzewellen sowie tropischen und außertropischen Stürmen einschließlich Tornados, um die wichtigsten derartigen Phänomene zu nennen. Sogenannte geophysikalische Ereignisse wie Erdbeben, Tsunamis und Vulkanausbrüche sollen hier ausgeklammert sein, obwohl beispielsweise der Tsunami am 26.12.2004 in Südostasien/Indonesien mit rund 170 000 Toten und das Erdbeben am 12.1.2010 in Haiti mit rund 223 000 Toten die in dieser Hinsicht schlimmsten Ereignisse der letzten Jahrzehnte, wenn nicht sogar Jahrhunderte gewesen sind. In der Versicherungswirtschaft, insbesondere bei den Rückversicherern, werden regelmäßig weltweit alle größeren Extremereignisse („große Naturkatastrophen“) erfasst. In Tabelle 1 ist eine kleine Auswahl dazu zusammengestellt. Zudem zeigt Abbildung 1, dass zwar nicht die Anzahl geophysikalischer, wohl aber atmosphärischer Extremereignisse (einschl. Folgen) seit 1980 deutlich zugenommen hat. In Übereinstimmung damit spricht das UNISDR (2015) von einer Verdoppelung seit 1995.

Tabelle 1: Kleine Auswahl „großer Naturkatastrophen“ seit dem Jahr 2000, volkswirtschaftliche und versicherte Schäden im Mill. US\$; Quelle: MUNICHRE 2002 ... 2015.

Datum	Land, Region	Ereignis	Tote	Volkswirt. Schäden	Versicherte Schäden
12.-20.8. 2002	Deutschl., Elberegion	Hochwasser	37	13 500	3 100
Juni-Aug. 2003	Europa (insbes. F,D,I)	Hitzewelle	70 000	13 000	1 000
25.-30.8. 2005	USA, Karibik	Hurricane Katrina	1 322	125 000	60 000
18.1. 2007	Deutschland	Orkan Kyrill	49	10 000	5 800
2.-5.5. 2008	Myanmar (Birma)	Zyklon Nargis	85 000	4 000	?
Juli/Aug. 2010	Russland, europ. Teil	Hitze, Waldbrände	56 000	3 600	20
22.-28.11. 2011	USA, Landinneres	Tornados	350	15 000	7 300
Juni 2013	Deutschl., verbreitet	Hochwasser	25	15 200	3 100
7.-11.11. 2013	Philippinen	Taifun Haiyan	6 235	10 500	7 000

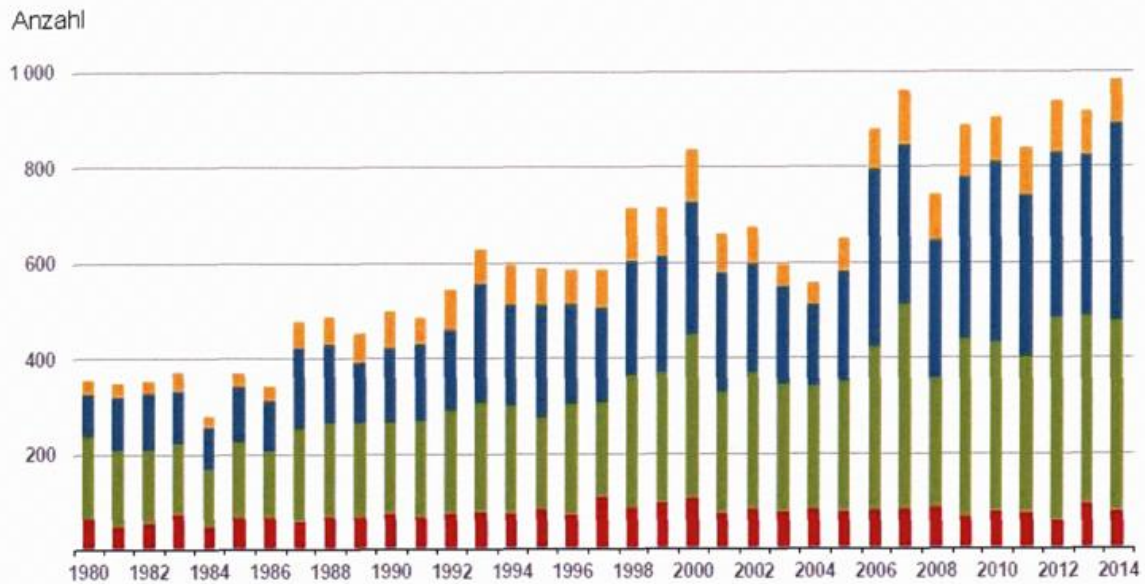


Abbildung 1: Anzahl „großer Naturkatastrophen“ weltweit seit 1980, aufgeschlüsselt nach Tsunamis, Erdbeben und Vulkanen („geophysikalisch“, rot), Stürmen (grün), Hochwasser, Murenabgängen u.ä. (blau) sowie Hitzewellen, Dürren und Waldbränden (gelb); Quelle: MUNICHRE 2015.

Bei den Schäden ergibt sich, von Jahr zu Jahr betrachtet, eher ein fluktuatives Bild, allerdings mit der Neigung zu einem in gewissen Zeitabständen immer höheren Schadensausmaß, so dass dekadisch, von 1950/59 über 1980/89 bis 2000/09, die volkswirtschaftlichen Schäden von 53,8 über 156,1 bis 435,2 Mrd. US\$ angewachsen sind (inflationsbereinigt bezüglich 2009, BERZ 2010), das heißt um den Faktor 8 (bei den versicherten Schäden liegt dieser Faktor sogar noch viel höher). Nach einem Bericht der WMO (2002) waren allein in der Dekade 1991-2000 weltweit rund 665 600 Tote durch derartige „Disaster“ zu beklagen, davon 91 % atmosphärisch bedingt. Die Zahl der Betroffenen lag in dieser Zeit bei über 2,1 Millionen, davon sogar 99,1 % mit atmosphärischer Verursachung (Rest jeweils geophysikalisch).

Synoptisch-meteorologischer Aspekt

Zu diversen meteorologischen Extremereignissen sind Fallstudien durchgeführt worden, wobei die Entwicklung und Besonderheit der jeweiligen Wetterlage im Blickpunkt steht (somit die Arbeitsweise der synoptischen Meteorologie). So kam es zum Hochwasser in der Elberegion im August 2002 aufgrund einer sogenannten Vb-Wetterlage, bei der die Tiefdruckgebiete von NNW kommend südlich um die Alpen herumgeführt werden, dort viel Feuchtigkeit auf sammeln und dann den Weg nach Norden nehmen, in diesem Fall in etwa entlang der Elbe (RUDOLF und RAPP 2003). Das hat in dieser Region zu tagelang anhaltendem Starkniederschlag geführt, wobei unter anderem auch orographische Hebung, insbesondere am Erzgebirge, beteiligt war.

Als zweites Beispiel soll hier noch kurz der Hitzesommer 2003 genannt sein, der im Zusammenhang mit einem blockierenden Hochdruckgebiet (sogenannte Omega-Lage) stand, das sich über Mitteleuropa etabliert hatte (RUDOLF 2004). Da solche Situationen auch mit Trockenheit verbunden sind, verstärkt der fehlende latente Wärmefluss an der Erdoberfläche (fehlende Verdunstung, die ansonsten dort für Wärmeentzug sorgt) noch den Hitzeeffekt.

Statistisch-klimatologischer Aspekt

Synoptisch-meteorologische Fallstudien, so interessant sie auch sind, können nichts zur klimatologischen Langzeitentwicklung aussagen und sozioökonomische Folgen hängen nicht nur von atmosphärischen Vorgängen, sondern zum Beispiel auch von der Besiedlungsdichte, Art der Bebauung und Wertekonzentrationen ab. Diese Nachteile vermeidet der statistisch-klimatologische Aspekt, bei dem klimatologische und somit

langzeitliche Zeitreihen, zum Beispiel der Temperatur, des Niederschlages und Windes, einer statistischen Analyse unterzogen werden. Dabei stellt sich zunächst die Frage: Was ist eigentlich extrem ?

Stellt man sich eine klimatologische Zeitreihe (ähnlich Abbildung 1, nun jedoch eines Klimaelements wie zum Beispiel der Sommer-Temperatur) langzeitlich vor, so lassen sich Trend und Standardabweichung σ berechnen (vergleiche zum Beispiel SCHÖNWIESE, 2013a, 2013b). Sodann kann man sich weitergehend parallel zur Trendlinie beidseitig weitere Linien im Abstand 1σ , 2σ usw. vorstellen. In dieser Weise ist es üblich, alle Datenwerte als extrem zu bezeichnen, welche die Linie 2σ oder 3σ überschreiten. Allerdings erhält man auf diese Weise meist nur wenige Extremwerte, die einer aussagekräftigen statistischen Analyse kaum zugänglich sind.

Daher ist es meist zielführender, die Zeitreihe in eine Häufigkeitsverteilung umzusetzen, eine theoretische Verteilung (Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, engl. Probability Density Function PDF) anzupassen und die Randbereiche als extrem anzusehen. Das können zum Beispiel jeweils 1%, 5% oder 10%, die sogenannten Perzentile, sein. TRÖMEL (2005) hat daher eine Methode entwickelt, bei der außer dem (linearen oder nichtlinearen) Trend auch die zugehörigen Zeitreihen der weiteren Verteilungsparameter (Streuparameter, ggf. auch Formparameter) errechnet und Zeitschritt für Zeitschritt in die Formel der verwendeten theoretischen Verteilung eingesetzt werden. Dann bewegt sich in der jeweils betrachteten Zeitspanne sozusagen nicht nur die Trendgerade (beziehungsweise im nichtlinearen Fall Trendkurve), sondern die gesamte Verteilung. Führt man dann schließlich noch bestimmte untere und obere Schwellenwerte ein, so lässt sich Zeitschritt für Zeitschritt die Unter- und Überschreitungswahrscheinlichkeit der betreffenden Extremwerte berechnen (TRÖMEL 2005, SCHÖNWIESE 2013a, 2013b). In Abbildung 2 sind zwei Beispiele für diese Vorgehensweise dargestellt, wobei im Fall des Temperaturbeispiels eine (Gauß'sche) Normalverteilung und des Niederschlagsbeispiels eine Gumbel-Verteilung verwendet worden ist. Dabei zeigt sich, dass im Fall des Temperaturbeispiels die Eintrittswahrscheinlichkeit von Temperaturen oberhalb der 22°C-Grenze von 0,1 % auf 16,2 %, im Fall des Niederschlagsbeispiels oberhalb der 300 mm-Grenze von 1,1 % auf 24,6 % angestiegen ist (Unterschreitungswahrscheinlichkeit: 17°C-Grenze starke Abnahme; 100 mm-Grenze leichter Anstieg, wie in der Abbildung angegeben). Derartige Analysen liegen detailliert und flächendeckend für Deutschland und darüber hinaus vor (vergleiche TRÖMEL 2005; SCHÖNWIESE 2013a, und dort angegebene Literatur).

Natürlich gibt es noch weitere Möglichkeiten statistisch-klimatologischer Extremwertanalyse, beispielweise anhand von temperatur- oder niederschlagbasierten Indikatoren, die unter anderem anhand von Wärmebeziehungsweise Kältesummen die Sommer- beziehungsweise Winterwitterung oder Starkniederschlagbeziehungsweise Trockenheit nach verschiedenen Gesichtspunkten charakterisieren, einschließlich der zeitlichen Andauer (vergleiche zum Beispiel HÄNSEL 2013 und folgenden Beitrag in diesem Band).

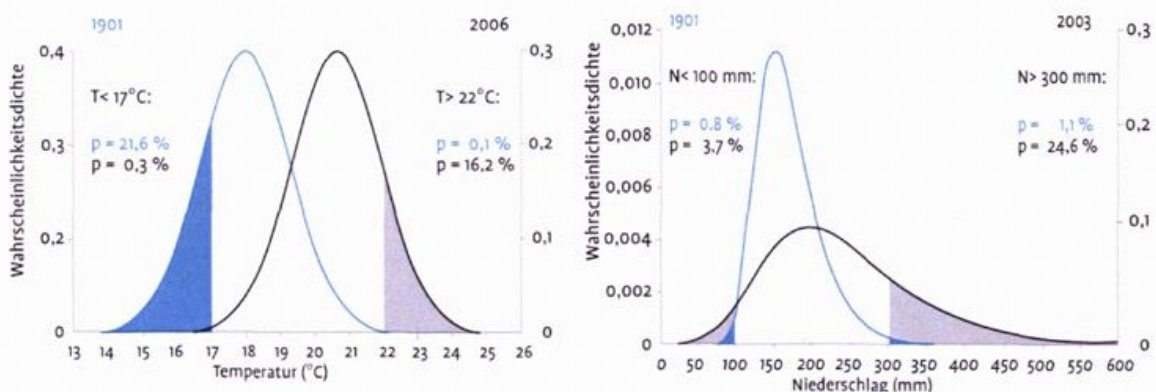


Abbildung 2: Zeitliche Änderung der PDF (links Normalverteilung und August-Temperatur in Frankfurt/Main, rechts Gumbel-Verteilung und Winter-Niederschlag in Eppenrod bei Limburg) von 1901 bis 2006 beziehungsweise 2003 und farbliche Markierung der Flächenanteile, die ein Maß für die Unter- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit der verwendeten Schwellenwerte sind (hier nach SCHÖNWIESE 2013b).

Das Phänomen Sturm kann hier nur erwähnt werden, wobei es weder zu den Winterstürmen in Deutschland noch zu den tropischen Wirbelstürmen statistisch signifikante Trendbefunde gibt. Allerdings zeichnet sich bei den tropischen Wirbelstürmen, zumindest im Nordatlantik, ab, dass die stärkeren auf Kosten der schwächeren zunehmen. Tornados sind aufgrund ihrer Kleinräumigkeit früher seltener als heute beobachtet worden, woraus natürlich nicht auf einen realen Trend geschlossen werden darf. Nicht ganz von der Hand zu weisen ist das Argument, dass die dreidimensionale Struktur der Temperaturänderungen im Kontext des Klimawandels (Zunahme vor allem in den unteren Schichten) die vertikale Schichtungsstabilität und somit die Neigung zu Gewittern, Hagel und eben auch Tornados erhöhen könnte.

Schlussbemerkungen und Ausblick

Das Problem atmosphärischer Extremereignisse ist der empirisch-statistischen Analyse weitaus mehr zugänglich als der Klimamodellierung, insbesondere was Niederschlag und Wind betrifft. Somit gibt es bei der dringenden Frage, was uns in dieser Hinsicht in Zukunft bevorsteht, kontroverse Diskussionen und noch viel Forschungsbedarf. Sehr wahrscheinlich ist das häufigere und intensivere Auftreten sommerlicher Hitzewellen. Beim Niederschlag könnte sich sowohl die Neigung zu Starkniederschlägen als auch zu Dürren regional weiter verstärken (IPCC 2014). Da tropische Wirbelstürme von bestimmten relativ hohen Schwellenwerten der Oberflächentemperatur der Ozeane abhängen, über denen sie entstehen, wäre im Kontext der globalen Erwärmung ein größeres Verbreitungsgebiet denkbar. Wie auch immer, sicher ist es sinnvoll, sich im Sinn von Anpassung und Vorsorge auf künftig möglicherweise häufigere und intensivere atmosphärische Extremereignisse möglichst adäquat einzustellen.

Literatur

- BERZ, G., 2010: Wie aus heiterem Himmel. Naturkatastrophen und Klimawandel. Deut. Taschenbuchverlag (dtv), München, 232 S.
- HÄNSEL, S., 2013: Dürre und Starkniederschlag – Langzeitvariabilität und Trends in Sachsen. DWD, Ann. Meteor. 46, S. 103-108 (siehe auch Beitrag in diesem Heft).
- IPCC (Stocker, T.F., et al., eds.), 2014: Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Cambridge Univ. Press, Cambridge (UK), 1535 pp.
- MUNICHRE, 2002 ... 2015: Topics Geo (jährliche Berichte). Selbstverlag, München.
- RUDOLF, B., 2004: Hydroklimatologische Einordnung der in Europa extremen Jahre 2002 und 2003. DWD, Klimastatusbericht 2003, S. 133-141.
- RUDOLF, B., RAPP, J., 2003: Das Jahrhunderthochwasser der Elbe: Synoptische Wetterentwicklung und klimatologische Aspekte. DWD, Klimastatusbericht 2002, S. 173-188.
- SCHÖNWIESE, C.-D., 2013a: Statistische Zeitreihenanalyse der Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Temperaturen und Niederschläge in Deutschland (20. Jahrhundert). DWD, Ann. Meteor. 46, S. 18-22.
- SCHÖNWIESE, C.-D., 2013b: Klimatologie. Ulmer (UTB), 4. Aufl., Stuttgart, 489 S.
- TRÖMEL, S., 2005: Statistische Modellierung von Klimazeitreihen (Dissertation). Inst. f. Atmosphäre u. Umwelt, Bericht Nr. 2, Frankfurt/M., 238 S.
- UNISDR, 2015: The Human Cost of Weather Related Disasters. Geneva, 30 pp.
- WMO, 2002: Reducing Vulnerability to Weather and Climate Extremes. WMO Publ. No. 936, Geneva, 36 pp.

1.7 Bausteine eines regionalen Dürremonitorings

Stephanie HÄNSEL, Dominic RUMPF, Jörg MATSCHULLAT

Einleitung und Motivation

Das auf ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Faktoren zurückzuführende Phänomen Dürre ist weniger greifbar als andere Naturgefahren, wie Erdbeben oder Überschwemmungen, da es sich schleichend entwickelt (zum Beispiel MAYBANK et al. 1995) und weil seine Auswirkungen zumeist nicht sofort offensichtlich sind, da i.d.R. keine strukturellen Schäden hervorgerufen werden (WILHITE et al. 2007). Dennoch können Dürren viele Menschen beeinträchtigen und mit erheblichen ökonomischen Verlusten verbunden sein (WILHITE et al. 2007). Die Europäische Kommission beziffert die durch Dürren in den EU-Mitgliedsstaaten hervorgerufenen wirtschaftlichen Verluste im Zeitraum 1976–2006 mit 100 Milliarden Euro (EC 2007) und für die USA beträgt das jährliche Defizit 6 bis 8 Milliarden Dollar (HAO und SINGH 2015). Die Folgen von Wasserknappheit beinhalten Vegetationsschäden, Waldbrände, Ernteausfälle, Hungersnöte, die Verbreitung von Krankheiten und Einschränkungen in der industriellen Produktion sowie der Energieerzeugung. Wenn die Folgen von Dürren katastrophale Ausmaße annehmen, liegt das jedoch oft auch an organisatorischen, administrativen und politischen Schwächen (PLAPP 2003), weshalb dem Dürremonitoring und entsprechenden Frühwarnsystemen eine große Bedeutung zukommt (BACHMAIR et al. 2015, STAHL et al. 2015). Obwohl Dürren an sich nicht verhindert werden können, kann zumindest die Vulnerabilität der Gesellschaft ihr gegenüber verringert werden (BACHMAIR et al. 2015). Die zeitnahe Bereitstellung von Dürreinformationen befähigt Menschen und Organisationen dazu, sich besser darauf vorzubereiten und entsprechend zu reagieren (SVOBODA et al. 2002).

Die Definition von Dürre ist ein potentieller Stolperstein für das Monitoring und für wissenschaftliche Analysen, da Dürren und ihre vielfältigen Auswirkungen sehr stark von Zeit- und Raumskalen abhängen und auch geographische Faktoren wie, Klima, Lage und Relief das Erscheinungsbild und die Auswirkungen einer Dürre beeinflussen (VICENTE-SERRANO et al. 2012). Im Allgemeinen basieren Dürremonitoringsysteme daher auf mehreren Dürreindizes, die unterschiedliche Bereiche des hydrologischen Kreislaufes repräsentieren. Dabei werden häufig auch kombinierte oder multivariate Indizes eingesetzt, um die unterschiedlichen Typen von Dürren mit ihren korrespondierenden Auswirkungen abbilden zu können (BACHMAIR et al. 2015). Bisher gibt es wenige empirische Belege, welcher Index die Dürrebedingungen für einen gegebenen Sektor am besten repräsentiert und welche Schwellenwerte angemessen sind (BACHMAIR et al. 2015). Für ein effektives Dürremonitoring sind jedoch Kenntnisse darüber entscheidend, wann und wo ein Niederschlagsdefizit oder auch geringe Abflussraten und Grundwasserstände zu Auswirkungen auf die Gesellschaft führen. Dazu wiederum werden empirische Bewertungen der Dürreindizes unter Nutzung von Impaktdaten benötigt. Auch die bisher gebräuchlichen, willkürlichen Schwellenwerte der Indizes für die Bestimmung der Intensität der Dürrebedingungen müssen überprüft werden, um impaktrelevante Informationen bereitstellen zu können. In verschiedenen Studien wurden die Verbindungen zwischen Dürreindizes und Impaktvariablen, wie Bodenfeuchte, Abflussdaten und aus Fernerkundungsdaten gewonnenen Indizes zur Bewertung des Vegetationsstresses untersucht (zum Beispiel JI und PETERS 2003; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ et al. 2015, VICENTE-SERRANO et al. 2012). Die Wahl des entsprechenden Dürreindex kann auch durch die Befragung von Interessensgruppenvertretern oder Expertenmeinungen unterstützt werden, wie diese beispielsweise bei der Implementierung des operationalen US Dürremonitors erfolgte (SVOBODA et al. 2002) und auch in Südwestdeutschland (STÖLZLE und STAHL 2011) und der Schweiz (KRUSE et al. 2010) durchgeführt wurde.

Im Rahmen eines durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) finanzierten Projektes werden derzeit die rezenten (1961–2014) Dürren im Freistaat anhand der Dürreindizes (SPI: Standardized Precipitation Index, MCKEE et al. 1993, und SPEI: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, VICENTE-SERRANO et al. 2010) flächenhaft analysiert. Diese Analysen in Verbindung mit Studien zur Bewertung der Relevanz der Indexwerte für Dürreauswirkungen in den Sektoren Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Hydrologie sowie Befragungen von Fachbehördenvertretern stellen die Grundlage für die Erarbeitung eines Konzeptes für ein regionales Dürremonitoring dar.

Analyse und Vergleich der Dürreindizes SPI und SPEI für Sachsen

Die flächenhafte Analyse der Dürreindizes SPI und SPEI auf den Zeitskalen von 1, 3, 6, 9, 12 und 24 Monaten für den Freistaat Sachsen im Zeitraum 1961–2014 zeigt starke Ähnlichkeiten in den räumlichen Dürremustern (Abbildung 1) und bis ca. 1990 auch in der mittleren Dürreintensität. Ab den 1990er Jahren führen die stark ansteigenden Temperaturen zu einem Auseinanderdriften der Indexwerte von SPI und SPEI (Abbildung 2). Während die Differenz zwischen SPEI und SPI in den 1960er bis 1980er Jahren im Bereich von etwa ± 0.5 um Null geschwankt hat, sind die SPEI-Werte seit 1990 gehäuft kleiner als der SPI – sprich nach SPEI werden die Dürren als schwerwiegender und die Nassphasen als weniger intensiv bewertet. Dies wird auf den längeren Zeitskalen besonders deutlich – so befinden sich die Indexdifferenzen für die Zeitskala von 12 Monaten seit ca. 1998 fast nur noch im negativen Bereich. Diese Entwicklung ist eng an die steigenden Lufttemperaturen und die somit steigenden Evapotranspirationsraten gekoppelt. Für das Dürremonitoring wird also bei den für den Freistaat Sachsen (und weltweit) für das 21. Jahrhundert projizierten weiter ansteigenden Temperaturen der SPI zunehmend ungeeignet. Das Auftreten von Dürren wurde zwar in der Vergangenheit in unserer Klimaregion größtenteils durch die Variationen des Niederschlags bestimmt, mit der Klimaerwärmung nimmt jedoch der Einfluss weiterer Klimakenngrößen zu und erfordert die Verwendung komplexerer Dürreindizes wie des SPEI.

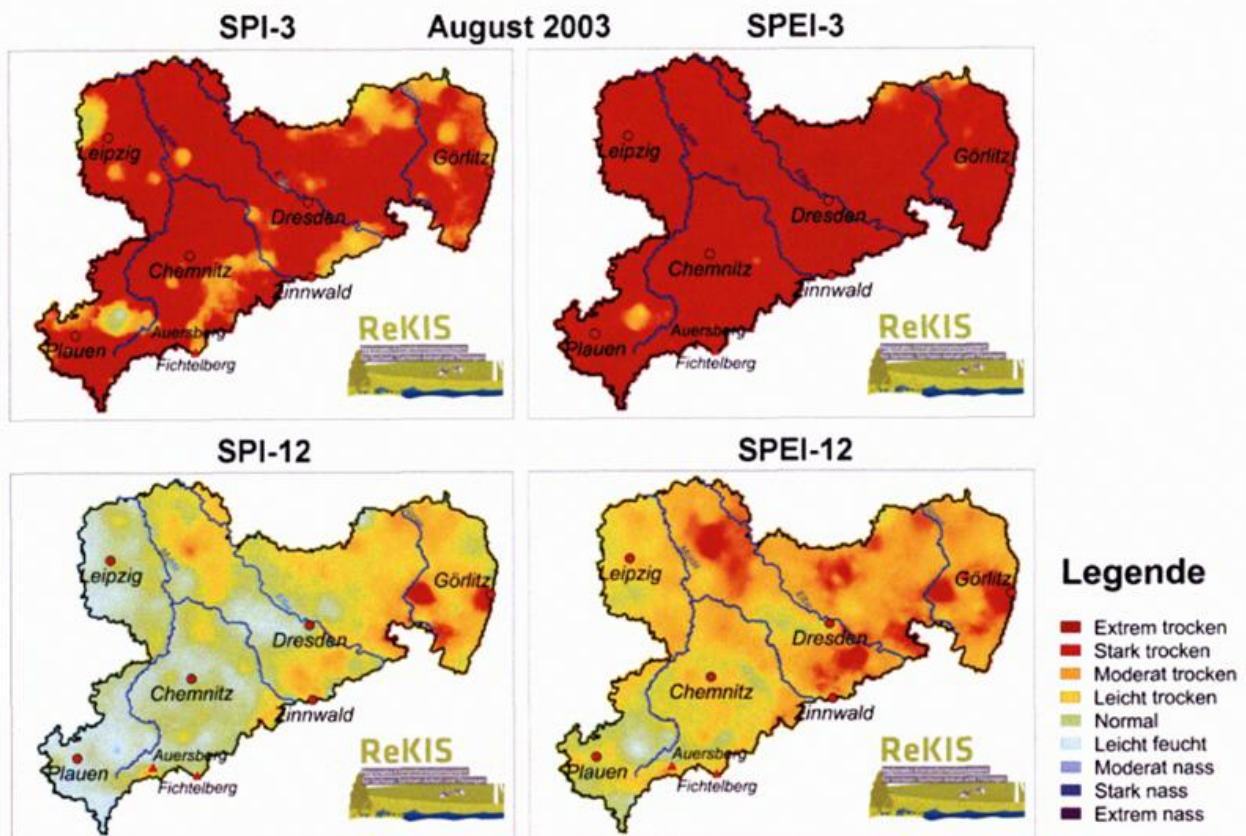


Abbildung 1: Kartendarstellung der Dürrebedingungen im August 2003 mittels SPI (links) und SPEI (rechts) auf den Zeitskalen 3 (oben) und 12 (unten) Monate

Gespräche mit Vertretern der Landesfachbehörden

Im Rahmen von Gesprächen mit Vertretern der Landesfachbehörden aus den Bereichen Land-, Forst- und Wasserwirtschaft werden die Erfahrungen mit dem Thema Dürre und fachspezifischen Dürreindizes, der Bedarf und die konkreten Anforderungen an ein regionales Dürremonitoring sowie mögliche Daten für die Analyse der Impaktrelevanz von SPI und SPEI in Erfahrung gebracht. Dazu wurde ein Fragenkatalog erstellt

und im Rahmen von Gesprächsrunden ausgefüllt. Die mehr als 40 Fragen umfassen fünf wesentliche Bereiche:

- A) Erfahrungen mit der Bewertung von Dürre (zum Beispiel genutzte Indizes/Modelle, Zeitskalenaspekte, konkrete Dürreauswirkungen, sensitive [Teil]Systeme, Minderungsmaßnahmen).
- B) Nutzung von Impaktdaten (zum Beispiel Eigenschaften der verfügbaren Datenbasen zur Bewertung der Impaktrelevanz der Dürreindizes, vorhandene Impaktstudien).
- C) Bedarfsanalyse Dürremonitoring (zum Beispiel Prioritätseinschätzung, Mehrwert, Erwartungshaltung, Nutzung/Einschätzung existierender Dürremonitoringprodukte).
- D) Konkrete Anforderungen an ein Dürremonitoring (räumliche und zeitliche Auflösung, Indizes, Komplexität, Sektorspezifität, Handlungsempfehlungen, Vergleichsjahre, Dürreprognose, Eigenbeteiligung an der operationellen Umsetzung).
- E) Technische/IT-Aspekte (Endnutzeranalyse, gewünschte Funktionalitäten des Portals, Mailingdienste, Marketing).

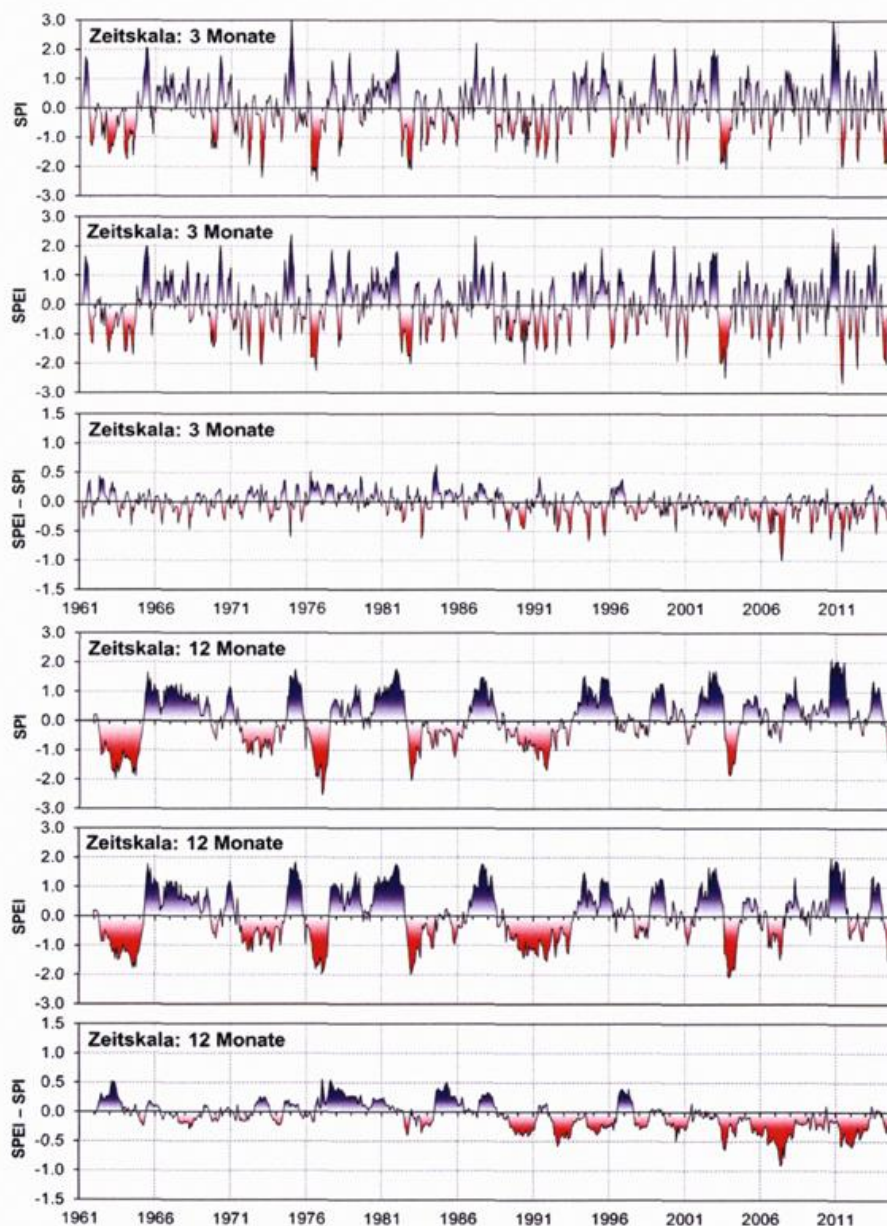


Abbildung 2: Sachsenmittelwert der Dürreindizes SPI und SPEI sowie deren Differenz für die Zeitskalen von 3 und 12 Monaten.

Die Ergebnisse der Gespräche werden derzeit ausgewertet, um sie in die Konzeption des sächsischen Dürremonitoringportals einfließen zu lassen. Anhand der durch die Fachbehörden bereit gestellten Impaktdaten werden SPI und SPEI exemplarisch hinsichtlich ihrer Impaktrelevanz untersucht. Ziel ist die Identifikation der für den jeweiligen Fachbereich besonders sensitiven Wirkungszeitskalen sowie die Überprüfung relevanter Indexschwellenwerte.

Zusammenhang zwischen SPI/SPEI und sektoralen Dürreauswirkungen

Weltweit wurden in einer Reihe von Studien bereits die Kopplung zwischen den Indizes SPI beziehungsweise SPEI und den Dürreauswirkungen in verschiedenen Systemen untersucht. Die wesentlichen Ergebnisse einer Auswahl von Studien wurden für die Bereiche Land-, Forst- und Wasserwirtschaft in Tabelle 1 zusammengefasst. Es zeigt sich eine breite Variabilität in den Zeitskalen, auf denen der Dürreindex am besten mit den Auswirkungen korreliert. Wichtige Einflussgrößen sind die geographische Lage inklusive der klimatischen Einordnung des Untersuchungsgebietes, der Eingriffsgrad des Menschen sowie die betrachtete Pflanzenart und die Bodenverhältnisse vor Ort. Daher ist es nicht möglich, die für bestimmte Regionen oder unter bestimmten Randbedingungen erzielten Ergebnisse einfach auf das jeweilige Untersuchungsgebiet zu übertragen. Für die Entwicklung eines regionalen Dürremonitorings sind Analysen hinsichtlich der optimalen Zeitskalen und der Schwellenwerte von SPI und SPEI für die Identifikation von spezifischen Dürreauswirkungen in adressierten Klimafolgenbereichen notwendig. Exemplarische Analysen werden derzeit durchgeführt.

Schlussfolgerungen

Für die Entwicklung eines impaktorientierten regionalen Dürremonitorings ist die Einbindung der regionalen Akteure von großer Bedeutung, nicht nur um letztendlich auch eine Nutzung des Portals sicher zu stellen. Einige Akteure haben bereits eigene Instrumente für die Bewertung von Trockenheit in Ihren Bereich entwickelt. Diese sind wenn möglich in das Trockenheitsmonitoring einzubeziehen. Anderen Akteuren fehlt zum Teil das Bewusstsein dafür, auf welchen Zeitskalen Dürre zu schwerwiegenden Auswirkungen in ihrem Bereich führt und welche Handlungsmöglichkeiten einschließlich Minderungsmaßnahmen bestehen. Daher sind Dürremonitoringportale, welche ausschließlich die derzeitigen Dürrebedingungen auf ausgewählten Zeitskalen darstellen für die meisten Anwender wenig nutzbringend. Das zu entwickelnde Produkt muss den Bedarf der identifizierten Zielgruppe adressieren, fachspezifische Bewertungen und Vergleichsmöglichkeiten bieten, Handlungsoptionen aufzeigen und auch die vorhandenen technischen Kapazitäten berücksichtigen. Dabei ist ein Kompromiss zwischen der möglichst spezifischen Darstellung der komplexen Dürreinformationen und einer möglichst einfachen Bedienbarkeit des Portals zu schließen.

Danksagung

Wir danken dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie für die Förderung des Projektes „Flächenhafte Analyse ausgewählter Trockenindizes und Erarbeitung eines Konzeptes für eine verbesserte Erfassung und Charakterisierung von Trockenheit im Klimafolgenbereich für den Freistaat Sachsen“.

Tabelle 1: Zusammenhänge zwischen den Dürreindizes SPI und SPEI mit Auswirkungen in den Bereichen Land-, Forst- und Wasserwirtschaft anhand einiger Studien (nach MICHEL 2015).

Untersuchungsgegenstand (-gebiet)	Index (Zeitskala), Verdunstung	Ergebnis/bester Zusammenhang	Referenz
Forstwirtschaft			
Dickenwachstum (Nordost ES)	SPI (1–48 Mon.)	Humide Regionen: 1–5 Monate Semiaride Regionen: 9–14 Mon.	PASHO et al. (2011)
Dickenwachstum (global)	SPI & SPEI (1,2,3, 6,9,12,24,48 Mon.)	SPEI besser als SPI; in ariden Regionen größere Anfälligkeit des Baumwachstums	VICENTE-SERRANO et al. (2012)
Dickenwachstum (Nordhemisphäre.)	SPEI (1–24 Mon.) Penman-Monteith	Humide Regionen: 3–5 Monate Semiaride Regionen: 12–11 Monate	VICENTE-SERRANO et al. (2014)
NDVI (CN)	SPEI (1–12 Mon.) Thornthwaite	Nadelwald: 11 Mon. Laubwald: 10 Mon.	LI et al. (2015)
Weizen (global)	SPI & SPEI (1,2,3, 6,9,12,24 Mon.)	SPEI besser als SPI; Zeitskala abhängig vom Klima	VICENTE-SERRANO et al. (2012)
Ertragsdaten Weizen, Mais, Reis, Gerste, Hafer, Soja (global)	SPEI (3 & 12 Mon.) FAO-56 Penman-Monteith	SPEI besser als SPI; Verbesserung durch Berücksichtigung Bodenwasserhaushalt	WANG et al. (2014)
Mais-Ernteerträge (Tiefeland Nord-CN)	SPEI (1–24 Mon.) Penman-Monteith	3 Monate (JJA)	MING et al. (2015)
NDVI (CN)	SPEI (1–12 Mon.) Thornthwaite	Grasland: 3 Mon.; Weide: 4 Mon. Kultivierte Vegetation: 2 Monate	LI et al. (2015)
Ernteerträge (Tiefeland CZ)	SPEI (1–24 Mon.) Haude	6 Monate (AMJJAS) für Wurzel-, Kohl-, Knollengemüse	POTOP et al. (2012)
EDII (BG, DE, GB, SI, NO)	SPEI (1–24 Mon.) Penman-Monteith	Regenfeldbau: 2–3 Monate Bewässerung: 9–12 Monate	STAGGE et al. (2015)
Wasserwirtschaft			
Abflüsse, Seepiegel (Pyrenäen ES)	SPI (1–24 Mon.)	Fließgewässer: 1–3 Monate Stillgewässer: 7–10 Monate > 12 Monate unbrauchbar Berücksichtigung saisonaler Schwankungen erforderlich	VICENTE-SERRANO und LÓPEZ-MORENO (2005)
Abflüsse, Seepiegel (Großes Becken, West-USA)	SPI, SPEI (1–12, 15,18,24,30,36, 48,60,72 Mon.) Thornthwaite	Fließgewässer: 8–15 Monate Stillgewässer: 18–48 Monate (≤ 6 Mon. unbrauchbar; Bedeutung Größe des Speichervolumens)	MCEVOY et al. (2012)
Abflüsse in 151 EZG (global)	SPI & SPEI (1,2,3,6,9,12,24, 48 Mon.)	Berücksichtigung des Hauptantriebs der Dürre für Bestimmung optimaler Dürreindex notwendig	VICENTE-SERRANO et al. (2012)
Abflüsse, Seepiegel (Nordost-ES)	SPEI (1-48 Mon) Thornthwaite	Hohe EZG ohne Regulation: 2-4 Mon. Tiefere EZG mit hoher Reg.: 6-10 Mon. Tiefere EZG mit Grundwassereinfluss: 10-20 Mon.	LÓPEZ-MORENO et al. (2013)
EDII (BG, DE, GB, SI, NO)	SPEI (1–24 Mon.) Penman-Monteith	Oberirdisches Wasser: 1 & 6 Mon. Unterirdisches Wasser: 3 & 9–12 Mon.	STAGGE et al. (2015)

Literatur

- BACHMAIR, S., C. SVENSSON, J. HANNAFORD, L. J. BARKER und K. STAHL, 2015: A quantitative analysis to objectively appraise drought indicators and model drought impacts. In: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 12 (9): 9437–9488.
- EC, 2007: *Water Scarcity and Droughts, In-depth assessment. Second Interim report.* Brussels. Internet: http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/comm_droughts/2nd_int_report.pdf (12.01.2016).
- HAO, Z. und V. P. SINGH (2015): Drought characterization from a multivariate perspective: A review. In: *Journal of Hydrology* 527: 668–678.
- JI, L. und A. J. PETERS, 2003: Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. In: *Remote Sensing of Environment* 87 (1): 85–98.
- KRUSE, S., I. SEIDL und M. STÄHLI, 2010: Informationsbedarf zur Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz. In: *Wasser Energie Luft* 102 (4): 305–308.
- LI, Z., T. ZHOU, X. ZHAO, K. HUANG, S. GAO, H. WU und H. LUO, 2015: Assessments of Drought Impacts on Vegetation in China with the Optimal Time Scales of the Climatic Drought Index. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12 (7): 7615–7634.
- LÓPEZ-MORENO, J. I., S. M. VICENTE-SERRANO, J. ZABALZA, S. BEGUERÍA, J. LO-RENZO-LACRUZ, C. AZORIN-MOLINA und E. MORÁN-TEJEDA, 2013: Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin. In: *Journal of Hydrology* 477: 175–188.
- MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J., A. GONZÁLEZ-ZAMORA, N. SÁNCHEZ und A. GUMUZZIO, 2015: A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator. In: *Journal of Hydrology* 522: 265–273.
- MAYBANK, J., B. BONSAI, K. JONES, R. LAWYER, E. G. O'BRIEN, E. A. RIPLEY und E. WHEATON, 1995: Drought as a natural disaster. In: *Atmosphere-Ocean* 33 (2): 195–222.
- MCEVOY, D. J., J. L. HUNTINGTON, J. T. ABATZOGLOU und L. M. EDWARDS, 2012: An Evaluation of Multiscalar Drought Indices in Nevada and Eastern California. In: *Earth Interactions* 16 (18): 1–18.
- MCKEE, T. B., N. J. DOESKEN und J. KLEIST, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: (1993): *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology.* Boston, Massachusetts: 179–184.
- MICHEL, J., 2015: *Impaktrelevanz ausgesuchter Trockenheitsindizes.* TU Bergakademie Freiberg, Unveröffentl. Bachelorarbeit, 48p.
- MING, B., Y. GUO, H. TAO, G. LIU, S. LI und P. WANG, 2015: SPEIPM-based research on drought impact on maize yield in North China Plain. In: *Journal of Integrative Agriculture* 14 (4): 660–669.
- PASHO, E., J. J. CAMARERO, M. DE LUIS und S. M. VICENTE-SERRANO, 2011: Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 151 (12): 1800–1811.
- PLAPP, S. T., 2003: *Wahrnehmung von Risiken aus Naturkatastrophen. Eine empirische Untersuchung in sechs gefährdeten Gebieten Süd- und Westdeutschlands.* Karlsruhe. Internet: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/3542003>.
- POTOP, V., M. MOŽNÝ und J. SOUKUP, 2012: Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 156: 121–133.
- STAGGE, J. H., I. KOHN, L. M. TALLAKSEN und K. STAHL, 2015: Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe. In: *Journal of Hydrology* 530: 37–50.
- STAHL, K., V. BLAUHUT, I. KOHN, V. ACÁCIO, D. ASSIMACOPOULOS, C. BIFULCO, L. DE STEFANO, S. DIAS, D. EILERTZ, B. FRIELINGS-DORF, T. J. HEGDAHL, E. KAMPRAGOU, V. KOURTENTZIS, L. MELSEN, H. VAN LANEN, A. F. VAN LOON, A. MASSARUTTO, D. MUSOLINO, L. DE PAOLI, L. SENN, J. H. STAGGE, L. M. TALLAKSEN und J. URQUIJO, 2012: A European Drought Impact Report Inventory (EDII): Design and Test for Selected Recent Droughts in Europe. DROUGHT-R&SPI Technical Report No. 3. Internet: <http://www.eu-drought.org/technicalreports/6>.
- STAHL, K., I. KOHN, V. BLAUHUT, J. URQUIJO, L. DE STEFANO, V. ACACIO, S. DIAS, J. H. STAGGE, L. M. TALLAKSEN, E. KAMPRAGOU, A. F. VAN LOON, L. J. BARKER, L. A. MELSEN, C. BIFULCO, D. MUSOLINO, A. DE CARLI, A. MASSARUTTO, D. ASSIMACOPOULOS und H. A. J. VAN LANEN, 2015: Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* 3 (9): 5453–5492.

- STÖLZLE, M. und K. STAHL, 2011: Wassernutzung und Trockenheitsindikatoren in Baden-Württemberg. Eine Umfrage unter betroffenen Akteuren. In: *Zeitschrift für Angewandte Geographie* 35: 94–101.
- SVOBODA, M., D. LECOMTE, M. HAYES, R. HEIM, K. GLEASON, J. ANGEL, B. RIPPEY, R. TINKER, M. PALECKI, D. STOOKSBURY, D. MISKUS und S. STEPHENS, 2002: The Drought Monitor. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 83 (8): 1181–1190.
- VICENTE-SERRANO, S. M., S. BEGUERÍA und J. I. LÓPEZ-MORENO, 2010: A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. In: *Journal of Climate* 23 (7): 1696–1718.
- VICENTE-SERRANO, S. M., S. BEGUERÍA, J. LORENZO-LACRUZ, J. J. CAMARERO, J. I. LÓPEZ-MORENO, C. AZORIN-MOLINA, J. REVUELTO, E. MORÁN-TEJEDA und A. SANCHEZ-LORENZO, 2012: Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. In: *Earth Interactions* 16 (10): 1–27.
- VICENTE-SERRANO, S. M., J. J. CAMARERO und C. AZORIN-MOLINA, 2014: Diverse responses of forest growth to drought time-scales in the Northern Hemisphere. In: *Global Ecology and Biogeography* 23 (9): 1019–1030.
- VICENTE-SERRANO, S. M. und J. I. LÓPEZ-MORENO, 2005: Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 9 (5): 523–533.
- WANG, Q., J. WU, T. LEI, B. HE, Z. WU, M. LIU, X. MO, G. GENG, X. LI, H. ZHOU und D. LIU, 2014: Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale. In: *Quaternary International* 349: 10–21.
- WILHITE, D., M. SVOBODA und M. HAYES, 2007: Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. In: *Water Resources Management* 21 (5): 763–774.

1.8 Raum-zeitliche Entwicklung des Starkregenverhaltens in Sachsen

Johannes FRANKE

Die Entwicklung des sächsischen Klimas seit den 1960er Jahren zeigt eine hohe natürliche Variabilität. Diese wird aber zunehmend von mittleren Trends der Erwärmung überlagert, was komplexe Auswirkungen zur Folge hat. Ursachen dafür sind Änderungen in der atmosphärischen Zirkulation als Folge des globalen Temperaturanstieges. Umfangreiche Untersuchungen haben ergeben, dass der Klimawandel mit dem Risiko einer Zunahme witterungsbedingter Extreme in Sachsen einhergeht, die auf der Grundlage vergleichsweise kurzer Messreihen, insbesondere beim Niederschlag, aber nur mit besonderen Verfahren erkennbar werden.

Zur Untersuchung witterungsbedingter Extreme werden von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) Indizes empfohlen, die teilweise auch auf dem Perzentil-Ansatz basieren. Eine weiterführende Starkregenanalyse für den Freistaat Sachsen verwendet deshalb auch das 90- und 95-Perzentil (R90p, R95p). Diese Größen beschreiben den in die Untersuchungen einbezogenen Datenumfang, das heißt hier die größten 10 % beziehungsweise 5 % der vorhandenen Messwerte.

Die Datengrundlage bildet sich aus 1km-Rasterdaten im Zeitraum 01.01.1961 bis 31.12.2015 (55 Jahre) aus denen (ca. 20 000) rasterbezogene Zeitreihen mit täglichen Niederschlagssummen extrahiert wurden. Zur Erzeugung der Rasterdaten wurde ein Indikator-Kriging als Interpolationsmethode angewendet. Die georeferenzierte Abbildung der Analyseergebnisse für die Zeitreihen ergab eine flächenhafte Struktur für Sachsen, deren höchste Informationsdichte aus der Extrahierung von Transekten erhalten werden konnte.

Für die Untersuchungen zum Starkniederschlagsverhalten in Sachsen wurde der zeitliche Verlauf des Auftretens von Starkniederschlagsereignissen (R90p, R95p) analysiert. Zur Anwendung kam eine nicht-parametrische Kernschätzung für das Auftreten der Ereignisse R90p und R95p („Peak over Threshold“), wobei der zeitliche Verlauf der Auftretensraten als inhomogener Poisson-Prozess aufgefasst wurde. In Ergänzung dazu wird die Datengrundlage einer zeitlich gleitenden extremwertstatistischen Analyse separierter partieller Serien unterzogen, wobei hier das meteorologische Sommerhalbjahr (Vegetationsperioden I und II) im Fokus steht.

Mit dem erhöhten Temperaturniveau in Sachsen gehen auch weitgehend flächendeckend Zunahmen der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen in der Klimanormalperiode 1981-2010 gegenüber 1961-1990 einher (Abbildungen 1 und 2). Daraus leitet sich auch ein erhöhtes Risiko lokaler Hochwässer in kleineren Einzugsgebieten (das heißt Prozesse der Abflussbildung und –konzentration dominierend) ab. Beim Niederschlag wurden in Sachsen seit 1961 zunehmende Summen in der Vegetationsperiode II (Juli bis September) gemessen, die mit einer flächendeckenden Erhöhung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Starkregenereignissen einhergehen. Vor dem Hintergrund eines generell erhöhten Temperaturniveaus weist die Kombination aus gestiegenen Niederschlagssummen und Starkregenereignissen (Anzahl, Intensität) darauf hin, dass der Anteil von Starkregen an den Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode II zugenommen hat. Damit im Einklang steht die Schlussfolgerung, dass trockene Abschnitte zunehmend von Starkregenereignissen unterbrochen werden, woraus sich auch ein erhöhtes Erosionsrisiko ableitet.

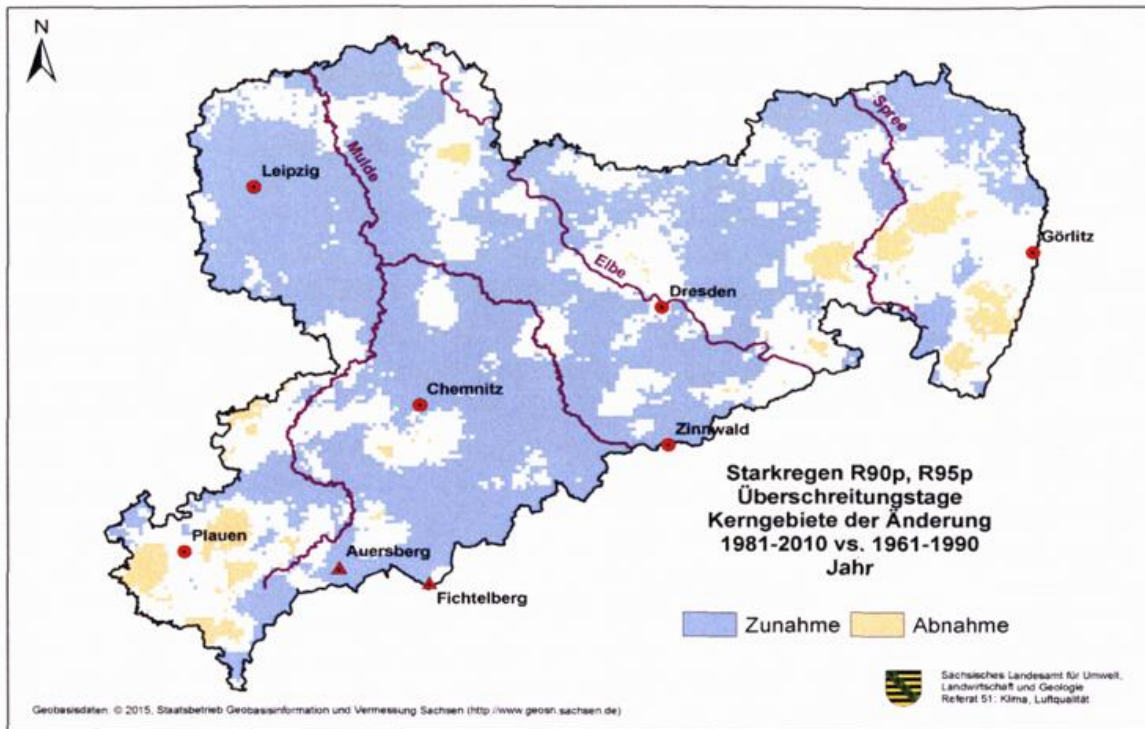


Abbildung 1: Kerngebiete der Änderungen für das Eintreten von Starkregenereignissen (R90p, R95p) 1981-2010 vs. 1961-1990 in Sachsen (Verhältnis Zu-/Abnahme 12:1).

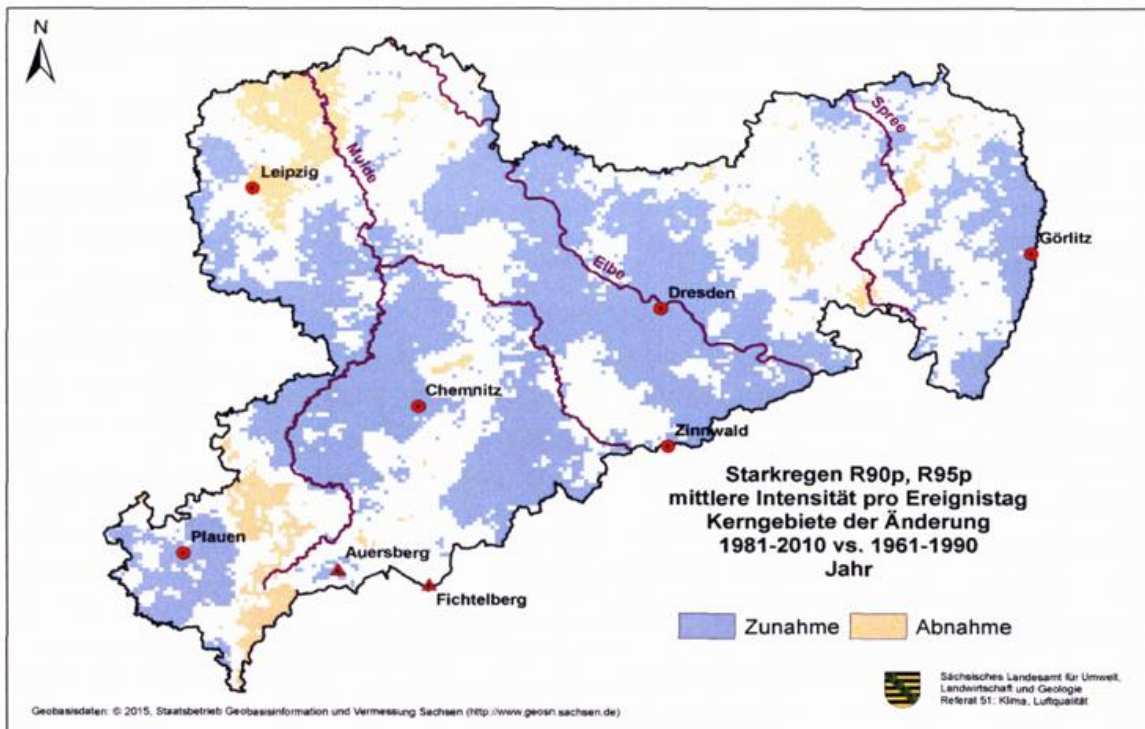


Abbildung 2: Kerngebiete von Änderungen in der mittleren Intensität pro Starkregenereignis (R90p, R95p) 1981-2010 vs. 1961-1990 in Sachsen (Verhältnis Zu-/Abnahme 6:1)

1.9 Hochaufgelöste Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur nutzerspezifischen Analyse von Extremereignissen

Tanja WINTERRATH

Einführung

Haben die Häufigkeit und die Intensität extremer Niederschlagsereignisse zugenommen? Gestiegene Einsatzzahlen von Feuerwehren und des THW sowie Versicherungsstatistiken scheinen dies zu bestätigen (BBK 2012). Besonders kurzfristige und kleinräumige Starkregenereignisse, wie sie am 6. Juni 2011 in Hamburg oder am 28. Juli 2014 in Münster vorkamen, könnten Städte in Zukunft vermehrt vor größere Herausforderungen stellen. Die im Rahmen des Klimawandels projizierten Häufungen von extremen Niederschlagsereignissen erfordern Anpassungsmaßnahmen. Effektiver vorsorgender Schutz vor Sturzfluten braucht innovative Planungs- und Anpassungskonzepte, insbesondere im urbanen Raum, wo der Platz für Retentionsflächen begrenzt ist. Zusätzlich implizieren solche oftmals sehr kurzfristigen Ereignisse geringe Vorwarnzeiten für Feuerwehren und Hilfsorganisationen, weshalb eine gute strategische Planung der Gefahrenabwehr von großer Bedeutung ist.

Im Rahmen des Projekts „Erstellung einer dekadischen radargestützten hochauflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag“ (DWD-Radarklima) der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“, bestehend aus dem Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, dem DWD, dem Technischen Hilfswerk und dem Umweltbundesamt erstellt der DWD eine radarbasierte Niederschlagsklimatologie ab 2001 bis heute. Das Projekt ermöglicht zum ersten Mal die klimatologische Erfassung und Analyse kleinräumiger Extremniederschläge nicht nur in ihrer Intensität sondern auch in ihrer räumlichen Struktur, Lage, Ausdehnung und Zugbahn und eröffnet damit neue Möglichkeiten einer ereignisorientierten Auswertung von Niederschlagsdaten.

Datenaufbereitung

Die Detektion kleinräumiger Starkniederschläge sowie die Erfassung ihrer räumlichen Ausdehnung und Zugbahnen erfordern eine zeitlich und räumlich hochaufgelöste, flächenhafte Niederschlagserfassung. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) betreibt hierzu ein flächendeckendes Radarnetzwerk in Deutschland. Alle fünf Minuten wird ein Niederschlagsprodukt auf einem Raster von 1 km x 1 km im Echtzeitbetrieb erstellt und für die Wettervorhersage und den Hochwasserschutz bereitgestellt. Die Radarmessungen erfolgen an bundesweit 17 Standorten. Die Grundlage der Niederschlagsanalysen bildet der sogenannte Niederschlags-scan, der mit einem minimalen Elevationswinkel topographiefolgend die bodennahe Atmosphäre bis in eine Entfernung von 150 km abtastet und dabei die Reflektionen an den Hydrometeoren (zum Beispiel Regentropfen, Schneeflocken, Hagelkörnern) detektiert. Radarmessungen unterliegen spezifischen Störfaktoren, welche die Niederschlagsanalyse beeinflussen. Aus diesem Grund werden die radarbasierten Reflektivitätsmessungen sowohl in der Echtzeit- als auch in der klimatologischen Analyse einer umfangreichen Qualitätskontrolle unterzogen. Die klimatologische Analyse bietet hier zusätzliche Möglichkeiten, die Qualität der Daten zu optimieren:

- Bebauung im Umkreis eines Radarsystems stellt ein Hindernis für den Radarstrahl dar. Erst in einer mehrjährigen Summe treten die durch die Abschattung hervorgerufenen Speichen deutlich in Erscheinung. Liegt im Bereich der Speichen lediglich eine Teilabschattung vor, so kann über einen Vergleich mit dem Signalverlauf in den angrenzenden ungestörten Winkelbereichen eine Korrektur ermittelt und angewendet werden (JACOBI et al. 2014).
- Aufgrund des positiven Elevationswinkel der Radarscans erfolgt die Messung mit zunehmender Entfernung vom Radar in steigenden Höhen. So kann eine Messung in orographisch gegliedertem Gebiet, zum Beispiel südlich des Radars München, am Rande des Erfassungsbereichs Höhen von ca. 3 km erreichen. Neben Dämpfungseffekten und der Aufweitung des Radarstrahls kann hier auch das Overshooting, also die Messung oberhalb des Regengebiets, zu einer Unterschätzung des realen Niederschlags führen. Auch dieses Phänomen zeigt sich erst deutlich in der mehrjährigen Niederschlagssumme. Über eine statistische

Auswertung der Daten kann eine Korrekturfunktion ermittelt und in der klimatologischen Analyse angewendet werden (WAGNER et al. 2014).

Disaggregation von Tagesniederschlägen

Die Aufbereitung der Daten erfolgt auf der Basis des RADOLAN-Verfahrens (WEIGL und WINTERRATH, 2010; WINTERRATH et al. 2012), das die radargestützten Reflektivitätsmessungen mit den lokalen Niederschlagsmessungen des Bodenmessnetzes kombiniert. Auf diese Weise werden die Vorteile beider Messverfahren – die Flächenhaftigkeit der Radarmessung und die quantitative Messung der Ombrometer – optimal kombiniert.

Das RADOLAN-Verfahren wird am DWD operationell betrieben und versorgt Kunden im Rahmen des Hochwasserschutzes in Echtzeit mit aktuellen Niederschlagsanalysen. Aus diesem Grund ist die Verwendung von Bodenmessdaten auf die automatischen Messnetze des DWD sowie kooperierender Messnetzbetreiber beschränkt. Bei einer nachträglichen klimatologischen Betrachtung können hingegen zusätzlich die Daten von Messstationen verwendet werden, die nicht für den Echtzeitbetrieb zur Verfügung stehen beziehungsweise zum Zeitpunkt der Erstellung zur Verfügung standen. Dies trifft insbesondere auf die Tageswertstationen des DWD zu, die in den ersten Jahren des betrachteten Zeitraums einen Großteil der Messsysteme ausmachten. Die Tagesdaten werden mit Hilfe eines Disaggregierungsverfahrens, in dem der Tagesniederschlagswert entsprechend der stündlichen Radarwerte in 24 Stundenanteile aufgeteilt wird, in das Aneichverfahren eingebracht. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis der Echtzeitanweichung auf der Basis weniger automatischer Aneichstationen für das Elbehochwasser 2002 in Sachsen, sowie das Ergebnis der Nachanweichung im Rahmen der klimatologischen Reprozessierung unter Verwendung einer Vielzahl zusätzlicher Bodenmessungen. Während im Echtzeitbetrieb aufgrund der geringen Anzahl der im Jahr 2002 verfügbaren automatischen Stationen der Einfluss einzelner Stationen das Gesamtbild dominiert, ermöglicht der umfangreiche Bodendatensatz in der Reprozessierung eine realistische Quantifizierung des Niederschlags.

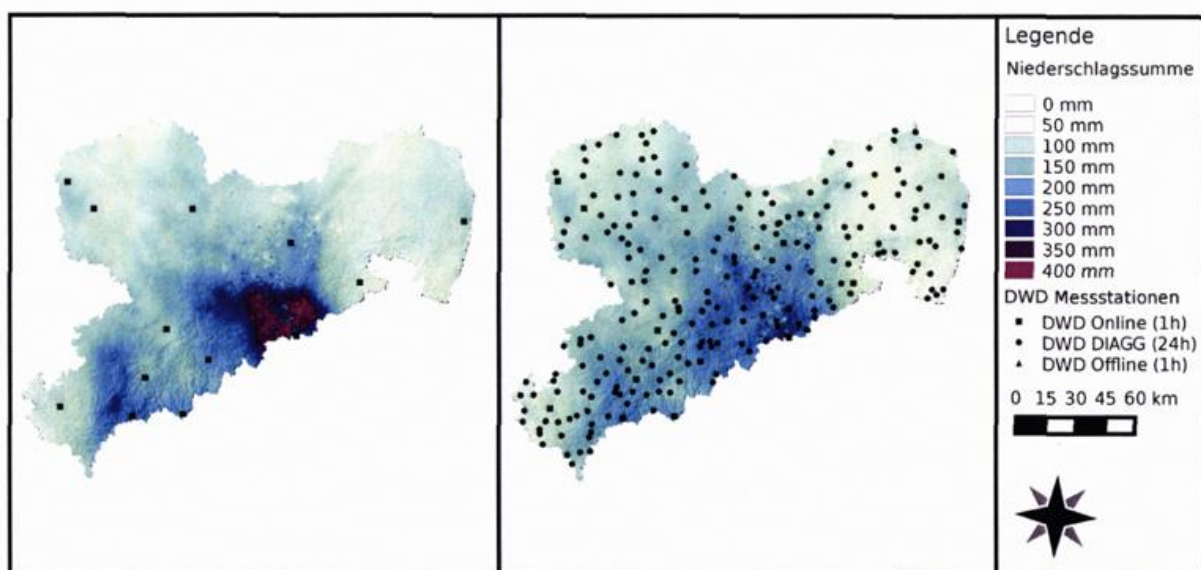


Abbildung 1: Gesamtniederschlag 06.-14.08.2002, Sachsen; Ergebnis des RADOLAN-Verfahrens: Echtzeitverfahren unter Verwendung der automatischen Stundenniederschlagswerte (links); Reprozessierung unter zusätzlicher Verwendung der disaggregierten Tagesniederschlagswerte (rechts); BRENDEL et al. (2015).

Einzelfallstudien

Extreme Niederschlagsereignisse können verheerende Folgen nach sich ziehen. Gerade im urbanen Raum kommt es aufgrund solcher pluvialen Fluten zu Überschwemmungen von Straßen, Infrastrukturen und Gebäuden mit der Gefahr von Personenschäden. Um den Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung zu

analysieren, sind detaillierte Informationen über das jeweilige Niederschlagsereignis, die vorherrschenden Abflusswege und nicht zuletzt die Vulnerabilität des urbanen Raums notwendig. Lokale konvektive Starkregenereignisse werden vom Bodenmessnetz häufig nur unzureichend erfasst. Die flächendeckende Erfassung des Niederschlags ermöglicht die detaillierte Analyse einzelner Starkregenereignisse und stellt damit optimierte meteorologische Daten zur Verfügung.

Abbildung 2 zeigt verschiedene Niederschlagsanalysen für das Starkniederschlagsereignis am 28. Juli 2014 in Münster, NRW. Die interpolierten Bodendaten des REGNIE-Produkts (links) unterschätzen den Niederschlag in diesem Fall massiv, da die Stationen das Ereignis nur unzureichend erfassen. Während das RADOLAN-Echtzeitverfahren auf der Basis der Radarmessungen und automatischen Bodenstationsdaten (Mitte) das Ereignis bereits sehr gut erfasst, führt die Verwendung zusätzlicher Messdaten zu einer weiteren Verbesserung der quantitativen Niederschlagsanalyse (rechts).

Die physikalische oder statistische Kombination hochaufgelöster radarbasierter Niederschlagsanalysen mit Wirkmodellen sowie Vulnerabilitäts-, Schadens- und Einsatzdaten ermöglicht die detaillierte Untersuchung von Starkregenereignissen von der meteorologischen Ursache über die hydrologische Wirkung bis hin zu den Folgen für die Einsatzkräfte im Schadensfall und bildet damit eine wichtige Informationsgrundlage für die Regulierung der Wasserabflüsse, die strategische Einsatzplanung von Feuerwehren und THW und die Erstellung von Gefährdungs- und Risikokartierungen.

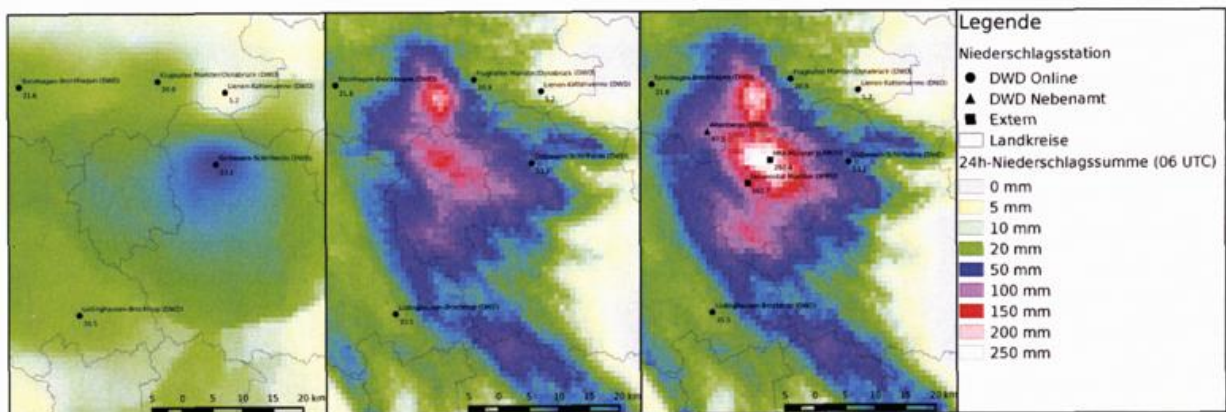


Abbildung 2: Münster, 28.07.2014: Interpolierte Bodendaten (REGNIE) (links); RADOLAN-Echtzeitverfahren unter Verwendung der automatischen Stundenniederschlagswerte (Mitte); Reprozzessierung unter Verwendung zusätzlicher verfügbarer Niederschlagswerte (rechts).

Statistische Auswertung

Neben den Einzelfallstudien bieten sich ebenso neue Möglichkeiten der statistischen Auswertung von Niederschlagszeitreihen. Klimaprojektionen deuten auf eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen bis zum Jahr 2100 hin. Es ist daher zu erwarten, dass sich die Niederschlagscharakteristik in Zukunft hin zu stärkeren Ereignissen wandeln wird. Gerade lokale konvektive Starkregenereignisse werden vom Bodenmessnetz häufig nur unzureichend erfasst. Radardaten bieten hier die Möglichkeit, Extremereignisse im Hinblick auf ihre Intensität und Ausdehnung zu erfassen und statistisch zu bewerten. Neben der klassischen Extremwertstatistik auf Basis der Rasterdaten stellen Starkregenindizes (zum Beispiel MÜLLER und KASPAR 2014, SCHMITT 2014) ein Maß für die objektive Bewertung von Extremereignissen dar und bieten das Potenzial, Änderungen in Bezug auf die „Extremität“ von Starkregenereignissen als Kombination von Intensität, Ausdehnung und Dauer im Kontext des Klimawandels zu untersuchen.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts „Erstellung einer dekadischen radargestützten hochauflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von

Niederschlag“ der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ erstellt der DWD eine radarbasierte Niederschlagsklimatologie ab 2001 bis heute.

Die Reprozessierung der Daten ermöglicht sowohl die Ermittlung und Anwendung spezifischer klimatologischer Verfahren zur Qualitätsverbesserung als auch die Verwendung zusätzlicher Stationsdaten im Rahmen der quantitativen Niederschlagsanalyse.

Die flächenhafte Messung ermöglicht die Erfassung kleinräumiger Starkniederschlagsereignisse sowie die Analyse ihrer Intensität, Ausdehnung und Zugrichtung. Die Verknüpfung mit hydrologischen Wirkmodellen sowie Vulnerabilitätsdaten liefert wertvolle Hinweise für die Erstellung von Gefährdungs- und Risikokarten, insbesondere im urbanen Raum.

Die klimatologische Auswertung der Daten schafft darüber hinaus eine wertvolle Grundlage für die statistische Erfassung von Starkregenereignissen im Kontext des Klimawandels.

Literatur

- BBK, 2012: Klimawandel – Herausforderung für den Bevölkerungsschutz, Auflage Februar 2012, Praxis im Bevölkerungsschutz - Band 5.
- BRENDEL, C., et al., 2015: Towards a Radar Based Precipitation Climatology for Germany – The Importance of Surface Precipitation Observations. In: Molnar, P. und N. Peleg (Hrsg.) (2015): Rainfall in Urban and Natural systems.- Proceedings of the 10th International Work-shop on Precipitation in Urban Areas, 1-5 December 2015, Pontresina, Schweiz, doi: 10.3929/ethz-a-010549004.
- DWD-Radarklima: www.dwd.de/DE/leistungen/radarklimatologie/radarklimatologie.html.
- JACOBI, S., A. BRONSTERT und M. HEISTERMANN, 2014: Rain rate retrieval of partially blocked beams from single-polarized weather radar data; Proceedings of the Eighth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Garmisch-Partenkirchen.
- MÜLLER, M. und M. KASPAR, 2014: Event-adjusted evaluation of weather and climate extremes, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 473–483, doi:10.5194/nhess-14-473-2014.
- SCHMITT, T. G., 2014: Starkregenindex zur Kommunikation von Überflutungsursachen und Risiken, Korrespondenz Abwasser, Abfall, 61, Nr. 8.
- WAGNER, A., J. SELTMANN und H. KUNSTMANN, 2014: The German radar composite RX: Qualitative performance analysis for a precipitation climatology; Proceedings of the Eighth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Garmisch-Partenkirchen.
- WEIGL, E. und T. WINTERRATH, 2010: Radargestützte Niederschlagsanalyse und –vorhersage (RADOLAN, RADVOR-OP), *promet*, Jahrg. 35, Nr. 1/2, S. 75-86.
- WINTERRATH, T., W. ROSENOW und E. WEIGL, 2012: On the DWD quantitative precipitation analysis and nowcasting system for real-time application in German flood risk management, *Weather Radar and Hydrology*, IAHS Publ. 351.

1.10 Bewertung radar-abgeleiteter Niederschläge für klimatologische Anwendungen am Beispiel Sachsen

Rico KRONENBERG

Motivation

Die Niederschlagsdetektion mittels Radar gewinnt immer mehr an Bedeutung. Stand in der Vergangenheit für die Prozessierung vorrangig die Ereignisanalyse im Mittelpunkt, so treten vermehrt auch klimatologische Aspekte in den Vordergrund. Der komplexen Prozessierung von Radardaten, hin zu einem Niederschlagsprodukt, ist es geschuldet, dass, trotz dem Ziel der Erstellung eines qualitativ hochwertigen Niederschlagsproduktes, Grenzen in dessen Anwendungsfeldern existieren. Diese Grenzen sollen in diesem Vortrag benannt, beschrieben und bewertet werden, um anschließend eine Methode vorzustellen, welche eine „klimatologische Konsistenz“ von radarabgeleiteten Niederschlägen anstrebt. Was darunter gemeint ist, wird im Folgenden ausgeführt.

Datengrundlage

Als Grundlage dieser Untersuchung dient das auf Tagessummen aggregierte RADOLAN rw-Produkt vom April 2004 bis Dezember 2009 (BARTHEL et al. 2004). Das RADOLAN-Produkt ist in 1-km-Auflösung verfügbar. Für den Untersuchungszeitraum lagen ebenso die 1-km aufgelösten Rasterdatensätze REGNIE (RAUTHE et al. 2013) und RAKLIDA (KRONENBERG und BERNHOFER 2015), sowie die entsprechenden Niederschlagsstationen (Tageswerte nicht registrierender Ombrometer nach Hellmann) im Untersuchungsgebiet für die Prozessierung und einen Vergleich vor.

Methoden und Ergebnisse

Die Summierung des ursprünglichen RADOLAN rw-Produktes über den Untersuchungszeitraum führt zu dem in Abbildung 1a) dargestellten Raster. Deutlich treten in diesem Raster Radarfragmente hervor. Um eine „klimatologische Konsistenz“ im Sinne von Güte, Qualität und Folgerichtigkeit zu erzielen, wird eine wesentliche Verbesserung der Korrelation mit der Geländehöhe und eine Verringerung der räumlichen Inkonsistenzen angestrebt. Unter diese Inkonsistenzen zählen Radarfragmente, wie Radarringe, Speichen, Clutter und sich überschneidende Radare.

Das vorgestellte Verfahren besitzt drei Parameter und basiert auf einem Quantile-Ausreißer-Test, einer anschließenden lineare Regression und linearen Transformation, und der abschließenden Aneichung an Hellmann-Messungen (Kronenberg und Bernhofer 2015). Wie in Abbildung 1b (RADN) dargestellt ist, kann so eine wesentliche Verbesserung der Qualität des Niederschlagsproduktes erzielt werden. Auch die Vergleiche mit REGNIE (Abbildung 1d) und RAKLIDA (Abbildung 1c) legen diesen Schluss nahe.

Für die Bewertung der tages- oder zeitlich höher aufgelösten radar-abgeleiteten Niederschläge (RADOLAN) stellt sich die Frage, wie diese mit den Langzeitniederschlagssummen (RADN) vereinbar sind. An dieser Stelle wird ein Vorgehen vorgeschlagen, welches im ersten Schritt die vorgestellte Methodik für „klimatologischen Konsistenz“ beinhaltet und im zweiten Schritt eine den ursprünglichen RADOLAN-Daten entsprechende gewichtete zeitliche Dissaggregation durchführt.

Demonstriert wird das Verfahren am Beispiel der Tagessummen des 15.6.2007, wie sie in Abbildung 2 dargestellt sind. Mit der vorgestellten Methode wird für einen 30-tägigen Zeitraum klimatologische Konsistenz hergestellt. Anschließend werden durch eine gewichtete zeitliche Dissaggregation die Tagessummen der Rasterzellen berechnet. Die Gewichtung wird aus den RADOLAN-Daten abgeleitet. So können radartypische Fehler verringert werden. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass die Niederschlagfelder für den 30-tägigen Zeitraum mit den täglichen Hellmann-Messungen korrespondieren, da sie an diese angeeicht wurden.

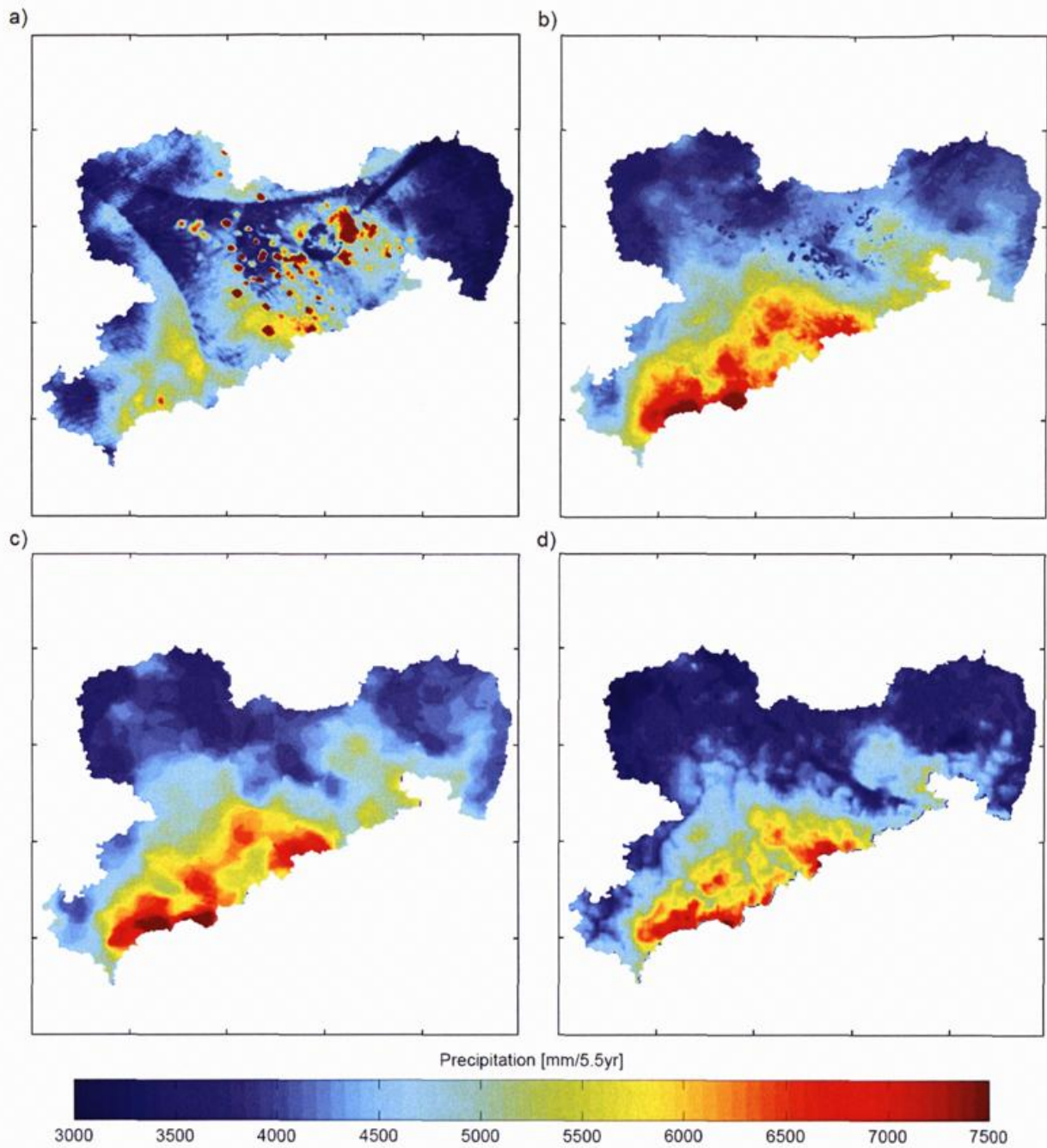


Abbildung 1: Niederschlagssummen in 1 km Auflösung für den Zeitraum April 2004 bis Dezember 2009 im Freistaat Sachsen für die Datensätze a) RADOLAN, b) RADN, c) RAKLIDA, d) REGNIE (modifiziert nach KRONENBERG und BERNHOFER 2015).

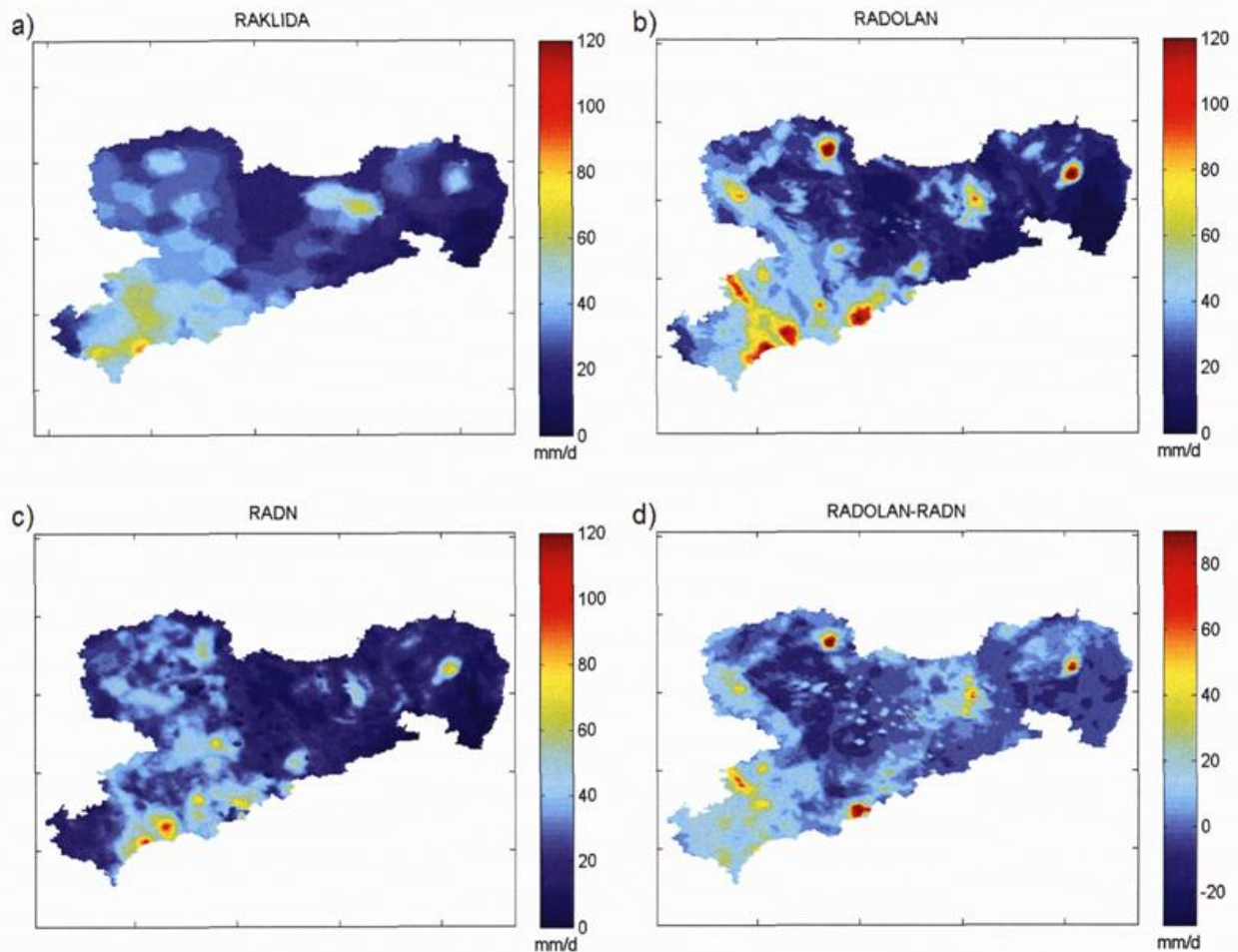


Abbildung 2: Tägliche Niederschlagssummen des 15.6.2007, a) RAKLIDA, b) aufsummiertes RADOLAN rw-Produkt, c) RADN; d) Differenz zwischen RADOLAN (rw-Produkt) und RADN-Daten.

Bedeutung von Aneichungsstationen

Die Aneichung an Bodenmessung ist für radarabgeleitete Niederschläge von großer Bedeutung, da auf Grundlage der Bodenmessungen erst auf die quantitative Verteilungen des Niederschlages im Raum geschlossen werden kann. Hieraus ergibt sich ein hoher Anspruch an die Bodenmessungen: der Niederschlag sollte so realitätsnah wie möglich erfasst werden. Das die konventionelle Niederschlagsmessung fehlerbehaftet ist, ist hinlänglich publiziert (RICHTER 1995, SEVRUK 2004). Weniger bekannt und untersucht sind die Messunterschiede, welche durch verschiedene Messprinzipien von Ombrometern unterschiedlicher Bauart herrühren. Für die Aneichung der stündlichen Radarprodukte werden registrierende Ombrometer mit wägendem System genutzt. Jedoch deutet vieles darauf hin, dass diese Ombrometer-Modelle den Niederschlag systematisch unterschätzen. Diese Unterschätzung kann bis zu 7 % (Fichtelberg) beziehungsweise 9 % (Tharandt) Unterschied der Jahressumme zur herkömmlich ermittelten Messung mittels Hellmann-Messer betragen (AUGTER 2013, RODRIGUEZ 2012). Für die klimatologische Auswertung der Niederschlagsdaten ergeben sich damit signifikante Unterschiede, welche beispielsweise eine Bewertung des langjährigen Wasserhaushaltes mittels dieser Daten verfälscht.

Zusammenfassung und Ausblick

Derzeit besitzen radar-abgeleitete Niederschläge, trotz des Anspruches den Niederschlag möglichst realitätsnah zu repräsentieren, meist eine eingeschränkte Gültigkeit. Sei es, wie bei RADOLAN für die Hochwasseranalyse, oder wie die hier vorgestellte klimatologische Prozessierung.

Die Prozessierung von Radardaten hin zu einem Niederschlagsprodukt für einen begrenzten Anwendungszweck ist problematisch, da sie dem Anwender fälschlicherweise suggeriert, es gäbe für einen Zeitpunkt verschiedene Niederschläge. Deshalb sollte sich zukünftig die Entwicklung der Radarprozessierung auf Kurz- wie auch Langzeitaspekte des Niederschlages gleichermaßen konzentrieren, um konsistente Datensätze zu erzeugen.

Die hier vorgestellte Methodik bedarf einer tiefgehenden Überprüfung und ausführlichen Validierung, um zu klären, ob beispielsweise kleinräumige konvektive Zellen für kurze Zeiträume in den prozessierten Niederschlagsdaten erhalten bleiben.

Bisher konnten vielversprechend Ergebnisse generiert werden, die auf ein hohes Potential der Methodik zur konsistenten Prozessierung von radarabgeleiteten Niederschlägen hindeuten.

Literatur

- AUGTER, G., 2013: Vergleich der Referenzmessungen des Deutschen Wetterdienstes mit automatisch gewonnenen Messwerten, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 238. DWD, Offenbach.
- BARTHEL, H., WEIGL, E., WAGNER, A., GERLACH, N., KOHLER, O., LANG, P., REICH, T., 2004: Projekt RADOLAN Routineverfahren zur Online-Aneicherung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer). DWD, Offenbach.
- KRONENBERG, R., BERNHOFER, C., 2015: A method to adapt radar-derived precipitation fields for climatological applications: A method to adapt radar-derived precipitation fields. *Meteorol. Appl.* 22, 636–649. doi:10.1002/met.1498.
- RAUTHE, M., STEINER, H., RIEDIGER, U., MAZURKIEWICZ, A., GRATZKI, A., 2013: A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorol. Z.* 22, 235–256. doi:10.1127/0941-2948/2013/0436.
- RICHTER, D., 1995: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 194. DWD, Offenbach.
- RODRIGUEZ, P., 2012: Vergleichende Untersuchung der Niederschlagsmessung am Tharandter Messfeld - Untersuchung systematischer und zufälliger Unterschiede der Niederschlagsmesser - Hydrologisch-Meteorologische Projektarbeit, TU Dresden.
- SEVRUK, B., 2004: Niederschlag als Wasserkreislauelement - Theorie und Praxis der Niederschlagsmessung. Eigenverlag, Zürich-Nitra.

1.11 Observed and projected changes in air temperature in the Karkonosze Mountains

Irena OTOP, Mariusz ADYNKIEWICZ-PIRAGAS, Bartłomiej MISZUK

The Karkonosze Mts. are the highest range of the Sudetes. The main Karkonosze ridge extends about 70 km from ESE to WNW direction. The highest peak of the Sudetes is the isolated Mt. Śnieżka (50°44'N; 15°44'E; 1603 m a.s.l.). Altitude and topographic features are the most important geographical factors that have an influence on climatic conditions of the Karkonosze Mts. Location of the mountain ranges in the region (ESE-WNW) and dominating western circulation cause suitable conditions for foehn wind.

The High Mountain Observatory at Mt. Śnieżka is the 1st order meteorological station of the Polish National Meteorological-Hydrological Service. The meteorological observation on Mt. Śnieżka has a long history. The first instrumental measurements at Mt. Śnieżka were carried out in 1824-1834 period, for the warm season only. Regular, continuous meteorological measurements at Mt. Śnieżka were begun on 1 July 1880. The meteorological instruments were located in St. Wawrzyniec Chapel, the thermometers were fixed at 2,05 m above the ground. Since 1 June 1900 the measurements were carried out in a new building, the thermometers were set up on the terrace of the Observatory at 15,9 m above the ground (1616 m a.s.l.). In 1976 the observations were moved to the new Observatory, since 23 October 1976 the thermometers have been set up at 14,0 m above the ground (1617 m a.s.l.). Relocation of the thermometers in 1976 has not affected homogeneity of the air temperature series (GŁOWICKI 1998).

Meteorological Observatory at Mt. Śnieżka represents the highest hypsometric zone of the Karkonosze Mts., the area that is not affected by anthropogenic activity. Therefore, the data series from Mt. Śnieżka is a valuable input for the research related to climate change in the mountainous regions of the Central Europe. The mountain ecosystems are especially vulnerable to ongoing climate changes (BENISTON 2005).

The climate of Mt. Śnieżka, especially thermal, cloudiness and solar conditions, have been a subject of numerous papers (DUBICKA 2000, DUBICKA and GŁOWICKI 2000, GŁOWICKI 1998, 2000, 2001, 2003, WIBIG and GŁOWICKI 2002, OTOP and MISZUK, 2011). The increase in air temperature at Mt. Śnieżka during the 20th century was well-documented. The increase of mean annual air temperature was equal to 0,82°C/100 years. The analysis showed rising minimum (1,38°C/100 years) and maximum (0,72°C/100 years) air temperature, while a decreasing trend (-0,64°C/100 years) was found for an amplitude of daily air temperature (GŁOWICKI 2003).

The aim of the paper was to evaluate current and future changes in air temperature in the Polish part of the Karkonosze Mts. The presented analysis focuses on the annual and seasonal air temperature, based on two periods: 1901-2014 and 1951-2014. The seasonal approach may be particularly important for the analysis of the impact of the warming on natural environment and economic issues. The analysis was carried out on the basis of the data from two stations: Mt. Śnieżka (1603 m a.s.l.) and Jelenia Góra (342 m a.s.l.). The records from Jelenia Góra station, located in the mountain foreland, are available since 1951. The analysis for the last 64-year period (1951-2014) allows to compare the data from the high and low elevation located stations in the Polish part of the Karkonosze Mts. Moreover, the obtained results were compared with Mt. Fichtelberg station (1215 m a.s.l.), located in the Ore Mts.

Mean annual air temperature at Mt. Śnieżka in the multiannual period of 1901-2014 is 0,5°C. The lowest values were noticed in: 1940, 1941 and 1956 (-1,2°C), while the highest one was measured in 2014 (2,7°C). Since 1997, except 2010, all the years have been characterized by positive thermal anomaly if compared to the reference period 1961-1990.

Mean air temperature values for consecutive twelve months enable more detailed analysis of air temperature changes. Such approach helps to identify 12-month episodes with remarkable air temperature anomalies that do not coincide with a calendar year (KUNDZEWICZ et al. 2009). The results indicate that for the last 114 years the warmest period at Mt. Śnieżka was noticed in 2006-2007. The highest 12-month moving average of air temperature (with 1-month shift) was observed for July 2006 – June 2007 and was equal to 3,3°C. It was

also the warmest period in Europe (KUNDZEWICZ et al. 2009). In this period, the month with the highest mean air temperature since 1901 was noticed. It was July 2006 that was by 5,6°C warmer than the monthly mean temperature for reference period 1961-1990. Until 2007, the warmest consecutive 12-month periods at Mt. Śnieżka were recorded in 2000 (from February 2000 – January 2001, March 2000 – February 2001 and April 2000 – March 2001) with mean temperature of 2,2°C. Very warm period was recorded also in 2014. From December 2013 to November 2014 12-month mean air temperature reached 3,0°C.

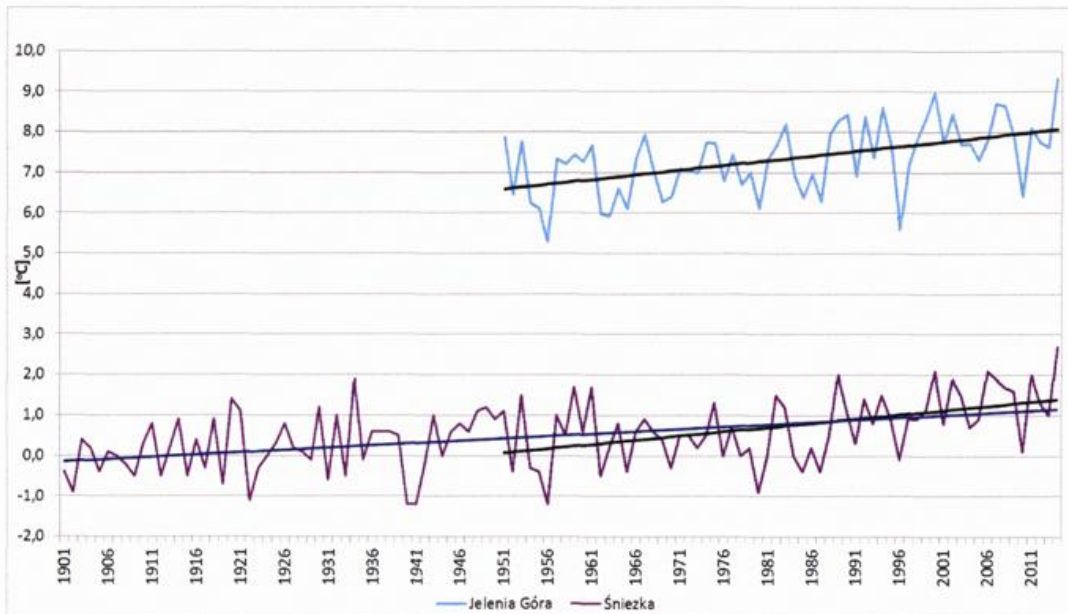


Figure 1: The long-term variability of annual mean air temperature at Śnieżka (1901-2014) and Jelenia Góra (1951-2014) stations (dark blue line – linear trend in the years 1901-2014, black line – linear trend in the years 1951-2014).

Mean annual air temperature at Mt. Śnieżka shows an increasing trend (Figure 1). The increase for the 1901-2014 period was 0,12°C per decade. The air temperature increase was observed for all the seasons during 1901-2014 period at Mt. Śnieżka, with the strongest warming rate in summer (0,14°C per decade). The trends in spring, summer and autumn are statistically significant (at the 95% significance level).

Taking into consideration 1951-2014 period, an increasing trend (0,21°C per decade) of annual mean air temperature at Mt. Śnieżka was stronger than for the 1901-2014. The lower located station of Jelenia Góra tended to have a slightly stronger increasing trend (0,24°C per decade). Similar rate of warming is noticed for Fichtelberg station (Ore Mts). Seasonal trends show that spring is characterized by the highest increase in air temperature. In the highest parts of the Karkonosze Mts. the trend is 0,30°C per decade while in the mountain foreland (Jelenia Góra) and in the top part of the Ore Mts. (Fichtelberg) it is equal to 0,35°C - 0,34°C per decade. Spring and summer warming trends are statistically significant, the rising trend is significant at Fichtelberg also for winter.

In order to obtain more detailed information concerning the changes of annual air temperature during the long-term period, the linear trends were calculated for each of the 30-year moving periods within 1901-2014. Increasing trends of annual air temperature dominated at Mt. Śnieżka in consecutive 30-year periods, the trends has been constantly positive since 1961-1990. The highest rate of warming occurred from 1978-2007 to 1980-2010 periods (Figure 2).

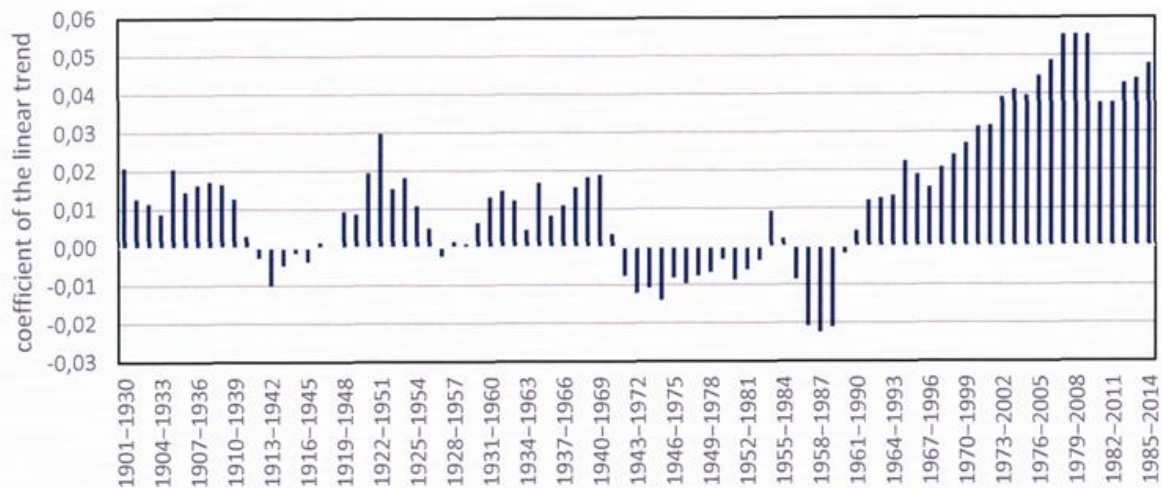


Figure 2: Coefficient of the linear trend of mean annual air temperature at Śnieżka for 30-year moving periods in 1901-2014.

On the global and European scale, the climate projections indicate further warming with strong regional differences (CHRISTENSEN et al. 2011). In the study, in order to assess future development of air temperature in the Polish part of Karkonosze Mts., climate projections developed within KLAPS project were used (KREIENKAMP et al. 2013). Climate projections were carried out with the use of the output from two global models: ECHAM5 and MPI-ESM-LR under A1B SRES emission scenario and for the new generation of concentration scenarios, the Representative Concentration Pathways i.e. RCP2.6 and RCP8.5 (IPCC 2013). RCP8.5 scenario assumes emissions continue increasing at current rates and atmospheric concentrations of CO₂ will be three to four times higher than pre-industrial level by the end of 21st century (SYMON 2013). On the other hand, RCP2.6 scenario assumes intensive mitigation strategies. Therefore, according to this scenario is unlikely to exceed a 2°C increase in global mean temperature since pre-industrial times (SYMON 2013).

Future development of thermal conditions in the Karkonosze Mts. were analyzed for two periods: 2021-2050 (near future) and 2071-2100 (far future) with the comparison to the reference period 1971-2000. For the future periods warming trend is projected. The rise of air temperature, based on different scenarios, varies between +1°C (RCP2.6) to +3,8°C (RCP8.5) at the end of the 21st century. Slightly stronger warming trend is projected by the end of the 21st century for the highest mountainous areas if compared to the lower regions of the Polish part of the Karkonosze Mts. In the higher regions, the rise of mean annual air temperature varies between +1.1 and +3.8°C while in the lower located area the increase about +1.0 to +3.5 °C is projected for 2071-2100 if compared to 1971-2000. The highest changes are expected in summer in the top part of Karkonosze Mts. The projected increase varies between +1.4°C and +5.0°C for the far future (2071-2100) in the comparison to the reference period.

Acknowledgements

We would like to thank DWD for the providing meteorological data from the station of Fichtelberg.

References

- BENISTON M., 2005: Mountain climates and climates change: An overview of processes focusing on the European Alps. *Pure Appl. Geophys.*, 162, 1587-1606.
- CHRISTENSEN, O. B, GOODESS, C. M. HARRIS, I, and WATKISS, P., 2011: European and Global Climate Change Projections: Discussion of Climate Change Model Outputs, Scenarios and Uncertainty in the EC RTD ClimateCost Project. In Watkiss, P (Editor), 2011. The ClimateCost Project. Final Report.

- Volume 1: Europe. Published by the Stockholm Environment Institute, Sweden, 2011. ISBN 978-91-86125-35-6.
- DUBICKA M., 2000: Variability in the cloud cover of the Karkonosze Mountains over the last century. *Geogr. Polonica* 73, 2, 117-125.
- DUBICKA M., GŁOWICKI B., 2000: Air temperature and cloudiness at Śnieżka between 1901 and 1998. *Prace Geogr. Inst. Geogr. UJ*, z. 107, 205-212.
- GŁOWICKI B., 1998: Wieloletnia seria pomiarów temperatury powietrza na Śnieżce. [In:] *Geoekologiczne Problemy Karkonoszy*, t.1. Wyd. Acarus, Poznań, 117-123.
- GŁOWICKI B., 2000: 20th-century variability to daily maxima and minima of air temperature in the Sudetic Mountains. *Geogr. Polonica* 73, 2, 111-116.
- GŁOWICKI B., 2001: Zmienność rocznego cyklu termicznego na Śnieżce w XX wieku. *Pr. i St. Geogr.*, t. 29, 121-125.
- GŁOWICKI B., 2003: Symptoms of contemporary warming in the 100-years series of temperature measurements on the Śnieżka Mountains. *Acta Univ. Wratisl.*, No 25, *Studia Geogr.* 75, 142-150.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Eds.): Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1535 pp.
- KREIENKAMP, F., A. SPEKAT, W. ENKE, 2013: *Klimaprojektionen im Projekt KLAPS. Publikationsreihe des EU-Projektes KLAPS – Klimawandel, Luftverschmutzung und Belastungsgrenzen von Ökosystemen im polnisch-sächsischen Grenzraum, Dresden*, 35 pp.
- KUNDZEWICZ Z., GERSTENGARBE F.-W., ÖSTERLE H., WERNER P.C., FRICKE W., 2009: Recent anomalies of mean temperature of 12 consecutive months – Germany, Europe, Northern Hemisphere. *Theor. Appl. Climatol.*, 95, 3-4, 417-422.
- OTOP I., MISZUK B., 2011: Cechy klimatu Śnieżki. [In:] *130 lat obserwacji meteorologicznych na Śnieżce.* IMGW-PIB, Wrocław, 23-54.
- SYMON C., 2013: *Climate change: Action, trends and implications for business.* – University of Cambridge, 20 pp.
- WIBIG J., GŁOWICKI B., 2002: Trends of minimum and maximum temperature in Poland. *Clim. Research* 20, 122-133.

1.12 Tiefdruckgebiete auf Vb-Zugbahnen im Klimawandel – Auswirkungen in den Flusseinzugsgebieten Elbe und Oder

Michael HOFSTÄTTER, Annemarie LEXER, Barbara CHIMANI, Manfred GANEKIND, Jucundus JACOBET, Markus HOMANN, Andreas PHILIPP, Christoph BECK

Einleitung

Mitteleuropa war in den letzten 20 Jahren mehrmals von außergewöhnlichen, großräumigen Starkniederschlagsereignissen betroffen. Einige von diesen haben zu herausragenden Hochwasserereignissen geführt, beispielsweise im Juli 1997 an der Oder, im August 2002 an Elbe und Donau oder großräumig im Mai/Juni 2010 und 2013. Im Zuge des globalen Klimawandels stellt sich nun die Frage, ob es zukünftig durch Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation und/oder durch die Zunahme der Lufttemperatur und -feuchtigkeit zu einem veränderten Risiko für derartige Starkniederschlagsereignisse kommt.

Aus diesem Grund hat sich das Bayerische Staatministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, gemeinsam mit dem Österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, im Frühjahr 2012 entschlossen, das deutsch-österreichische Forschungsvorhaben WETRAX im Rahmen der Ständigen D/Ö-Gewässerkommission nach dem Regensburger Vertrag zu initiieren und gemeinsam mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt sowie der Bundesanstalt für Gewässerkunde zu beauftragen.

Die Studie befasst sich mit der Veränderung von großräumigen Starkniederschlagsereignissen im Klimawandel für den Zeitraum von 1951 bis 2100. Das Untersuchungsgebiet umfasst Süddeutschland, Österreich und angrenzende Teile der Schweiz sowie Tschechiens. Als innovativer Ansatz wurden starkniederschlagsrelevante Muster der atmosphärischen Zirkulation parallel nach zwei verschiedenen Vorgehensweisen bestimmt und ausgewertet. Diese Muster umfassen einerseits großräumige Zirkulationstypen („Wetterlagen“) und andererseits Zugbahnen von Tiefdruckgebieten, wie etwa die bekannte Vb-Zugbahn von van Bebber.

Methode

Für das Projekt WETRAX wurde ein innovativer Ansatz gewählt, um das Auftreten von großräumigen Starkniederschlägen im Klimawandel zu untersuchen und robuste Ergebnisse ableiten zu können. Kleinräumige, konvektive Niederschläge, die nur in Einzelfällen substanziell zu extremen Niederschlägen in einer gesamten Region beitragen, werden hierbei jedoch nicht thematisiert. Alle Fragestellungen werden stets parallel mit zwei unterschiedlichen methodischen Ansätzen. Die Analyse basiert zum einen auf typischen Mustern der atmosphärischen Zirkulation (sogenannte Zirkulationstypen) und zum anderen auf Zugbahnen von Tiefdruckgebieten (Beispiel für die Vb-Zugbahn siehe Abbildung 1) über Europa.

Speziell für dieses Vorhaben wurde außerdem ein hochaufgelöster, flächendeckender Niederschlagsdatensatz auf Tagesbasis geschaffen, welcher eine fundierte Analyse der Starkniederschläge in Mitteleuropa, für den langen Zeitraum von 1951-2007, ermöglicht. Mit Hilfe dieses Datensatzes werden für die anstehenden Analysen auf Jahres- und jahreszeitlicher Basis unterschiedliche Niederschlagsregionen mit ähnlicher Niederschlagsvariabilität definiert (siehe Abbildung 2).

Erstmalig wurde ein Katalog von Zugbahnen und Zirkulationstypen über Mitteleuropa mit Fokus auf Starkniederschlagsereignisse geschaffen. Aus diesem Katalog sind Wettersituationen bestimmt worden, die in den jeweiligen Gebieten eine besondere Relevanz für das Auftreten von großräumigen Starkniederschlägen aufweisen. Diese Typen werden genutzt, um die Veränderung von großräumigen Starkniederschlägen im Klimawandel (Vergangenheit und Zukunft) zu untersuchen.

Vb Zugbahnkarten 1961-2001 (ERA-40)



Abbildung 1: Zugbahnkarten aus ERA-40. Die roten Punkte kennzeichnen den Startpunkt der jeweiligen Zugbahn.

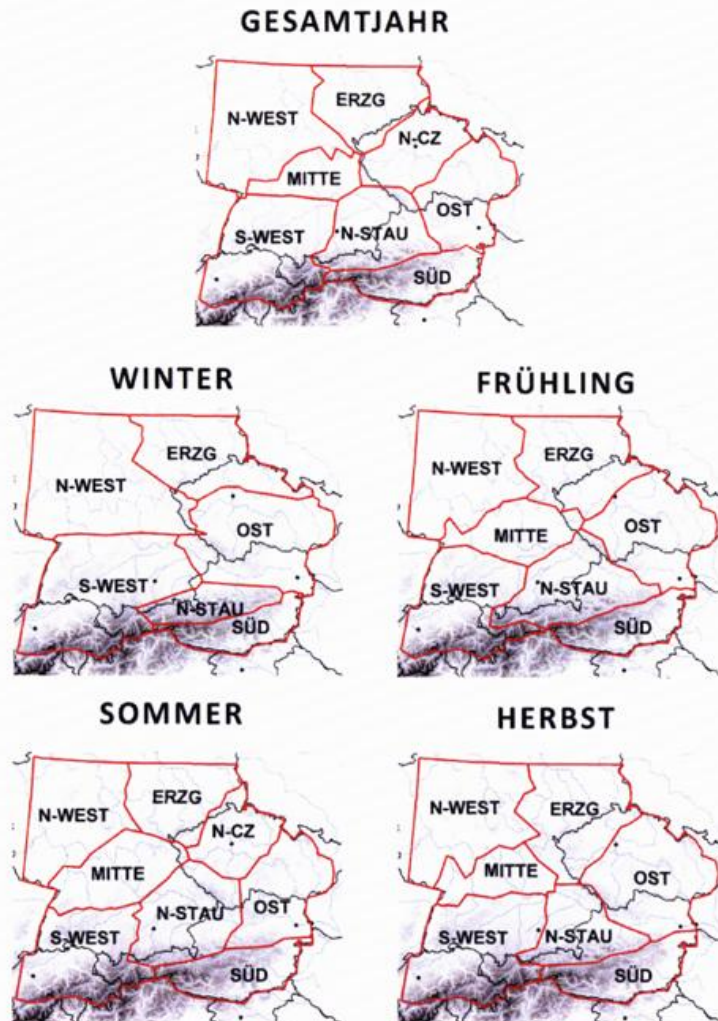


Abbildung 2: Darstellung der einzelnen definierten Niederschlagsregionen, die sich aus der Zusammenfassung all jener Gitterboxen ergeben, die eine ähnliche Niederschlagsvariabilität zeigen – auf Jahres- und jahreszeitlicher Basis.

Ergebnisse

Tiefdruckgebiete im Bodendruckfeld, welche im Bereich der Alpensüdseite entstehen und dann über den Alpenostrand nach Mitteleuropa ziehen (Vb-Zugbahn), weisen mit Abstand die größte Starkniederschlagsrelevanz auf. Besonders häufig treten solche Zugbahnen in Zusammenhang mit einem sogenannten „Cut-Off“-Tief in höheren Luftschichten über dem Alpenraum oder Mitteleuropa auf. Dieses meist stationäre Höhentief trägt wesentlich zu der langen Dauer der Niederschlagsereignisse bei. Ein zweites Muster mit hoher Starkniederschlagsrelevanz ist eine zonale Wetterlage mit einem starken Bodentief über Mitteleuropa.

Unter den großräumigen Zirkulationstypen (ZT) erweisen sich neben den „Cut-Off“-Tiefs südöstlich gerichtete Ausweitungen des subpolaren Tiefdrucks, zonale Zirkulationsmuster („Westwetterlagen“, vor allem für die nördlich und westlich gelegenen Regionen), meridionale Tröge (vor allem für Gebiete südlich des Alpenhauptkamms) sowie Zirkulationsmuster mit nordwestlicher Anströmung (vor allem für den Nordrand der Alpen) von Bedeutung.

Vb-Zugbahnen sind vor allem im Sommerhalbjahr (Mai-Oktober) in den Einzugsgebieten von Donau, Oder und Elbe starkniederschlagsrelevant. Im Winterhalbjahr (November-April) nimmt diese Zugbahn eine spezielle Rolle in den Regionen im Bereich des Alpenostrandes ein. Zugbahnen des Typs TRZ (Track Recognition Zone = Untersuchungsgebiet) oder Atlantik (ATL) sind vorwiegend für die Flüsse Rhein, Ems und Weser von Bedeutung, dabei gibt es keine jahreszeitlichen Unterschiede.

Bei den starkniederschlagsrelevanten ZT treten „Cut-Off“-Tiefs in allen Jahreszeiten mit Ausnahme des Herbsts besonders hervor. Die südöstlich gerichtete Ausweitung des subpolaren Tiefdrucks ist vor allem im Frühjahr vertreten, während die (für unterschiedliche Niederschlagsregionen relevanten, siehe Abbildung 2) zonalen, meridionalen und gemischten Zirkulationsmuster vor allem im Herbst und Winter festzustellen sind.

In der Klimazukunft zeigt sich ein signifikanter Rückgang in der Anzahl der gefundenen Zugbahnen über Europa. Dieser kommt vor allem aus dem Sommerhalbjahr und weist nur eine geringe Abhängigkeit von der Intensität der Tiefdruckgebiete auf. Der Rückgang gilt in gleichem Maße für die starkniederschlagsrelevanten Typen Vb und ATL. Bei den ZT lässt sich im Winter eine Zunahme starkniederschlagsrelevanter zonaler Zirkulationsmuster feststellen, während im Sommer gleichbleibende oder abnehmende Häufigkeiten von starkniederschlagsrelevanten ZT zu verzeichnen sind. Die geringste Anzahl signifikanter Änderungen ergibt sich im Herbst.

Ein Blick über alle Niederschlagsregionen (siehe Abbildung 3) zeigt eine Zunahme in der Niederschlagsmenge der Starkniederschlagsereignisse. Auf Jahresbasis lässt sich nur für die auf dem 700 hPa-Niveau analysierten Zugbahnen eine robuste Zunahme in der Niederschlagsmenge feststellen. Auf saisonaler Basis sind die Änderungen deutlich weniger signifikant, wobei jedoch der Sommer mit einer starken Abnahme der Niederschlagsmenge von 2071-2100 für beide Druckniveaus (700 hPa, MSLP) markant hervortritt!

Auf der Grundlage veränderter ZT-Auftrittshäufigkeiten ergeben sich überwiegend ähnliche Änderungen bei Starkniederschlagshäufigkeiten und Starkniederschlagssummen, das heißt die Intensität der regionalen Starkniederschläge bleibt im Mittel annähernd gleich; nur in wenigen Fällen zeigt sich eine schwache Zunahme. Unter den regionsspezifisch starkniederschlagsrelevanten ZT lässt sich allerdings teilweise eine generelle Niederschlagszunahme in Abhängigkeit von verstärkter Hebung und größerer Luftfeuchtigkeit in der Zukunft feststellen. Am häufigsten finden sich diese Zunahmen im Sommer, während der Herbst kaum davon betroffen ist. In den übrigen Jahreszeiten trifft dies auf ein Viertel bis knapp der Hälfte aller Fälle zu. Eine spezielle Auswertung der Vb-Zugbahnen weist auf größere Veränderungen der Starkniederschlagsmengen für diese Ereignisse hin.

Eine hohe Auftrittshäufigkeit von starkniederschlagsrelevanten Zugbahnen und Zirkulationstypen ist naturgemäß mit einer größeren Anzahl von Niederschlagsereignissen verbunden. Die Niederschlagsmenge hängt davon aber nicht zwingend ab, während Änderungen in der Intensität der relevanten Tiefs, der Stationarität oder der verfügbaren atmosphärischen Feuchte eine wesentlich wichtigere Rolle für die Änderung der Mengen spielen.

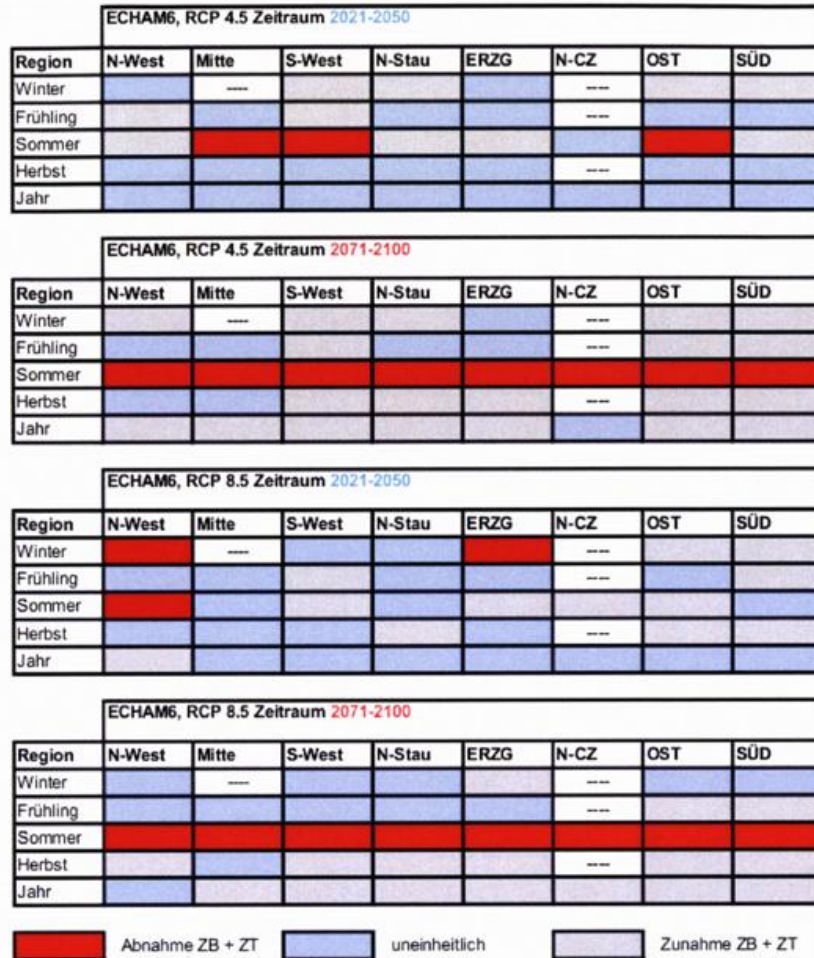


Abbildung 3: Generalisierter Vergleich der Veränderung regionaler Starkniederschlagssummen gegenüber 1971-2000 aus Zugbahnanalyse (ZB) und Zirkulationstypanalyse (ZT), basierend auf dem ECHAM6-Ensemblemittel für die Szenarien RCP4.5 und RCP8.5. **Rot:** in beiden Analysen Abnahme der regionalen Starkniederschlagssummen, **Blau:** in beiden Analysen Zunahme der regionalen Starkniederschlagssummen, **Grau:** unterschiedliches Vorzeichen der Veränderung.

Zusammenfassung

Im Vergleich der beiden Ansätze (Zugbahnen und Zirkulationstypen) sind die Ergebnisse speziell im Sommer sehr konsistent und robust. Sie indizieren einen generellen Rückgang bei großflächigen Starkniederschlägen, der allerdings nicht auf kleinräumige Konvektive Ereignisse übertragen werden kann und auch gegensätzliche Entwicklungen in besonderen Fällen nicht ausschließt. Beispielsweise zeigt sich bei alleiniger Betrachtung des Zugbahntyps Vb eine Zunahme der Starkniederschlagsmengen. Dies widerspricht jedoch nicht der generellen Abnahme, da einerseits Vb-Ereignisse sehr selten und andererseits in den Extremen überproportional stark vertreten sind. Damit wirkt sich die Zunahme im Fall von Vb-Ereignissen nicht erkennbar auf die Veränderung der moderaten Extrema – bei Betrachtung aller Zugbahnen – aus.

Literatur

HOFSTÄTTER M., JACOBET J., HOMANN M., LEXER A., CHIMANI B., PHILIPP A., BECK C. und M. GANEKIND, 2015: WETRAX – Weather Patterns, Cyclone Tracks and related Precipitation Extremes. Großflächige Starkniederschläge im Klimawandel in Mitteleuropa. Augsburg, Deutschland. Projektendbericht.

1.13 Herausforderungen im Hochwasserrisikomanagement (mit Berücksichtigung Klima)

Uwe MÜLLER

Im vorliegenden Beitrag wird ein kurzer Einblick in die umfassenden methodischen und ingenieurmäßigen Leistungen zum Hochwasserrisikomanagement und die noch ausstehenden Herausforderungen in Sachsen gegeben.

Integriertes Hochwasserrisikomanagement

Im Artikel 7 der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (EG-HWRM-RL) EU (2007) ist ausgeführt, dass die Hochwasserrisikomanagementpläne alle Aspekte des Hochwasserrisikomanagement (HWRM) berücksichtigen sollen, wobei der Schwerpunkt auf Vermeidung, Schutz und Vorsorge sowie auf Hochwasservorhersagen und Frühwarnsysteme gelegt wird.

Um die weiteren Ausführungen in den Kontext des HWRM stellen zu können, sollen zuerst das Hochwasserrisiko und anschließend das integrierte HWRM kurz erläutert werden.

Das Hochwasserrisiko wird in der EG-HWRM-RL als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit eines Hochwasserereignisses und der hochwasserbedingten potenziellen nachteiligen Folgen (Hochwasserschäden) auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und die wirtschaftlichen Tätigkeiten definiert. Da die Vulnerabilität der Schutzgüter in die Betrachtung mit einbezogen werden muss, ist in Abbildung 1 das Hochwasserrisiko als Interaktion von Gefährdung und Vulnerabilität dargestellt. Im weiteren Verlauf dieses Beitrages wird diese weitergehende Risikodefinition verwendet, weil damit auch die Exposition, das Schadenspotenzial und die Anfälligkeit der Schutzgüter mit berücksichtigt werden.

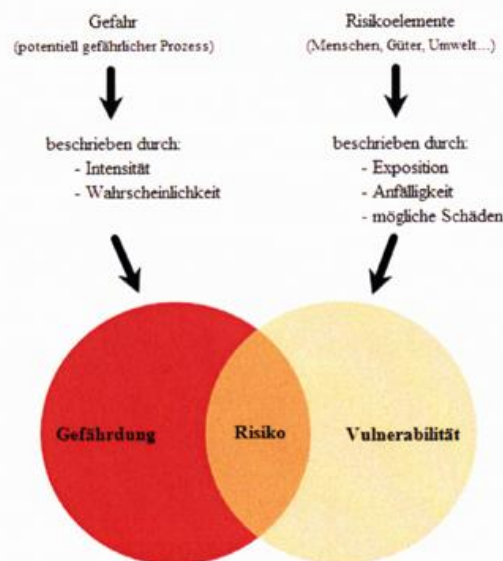


Abbildung 1: Risiko als Resultat der Interaktion von Gefährdung und Vulnerabilität (MÜLLER 2010).

Der Umgang mit den Risiken wird als Risikomanagement bezeichnet. Übliche Risikosteuerungsstrategien sind die Risikovermeidung, die Risikoverminderung, die Risikobegrenzung, die Risikoübertragung und die Risikoakzeptanz.

Das Hochwasserrisikomanagement kann als Risikokreislauf (oder Spirale) dargestellt werden, weil es als fortlaufender und iterativer Prozess unter Berücksichtigung möglichst vieler Ebenen verstanden wird. Für die weiteren Ausführungen in diesem Beitrag wird der in Abbildung 2 dargestellte Kreislauf verwendet.

Die einzelnen Phasen des Hochwasserrisikomanagementkreislaufes können wie folgt beschrieben werden. Das Hochwasserereignis ist das Abflussgeschehen mit Wasserständen oder Durchflüssen ab einem definierten Schwellwert. Die Hochwasserbewältigung dient der Begrenzung des Ausmaßes und der Dauer einer Hochwasserkatastrophe. In der Phase der Regeneration müssen alle Voraussetzungen für den normalen Alltagsbetrieb geschaffen werden und in die Phase der Vorbeugung fallen alle Aktivitäten (Prävention und Vorsorge) zur Verminderung der Vulnerabilität gegenüber Hochwasserereignissen. Eine ausführliche Erläuterung zu den einzelnen Phasen ist in MÜLLER (2010) enthalten.

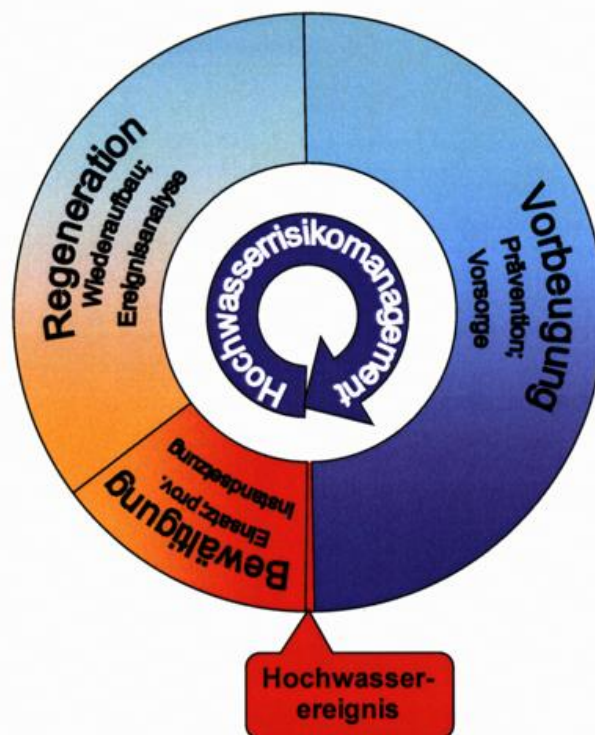


Abbildung 2: Kreislauf Hochwasserrisikomanagement (MÜLLER 2010).

Mit dem dargestellten Hochwasserrisikomanagementkreislauf werden viele Fachdisziplinen und Akteure auch außerhalb der Wasserwirtschaft angesprochen. Ziel des integrierten Hochwasserrisikomanagements ist es, neben der Risikoakzeptanz (Risikobewusstsein) die größtmögliche Vermeidung, Verminderung oder Begrenzung des Hochwasserrisikos unter Beteiligung aller Betroffenen und Akteure aller Ebenen, mit allen verfügbaren Mitteln, in allen Phasen des Risikokreislaufes zu erreichen (MÜLLER 2010).

Extreme Hochwasserereignisse von 2002 bis 2013

Eine so genannte Vb-Wetterlage führte im August 2002 zu den höchsten jemals in Deutschland gemessenen Tagesniederschlagssummen. Das Extremereignis vom August 2002 war eine der schlimmsten Hochwasserkatastrophen in Europa, die Schäden in einer Höhe von ca. 18,5 Milliarden Euro verursachte und 37 Menschen das Leben kostete. Am stärksten betroffen waren Deutschland mit Schäden von 9,2 Milliarden Euro sowie Österreich und Tschechien mit Schäden von je 3,0 Milliarden Euro. Fast die Hälfte der Hochwasserschäden entfiel auf Deutschland und hier wiederum befanden sich ca. 80 % der Schäden im Freistaat Sachsen, wo zwei Drittel der Sächsischen Gemeinden direkt vom Hochwasser betroffen und alle 21 deutschen Todesopfer zu beklagen waren, MÜLLER (2010).

Ende März 2006 war insbesondere die Elbe aufgrund des einsetzenden Tauwetters und der ergiebigen Niederschläge im tschechischen Elbeinzugsgebiet von einem größeren Hochwasser betroffen. Der Elbpegel in Dresden stieg innerhalb von 24 Stunden über 180 cm.

Im August und September 2010 sowie im Januar 2011 ereigneten sich wieder mehrere Hochwasser, die in einigen Gebieten die bisher beobachteten Extreme überschritten. Diesmal waren bis auf wenige Ausnahmen Gebiete betroffen, die im August 2002 kaum Hochwasserschäden erleiden mussten. Für diese Ereignisse sind die Schäden auf ca. 850 Millionen Euro geschätzt worden und es gab vier Todesopfer zu beklagen.

Im Juni 2013 kam es in nahezu allen Sächsischen Flussgebieten zu einem extremen Hochwasser. Grund waren starke Niederschläge, die auf eine außerordentlich hohe Bodenfeuchte trafen. Die Wasserstände dieses Hochwassers übertrafen teilweise noch die Werte vom August 2002 oder die bisher aufgezeichneten Extrema. Die Schäden beliefen sich auf ca. 2 Milliarden Euro.

Damit war Sachsen innerhalb von 11 Jahren von fünf extremen Hochwasserereignissen betroffen, die jeweils unterschiedliche hydrometeorologische Ursachen hatten aber in sehr kurzer Reihenfolge auftraten. Wesentlich ausführlichere Erläuterungen können den Ereignisanalysen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie oder MÜLLER (2010) entnommen werden.

Hochwasserbewältigung

In diese Phase fallen alle Sachverhalte und Maßnahmen zur Begrenzung des Ausmaßes und der Dauer einer Hochwasserkatastrophe. Dazu gehören der Hochwassereinsatz mit den Bestandteilen Alarmierung, Rettung, Schadensabwehr durch Sofortmaßnahmen und Opferbetreuung; die provisorische Instandsetzung/Sicherstellung von lebenswichtigen Einrichtungen, Verkehrs- und Rettungswegen, Kommunikationswegen, Ver- und Entsorgungsleitungen, Ver- und Entsorgung und die Dokumentation des Hochwasserereignisses und der Hochwasserbewältigung.

Die Hauptakteure in dieser Phase sind die Katastrophenschutzbehörden, die Wasserbehörden und Hochwassermeldezentralen, die Gewässer- und Stauanlagenbetreiber sowie weitere Aufgabenträger. Die größte Herausforderung für die Akteure ist die insbesondere logistische Bewältigung aller anstehenden und in kurzer Zeit zu erledigenden Aufgaben.

Regeneration

Die Phase der Regeneration dient der Schaffung aller Voraussetzungen für den normalen Alltagsbetrieb und lässt sich in zwei Haupthandlungsfelder aufteilen. Einerseits ist die Anfertigung einer Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse mit den Bestandteilen Prozessanalyse, Gefahrenanalyse, Schutzdefizitanalyse und Vulnerabilitätsanalyse wichtig. Nur mit solch einer Analyse kann man die Schwachstellen erkennen und sich besser auf nachfolgende Ereignisse vorbereiten. Die Anwendung der Analyseergebnisse der Hochwasserereignisse von 2002 bis 2011 hat im Jahr 2013 zu wesentlich weniger Schäden geführt obwohl das gesamte Bundesland betroffen war. Eine zeitnahe, qualifizierte und umfassende Ereignisdokumentation ist erforderlich, um unter anderem die erforderliche Datenbasis für spätere im Rahmen der eigentlichen Ereignisanalyse oder in der Phase der Hochwasservorbeugung durchzuführende Analysen, Berechnungen und Simulationen zu schaffen. Ohne diese Datenbasis sind Kalibrierungen und Weiterentwicklungen von Analyse- und Berechnungsmodellen nur schwer oder teilweise nicht möglich. Die zweite große Herausforderung ist der nachhaltige Wiederaufbau von lebenswichtigen Einrichtungen, Verkehrs- und Rettungswegen, Kommunikationswegen, Ver- und Entsorgungsleitungen, Ver- und Entsorgung, Gebäuden, Infrastrukturen und Gewerbe- und Industrieobjekten.

Bereits in der Phase der Regeneration hat der Freistaat Sachsen beginnend mit der beschriebenen Ereignisanalyse über die Erarbeitung von Hochwasserschutzkonzepten (HWSK) und die Erstellung von Gefahrenkarten begonnen, das Katastrophenhochwasser methodisch aufzuarbeiten und ein sinnvolles Hochwasserschutzinvestitionsprogramm zur schrittweisen Verbesserung des Hochwasserschutzes abzuleiten. Die HWSK decken den größten Teil der Inhalte der bis Dezember 2015 zu erarbeitenden Hochwasserrisikomanagement-

pläne der erst später in Kraft getretenen EG-HWRM-RL ab und beinhalten sehr viele neu erarbeitete methodische Grundlagen, siehe MÜLLER (2010).

Hochwasservorbeugung

Die Phase der Hochwasservorbeugung dient der Verminderung der Vulnerabilität gegenüber Hochwasserereignissen. Die Handlungsfelder in dieser Phase sind die Prävention mit angepasster Raumnutzung, raumplanerischen Maßnahmen, natürlichem Hochwasserschutz, technischem Hochwasserschutz sowie Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten und die Hochwasservorsorge mit Risikovorsorge, Verhaltensvorsorge, Vorhaltung und Vorbereitung des Katastrophenschutzes, Informationsvorsorge (zum Beispiel Hochwassernachrichtendienst, ...) und Hochwasserrisikomanagementplänen. Diese Phase stellt auch den Handlungsschwerpunkt nach EG-HWRM-RL (EU 2007) dar.

Beispielhaft soll der ebenfalls wesentlich verbesserte Hochwassernachrichtendienst von Sachsen erwähnt werden. Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie betreibt eines der modernsten Landeshochwasserzentren (LHWZ) in Deutschland.

Hier werden die Daten (Wasserstand, Niederschlag, Wetter, ...) aus eigenen oder von Dritten betriebenen Messnetze verarbeitet und als Hochwasserstandsmeldungen oder Hochwasserwarnungen über alle denkbaren Informationskanäle verbreitet. Eine Sächsische Besonderheit stellt die Hochwassereilbenachrichtigung per SMS oder andere Übermittlungskanäle dar. Nach Überschreiten der Alarmstufe 1 (und auch der AS 3) werden die im System angemeldeten Empfänger (Behörden in allen Ebenen, Kommunen, Private, ...) direkt benachrichtigt und müssen den Erhalt der Nachricht auch quittieren. Damit soll eine sofortige Benachrichtigung über Hochwasser sichergestellt werden.

Als Reaktion an sich ändernde klimatische Verhältnisse plant, koordiniert und bearbeitet das LHWZ Vorhaben und Projekte, welche der nachhaltigen Verbesserung und Stärkung des Hochwasserrisikomanagements dienen. Zu nennen sind hier die fortwährende und wissenschaftlich fundierte Optimierung der landeseigenen meteorologischen und hydrologischen Messnetze, Fortschreibung und fachlich-inhaltliche Konsolidierung von für das Hochwasserrisikomanagement relevanten Daten (zum Beispiel Risikokarten) oder die Verbesserung der Hochwasserwarnung in kleinen Einzugsgebieten.

Literatur

- EUROPÄISCHE UNION, 2007: Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (EG-HWRM-RL), Straßburg.
- MÜLLER, U., 2010: Hochwasserrisikomanagement – Theorie und Praxis, Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien, Wiesbaden.

1.14 Klimawandel und Wassererosion - Planung von Schutzmaßnahmen mittels Radolan-Daten und hochauflösender Geländemodelle

Ellen MÜLLER, Walter SCHMIDT, Marcus SCHINDEWOLF, Phoebe HÄNSEL, Franziska KUNTH, Andreas KAISER

In Sachsen weisen rund 60 % der Ackerfläche ein hohes bis sehr hohes Gefährdungspotenzial für Wassererosion auf. Infolge von Bodenerosion, die vor allem durch Starkregenereignisse ausgelöst wird, kommt es zu einem irreversiblen Verlust an fruchtbarem Ackerboden, an Humus und Nährstoffen und somit letztlich zu einer Verringerung der Ertragsfähigkeit von Böden. Außerhalb von Ackerflächen kann abgetragenes Bodenmaterial und abfließendes Wasser zu erheblichen Schäden und Kosten führen. So werden zum Beispiel Verkehrswege verunreinigt, Gräben verfüllt, Gebäude beschädigt und Gewässer durch Nährstoffeinträge belastet.

Der Vergleich des Klimas im Zeitraum 1981-2010 zur Referenzperiode 1961-1990 zeigt, dass sich aufgrund des höheren Temperaturniveaus Häufigkeit und Intensität der Starkregenereignisse und damit die Erosionsgefährdung erhöht haben. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Entwicklung fortsetzen wird, da von einer weiteren Zunahme thermisch induzierter Starkregen auszugehen ist (BERNHOFER et al. 2015, SMUL 2015).

Daher ergibt sich ein verstärkter Handlungsbedarf zur Vorsorge gegen Wassererosion. Erosionsmindernde Maßnahmen müssen optimiert und umfassender umgesetzt werden. Gleichzeitig muss auf Ackerflächen möglichst viel Niederschlagswasser infiltrieren.

Die wirksamsten Maßnahmen eines nachhaltigen und vorsorgenden Erosionsschutzes sind die dauerhaft konservierende Bodenbearbeitung und die Direktsaat. Der Anteil dauerhaft pfluglos bearbeiteter Ackerflächen an der gesamten Ackerfläche in Sachsen wird auf ca. 35 %, der Anteil periodisch pflugloser Bodenbearbeitung auf über 50 % geschätzt. Direktsaat und ergänzende Schutzmaßnahmen auf Ackerflächen (zum Beispiel Schlagteilung, Hangrinnenbegrünung oder Verwallungen) sind bisher in Sachsen nur auf wenigen Ackerflächen angewandt worden. Sie tragen jedoch sehr wirksam zu einer weiteren Erosionsminderung bei und müssen kurz- und mittelfristig verstärkt in Kombination mit der konservierenden Bodenbearbeitung/Direktsaat umgesetzt werden.

Mit dem Erosionssimulationsmodell EROSION-3D (von WERNER 1995) können Erosionsschutzmaßnahmen konkret geplant werden. Das Modell simuliert die Bodenerosion durch Wasser: den Bodenabtrag, die Deposition und den Sedimenteintrag in Fließgewässer. Es ist ein rasterbasiertes, physikalisch begründetes Modell, welches in zahlreichen Einzugsgebieten in Sachsen erfolgreich angewendet wurde (zum Beispiel SEIDEL 2008, SCHOB et al. 2006, SCHINDEWOLF 2012). Mit Hilfe von EROSION 3D können Erosionssimulationskarten erstellt und damit Erosionsereignisse analysiert sowie die Wirkung verschiedener Erosionsschutzmaßnahmen abgeschätzt und weiterer Handlungsbedarf im Sinne eines vorsorgenden Schutzes gegen Wassererosion ermittelt werden.

Beispielsweise überprüften SEIDEL et al. (2015) mit dem Modell die Wirksamkeit einer Hangrinnenbegrünung und von ackerbaulich nutzbaren Verwallungen (Speichervolumen 700 m³, siehe Abbildung 1), in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung auf den Bodenabtrag, die Deposition und die Oberflächenabflussmenge. Außerdem wurde das Retentionsvermögens der Verwallungen in Kombination mit verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen quantifiziert.

Für Sachsen liegt landesweit eine mit EROSION 3D erstellte Kartensammlung im 20 m-Raster vor (SCHINDEWOLF 2012), die räumlich differenziert über die wichtigsten Erosionsprozesse (Erosion, Deposition, Sedimenteintrag) für ein Worst-Case-Szenario Aufschluss gibt. Auf Basis dieser Karten können pixelscharf Flächen und Gewässerabschnitte, die in ungünstigen Fällen von schädlicher Bodenumlagerung betroffen sind, identifiziert werden.



Abbildung 1: Bewirtschaftungsintegrierte Verwallungen in einer Tiefenlinie eines Ackerschlagles.

Für die Erfassung und Darstellung realer Erosionsschadereignisse und der anschließenden Planung von Schutzmaßnahmen auf Ackerflächen sowie für die vorgesehene Entwicklung eines Frühwarnsystems vor Erosionsereignissen sind räumlich und zeitlich hochaufgelöste Eingangsparameter notwendig. Das betrifft insbesondere Niederschlags- und Geländedaten sowie aktuelle großmaßstäbige Orthophotos. In der Vergangenheit fehlten häufig zu den Erosionsereignissen Orthophotos sowie Angaben zur Niederschlagsmenge und -intensität. Starkniederschläge treten meistens lokal eng begrenzt auf und Ombrometerdaten liegen nicht flächendeckend vor. Anhand von hochaufgelösten Geländemodellen und Orthophotos könnten Erosionsereignisse besser kartiert und analysiert werden. Außerdem wäre eine Validierung des Modells EROSION 3D möglich.

Das Defizit fehlender Niederschlagsdaten von Erosionsereignissen kann durch die Nutzung von RADOLAN-Daten behoben werden. Dafür stellt der DWD seit 2011 dem LfULG das RADOLAN-Ergebnis (RW-Produkt) mit stündlichen Niederschlagshöhen in einer räumlichen Auflösung von 0,1 mm zur Verfügung und informiert täglich darüber, ob und wo am Vortag in Sachsen Niederschlagsereignisse > 10 mm/h aufgetreten sind.

Hochaufgelöste Geländemodelle und Orthophotos können durch eine Befliegung mit kamerabestückten Drohnen erstellt werden. Kamerabestückte Drohnen oder auch UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) und ihre Anwendungen sind in den letzten Jahren ein wichtiger methodischer Baustein der geomorphologischen und insbesondere der Bodenerosionsforschung geworden. Sie ermöglichen die günstige und wenig zeitaufwändige Generierung von großmaßstäbigen Luftbildern in hoher zeitlicher Auflösung. Aus diesen Luftbildern können neben Orthophotos insbesondere hochauflösende digitale Geländemodelle (DGMs) erstellt werden (HACKNEY und CLAYTON, 2015).

Drohngestützte Produkte zur Kartierung von Schadereignissen werden seit zwei Jahren in der AG Boden- und Gewässerschutz der TU Bergakademie Freiberg verwendet.

Die folgende Abbildung 2 zeigt als Beispiel das DGM und das im GIS berechnete Volumen eines 2014 mit dem Quadrocopter Phantom 2 beflogenen Erosionsgrabens am Großräschener See, eines in Flutung befindlichen Tagebaurestsees im Lausitzer Seenland.



Abbildung 2: DGM des beflogenen Erosionsgrabens am Großräschener See und dessen Volumen (KUNTH et al. 2015).

Die Vorgehensweise der drohnengestützten Datenerfassung und –auswertung zu Erosionsereignissen soll in einem Promotionsvorhaben der AG Boden- und Gewässerschutz der TU Bergakademie Freiberg bei Erosionsschadereignissen auf Ackerflächen angewendet werden.

Hierzu werden vom DWD zur Verfügung gestellte RADOLAN-Daten und die daraus erzeugten Rasterkarten werden hinsichtlich ihres Auftretens von Starkniederschlägen ausgewertet. Im Falle eines mit dem Starkregen einhergehenden Erosionsereignisses werden diese Flächen aufgesucht, beflogen und fotografiert. Das Datenmaterial wird zu Orthophotos und DGMs verarbeitet. Das Erosionsereignis kann damit kartiert werden. Zudem wird geprüft, inwieweit linienhafte Erosionsmuster detektierbar und volumenmäßig quantifizierbar sind.

In weiteren Schritten werden diese Flächen mittels EROSION 3D und den RADOLAN-Daten modelliert als Grundlage für die Planung von Erosionsschutzmaßnahmen. Die Ergebnisse aus Befliegung und Modellierung werden miteinander verglichen und auf Plausibilität geprüft. Bei ausreichender Gültigkeit der Modellaussagen werden die vorhandenen Erosionsvorhersagekarten (SCHINDEWOLF 2012) mit Hilfe von RADVOR-OP (radargestützte Niederschlagsvorhersage) darüber hinaus so kombiniert, dass zukünftig eine Frühwarnung vor Erosionsereignissen möglich wird (Frühwarnsystem).

Literatur

- BERNHOFER, C., FRANKE, J., FISCHER, S., KIRSTEN, L., KÖRNER, P., KOSTROWSKI, D., PRASSE, H., SCHALLER, A., DONIX, T., 2015: Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen. Schriftenreihe des LfULG, Heft 3/2015.
- HACKNEY, C., CLAYTON, A. I., 2015: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and their application in geomorphic mapping. In: Clarke, L. und Nield, J. (Hg.): Geomorphological Techniques (Online Edition). British Society for Geomorphology, London. Kapitel 2.1.7.

- KUNTH, F., KAISER, A., VLÁČILOVÁ, M., SCHINDEWOLF, M., SCHMIDT, J., 2015: Extensive rill erosion and gullyng on abandoned pit mining sites in Lusatia, Germany. Geophysical Research Abstracts 17. EGU General Assembly.
- SCHINDEWOLF, M; SCHMIDT, W., 2012: Phosphoreinträge durch Erosion in Sachsen. Schriftenreihe des LfULG. Heft 11/2012. Dresden.
- SCHOB, A., SCHMIDT, J., TENHOLTERN, R., 2006: Derivation of site-related measures to minimise soil erosion on the watershed scale in the Saxonian loess belt using the model EROSION 3D. Catena 68(2-3): 153-160.
- SEIDEL, N., 2008: Untersuchung der Wirkung verschiedener Landnutzungen auf Oberflächenabfluss und Bodenerosion mit einem Simulationsmodell. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg.
- SEIDEL, N.; PESCHKE, S.; SCHÜTZE, S., 2015: Erosionsschutz und Wasserrückhalt mit Hilfe von bewirtschaftungsbedingten Verwallungen. In: WasserWirtschaft 105 (2015). Heft 4: S. 42-47
- SMUL, 2015: Klimawandel in Sachsen - wir passen uns an. Dresden.
- VON WERNER, M., 1995: GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten. Dissertation. Freie Universität Berlin.

1.15 ReKliEs-De: Wie können Informationen aus Klimamodell-Ensembles besser für Impaktforschung und Politikberatung nutzbar gemacht werden?

Heike HÜBENER

Für den fünften IPCC-Report (Intergovernmental Panel on Climate Change Assessment Report 5) wurden globale Klimasimulationen für eine neue Klasse von Klimaszenarien erstellt. Nachdem bis zum vierten IPCC-Report Szenarien der Emissionsentwicklungen der Treibhausgase verwendet wurden (sogenannte SRES-Szenarien, NAKICENOVIC et al. 2000), liegen nun Szenarien der Konzentrationsverläufe vor; die RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways, MOSS et al. 2010). Damit stellt sich für die Klimafolgenforschung und die Politikberatung die Frage, ob frühere Abschätzungen über die Auswirkungen des zu erwartenden Klimawandels noch aktuell sind oder überarbeitet werden müssen. Aus diesem Grund wurde von Vertretern der Bundesländer und des UBA angeregt, einen systematischen Vergleich zwischen den bisherigen Abschätzungen von Klimawandel und seinen Folgen für Deutschland und den entsprechenden Folgen unter den neuen Szenarien durchzuführen.

Um den künftigen Klimawandel in Deutschland abschätzen zu können, sind hoch aufgelöste Simulationen erforderlich. Im Rahmen der Europäischen Initiative EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment for Europe) wurden und werden mehrere globale Simulationen für die neuen Szenarien mit (dynamischen) regionalen Klimamodellen für Europa regionalisiert. Im Projekt ReKliEs-De sollen diese hochaufgelösten Simulationen systematisch für Deutschland (inklusive der nach Deutschland entwässernden Flusseinzugsgebiete) ausgewertet und durch ausgesuchte weitere Simulationen (sowohl mit dynamischen als auch mit statistischen Verfahren) komplettiert werden.

Vorrangiges Ziel des Projektes ist die Bereitstellung robuster Informationen über die Bandbreiten und Extreme der zukünftigen Klimaentwicklung in Deutschland. Hierzu gehört neben der Generierung der wissenschaftlichen Erkenntnisse insbesondere auch die nutzerorientierte Aufbereitung der Ergebnisse für die Verwendung in der Impakt-Forschung und der Politikberatung. Darauf aufbauend können bisherige Abschätzungen von Klimafolgen, Risiken und Anpassungsbedarf unter den aktuellen Szenarien überprüft und gegebenenfalls adjustiert werden. Vergleiche zu Ergebnissen früherer Projekte (zum Beispiel ENSEMBLES) werden systematisch durchgeführt und als Teil der Projektergebnisse aufbereitet und bereitgestellt.

Es ist inzwischen State-of-the-Art für Aussagen über den Klimawandel und seine Folgen Ensemble von möglichst vielen verschiedenen Modellen zu verwenden. Mitunter sind die in der Klimafolgenforschung verwendeten Impakt-Modelle jedoch so Rechenzeit-aufwändig, dass es unmöglich scheint, sehr viele Klimamodelle als mögliche Antriebe für die Impakt-Modelle zu verwenden. Daher wird im Projekt auch untersucht, wie groß ein Ensemble sein muss (und gegebenenfalls welche weiteren Bedingungen es erfüllen muss) um eine belastbare Abschätzung der künftigen Klimaänderungen zu ermöglichen. Darüber hinaus wird untersucht, ob sich systematische Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus dynamischen und statistischen regionalen Klimamodellen identifizieren lassen.

Insbesondere für hydrologische Fragestellungen werden häufig besonders hochaufgelöste meteorologische oder klimatologische Antriebsdaten benötigt, die zudem nicht zu stark von den beobachteten Gegebenheiten abweichen dürfen. Klimasimulationen mit hoher räumlicher Auflösung ermöglichen eine bessere Darstellung des Geländereiefs. Bei Auflösungen von weniger als 4 km (Gittermaschenweite) werden zudem keine Parametrisierungen für die Niederschlagsprozesse benötigt, wodurch sich im Allgemeinen die Niederschlagsverteilungen besser darstellen lassen. Andererseits benötigen Simulationen mit sehr hoher räumlicher Auflösung sehr viel Rechenzeit. Klimasimulationen für mehrere Dekaden sind derzeit in einer solchen Auflösung nicht möglich. Daher stellt sich die Frage, bis zu welcher Einzugsgebietsgröße Klimasimulationen mit derzeit möglichen Auflösungen (in EURO-CORDEX und ReKliEs-De ca. 11 km) eine realistische Darstellung des Niederschlagsgeschehens zulassen. Zu diesem Zweck werden für ausgewählte Starkniederschlag-Episoden mehrere, mit ca. 1 km sehr hoch aufgelöste, dynamisch genestete Episodensimulationen (mehrere Tage) durchgeführt. Anhand dieser Simulationen wird untersucht, inwieweit

die simulierten Niederschlagsintensitäten mit 11 km Auflösung für die Analyse und weiterführende Impakt-Modellierung von Hochwasserereignissen in Folge von Starkniederschlag geeignet sind oder ob eine weitere Erhöhung der Auflösung zu sinnvollen Verbesserungen führt.

Um die Projektergebnisse möglichst passgenau auf die Anforderungen der Nutzer abzustimmen, wird zur Halbzeit des Projektes, am 14./15. Juni 2016, ein Nutzerworkshop durchgeführt. Hier können interessierte Anwender ihre Anforderungen an die Projektergebnisse formulieren und in das Projekt einbringen.

Im Vortrag werden erste Beispiele von möglichen Auswertungen vorgestellt.

Literatur

NAKICENOVIC, N., R. SWART (eds), 2000: Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp.

MOSS et al., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756.

Wissenstransfer und Kommunikation

1.16 Drei Jahre nach Regklam: Was haben wir aus dem Klimaanpassungsprogramm gelernt - Wo stehen wir mit der Umsetzung?

Christian KORNDÖRFER, Franziska REINFRIED

Einführung

Der Stadtrat der Landeshauptstadt Dresden hatte bereits 2004 unter dem Eindruck der verheerenden Hochwasserereignisse von 2002 und dem Extremsommer 2003 den Auftrag erteilt, die Anstrengungen zum Klimaschutz durch Maßnahmen zur Klimaanpassung zu ergänzen. Das Dresdner Umweltamt hat daraufhin begonnen, selbst Betrachtungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die städtischen Handlungsfelder durchzuführen und Maßnahmen abzuleiten, um nachteiligen Entwicklungen gegenzusteuern oder vorzubeugen. Als Schwerpunkte wurden die Überwärmung der Innenstadt, Veränderungen im lokalen und regionalen Wasserhaushalt und die Ausbreitung von Neophyten und Neozythen sowie neuer vektoriieller Erkrankungen gesehen.

Die durch das Hochwasser von 2002 ausgelöste Schadensbeseitigung wurde als Chance genutzt, umfangreiche gewässerbezogene Anpassungsmaßnahmen auf den Weg zu bringen, die sowohl dem Hochwasserschutz als auch der Gewässerökologie zu Gute kamen. Diese Maßnahmen wurden integriert in einen umfassenden raumstrukturellen Ansatz „Die kompakte Stadt im ökologischen Netz“, der zwischenzeitlich zum Leitbild im Landschaftsplan wurde (Abbildung 1). Kompakte Stadtstrukturen werden hier eingebettet in ökologisch multifunktionale Räume. Die Notwendigkeit kompakter Stadtstrukturen liegt im Klima- und Ressourcenschutz begründet. ÖPNV und leitungsgebundene Ressourcen wie zum Beispiel die Fernwärme bedingen urbane Nutzungsdichten. Grünstrukturen ermöglichen als unversiegelte Flächen die Regenwasserversickerung vor Ort, wodurch der Abfluss in Flüssen und Kanalisation entlastet wird. Die Verdunstungskühle mindert durch die Evapotranspirationsleistung von Großgrün die Übertemperaturen. Außerdem wird der bodennahe Wärmeeintrag durch die Verschattung von zum Beispiel großkronigen Bäumen reduziert. Mit diesem Ansatz soll eine ressourcenschonende Stadtentwicklung ermöglicht werden, die gleichzeitig auf die zu erwartenden Klimaveränderungen hin zu ausgeprägteren Extremwetterlagen reagiert.

Das REGKLAM-Projekt

Die Dresdner Verwaltung betrat zu dieser Zeit Neuland, anwendungsbereite Forschungsergebnisse lagen kaum vor. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat den Forschungsbedarf für die deutschen Kommunen erkannt und ein großes übergreifend angelegtes Forschungsprojekt „KLIMZUG – Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten“ ausgelobt. Neben der Erforschung der Klimatrends und deren Auswirkungen und der Ableitung von Anpassungsmaßnahmen ging es vor allem um die Initialisierung eines fruchtbaren Dialogs zwischen Wissenschaftlern, Verwaltungsfachleuten, Unternehmern sowie politischen Entscheidungsträgern. Es war ein Glücksfall für Dresden, dass es gelang, die Region Dresden in das Programm aufzunehmen. Als eines von sieben Modellprojekten wurde zwischen 2008 und 2013 unter Leitung des Instituts für ökologische Raumentwicklung das Vorhaben „Entwicklung und Erprobung eines integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden“ – kurz REGKLAM – durchgeführt. Der Fokus des Projektes lag neben den Auswertungen regionaler Klimatrends und Entwicklung möglicher Zukunftsszenarien auf Untersuchungen zu städtebaulichen Strukturen, zur Ver- und Entsorgungsinfrastruktur mit Schwerpunkt auf urbanen Wassersystemen sowie der Landnutzung. Unter dem Leitsatz „Lebensqualität sichern, wirtschaftliche Chancen nutzen“ erarbeitete ein Konsortium regionaler Akteure aus Wissenschaft, Verwaltung und Wirtschaft Strategien für den Umgang mit den regionalen Auswirkungen des Klimawandels. In insgesamt fünf Regionalforen wurden die Ergebnisse aus den unterschiedlichen Teilprojekten den Stakeholdern vorgestellt und diskutiert. Leider gelang es nur unzureichend, die regionale Politik und Entscheidungsträger in die Arbeit und Diskussionen einzubeziehen. Als Endprodukt entstand ein umsetzungsorientiertes Integriertes Regionales Klimaanpassungsprogramm - IRKAP.

Das Programm besteht aus drei Teilen:

Teil 1 analysiert den Klimawandel differenziert für verschiedene sächsische Regionen und ausgewählte Klimakenngrößen. So wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine signifikante Temperaturänderung von 2,0 bis 3,5 K in der Modellregion erwartet. Die Simulationen gehen von einem stärkeren Temperaturanstieg im Winterhalbjahr als im Sommerhalbjahr aus. Die projizierten Änderungssignale für den Niederschlag sind mit hohen Unsicherheiten behaftet. Eine Abnahme der Regenmenge mit längeren Trockenphasen sowie intensiven Einzelereignissen in den Sommermonaten ist allerdings wahrscheinlich. Es muss daher von Veränderungen im Heiz- beziehungsweise Kühlenergiebedarf, einer höheren Wärmebelastung sowie mit einer Verschiebung der phänologischen Phasen (Verlängerung der Vegetationsperiode) einhergehend mit einem erhöhten Wasserbedarf ausgegangen werden.

In *Teil 2* werden Klimaanpassungsmaßnahmen für die Region formuliert, die auch überregional übertragbar sind. Diese sollten heute oder in naher Zukunft umgesetzt werden, damit die Region in und um Dresden ein attraktiver Standort bleibt. Der Handlungsbedarf wurde in fünf strategische Themenbereiche der Klimaanpassung gegliedert: Städtebauliche Strukturen und Gebäude, Grün- und Freiflächen, Wasserhaushalt und -wirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Gewerbliche Wirtschaft, Naturschutz.

Der *Praxisteil 3* enthält konkrete Handlungsempfehlungen und Umsetzungsbeispiele. In sogenannten Maßnahmeblättern wird vertiefend auf einzelne Maßnahmen bezogen auf die oben genannten Themen eingegangen, wobei die Landeshauptstadt den Schwerpunkt der Betrachtungen bildete.

Die Integration von REGKLAM in der Verwaltung

Das von Forschung und Verwaltung erarbeitete IRKAP wurde nach Projektende den übrigen Ämtern und der Verwaltungsspitze der Stadtverwaltung Dresden vorgestellt und im Folgenden dem Stadtrat zur Kenntnis gegeben. Dieser erteilte daraufhin im März 2014 den Auftrag, über die laufenden Klimaanpassungsmaßnahmen zu berichten und Vorschläge für die Umsetzung weiterer Maßnahmen des IRKAP zu unterbreiten.

Zwischenzeitlich hat sich das Thema Anpassung an den Klimawandel in der Novellierung des Bundesnaturschutzgesetzes 2009 sowie des Baugesetzbuches 2011 niedergeschlagen. Danach sind Luft und Klima und hier insbesondere Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete oder Luftaustauschbahnen zu schützen (BNatSchG § 1 Abs. 3, Nr. 4). Klimaschutz und Klimaanpassung werden als Aufgabe der Bauleitplanung (§ 1 BauGB) eingeführt. Durch die maßgebliche Beteiligung verschiedener Akteure der Stadtverwaltung während des gesamten Vorhabens kam es nicht zu dem bei externer Vergabe von Gutachten üblichen Effekt, dass das im Projekt erarbeitete Wissen im Wesentlichen im Ingenieurbüro und bei wenigen Insidern der Verwaltung verbleibt. Soweit bestanden gute Voraussetzungen für die Implementierung der IRKAP. Es gibt aber auch deutliche Hemmnisse, die dazu geführt haben, dass weder im Bereich der Gesundheitsvorsorge noch im Bereich des Hoch- und Tiefbaus dezidiert Klimaanpassungsmaßnahmen umgesetzt wurden.

Welche Ergebnisse liegen nun drei Jahre nach Projektabschluss in der Stadtverwaltung vor ?

Für Dresden als Stadt am Fluss in Tallage und im Erzgebirgsvorland spielen zwei Aspekte der Anpassung eine wichtige Rolle: Die Überwärmung des bebauten Stadtgebiets und die Zunahme von Dürreperioden und Starkniederschlagsereignissen. Für Beides gibt es in den letzten 15 Jahren mehrere herausragende Ereignisse, und somit hinreichende Betroffenheit. Ob die extremen Hochwasserereignisse seit 2002 das Resultat einer Klimaänderung sind, kann statistisch (noch) nicht belegt werden. Klimaforscher gehen allerdings von einer zukünftigen Zunahme an Starkregenereignissen in der Region aus, was eine erhöhte Hochwassergefahr für die Stadt bedeutet. Die Intensität der Überwärmung in der Stadt wird durch die Lage im Elbtal und der damit reduzierten Durchlüftung erhöht (Abbildung 2). Auch das Auftreten von Inversionswetterlagen kann dadurch begünstigt sein und den Stadtklimaeffekt verstärken. In Folge des Klimawandels und der damit einhergehenden Zunahme heißer Tage ist davon auszugehen, dass sich die Überwärmungsbereiche intensivieren und ausdehnen. Generell ist zu erwarten, dass die Vulnerabilität der bebauten Stadt zunimmt. Die Wissensbasis für die Entscheidungsträger wurde deutlich erweitert und vertieft unter anderem mit Karten und Messwerten zum Stadtklima, der Darstellung der überwärmten Gebiete, der Kaltluftentstehungsgebiete und der wichtigen Frischluftschneisen. In die gesamtstädtischen Planungen wie zum Beispiel das Integrierte

Stadtentwicklungskonzept (INSEK) haben die grundsätzlichen Aussagen des IRKAP Eingang gefunden. Die Aussagen zu dem bereits eingetretenen und noch zu erwartenden Temperaturanstieg werden von den Forschern mit viel größerer Sicherheit getroffen, als die Projektionen zu den zu erwartenden Änderungen im Niederschlagsgeschehen. Der aktuelle Entwurf des Dresdner Landschaftsplans geht auf beide Aspekte intensiv ein und versucht mit dem o. g. Leitbild von der Kompakten Stadt im ökologischen Netz Lösungen und konkrete Maßnahmen vorzuschlagen. Mit diesem erarbeiteten Wissen besteht die Möglichkeit mit der vorbereitenden und verbindlichen Bauleitplanung die klimaökologisch bedeutsamen Bereiche frei zu halten und so für die Zukunft gegen weitere Überwärmung vorzusorgen. Trotz der Klimaschutznovelle des BauG wird diese Chance im konkreten Planungsfall kaum oder nur widerstrebend genutzt. Die ortskonkrete Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung der Überwärmungsbereiche scheitert fast immer in der Abwägung.

Konkrete Umsetzungen

Die Entwicklung der Spangen des ökologischen Netzes erfolgte mit Ausnahme des Weißeritzgrünzugs im Gefolge von wasserbaulichen Maßnahmen im Kontext mit dem Ziel der Verbesserung der Gewässerqualität und des Hochwasserschutzes. Selbst der Weißeritzgrünzug hat seinen Ursprung zum großen Teil in den Überlegungen des Umweltamtes zu einem vorbeugenden Hochwasserschutz an Dresdens gefährlichstem Fluss. Das Stadtgebiet von Dresden umfasst ein Gewässernetz von fast 500 km. Aufgrund der Topographie Dresdens entspricht der Großteil der Kaltluftabflussbahnen den Gewässerläufen. Durch Umsetzungen von Hochwasserschutzmaßnahmen an Gewässern konnten mittelbar klimaökologisch wichtige Funktionsräume zumindest teilweise freigehalten werden. Die kommunalen Bäche und Flüsse mit ihren recht kleinen Einzugsgebieten reagieren besonders schnell und gefährlich auf Starkregenereignisse. Deshalb wurden für sie im städtischen Plan Hochwasservorsorge prioritäre Maßnahmen festgelegt und mit einem Investitionsvolumen von mehr als 20 Mio. Euro zum großen Teil umgesetzt. Ein 100%-iger Hochwasserschutz wird für diese Gewässer nicht möglich sein, deshalb werden Hochwasserrisikomanagementpläne für die wichtigsten Gewässer unter Einbeziehung der betroffenen Bevölkerung ausgearbeitet.

Der Erfolg bei der Umsetzung gewässerbezogener Klimaanpassungsmaßnahmen basiert neben dem festen Willen der Akteure im Wesentlichen darauf, dass im Wasserrecht der Vorsorgeaspekt bis hin zum Hochwasserrisikomanagement fest gesetzlich verankert ist und auf die Folgen des Klimawandels angewandt werden kann. Überschwemmungsgebiete werden anhand geschehener Ereignisse erfasst und Risikokarten entsprechend der EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie erstellt. Gewässer wurden offen gelegt, Gewässerrandstreifen renaturiert und naturnahe Rückhalteräume geschaffen.

Große Fortschritte wurden auch durch die Stadtentwässerung Dresden bei der Minimierung der Risiken durch Überstau im Kanalnetz erreicht, einer Maßnahme, die im REGKLAM-Projekt entwickelt und intensiv untersucht worden ist.

Die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen zu den Themen Stadtklima und Überwärmung verbleibt jedoch meist auf der Planungsebene und ein kraft- und zeitraubender Prozess, dessen Erfolg in erster Linie in Abhängigkeit vom Willen der jeweiligen Entscheidungsträger steht.

Zusammenfassung

Der Klimawandel berührt sehr viele Bereiche des städtischen Daseins. Überlegungen zur Klimaanpassung haben mithin Eingang gefunden bei den übergreifenden Fachkonzepten und bei stadträumlichen Planungen wie Landschaftsplan und Flächennutzungsplan, die keine direkte Außenwirkung entfalten. Viele der Ansätze basieren jedoch bei genauerer Betrachtung auf Anregungen und Vorschlägen, die aus dem Umweltbereich in Verfahren anderer städtischer Behörden eingebracht worden sind. Das lässt erkennen, dass noch stärker als bei den städtischen Anstrengungen zum Klimaschutz die Klimaanpassung noch immer als „grünes“ Thema in der Zuständigkeit des Umweltamtes gesehen wird, obwohl sie mittlerweile als bedeutende Handlungserfordernis allgemein anerkannt ist. Trotz offensichtlicher Betroffenheit fehlt die Implementierung im Bereich Gesundheitsvorsorge weitgehend. Folglich fehlt von dort auch die wirksame Unterstützung von Vorschlägen und Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor Überwärmung, zum Beispiel durch Freihalten oder -legen von Frischluftschneisen. Hier bedarf es noch entsprechender Überzeugungsarbeit durch

die Verwaltungsspitze, um diese allgemeine Anerkennung in zielgerichtetes Verwaltungshandeln der verschiedenen Geschäftsbereiche zu transformieren.

Die Bereitschaft, Themen der Klimaanpassung aufzunehmen, Maßnahmen zu entwickeln und umzusetzen, ist sowohl in der Verwaltung als auch beim Rat eher gering, wenn verbindliche Normen oder gesetzliche Grundlagen fehlen und die Ergebnisse der Anpassungsmaßnahmen nicht kurzfristig und offenkundig wirksam werden. Eine Vorsorge im Rahmen eines Risikomanagements ist innerhalb des Verwaltungsapparates nicht vorgesehen. Verwaltungshandeln benötigt immer eine Rechtsgrundlage. Die Verwaltung reagiert auf Geschehnisse, aber agiert nicht a priori im Hinblick auf projizierte Zukunftsszenarien. Eine zusätzlich notwendige Gebäudeausstattung kann demnach finanziell nicht ermöglicht werden. Der Stadtverwaltung sind dort Grenzen gesetzt, wo es keine weitergehende Berücksichtigung von Klimaanpassung in technischen Regelwerken oder Bauvorschriften gibt. Dies bedeutet nicht nur eine Begrenzung der Fördermöglichkeiten, sondern auch eine Einschränkung in Gewährleistungsverfahren. Das wird deutlich im Hoch- und Tiefbau, wo die Verwaltung bei öffentlichen Investitionen nicht über die bestehenden Standards zum Beispiel bei der Materialauswahl oder der technischen Gebäudeausstattung hinausgehen darf, wenn dies zu höheren Baukosten führt. Dies wird vom Landesrechnungshof kontrolliert.

Gesetzliche und untergesetzliche Regelungen müssen als Grundlage für eine sachgerechte Abwägung und finanzierbare Umsetzung geschaffen werden. Dabei muss allerdings auch auf Flexibilität geachtet werden, um mit Unsicherheiten der Klimaprojektionen und neuen Erkenntnisgewinnen umgehen zu können.

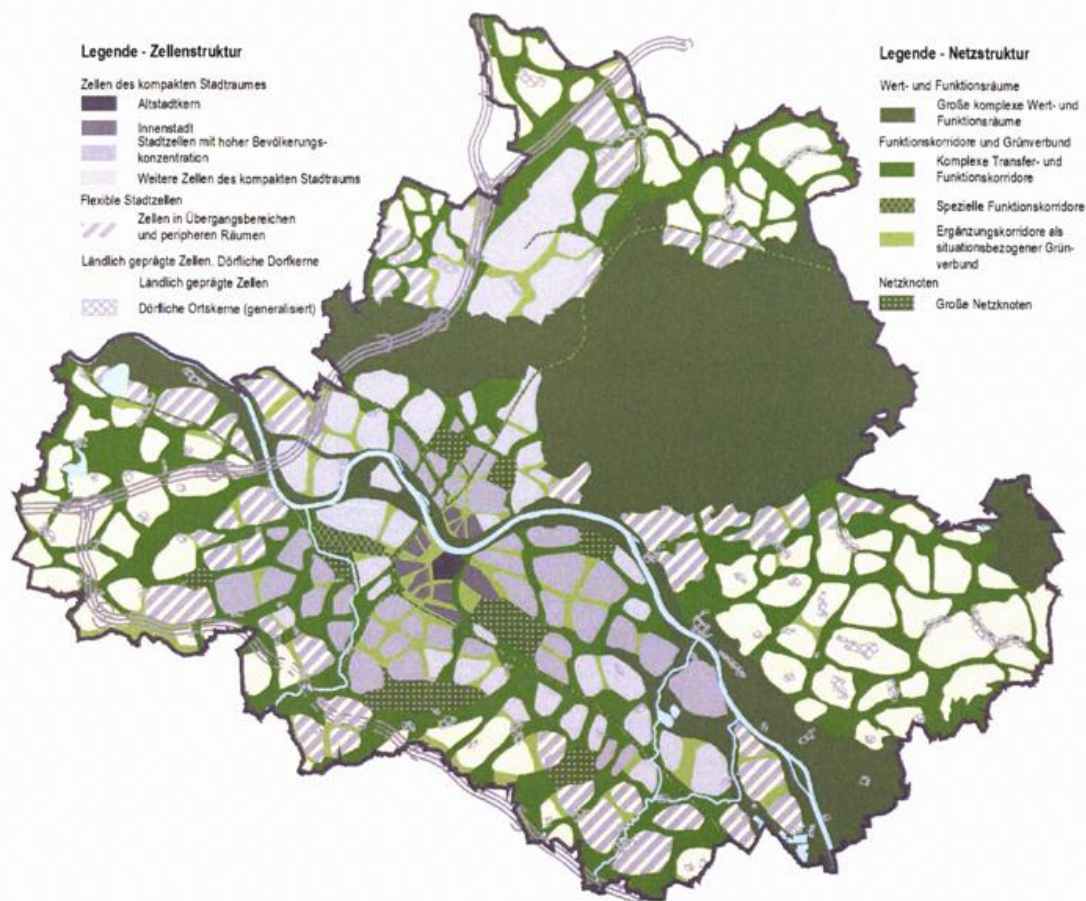
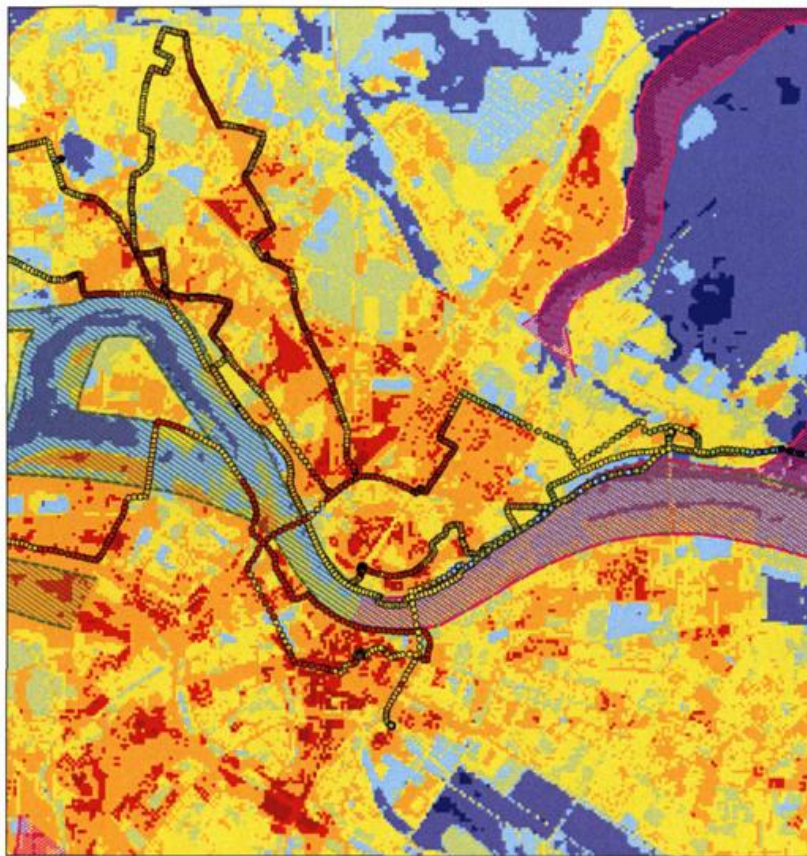


Abbildung 1: Landschaftsplan Dresden – Strategisches Leitbild „Dresden – Die kompakte Stadt im ökologischen Netz“, Quelle: Umweltamt der Landeshauptstadt Dresden.



**Synthetische Klimafunktionskarte
Ausschnitt mit Messfahrten**

Legende

- Kalt- und Frischluftabflussbahnen (Begrenzung)
- Luftleitbahnen (Begrenzung)

- Bereich sehr hoher Kaltluftproduktion
- Bereich hoher Kaltluftproduktion
- Bereich der Kalt- und Frischluftentstehung im Elbtal, auf Grünflächen und daran angrenzende Gebiete
- Bereich beginnender Überwärmung (1-2 Grad)
- Bereich geringer Überwärmung (2-3 Grad)
- Bereich mittlerer Überwärmung (3-4 Grad)
- Bereich hoher Überwärmung (4-5 Grad)
- Bereich sehr hoher Überwärmung (>5 Grad)

Abbildung 2: Synthetische Klimafunktionskarte-Ausschnitt, Quelle: Umweltamt der Landeshauptstadt Dresden.

1.17 Hindernisse und Möglichkeiten der Kommunikation von Klimathemen

Frank BÖTTCHER

Die Kommunikation von wissenschaftlichen Ergebnissen stellt einen immer wichtigeren und zunehmend festen Bestandteil im Arbeitsprozess der Klimaforschung dar. Grundsätzlich geht es darum, Ergebnisse und Erkenntnisse sowie Einordnungen vorzunehmen, sowie den jeweiligen Stand der Forschung einer breiten Öffentlichkeit bekannt zu machen und zum öffentlichen Diskurs anzubieten. Auf diese Weise soll Klimakommunikation dazu beitragen, vorhandene Meinungen zum Thema durch die vorhandenen Fakten zu bestätigen, zu ergänzen oder zu ersetzen.

Auf dem Weg zum Ziel gibt es allerdings viele Hindernisse, die überwunden werden müssen, damit die Möglichkeiten der Kommunikation von Klimathemen erfolgreich genutzt werden können. Diese Hindernisse haben verschiedene Ursachen und Quellen. Zu den äußeren hinderlichen Einflussfaktoren gehören Lobbygruppen und Themenleugner, die – wie in jedem politisch und wirtschaftlich relevantem Bereich – Einfluss auf die Meinungsbildung nehmen und die öffentliche Meinung zu Gunsten ihrer Interessen verändern wollen. Da die Ergebnisse der Klimaforschung oft weitreichende Auswirkung auf die Wirtschaft und Politik haben – mehr als bei manchen anderen Forschungsfeldern –, ist der Anspruch Klimakommunikation höher, als in vielen anderen Bereich der Wissenschaftskommunikation.

Hindernisse in der Klimakommunikation können in folgenden Feldern begründet sein: Bei der Wahl des Themas, bei der Einschätzung der medialen Relevanz, bei der Verständlichkeit und der Eindeutigkeit vorliegender Erkenntnisse sowie beim Neuigkeitswert und beim richtigen Timing einer Nachricht. Auch die stark unterschiedliche Sachkenntnis der Journalisten kann sich als großes Hindernis herausstellen. Journalisten müssen nicht in allen Themenfeldern Experten sein, sondern nur Experten in der Erstellung von Berichten und Beiträgen. Der Unterschied zwischen „Wetter“ und „Klima“ ist immer wieder zu erklären, um Journalisten bei der Einordnung der Aussagen zu helfen. Das hilft Journalisten bei der Einordnung der Aussage. Besonders wichtig ist die Bereitschaft der Wissenschaftler, auch mit ganz unterschiedlichen Journalisten reden zu wollen und grundsätzlich auch alle Menschen erreichen zu wollen. Hier besteht oft Unsicherheit im Umgang mit Journalisten und die Sorge der Forscher, man könne falsch verstanden, falsch zitiert oder im falschen Kontext dargestellt werden. Bei eben genanntem Beispiel kann es schon hilfreich sein, direkt zu Beginn des Statements einen Bezugspunkt zu formulieren: „Ich treffe jetzt eine Aussage zum Klima...“.

Diese Sorgen und die genannten Aspekte in Bezug auf Thema und Erkenntnis stehen noch vor der Betrachtung der Kommunikationswege. Oft scheitert der Versuch, ein – aus Sicht der Forschenden wichtiges Thema – breit zu kommunizieren, schon daran, dass das Thema aus Sicht der Redakteure keine Relevanz hat, das Thema inhaltlich nicht passt, zum falschen Zeitpunkt erfolgt, für Leser/Zuschauer mit meist nur geringen Vorkenntnissen als zu kompliziert eingeschätzt wird oder – mangels Kenntnis des Journalisten selbst – nicht richtig verstanden wird. Es gilt immer, die Fakten so darzustellen, dass jeder Mensch diese auch ohne großes Vorwissen verstehen kann. Die Kunst – und es ist eine Kunst – besteht darin, die richtige Meldung, zum richtigen Zeitpunkt, mit dem richtigen Thema, zum passenden Kontext an den richtigen Redakteur zu schicken, so zu schicken, dass dieser die Botschaft zu seinem Thema macht.

Die Arbeitsweise von Journalisten und Wissenschaftlern könnte unterschiedlicher nicht sein: Während ein Journalist jeden Tag vor der Aufgabe steht aus der Vielzahl der ihm angebotenen Themen eine leere Seite zu füllen und am Tag mehrere Termine einhalten muss und dabei stets die Verkaufsfähigkeit seiner Arbeit im Blick hat, arbeitet der Forscher oft über lange Zeit an einer Fragestellung.

So kann der richtige Zeitpunkt einer Meldung schon den Ausschlag für oder gegen die rasche Verbreitung bringen: Grundsätzlich kann jedes Thema für Journalisten relevant werden, vor allem wenn die Erwartung besteht, dass auch die medialen Wettbewerber das Thema aufgreifen. Kann ein Redakteur eine wissenschaftliche Meldung in ein aktuelles Thema integrieren, so steigt die Chance der Erwähnung stark an. Da Journalisten die erhaltenen Informationen aufgrund ihrer Arbeitsweise oft in einen anderen Kontext sehen als

Wissenschaftler, können Themen in der Relevanzbewertung plötzlich unerwartet ab- und zunehmen. Auf diese schnellen Bedeutungswechsel eines Themas gilt es sich einzustellen.

In der Wissenschaftskommunikation kommt der Komponente „Mensch“ eine hohe Bedeutung zu. Wissenschaftler unterteilen Medien nicht selten in die Kategorien „seriös“ und „nicht seriös“. Dieser Umstand stellt ein Hindernis in der Kommunikation dar. Mit „unseriösen“ Medien möchte ein Wissenschaftler besonders dann nicht so gerne sprechen, wenn er/sie sich selbst als „seriös“ betrachtet. Das trifft wohl auf die große Mehrheit der Wissenschaftler/innen zu. Dahinter könnte man die Sorge vermuten, dass Kollegen einen mit dem Attribut „unseriös“ belegen können, wenn man häufig Statements in vermeintlich unseriösen Medien gibt. Hier sollte die Maßgabe stehen: Je mehr Menschen ich mit meiner fundierten Botschaft erreiche, umso weniger falsche Informationen können sie bekommen.

Auf der gegenüberliegenden Seite findet oft die Aufteilung in „bunt“ und „blass“ statt. Mit blassen Wissenschaftlern möchte ein Journalist kein Interview machen, oft aus der Sorge, der journalistische Beitrag könnte dann ebenfalls „blass“ werden und den Erfolg bei den Konsumenten des medialen Produktes schmälern. Beide Seiten verpassen mit diesen Klischees die Chance einer erfolgreichen Zusammenarbeit. Den Umgang mit den medialen Kollegen kann und sollte jeder Wissenschaftler erlernen. Der Tatsache von einem Journalisten gefragt zu werden, sollte die gleiche Bedeutung zukommen, wie der Einladung zu einem Vortrag auf eine Konferenz. Dabei darf man nicht vergessen, dass Journalisten meist eigennützig vorgehen: „Der/die Wissenschaftler/in liefert mir ein Statement, mit dem ich etwas anfangen kann.“ Ist ein Kollege mit einigen Statements sichtbar, werden andere Journalisten aufmerksam und werden sich ebenfalls an diese/n Kollegen/in wenden. Dabei bevorzugen Journalisten eine bildreiche Sprache. Verlässlichkeit und die Fähigkeit in einer bildhaften oder vergleichenden Sprache die Dinge auf den Punkt zu bringen, sind wichtigen Erfolgskriterien. Da immer mehr Medien einen stärkeren emotionalen Zugang zum Thema wählen, ist ein Training zum richtigen Umgang mit den Medien besonders wichtig.

Vor diesen Hintergründen ist es wichtig, die Kommunikation von Klimathemen als systematischen Prozess zu verstehen und die Themen und Abläufe zusammen mit Experten zu erarbeiten, die im Bereich der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Medien zu Hause sind und hier viel Erfahrung haben. Medientrainings für Wissenschaftler stellen eine wichtige Grundlage für den Erfolg der Klimakommunikation dar.

1.18 Klimabildung in Sachsen – Herausforderung und Umsetzung

Werner SOMMER

Was ist Klimabildung und welche Bedeutung kommt ihr in der schulischen Bildung zu?

Schulische Klimabildung hat in Sachsen bereits eine längere Tradition. Klimabildung wurde dabei im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung als Handlungsdimension verankert, die Klimafragen neben Themen der sozialen Gerechtigkeit, der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit, der ökologischen Nachhaltigkeit und der politischen Stabilität berücksichtigt. Seit 2007 wurde das Thema Klimawandel in Zusammenarbeit von Umwelt- und Kultusministerium schrittweise in die Bildungsangebote an den Schulen integriert. Geeignete Materialien, Fortbildungsangebote, Wettbewerbe und verschiedene methodische Angebote wurden entwickelt, erprobt und eingeführt, um die praktische Umsetzung zu unterstützen.

Aufgabe von Schule ist es, den Klimawandel zunächst zu erklären und ihn fächerübergreifend in den lokalen, regionalen und globalen naturwissenschaftlichen und gesellschaftlichen Kontext zu stellen. Das schafft eine Wissensbasis, lenkt den Blick auf die Betroffenen und ermöglicht persönliche Bezüge zur Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler. Schule sollte daneben auch Offenheit schaffen gegenüber Lebensstilfragen, Wirtschaftsformen oder Wachstumsfragen, die allesamt eng mit der Erderwärmung zusammenhängen. Klimabildung darf aber nicht bei der Wissensvermittlung und beim privaten Handeln stehen bleiben. Will sie gesellschaftlich Einfluss nehmen, muss sie Handlungskompetenz entwickeln: Sie braucht Kinder und Jugendliche, die sich in ihrem Aktionsradius engagieren: für klimafreundliche Angebote im Schulkiosk, für CO₂-ärmere Klassenfahrten oder politisch im Stadt- oder Gemeinderat, um sich dort für den Radwegeausbau, ein gutes ÖPNV-Angebot, die Anlage von Grünflächen und ähnliches einzusetzen.

Bisherige Angebote zur schulischen Klimabildung in Sachsen

Klimabildung ist im schulischen Unterricht in den letzten Jahren zunehmend sichtbarer geworden, auch entsprechende Bildungsmaterialien gibt es inzwischen in großer Zahl. Entscheidend dabei ist, die Lebens- und Erfahrungswelt der Schülerinnen und Schüler aufzugreifen und das Thema Klimawandel didaktisch so zu reduzieren, dass ihnen die Herausforderungen des Klimawandels vor allem an lokalen und regionalen Beispielen aufgezeigt und erläutert werden. Dafür wurden in Sachsen vielfältige Unterrichtsmaterialien für den Fachunterricht und den fächerverbindenden Unterricht entwickelt:

- die Schülerbroschüre „Klasse Klima?!“ mit einer Lehrerhandreichung,
- der Klimakoffer für den experimentellen Einsatz,
- die DVD „Sachsen im Klimawandel“ zu den Auswirkungen des Klimawandels in Sachsen,
- die Aktionsmappe „Phänologische Beobachtung – Sachsens Schulen erforschen den Klimawandel“.



Abbildung 1: Beispiele für die Unterrichtsmaterialien.

Daneben unterstützen weitere Angebote die Integration des Themas Klima an den sächsischen Schulen:

- eine zunächst auf drei Jahre angelegte Lehrerfortbildung zu neuen Methoden und Inhalten insbesondere für den fächerverbindenden Unterricht,
- die Klimaexpedition, die durch den Vergleich von Live-Satellitenbildern mit Archivaufnahmen vor allem technikaffine Schüler erreicht,
- der Klimapavillon als interaktive Präsentation zum Regionalen Klimawandel, der kostenlos an Schulen ausgeliehen wird.



Abbildung 2: Der Klimapavillon für die Präsentation an Schulen in Sachsen.

Die dargestellten Aktivitäten haben dazu geführt, dass heute in vielen sächsischen Schulen das Thema Klima in seinen unterschiedlichen Ausprägungen und Zusammenhängen vermittelt und wird. Künftig sollen diese Aktivitäten landesweit ausgebaut, stärker vernetzt und strukturiert werden, um sie dauerhaft an den Schulen zu etablieren.

Wie geht es weiter?

Die neue Initiative „Klimaschulen in Sachsen“ soll dazu beitragen, dieses Ziel zu erreichen. Umwelt- und Kultusministerium wollen so die Themen Klimawandel, Klimafolgen und Klimaschutz langfristig an sächsischen Schulen verankern und diese anregen, ihr eigenes Schulprofil als Klimaschule zu entwickeln.

Jede Schule besitzt vielfältige Möglichkeiten, Klimaschutz im eigenen Schulgebäude, im Schulalltag und darüber hinaus zu praktizieren. Die sächsische Klimaschule basiert deshalb auf der Leitidee einer Kultur der klimafreundlichen Schule, in der alle Bereiche schulischen Wirkens vom Klimathema durchdrungen werden. Ziel ist es, die Schule als Ganzes in der Auseinandersetzung mit den Schlüsselthemen unserer Gesellschaft für die Herausforderung des Klimawandels zu sensibilisieren und ein nachhaltiges Denken und Handeln aller schulischen Akteure zu entwickeln.

So sollen die fünf schulischen Handlungsfelder Unterricht, Fortbildung, Schulleben, außerschulische Lebenswelt und schulische Infrastruktur profiliert werden. Ein Katalog von fünf Modulen mit jeweils mehreren Schlüsselthemen dient der inhaltlichen Ausgestaltung der fünf Handlungsfelder: Globale Ursachen und regionale/lokale Auswirkungen des Klimawandels, Klimafaktor Mensch, Lebenswelt gestalten, Energie-wende vor Ort, klimabewusst handeln und konsumieren.

Die Initiative wurde im November 2015 gestartet. Im Rahmen eines Modellversuchs soll nun in den Schuljahren 2016/2017 und 2017/2018 an zehn sächsischen Schulen die Einführung eines Schulprofils Klimaschule getestet werden.

2. Teil

Ergebnisse aus 100 Jahren meteorologischer Messungen auf dem Fichtelberg/Sachsen und am Tieflandstandort Radebeul-Wahnsdorf

Unmittelbar vor den 10. Annaberger Klimatagen wird die 100. Wiederkehr des Beginns regelmäßiger meteorologisch-klimatologischer Beobachtungen auf dem Fichtelberg gefeiert. Dies ist Anlass, in diesem Band der Annalen der Meteorologie neben den Ergebnissen der Vortragenden der Annaberger Klimatage auch Resultate der akribischen Messwertgewinnung auf dem Fichtelberg vorzustellen.

2.1 Zum Klima des Erzgebirges

Falk BÖTTCHER

Bevor in den folgenden Kapiteln die Resultate der meteorologischen Messungen einzelner Klimaelemente in der einhundertjährigen Reihe der Bergwetterwarte Fichtelberg detailliert dargestellt werden, soll zunächst ein Überblick über die das Erzgebirge prägenden klimatischen Bedingungen gegeben und ihre Ursachen ansatzweise beschrieben werden. Dazu wird auf wissenschaftliche Literatur zurückgegriffen, die in den letzten Jahrzehnten sowohl das Gebiet als Ganzes wie auch einzelne Regionen beschreibend, veröffentlicht wurden.

Die Herausforderungen an die Meteorologie und Klimatologie sind im Erzgebirge besonders groß, denn die Region ist sowohl in forstlicher, wasser- und landwirtschaftlicher als auch industrieller und ebenso in hohem Maße touristischer Hinsicht bedeutsam. Dabei ist laut Statistischem Landesamt Sachsen 2015 eine Bevölkerungsdichte von etwa 191 Einwohnern je Quadratkilometer zu beachten. Die Bereitstellung von belastbaren klimatologischen aber auch Wettervorhersagedaten für die Sicherstellung der Funktionen der bis in höchste Lagen umfangreich ausgebauten Infrastruktur ist dabei in erster Linie Grundvoraussetzung zur Lösung der Herausforderungen. Dies zeigen schon die Auswertungen, die in METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR (1973) publiziert vorliegen.

Die klimatischen Bedingungen des Erzgebirges, das sich die Tschechische Republik und die Bundesrepublik Deutschland teilen, werden maßgebend durch die orographischen Bedingungen und die Exposition des Gebirges erzeugt. Dabei gehört das Erzgebirge dem östlichen Teil der mitteleuropäischen Mittelgebirgszone an, deren Kern die Böhmisches Masse bildet und deren nordwestliche Begrenzung wiederum das Erzgebirge mit einer ausgeprägten Pultschollengestaltung bildet. Die Pultscholle erhebt sich sanft von Nord nach Süd aus dem Sächsischen Hügelland empor und erreicht in den westlichen und mittleren Regionen Höhen über 1000 m NN, während im Osterzgebirge diese Höhe nicht erreicht wird. Die höchsten Erhebungen sind der Klinovec auf der tschechischen Seite mit 1244 m NN und der Fichtelberg mit 1215 m NN. Südlich der Kammlinie fällt das Erzgebirge schroff zur Nordböhmischen Senke ab. Der Fuß dieses steilen Abbruchs bildet zugleich die Südgrenze des Erzgebirges, während es im Westen in das Elstergebirge übergeht und an das Vogtland grenzt. Im Norden schließen sich Erzgebirgisches Becken und Mittelsächsisches Lößhügelland an und im Osten wird es begrenzt durch das Elbsandsteingebirge (METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR 1973). Die südlichen Stadtgrenzen von Zwickau, Chemnitz und Dresden können als Tore zu den einzelnen Erzgebirgsregionen wie Westerzgebirge, Mittleres Erzgebirge und Osterzgebirge betrachtet werden. Diese Regionen werden wiederum durch die Läufe der vom Kammbereich nach Norden hin fließenden Gewässer „Schwarzwasser“ und „Flöha“ markiert.

Das Erzgebirgsklima wird insbesondere im Kammlagenbereich als außerordentlich rau beschrieben. Das führt unter anderem dazu, dass es hier sogar auf 900 m Meereshöhe natürliche Latschenkiefernbestände gibt, die man in den Alpen erst oberhalb von etwa 1600 m Meereshöhe findet. Bei der Betrachtung der Klimareihen von 1961-1990 der vier Standorte Freiberg (380 m NN; Jahresmittel der Lufttemperatur 7,7 Grad C und mittlere Jahresniederschlagshöhe 764 mm), Annaberg-Buchholz (630 m NN, 6,7 Grad C, 834 mm), Zinnwald-Georgenfeld (877 m NN, 4,3 Grad C, 979 mm) und Fichtelberg (1215 m NN, 2,9 Grad C, 1117 mm) zeigt sich, dass die Jahresmitteltemperatur linearisiert zwischen der hier tiefst gelegenen und der höchst gelegenen Messstelle um 1 K abnimmt, wenn die Höhe um etwa 175 m NN zunimmt. Durch örtliche Effekte kann dieser Wert regional etwas variieren. Lagen oberhalb 900 m Meereshöhe können im Durchschnitt nur etwa 140 frostfreie Tage erwarten. In den älteren Chroniken (vergleiche LEHMANN 1699) wird von sehr harten Wintern berichtet, in denen durch Frostereignisse sogar das Vieh in den Ställen erfror und weite Gebiete durch teilweise bis in den April reichende mächtige Schneedecken von der Außenwelt abgeschnitten waren. Während in Freiberg zwei Monate eine negative mittlere Lufttemperatur zeigen (Januar und Februar), sind es in Annaberg-Buchholz drei (zusätzlich Dezember), in Zinnwald-Georgenfeld vier (zusätzlich März) und auf dem Fichtelberg fünf Monate (November bis März). In Freiberg erreichen die wärmsten Monate Juli und August Mittelwerte bis 16,5 Grad C. Auch auf dem Fichtelberg sind die beiden Monate die wärmsten, aber ihre Mitteltemperaturwerte erreichen nur 11,2 Grad C. Die Auswahl der hier verwendeten Stationsstandorte fußt auf den Aussagen von FREYDANK (2014).

Im Erzgebirge fallen in den unteren Lagen zwischen 650 und 770 mm Niederschlag im Jahr. In den Kammlagen sind es 950 bis 1200 mm, wobei im Mittleren und im Westerzgebirge die höheren Werte auftreten. An vielen Messstellen des Erzgebirges findet sich neben dem Hauptmaximum des Niederschlages im Sommer (Monate Juni bis August) ein sekundäres Maximum im Dezember, das vielerorts fast an die Sommerwerte heran reicht. Monate mit geringem Niederschlag sind der Februar und der Oktober. Die Niederschlagsmengen in den Monaten variieren in den tieferen Lagen zwischen 40 und 90 mm, in den Kammlagen zwischen 65 und 120 mm. Die hohen Jahresniederschlagssummen kommen vor allem durch Stauerscheinungen von Norden her zustande. Unterstützend wirkte die Nordstaukomponente auch bei der bisher höchsten in Deutschland gemessenen Tagesniederschlagssumme von 312 mm, die am 12. August 2002 in Zinnwald-Georgenfeld registriert wurde. Diese außergewöhnliche Niederschlagsmenge wurde durch eine sogenannte „Vb-Wetterlage“ verursacht, die in der Folge in weiten Teilen des Elbeeinzugsgebietes ein verheerendes „Jahrhunderthochwasser“ nach sich zog.

Bei Wetterlagen, die eine südliche Anströmung an das Erzgebirge nach sich ziehen, sind Stauerscheinungen auf der tschechischen Seite bemerkbar, aber da es sich hierbei vielfach um trockenere Luft handelt als von Norden anströmende bzw. bei einer Südwestanströmung der vorgelagerte Gebirgskomplex von Böhmerwald und Bayerischem Wald viel Niederschlagsfracht abgezogen hat, sind die Auswirkungen der Niederschläge wesentlich geringer, was exemplarisch an der Jahresniederschlagssumme des zwar nicht mehr im Erzgebirge aber nah dabei liegenden Gipfels der Milesovka (833 m NN) oberhalb von Teplice im Böhmischem Becken gezeigt werden kann. Dort werden als Jahresniederschlagssumme im Mittel nur 566 mm gemessen (siehe auch SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE, 2014).

Vielmehr sind solche südlichen Wetterlagen verantwortlich für föhnartigen Wind, der am Nordrand des Erzgebirges zu Niederschlagsunterdrückung und Wolkenauflockerungen führt. Eine spezielle Form des südlichen Windes durch die nord-süd-orientierten Flusstäler im Erzgebirge und in den anliegenden Regionen stellt der Böhmishe Wind dar. Er entsteht primär, wenn sich im Böhmischem Becken Kaltluft sammelt. Dies ist im Winter dann bevorzugt der Fall, wenn ein Hochdruckgebiet über Mittel- und Osteuropa etabliert ist. Reicht der sich bildende Kaltluftsee im Böhmischem Becken an den durch Flusstäler eingekerbten Rand des Beckens, dann kann die schwere, kalte Luft über diese Flusstäler aus dem Böhmischem Becken ausfließen. In Kombination mit einer Inversion kann der Böhmishe Wind besonders unmittelbar unterhalb der Inversion beträchtliche Stärke erreichen. So sind schon Geschwindigkeiten beobachtet worden, die mindestens Windstärke 10 entsprechen.

Aus den geschilderten Anströmbedingungen und ihren Auswirkungen insbesondere auf die Bewölkung ergibt sich für die Verteilung der Globalstrahlung und der Sonnenscheindauer ein Bild, das höhere Werte am Südrand des Erzgebirges zeigt. Während im Kammbereich etwa 1400 bis 1600 Stunden Sonnenschein erwartet werden dürfen, sind es nördlich etwa 1500 bis 1700 Stunden und am Südrand werden gebietsweise 1700 bis 1800 Stunden im Mittel eines Jahres registriert. Im südlichen Teil des Erzgebirges kommt es stark auf die Ortshöhe an, denn durch die mit der Ausformung des Kaltluftsees im Böhmischem Becken bei winterlichen Hochdrucklagen oftmals verbundenen Inversionen sind häufig an deren Obergrenze hochnebelartige Stratuswolken vorhanden, die an den Orten dann wieder die Sonnenscheindauer reduzieren, was auch hier zu Ergebnissen zwischen 1500 und 1600 Stunden mittlerer Sonnenscheindauer im Jahr führt. Im Kammbereich kommt als Dämpfung für die Sonnenscheindauer und Globalstrahlung noch die im Sommer verstärkte Konvektion hinzu, die beispielsweise dafür sorgt, dass das Globalstrahlungsmaximum auf dem Fichtelberg nicht beim Sonnenhöchststand im Juni, sondern schon im Mai gemessen wird.

Die phänologische Entwicklung ist ein Spiegel der Temperaturverteilung unter Beachtung der längeren Andauer der Schneedecke je höher man aufsteigt. Zwischen den tieferen Lagen und dem Kammbereich liegen in der Vegetationsentwicklung in aller Regel zwischen einer und zwei Wochen. Oberhalb 900 m Meereshöhe ist dabei kaum noch Ackerbau anzutreffen. Hier dominiert in der Landwirtschaft auch aus Erosionsschutzgründen die Grünlandwirtschaft.

Literatur

- FREYDANK, E., 2014: 150 Jahre staatliche Wetter- und Klimabeobachtungen in Sachsen, Tharandter Klimaprotokolle Band 21, Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur für Meteorologie.
- LEHMANN, C., 1699: Von kalten Wintern, In: Historischer Schauplatz derer natürlichen Merckwürdigkeiten in dem Meißnischen Ober-Ertzgebirge, Friedrich Lankischens Erben, Leipzig, Digitalisat der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Universitäts- und Landesbibliothek Sachsen-Anhalt).
- METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR (Herausgeber), 1973: Klima und Witterung im Erzgebirge, Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik Nr.104 (Band XIII), Akademie-Verlag Berlin.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (Herausgeber), 2014: INTERKLIM - Der Klimawandel im böhmisch-sächsischen Grenzraum, Abschlussbericht.

2.2 Einordnung der Bergwetterwarte Fichtelberg in das Netz meteorologischer Messstellen

Falk BÖTTCHER und Eberhard FREYDANK

Vorbemerkungen

Mit dieser Publikation wird das Jubiläum der 100. Wiederkehr der Aufnahme durchgehender meteorologisch-klimatologischer Messungen auf der höchsten sächsischen Erhebung gewürdigt. Insofern ist es naheliegend, die Aufzeichnungen des Jahrhunderts zu sichten und ein Bild über die Einordnung der Messstelle auf dem Fichtelberg in die meteorologischen Messnetze im Wandel der Zeiten zu entwerfen. In gewisser Weise schließen die Beiträge in diesem Heft damit an die aus Anlass der 50. und 75. Wiederkehr dieses Ereignisses verfassten Festschriften an (siehe Literaturverzeichnis).

Meteorologische Messnetze entwickelten sich in der Folge des wissenschaftlich-technischen Fortschritts seit der Renaissance, unter anderem ausgelöst durch das Wirken von René Descartes, und dabei hauptsächlich der Erkenntnis folgend, dass Wetterphänomene nicht an Grenzen haltmachen im Ausgang des 18. Jahrhunderts in der Ausprägung des weltweiten Netzes der Societas Meteorologica Palatina (SMP; vergleiche KÖRBER 1987). Diesem Beispiel folgend und auf Ergebnissen dieser Messungen aufbauend kam es im 19. Jahrhundert verbreitet zu der Erkenntnis, dass vielerorts durchgeführte meteorologische Messungen für den Erkenntnisgewinn und die Ableitung meteorologisch basierter Kenntnisse für Wissenschaft und Praxis im sich entwickelnden Verkehrswesen aber auch insbesondere in Land- und Forstwirtschaft von weitreichender Bedeutung sind. Die um die Mitte des 19. Jahrhunderts beginnende Einrichtung staatlicher meteorologischer Beobachtungsnetze orientierte sich am SMP-Beispiel, so auch in Sachsen, wo man nach etlichen Vorarbeiten, die bei FREYDANK (2014) studiert werden können, ab 1864 von einem meteorologischen Messnetz sprechen kann.

Der Gedanke hinter der Einrichtung von Bergwetterwarten war der Wunsch, mittels dieser die freie Atmosphäre zu erforschen und dies war auch schon im Rahmen des SMP-Netzes beispielsweise durch die Einrichtung der Messstellen auf dem Hohenpeißenberg und am St. Gotthard in die Tat umgesetzt worden. Nach der Überwindung der Probleme einer nachrichtentechnischen Anbindung an eine Zentrale zur zeitnahen Nachrichtenübermittlung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts war dann auch der Weg für weitere dieser Stationen frei und eine der letzten Einrichtungen von Bergwetterwarten unter dem genannten Aspekt war mit der Inbetriebnahme der Fichtelbergwetterwarte vorgenommen worden. Es wurde recht schnell erkannt, dass die Werte der Bergwetterwarten keine störungsfreien Bedingungen der freien Atmosphäre liefern, sondern stark durch die orographischen Verhältnisse beeinflusst sind. Diese Erkenntnis führte im 20. Jahrhundert zur Etablierung der Gebirgsmeteorologie als Spezialgebiet (KÖRBER 1987).

In der Regel war den Bergstationen eine korrespondierende Flachlandstation zugeordnet. Im Falle des Fichtelberges ist dies in Wahnsdorf bei Dresden geschehen. Dort wurden die Messungen am 1. August 1916 aufgenommen – mitten im Ersten Weltkrieg, was die Bedeutung der Meteorologie zu diesem Zeitpunkt unterstreicht – und bis Juni 1974 als 3- beziehungsweise 4-terminige Klimamessungen fortgeführt, bevor diese Messungen zugunsten des nahegelegenen Dresdner Flughafens Klotzsche eingestellt wurden. Gleichwohl kann auch der meteorologische Standort Wahnsdorf (heute: Radebeul-Wahnsdorf) inzwischen auf eine einhundertjährige Historie zurückblicken und nach der Verwendung des Standortes als „Observatorium Wahnsdorf“ und „Sächsische Landeswetterwarte“ erfolgte mit Einrichtung des Meteorologischen und Hydrologischen Dienstes der DDR 1952 die Umbenennung in „Meteorologisches Observatorium Wahnsdorf“ und der Tätigkeitsbereich verlagerte sich in dem bis zur deutschen Einheit unter dem Dach des Meteorologischen Dienstes der DDR betriebenen Observatoriums endgültig auf das Gebiet der Luftchemie (KOHL 1966, DIETZE 1991). Nach der Wiedervereinigung Deutschlands war der Standort Wahnsdorf eine der Keimzellen des neu eingerichteten Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie und beherbergt heute die Geschäftsleitung der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft. Über die Ergebnisse und Arbeiten am Standort Radebeul-Wahnsdorf berichten im letzten Beitrag dieses Bandes Dr. Andrea Hausmann et al.

Die Einrichtung der Fichtelbergwetterwarte

Professor Paul Schreiber, ab 1883 als Direktor des Meteorologischen Instituts berufen, baute das von Professor Hermann Krutzsch (Forstliche Hochschule Tharandt) ab 1863/64 betriebene sächsische Stationsnetz aus und erkannte die Wichtigkeit von Bergwetterbeobachtungen den Beispielen aus den Nachbarregionen (Brocken 1895 und Sněžka 1900) folgend. Noch vor dem Ersten Weltkrieg wurde im Frühjahr 1914 der Betrag von 150 000 Mark für den Bau der Wetterwarten Fichtelberg und Wahnsdorf bewilligt und nach der Überwindung kriegsbedingter Hindernisse begann der Bau 1915. Auf dem Fichtelberg wurden die Arbeiten bis zum Jahresende 1915 soweit abgeschlossen, dass die Beobachtungen mit einem Beobachter am 1. Januar 1916 als Station erster Ordnung aufgenommen wurden. So sind die von 1890 bis 1902 durch die Wirte des Unterkunftshauses des Erzgebirgsvereins noch kontinuierlich und bis 1910 unregelmäßig durchgeführten meteorologischen Beobachtungen verstetigt worden und laufen bis heute in dem baulich nur in den 60er Jahren erweiterten, sonst aber im Wesentlichen unveränderten Stationsgebäude. Schreiber sorgte auch für die Ideen und die Fertigung der Messgeräte, mit denen die Station ausgestattet wurde (SCHMIDT 1991, SCHMIDT und FREYDANK 1991). Über die an beiden Observatorien eingesetzte Messtechnik gibt die Monographie von FREYDANK 2014 einen umfassenden Überblick. Bemerkenswert ist, dass die Messung des in den einhundert Messjahren methodisch nahezu einheitlich mit Geräten einer Auffangfläche von 500 cm² in 2 m über Grund erfolgte, was aber nicht zu der Annahme berechtigt, es läge eine homogene Reihe vor.

Die Jahre bis etwa zum Ende des Zweiten Weltkrieges

Im engeren Sinne war durch die personelle Besetzung der Fichtelbergwetterwarte mit nur einer Person der Status der Station als Klimastation zu bezeichnen. Es wurden kontinuierliche Beobachtungen um 07, 14 und 21 Uhr Mittlerer Ortszeit (MOZ) durchgeführt. Der Fichtelberg und Wahnsdorf sind die beiden einzigen sächsischen Stationen, die auch über das Ende der beiden Weltkriege hin lückenlose Daten aufweisen. Ab 1935 kamen neben den Klimaaufzeichnungen synoptische Meldungen hinzu. Dieses Beobachtungs- und Meldeprogramm entsprechend der seinerzeit gültigen Vorschriften wurde bis zum 31.05.1946 betrieben (SCHMIDT U. FREYDANK 1991).

Nach dem Zweiten Weltkrieg bis zur Wiedervereinigung Deutschlands

Auf der Basis des Befehls 602 der Sowjetischen Militäradministration in Deutschland wurde das sächsische meteorologische Netz wieder aufgebaut und ab dem 01.04.1946 griffen die damit verbundenen Veränderungen auch auf dem Fichtelberg. Neben der nunmehr erfolgten Personalaufstockung auf drei Mitarbeiter wurde Anfang April 1946 der offizielle synoptische Meldedienst mit einem dreistündigen Meldeintervall aufgenommen. Ab 1967 stellte man um auf eine Meldefolge von 1,5 Stunden bevor ab 1971 der Ein-Stunden-Takt eingeführt wurde und dies dann bis zur Wiedervereinigung so blieb. Bei gefahrdrohenden Wettererscheinungen wurden auch zwischendurch Meldungen abgesetzt. Die Station war eine Meteorologische Hauptstation, was nach und nach einen weiteren Personalzuwachs bedeutete. Bis 1949 wurden die Aufgaben von drei Beobachtern wahrgenommen, ab 1950 bis 1955 waren es vier Kollegen. Von 1956 bis 1976 versahen fünf Mitarbeiter den Dienst und im Laufe des Jahres 1976 kam die sechste Planstelle hinzu. Dieser Planstellenbestand gilt bis heute.

Die Beobachtung zu den Klimaterminen um 07, 14 und 21 Uhr MOZ wurde bis 1966 fortgesetzt. Daneben wurden ab 01.06.1946 Klimabeobachtungen zu den 01, 07, 13 und 21 Uhr MOZ, später MEZ durchgeführt und damit mit den synoptischen Terminen synchronisiert. In den 80er Jahren ging man von den vierterminigen Klimabeobachtungen zur achtterminigen Mittelbildung über. Dazu wurden die Werte der synoptischen Haupt- und Nebentermine um 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 und 21 Uhr UTC verwendet.

Neben den umfangreichen Standardaufgaben wurden auf dem Fichtelberg vielfältige Sondermessungen durchgeführt. Dazu zählen Strahlungsmessungen, Ozon- und andere luftchemische Messungen sowie Messungen von Nebelfrostablagerungen. Daneben fanden zahlreiche Tests von Messgeräten wie beispielsweise von Schneesonden und Nebelfrostablagerungsmessgeräten statt.

Neben der konventionellen Messtechnik kam es im Laufe der Jahre zum Einsatz unterschiedlichster automatischer Messfühler. Dabei zeigte sich unter anderem, dass die meteorologischen Besonderheiten auf dem Gebirgskamm eine große Herausforderung nicht nur an die hier tätigen Menschen sondern auch an die eingesetzte Technik stellen, deren Funktionsfähigkeit oftmals nur durch unermüdlichen Einsatz des Menschen erhalten bleibt. Es sei in dem Zusammenhang auf den Beitrag des Leiters der Bergwetterwarte im Rahmen der Annaberger Klimatage verwiesen, der weiter vorn in diesem Band nachzulesen ist.

Die Zeit von der Wiedervereinigung bis heute

Mit der deutschen Wiedervereinigung ging der Dienstbetrieb mit der Vereinigung von Deutschem Wetterdienst (DWD) und Meteorologischem Dienst der DDR zunächst beinahe unverändert weiter. Anfang der 90er Jahre gab es etliche Anpassungen an die Vorschriften des DWD. Die luftchemischen Messungen, die nicht in der Zuständigkeit des DWD lagen, wurden aber im Auftrag des Freistaates Sachsen an der Fichtelbergwetterwarte fortgesetzt und sind heute weitgehend automatisiert.

Die Bergwetterwarte Fichtelberg wird als Wetterstation der Kategorie I geführt und dabei messtechnisch regelmäßig auf den neuesten Stand der Technik gebracht, sofern diese Messtechnik für den Einsatz unter den obwaltenden klimatischen Bedingungen geeignet ist. In der Zwischenzeit war die Station auch in den Status einer Klimareferenzstation eingeordnet. Hierbei wurden die Messungen der meteorologischen Elemente einerseits automatisch und andererseits mit den konventionellen Geräten vorgenommen und verglichen. Ergebnisse dieser Vergleiche finden sich bei AUGTER (2013). Der Fichtelberg war dabei die höchstgelegene Klimareferenzstation in Deutschland.

Bis zum heutigen Tag finden auf dem Fichtelberg unterschiedlich angelegte Sondermessungen statt. Ergebnisse eines Beispiels solcher Messungen können dem Beitrag von Stephanie Schüttauf entnommen werden.

Die Zukunft

Im Januar 2015 veröffentlichte der Deutsche Wetterdienst die Entscheidung, das gesamte Beobachtungsnetz bis 2021 vollständig zu automatisieren. Dies soll so erfolgen, dass es keine qualitativen Probleme mit den Messwerten gibt und die Zuverlässigkeit der Resultate des Messnetzes sowohl für den Wettervorhersage- als auch den Klimabereich mit all seinen nachgelagerten Nutzungen unter Einbeziehung neuer Werkzeuge aus dem Fernerkundungsbereich gewährleistet wird. Für die Messtechnik, die dann an einer Station der klimatischen Exposition des Fichtelberges eingesetzt wird, ist das eine aus heutiger Sicht enorme Herausforderung in den wenigen Jahren, die bis zur Umsetzung der genannten Entscheidung verbleiben. Wie bei jeder Einführung neuer Technik, wird man Inkonsistenzen in den Datenreihen in Kauf nehmen müssen. Vor dem Hintergrund der Bedeutung langer und qualitativ hochwertiger Klimamessreihen ist den diesbezüglichen Entscheidungsträgern Augenmaß und Stehvermögen zu wünschen um eine vollständige Automatisierung wirklich erst dann zu realisieren, wenn nachgewiesen ist, dass es dadurch und in Kopplung mit klimatologischen Methoden bei der Nutzung von Fernerkundungsdaten keinen Qualitätsverlust sondern sogar eine Qualitätssteigerung gibt.

Literatur

- AUGTER, G., 2013: Vergleich der Referenzmessungen des Deutschen Wetterdienstes mit automatisch gewonnenen Messwerten, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Band 238, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- DIETZE, G., 1991: 75 Jahre Meteorologisches Observatorium Wahnsdorf – Tradition und Zukunft eines sächsischen Instituts, Informationsschrift des Meteorologischen Observatoriums.
- FREYDANK, E., 2014: 150 Jahre staatliche Wetter- und Klimabeobachtungen in Sachsen, Tharandter Klimaprotokolle Band 21, Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur für Meteorologie.
- KOHL, G., 1966: Fünfzig Jahre Meteorologisches Observatorium Wahnsdorf und Meteorologische Station Fichtelberg, Festschrift des Meteorologischen Dienstes der DDR.

- KÖRBER, H.-G., 1987: Vom Wetteraberglauben zur Wetterforschung – Aus Geschichte und Kulturgeschichte der Meteorologie, Edition Leipzig.
- METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR (Herausgeber), 1973: Klima und Witterung im Erzgebirge, Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik Nr. 104 (Band XIII), Akademie-Verlag Berlin.
- SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (Herausgeber), 2014: INTERKLIM - Der Klimawandel im böhmisch-sächsischen Grenzraum, Abschlussbericht.
- SCHMIDT, H., 1991: 75 Jahre Wetterstation Fichtelberg, Informationsschrift des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt Dresden.
- SCHMIDT, H., FREYDANK, E., 1991: 75 Jahre Bergstation Fichtelberg mit Basisstation Wahnsdorf, Zeitschrift für Meteorologie, Bd. 41, Heft 4, 306–308.
- KOHL, G., 1966: Fünfzig Jahre Meteorologisches Observatorium Wahnsdorf und Meteorologische Station Fichtelberg, Festschrift des Meteorologischen Dienstes der DDR.
- HERRMANN, G., 1991: Von der Wetterwarte zum Landesamt für Umwelt und Geologie. Landesamt für Umwelt und Geologie.
- RAT DER STADT OBERWIESENTHAL, SCHMIDT, H., 1991: 75 Jahre Wetterwarte Fichtelberg, u. a. mit Beiträgen von Schmidt, H. (75 Jahre Bergstation Fichtelberg mit Basisstation Wahnsdorf), Aus dem Gästebuch, Handschack (Das Klima von Wahnsdorf und vom Fichtelberg – Unterschiede und Gemeinsamkeiten), Gäbler, H. (Besondere Wettererscheinungen auf dem Fichtelberg), Spanowsky, S. (Der Pflanzgarten auf dem Fichtelberg), Liste der Mitarbeiter und Stationsleiter seit 1915 bis 1991.

2.3 Die Lufttemperatur auf dem Fichtelberg (1916–2015)

Andreas HOY

Klimastatus und Rekordwerte

Die Fichtel- und Keilbergregion umfasst die mit >1000 m höchsten Erhebungen des Erzgebirges und weist entsprechend die niedrigsten Mitteltemperaturen der weiteren Umgebung auf. Das säkulare Temperaturmittel (1916–2015) der meteorologischen Station Fichtelberg beträgt 3,1°C, ca. 6 K weniger als in Dresden.

Informationen zu monatlichen Mittel- und Extremwerten verschiedener Kenngrößen sind in Tabelle 1 für den Fichtelberg dargestellt. Der Jahresgang der Temperatur ist mit einer Spannweite von 16,6 K zwischen Januar und Juli gegenüber dem Flachland etwas abgeschwächt. Die Jahr-zu-Jahr-Variabilität der Monatsmitteltemperaturen ist, wie in Mitteleuropa üblich, im Winter am stärksten und im Sommer am schwächsten ausgeprägt. Die im Durchschnitt kältesten Monate sind Januar und Februar, während Juli und August am wärmsten sind. Gegenüber tiefer gelegenen Gefilden sind die jährlich kältesten und wärmsten Perioden innerhalb des Jahres etwas nach hinten verschoben: im Flachland macht sich der erhöhte bzw. zurückgehende Sonnenstand eher bemerkbar als auf dem Fichtelberg, was mit seiner Lage oberhalb der (nächtlichen) Temperaturinversion tieferer Lagen zusammenhängt.

Im Durchschnitt 18 Tage mit Temperaturen über 20°C treten üblicherweise ab Mai oder Juni bis in den August oder September auf – vereinzelt auch noch etwas eher bzw. später (Rekordwerte: 17.04.1934 und 19.10.2012). Sommertage mit Maxima über 25°C sind auf dem Fichtelberg sehr selten anzutreffen (im Mittel nur knapp zwei pro Jahr) – in manchen Jahren bleiben sie ganz aus. Frühester registrierter Sommertag war der 14. Mai 1969, während am 17. September 1975 der späteste Sommertag aufgezeichnet wurde. Drei heiße Tage mit Temperaturen über 30°C wurden in den vergangenen 100 Jahren auf dem Fichtelberg registriert: am 7. Juli 1957 (30,6°C), am 27. Juli 1983 (30,8°C) und am 20. August 2012 (30,6°C). Das höchste Tagesmittel und ebenso Tagesminimum traten am 7. August 2015 auf. Zusammen mit dem 9. August 1992 sind das die einzigen zwei Tropennächte, die bisher auf dem Fichtelberg registriert wurden.

Frost tritt auf dem Fichtelberg von November bis April an den meisten Tagen auf, im Mittel an 171 Tagen im Jahr. Der erste Frosttag wird jährlich im September oder Oktober beobachtet (Rekord: 4.9.2007), der späteste im Mai oder Juni (Rekord: 4.7.1962). Von Dezember bis Februar herrscht häufig ganztägig Frost (Mittelwert: 96 Tage/Jahr). Der erste Eistag tritt im Oktober oder November auf (Rekord: 23.9.1934), der letzte wird im April oder Mai gemessen (Rekord: 23.5.2004). Strenge Nachtfröste ab -10°C werden in jedem Winter beobachtet (Mittelwert: 28 Tage), üblicherweise von Dezember bis März (zeitigster: 24.10.1946; spätestester: 25.04.1972). Tage mit strengem Frost unter -10°C auch am Tage sind hingegen selten (Mittelwert von 5 Tagen), kommen jedoch dennoch in fast allen Jahren vor. Der zeitigste Vertreter wurde am 11.11.1921 beobachtet, der späteste am 5.4.1929 (gefolgt vom 24.3.2013). Die kältesten gemessenen Temperaturen traten am 1. (Minimales Tagesmaximum: -21,7°C) und 9. Februar 1956 auf (Minimales Tagesmittel: -27,1°C; Tagesminimum: -30,4°C). Die -30-Grad-Marke wurde auf dem Fichtelberg nur ein einziges Mal (am 9.2.1956) unterschritten.

Der innerjährliche tägliche Verlauf von Mittel- und Extremwerten der Lufttemperatur ist in Abbildung 1 für Mess- und Anomaliewerte dargestellt. Die im Durchschnitt höchsten Temperaturen treten demzufolge am Monatswechsel von Juli zu August auf (maximales säkulares Tagesmittel: 12,8°C am 1. und 2. August), die tiefsten Temperaturen in einem langen Zeitraum von Mitte Dezember bis Mitte Februar (minimales säkulares Tagesmittel: -5,8 °C am 14. und 16. Februar). Regelmäßig wiederkehrende Singularitäten im Witterungsverlauf werden nur bei genauerer Betrachtung sichtbar, wie zum Beispiel der Frühwinter vom 16. bis 20. Dezember (Mittel 4,3°C), das nachfolgende, von westlichen Winden geprägte Weihnachtstauwetter vom 22.-25. Dezember (Mittel 3,7°C) und der sich anschließende erneute Kälteabschnitt ab dem 2. Weihnachtsfeiertag mit Mittelwerten um -4,5°C. Recht deutlich sichtbar ist außerdem die Wärmeperiode Anfang Juni (Mittel 7.-10.6. 9,9°C), die danach durch die sogenannte Schafskälte unterbrochen wird (Mittel 11.-17.6. 9,2°C). Andere bekannte Singularitäten wie Eisheilige und Altweibersommer sind hingegen kaum erkennbar.

Tabelle 1: Säkulare Charakterisierung (1916-2015) der monatlichen und jährlichen Temperatureigenschaften; Wärmesumme: Summe der Temperaturmittel >10°C, Kältesumme: Summe der Temperaturmittel < 0°C.

		Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Jahr
Mittelwert	°C	-4,9	-4,8	-2,1	1,8	6,7	9,6	11,7	11,5	8,3	3,9	-0,7	-3,7	3,1
Standardabw.	K	2,6	2,8	2,3	2,1	1,8	1,6	1,7	1,5	1,8	2,0	1,8	2,1	0,9
Quartilsabstand	K	3,2	3,7	3,6	2,6	2,8	2,3	2,1	1,9	2,0	2,5	2,2	2,9	1,2
Maximum	°C	13,1	12,8	16,2	22,4	25,3	27,0	30,8	30,6	26,0	21,3	19,0	14,6	30,8
Jahr		1955	1961	1968	1968	1969	1917	1983	2012	1947	1966	2015	1953	1983
Wärmster	°C	-0,1	0,7	2,6	7,2	10,3	13,8	16,7	16,3	12,5	8,3	4,2	1,8	5,3
Jahr		1930	1990	2014	2009	1931	2003	2006	2015	1947	2001	2011	2015	2014
Wärmesumme	K			0	2	19	47	79	73	28	5	0	0	254
Max ≥ 20°C	Tage				0,1	1,0	3,5	6,3	5,3	1,5	0,0			17,6
Sommertage	Tage					0,0	0,2	0,8	0,7	0,1				1,8
Minimum	°C	-28,2	-30,4	-20,5	-14,5	-9,3	-4,1	-0,1	0,0	-4,2	-16,3	-15,9	-23,4	-30,4
Jahr		1979	1956	1971	1929	1935	1962	1962	1921	1931	1920	1921	1938	1956
Kältester	°C	-12,3	-14,2	-7,3	-2,4	2,0	4,4	8,4	8,1	3,8	-0,9	-4,8	-8,4	1,2
Jahr		1942	1956	1987	1917	1941	1923	1919	1940	1931	1974	1985	1969	dreimal
Kältesumme	K	161	144	97	32	3	0			0	14	63	129	645
Frosttage	Tage	29,5	26,6	25,9	18,4	6,2	0,9	0,0		1,4	11,6	22,9	28,2	171,4
Min ≤ -10°C	Tage	8,7	7,8	4,1	0,3						0,1	1,3	5,6	27,9
Eistage	Tage	21,6	19,1	14,6	5,8	0,6				0,0	3,2	11,8	19,4	96,1
Max ≤ -10°C	Tage	2,2	1,8	0,3	0,0							0,1	1,1	5,4

Die – nach Herausfilterung des Jahrganges – extremsten positiven Anomalien der minimalen und maximalen täglichen Temperatur zeigen ganzjährig recht ähnliche Werte, während die negativen Anomalien deutlichen Schwankungen im Jahresverlauf unterliegen (Abbildung 1). Die tiefsten Anomalien der Temperaturmaxima wurden von ca. Mitte Dezember bis Mitte Februar mit Werten von unter -15 K beobachtet, während ganzjährig Werte von unter 10 K auftraten. Die deutlichsten Anomalien der Temperaturminima mit Werten von unter -20 K traten ausschließlich von Anfang Januar bis Mitte Februar in Verbindung mit extremen Kaltluftausbrüchen und großflächig vorhandener Schneebedeckung auf. Von Anfang Juni bis

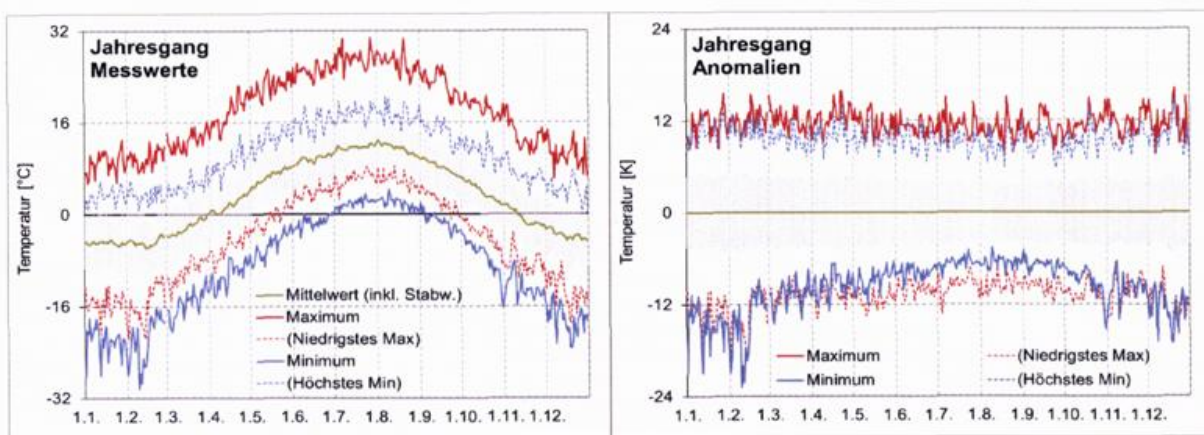


Abbildung 1: Innerjährlicher täglicher Verlauf der Lufttemperatur (1916–2015). Links: Messwerte, rechts: Anomalien von den jeweiligen säkularen Tagesmittelwerten.

Mitte Oktober wurden dagegen keinerlei Anomalien unter -10 K beobachtet. Ein beachtenswerter Kälteeinbruch führte am 31. Oktober 1920 – ohne Schneebedeckung auf dem Fichtelberg und generell Mitteleuropas – zur tiefsten Anomalie ($-15,3\text{ K}$) außerhalb des Winterzeitraums (Dezember bis Februar) sowie der Kuriosität, dass das absolute säkulare Temperaturminimum des Oktobers ($-16,3^\circ\text{C}$, Tabelle 1) unter dem des Novembers ($-15,9^\circ\text{C}$) liegt.

Klimaänderungen

Seit dem 20. Jahrhundert werden markante Veränderungen des globalen Klimasystems sowie damit in Verbindung stehende regionalklimatische Anomalien beobachtet, die durch natürliche Klimaschwankungen allein nicht mehr erklärbar sind. Diese Abweichungen stehen mit einem anthropogen bedingten Anstieg der troposphärischen Treibhausgaskonzentrationen in Zusammenhang und werden sich in Zukunft weiter verstärken (IPCC 2013). Regional-klimatische Veränderungsmuster werden dabei von der Variabilität atmosphärischer Zirkulationsmuster bestimmt, die für den Großteil der natürlichen Klimaschwankungen in Europa verantwortlich sind (BARNSTON und LIVEZEY 1987, HURRELL 1995, HOY 2013).

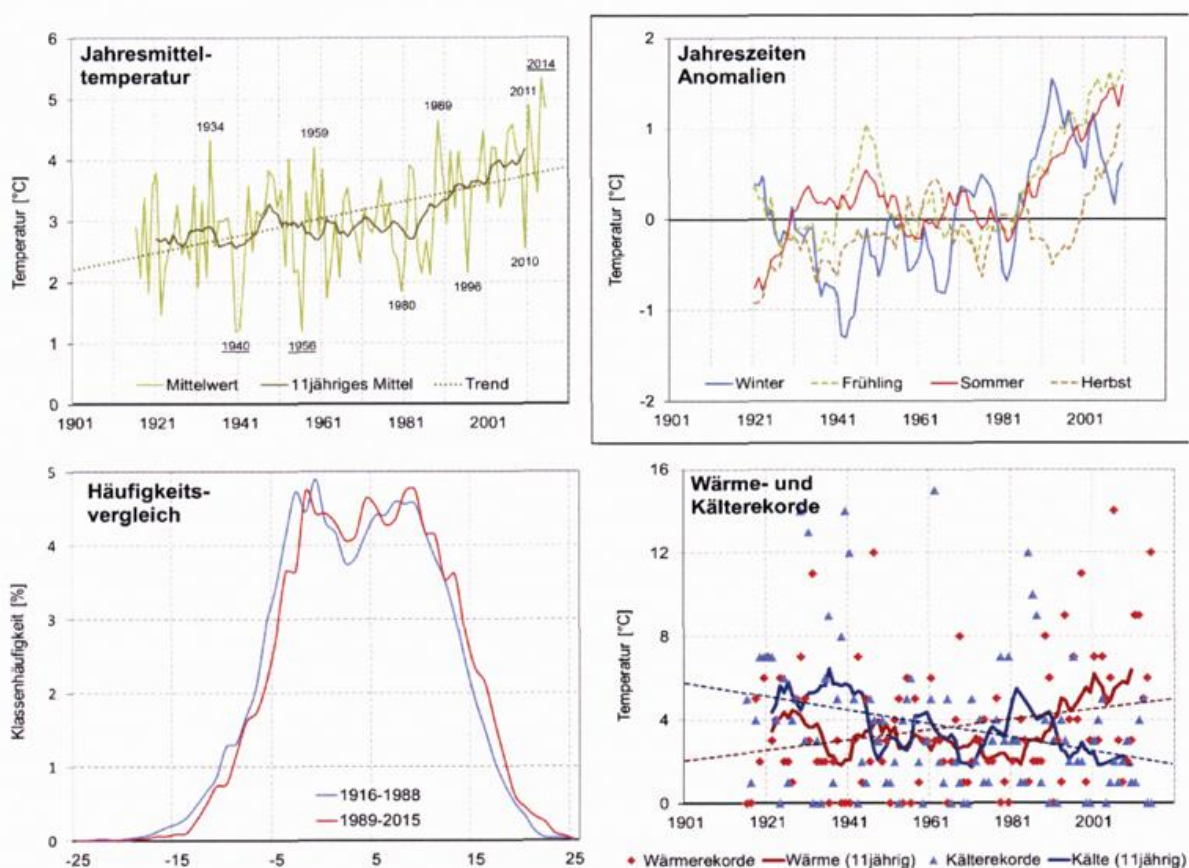


Abbildung 2: a) Jahresmitteltemperatur, b) jahreszeitliche Temperaturveränderungen (Basis: 1961–1990; 11jährig gleitende Mittelwerte), c) Häufigkeitsvergleich der Tagesmitteltemperaturen im Vergleich der Perioden 1916–1988 und 1989–2015 (Klassengröße: 1 K) sowie d) jährliche Anzahl der Wärme- und Kälterekorde für die Tagesmitteltemperatur.

Auf dem Fichtelberg wird im Zeitraum 1916–2015 ein ausgeprägter Erwärmungstrend erkennbar (Abbildung 2, linearer Trend: $1,4\text{ K}/100\text{ Jahre}$), der bis in die 1980er Jahre jedoch kaum sichtbar war. Die Jahre 1940, 1941 und 1956 waren mit einem jährlichen Mittelwert von $1,2^\circ\text{C}$ am kältesten. Für einige zwölfmonatige Zeiträume zwischen Oktober 1939 und Juli 1942 wurden sogar noch tiefere Mitteltemperaturen beobachtet. Seit dem Jahr 1989 ist jedoch ein deutlich höheres Temperaturniveau zu beobachten (Mittelwert: $3,9^\circ\text{C}$; davor $2,9^\circ\text{C}$), vor dessen Hintergrund auch die in den vergangenen Jahren aufgetretenen Wärmerekorde gesehen werden müssen (Tabelle 1).

Acht von zwölf monatlichen Wärmerekorden traten seit der Jahrtausendwende auf. Der letzte Monat des säkularen Betrachtungszeitraums 1916–2015 – der Dezember 2015 – erreichte dabei mit einer Abweichung von 5,5 K zum Normalwert und 1,4 K zum bisherigen Rekordwert aus dem Jahre 2006 den bedeutendsten aller monatlichen Wärmerekorde. Auch die wärmsten Jahre traten alle zum Ende des Beobachtungszeitraumes auf: 2014 lag mit 5,3°C an der Spitze, gefolgt von 2015 (5,1°C) und 2011 (4,9°C). Der Zeitraum von Juli 2006 bis Juni 2007 war mit einem Mittelwert von 6,0°C noch deutlich wärmer. Die beobachteten Veränderungen ordnen sich in die Erwärmungsmuster umliegender Gebiete und generell Mitteleuropas ein, wobei zeitliche und charakterliche Veränderungen von Wetterlagen auf den Bergen etwas andere klimatische Folgen als im Flachland haben (siehe späteres Kapitel).

Die beschriebene Erwärmung ist in allen Jahreszeiten evident und setzte in Winter, Frühling und Sommer bereits in den 1980er Jahren ein, nur im Herbst ist eine deutliche Erwärmung erst seit der Jahrtausendwende sichtbar (Abbildung 2). Der beobachtete Temperaturanstieg hält bis in die Gegenwart an, nur die Wintermonate – generell durch eine hohe dekadische Variabilität gekennzeichnet – waren zuletzt wieder etwas kühler. Die größte säkulare Erwärmung wurde im Sommer (linearer Trend: 1,7 K/100 Jahre) beobachtet, die anderen Jahreszeiten wiesen etwas geringere Erwärmungsraten (1,3 K) auf. Insbesondere August (2,1 K), April (2,0 K), Oktober und November (1,9 K) erwärmten sich markant, während nur der September klimatisch nahezu unverändert blieb (0,1 K). Die vergangenen 50 Jahre (1966–2015) waren durch eine leichte Abkühlung im September und Oktober gekennzeichnet, während April, Mai und Juli die größten Erwärmungsraten aufwiesen.

Die markante Verschiebung des Temperaturniveaus Richtung wärmerer Verhältnisse wird auch durch den Vergleich der Klassenhäufigkeiten der Tagesmitteltemperaturen (Klassengröße: 1 K) für die Perioden 1916–1988 und 1989–2015 deutlich (Abbildung 2.3.2c). Kalte Temperaturklassen nahmen deutlich ab, während die Häufigkeit warmer Klassen in gleichem Maße anstieg. Die Verteilung der jeweiligen Wärme- und Kälterekorde der 365 Kalendertage bestätigt diese Erkenntnis: seit den 1990er Jahren traten nur noch an wenigen Tagen säkulare Kälterekorde auf, während die warmen Extreme doppelt so häufig wie statistisch erwartbar vorkamen (Abbildung 2).

Sommerwärme

Der wärmste Sommer (Juni – August) war, wie in vielen west- und mitteleuropäischen Regionen, der von 2003 (13,9°C), gefolgt von 2015 (13,6°C) und 1992 (13,2°C; Abbildung 3). Die höchsten monatlichen Mitteltemperaturen wurden allerdings im Juli 2006 beobachtet (16,7°C), gefolgt von Juli 1994 und August 2015 (16,3°C). Dekadisch traten die im Mittel höchsten Temperaturmaxima in der ersten Julidekade 1957 (24,1°C) sowie der zweiten Septemberdekade (!) 1947 (24,0°C) auf. Die letztgenannte Dekade wies damit eine Abweichung von 12,1 K zum säkularen Mittelwert für Mitte September auf – die mit Abstand größte dekadische Anomalie (und die einzige ≥ 10 K), die auf dem Fichtelberg von Januar 1916 an beobachtet wurde.

Zur Charakterisierung der Wärmeeigenschaften eines Jahres wurde die Wärmesumme aller Tagesmitteltemperaturen über 10°C berechnet (Abbildung 3). Sie liegt im Mittel bei 254 K pro Jahr. Sie war in den Jahren 2003 (468 K) sowie 1947 (447 K) am höchsten. Das Jahr 1947 – im Ranking der wärmsten Sommer nur auf Rang 10 positioniert – profitierte hier von deutlich positiven Anomalien während des gesamten Sommerhalbjahres (April – September; hier Rang 1).

Die wärmsten Tages- und Nachttemperaturen traten nur partiell in als besonders warm charakterisierten Sommern auf (Abbildung 3). Die drei höchsten täglichen Temperaturmaxima wurden bereits in einem früheren Kapitel beschrieben – interessanterweise liegen sie um $> 1,5$ K über allen weiteren beobachteten Temperaturmaxima. Die Rekordliste der höchsten Tagesminima (siehe früheres Kapitel) liegt nicht so weit auseinander, allerdings ist hier in Übereinstimmung mit meteorologischen Stationen in weiten Teilen Europas eine deutliche Häufung hoher Werte seit den 1980er Jahren zu beobachten (HOY et al. 2016), die für die Maximaltemperaturen nicht in diesem Maße deutlich wird.

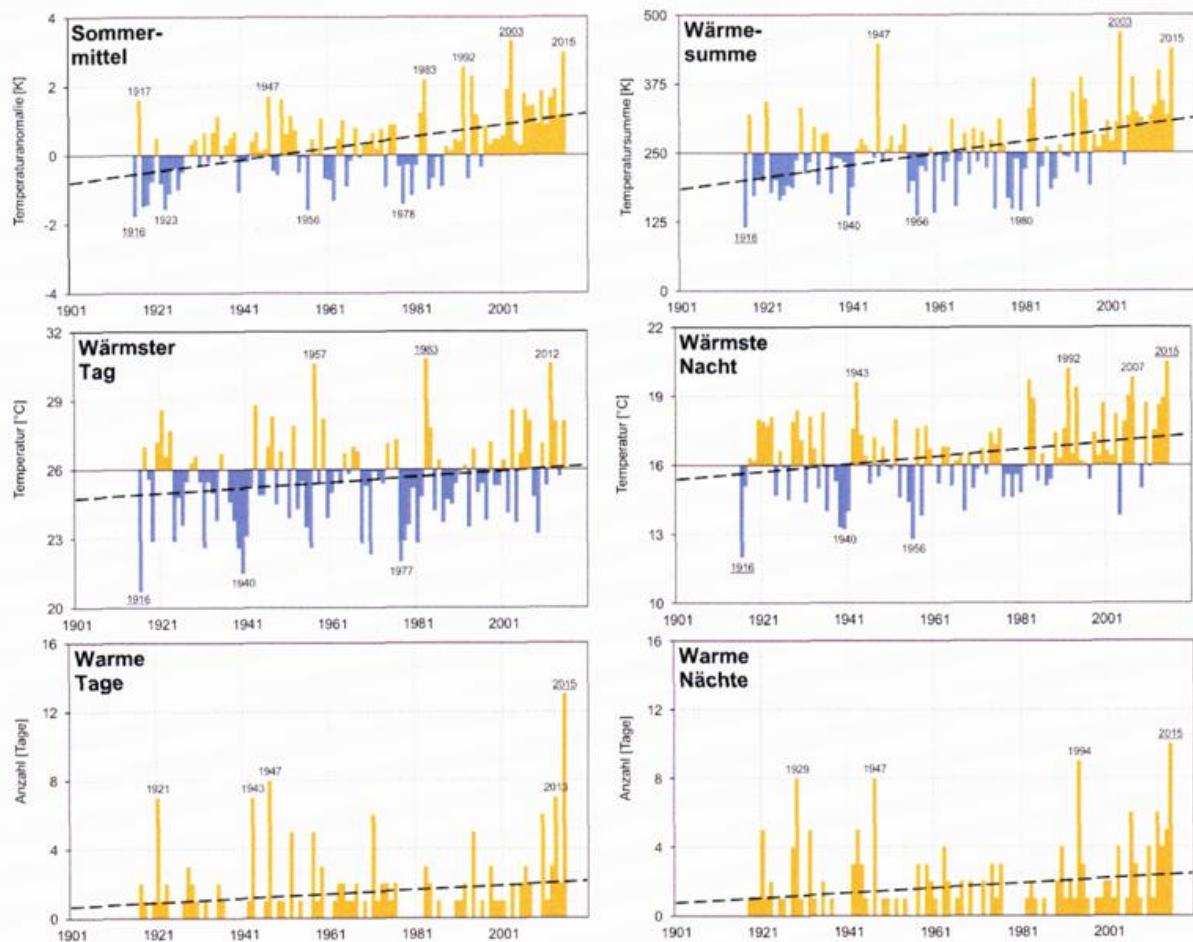


Abbildung 3: Panel aus 6 Temperaturkenntnissen zur Charakterisierung der Sommerwärme für 1916–2015; a) Temperaturmittelwert der Monate Juni, Juli und August; b) jährliche Wärmesumme der Tagesmitteltemperaturen > 10°C; c) höchstes jährliches Temperaturmaximum und d) Temperaturminimum; e) Tage mit Temperaturmaximum \geq 99. Perzentil der Monate Juni, Juli und August des Zeitraums 1961–1990 sowie f) gleichem Index für das Tagesminimum.

Sogenannte warme Tage und Nächte traten verstärkt am Anfang und Ende des Beobachtungszeitraums auf (Abbildung 3). Dabei sticht der letzte Sommer des Beobachtungszeitraums als besonders extrem heraus, in dem 13 warme Tage ermittelt wurden – der vorherige Rekordwert lag bei 8 aus dem Jahre 1947. Überschreitungen des Schwellenwertes von 25,3°C traten 2015 in vier verschiedenen Zeiträumen von Anfang Juli bis Ende August auf. Die 2015 beobachtete außergewöhnliche Häufigkeit extrem warmer Temperaturen auf dem Fichtelberg stimmt mit den Beobachtungen im restlichen Mitteleuropa überein (HOY et al. 2016).

Winterkälte

Der kälteste Winter war der von 1962/63 (-9,2°C) – auch im restlichen Mitteleuropa der kälteste des 20. Jahrhunderts. In dichtem Abstand folgen weitere Extremwinter, die alle in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts – insbesondere zwischen 1940 und 1947 – zu finden sind (Abbildung 4). Diese Jahre waren durch eine besonders hohe Kontinentalität gekennzeichnet, die zu sehr kalten Wintern und gleichzeitig sehr warmen Sommers führte (KOŽUCHOWSKI et al. 1994, THOMPSON 1995). Der mit Abstand kälteste Monat war der europaweit extrem kalte Februar 1956 (-14,2°C), die kälteste Dekade die erste Februardekade 1956 (-20,5°C). Der Februar 1956 war der einzige Monat, in dem alle nächtlichen Minima unter -10°C lagen. Auf den Plätzen folgen die Monate Januar 1942 (12,3°C) und Februar 1986 (-11,9°C); seit 1916 waren insgesamt 9 Monate kälter als -10°C. Deutlich zu kalte Winter traten nach 1962/63 nicht mehr auf. Insbesondere der Zeitraum von 1988 bis 2002 war durch sehr milde Winter und schlechte Wintersportbedingungen geprägt.

Die Kältesumme ist ein Maß für die Winterstrenge und liegt auf dem Fichtelberg im säkularen Mittel bei 645 K je Wintersaison (Werte von Juli bis Juni). Die Rangfolge der extremsten Jahre verschiebt sich hierbei im Vergleich zum winterlichen Mittelwert, zum einen aufgrund der verlängerten Betrachtungsperiode, zum anderen weil milde Perioden in ansonsten kalten Wintern nicht mehr berücksichtigt werden. Die Kriegswinter 1939/40 (1102 K) und 1941/42 (1098 K) führen nun fast gleichauf das Feld an, gefolgt von vier weiteren Wintern mit Kältesummen über 1000 K (Abbildung 4). Die kältesten Tages- und Nachttemperaturen traten im Februar 1956 auf (siehe erstes Kapitel), gefolgt vom ebenfalls sehr kalten Februar 1929 (Abbildung 4). Temperaturen unter -25°C sind Ausnahmereischeinungen auf dem Fichtelberg und kamen nur in sechs Jahren vor, mit Abstand am häufigsten in den genannten zwei Februaren (fünffmal). Tagesmaxima mit Temperaturen unter -20°C sind noch seltener und wurden insgesamt nur an sechs Tagen beobachtet (12.-14.2.1929, 13.2.1940, 1.2.1956 und 12.1.1987).

Sogenannte kalte Tage und Nächte treten häufig im Zusammenhang mit ausgeprägten Kälteepisoden auf. Bei den Minima stechen die bekannten kalten Winter hervor, mit 1939/40 an der Spitze. Im Bereich der Maxima hat die zeitliche Lage der Kältewellen durch den jahreszeitlich ansteigenden Sonnenstand einen stärkeren Einfluss. Hier liegen die Winter 1939/40 und 1984/85 gleichauf. Spektakulär ist das Auftauchen eines nach 1987 aufgetretenen Winters in den Top 10 von kalten Nächten und Tagen. Ein massiver Kälteeinbruch Ende Januar 2012 führte hier, nach einem zuvor milden Winter, zu dem niedrigsten säkularen Dekadenmittel des Temperaturmaximums (1. Februardekade: $-13,7^{\circ}\text{C}$) und dem drittniedrigsten des Temperaturminimums ($-19,3^{\circ}\text{C}$).

Insgesamt zeigen alle betrachteten Indizes einen deutlichen Rückgang der Winterkälte über den säkularen Zeitraum 1916–2015. Besonders deutlich wird dieser Rückgang für die Frost- und Eistage (Abbildung 4). Frosttage traten am Ende des betrachteten Zeitraums 31 Tage und Eistage 18 Tage weniger als noch am Anfang auf (linearer Trend). Die massiven Rückgänge traten erst ab den 1980er Jahren sehr deutlich in Erscheinung und korrespondieren mit der zuvor beschriebenen deutlichen Erwärmung seit diesem Zeitraum. Die Tabelle 2 fasst die Maxima und Minima verschiedener Schwellenwerte der Lufttemperatur noch einmal zusammen. Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass fast alle winterlichen Kälteextreme bis zur Saison 1962/63 auftraten, während fast alle Wärmeextreme ab der Saison 1988/89 beobachtet wurden.

Tabelle 2: Rekordliste verschiedener winterlicher Temperaturkenntage.

Kenntage	Maximum (Tage)		Minimum (Tage)	
Frosttage:	208	1922/23	137	2006/07
Minimum $\leq -10^{\circ}\text{C}$:	64	1941/42	2	2013/14
Minimum $\leq -20^{\circ}\text{C}$:	13	1940	-	-
Minimum $\leq -25^{\circ}\text{C}$:	5	1929	-	-
Eistage:	130	1943/44	45	2013/14
Maximum $\leq -10^{\circ}\text{C}$:	26	1939/40	-	-
Maximum $\leq -15^{\circ}\text{C}$:	7	1956	-	-

Wetterlagen und Temperatur

In mittleren und hohen Breiten stehen großräumig relevante klimatische Anomalien zumeist in Verbindung mit (langanhaltenden) Anomalien atmosphärischer Zirkulationsmuster. Diese Muster werden über Wetterlagen, Zirkulationsformen und Zirkulationsindizes quantitativ erfasst – BARRY und CHARLTON (2001) und HUTH et al. (2008) geben einen ausführlichen Überblick über entsprechende Klassifizierungsmöglichkeiten. Die bekannte Großwetterlagenklassifikation nach BAUR (1947), weiterentwickelt durch HESS und BREZOWSKY (1977), ist das im mitteleuropäischen Raum meistangewandte Konzept zur Verbindung regionaler Klima- und großräumiger Zirkulationsvariabilität (Daten aktualisiert nach WERNER und GERSTENGARBE 2010). Sie wird nachfolgend für eine knappe Bewertung der Temperaturentwicklung auf dem Fichtelberg verwendet.

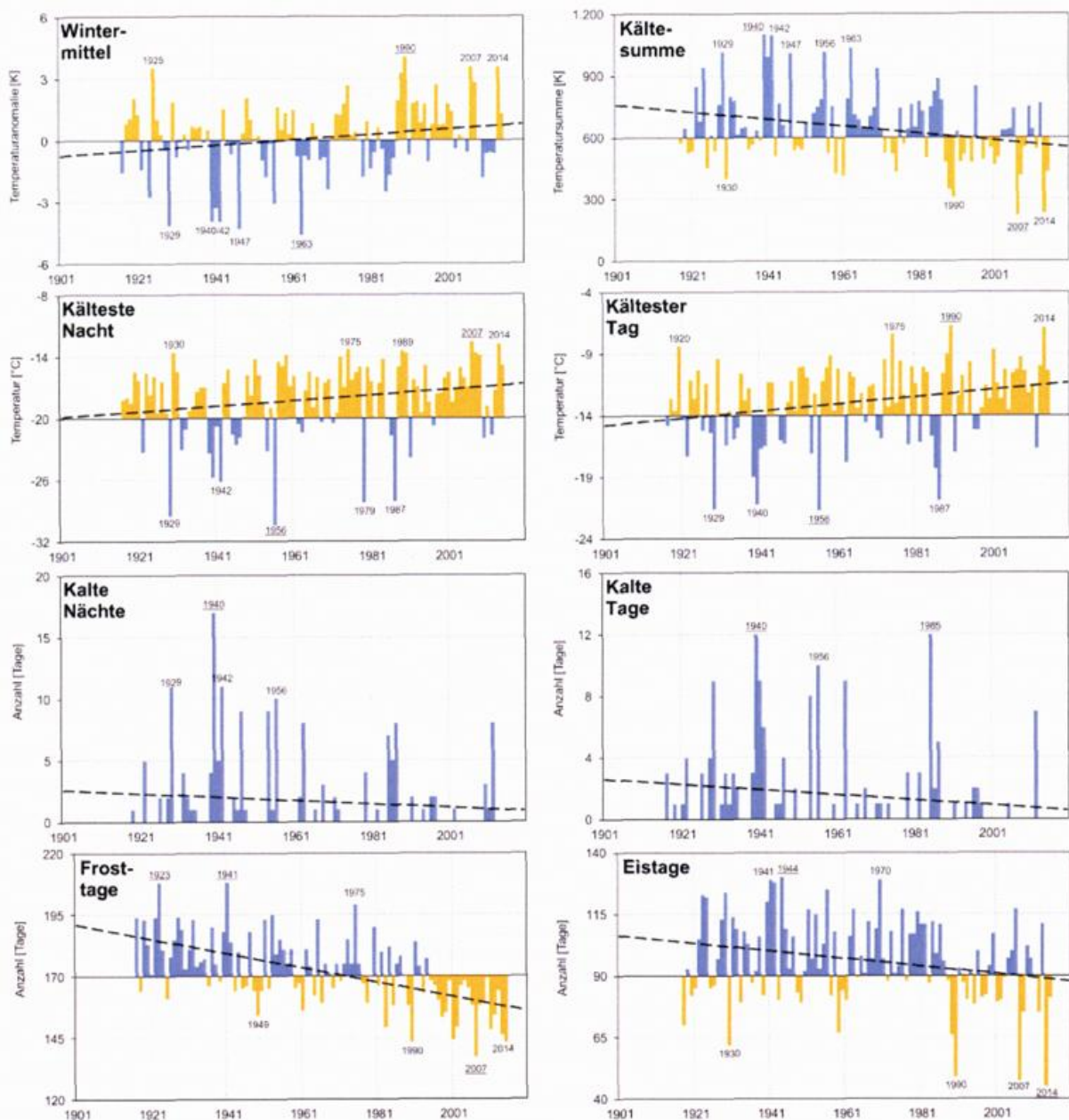


Abbildung 4: Panel aus 8 Temperaturkenntagen zur Charakterisierung der Winterkälte für 1916–2015; a) Temperaturmittelwert der Monate Dezember, Januar und Februar; b) jährliche Kältesumme der Tagesmitteltemperaturen $< 0^{\circ}\text{C}$; c) niedrigstes jährliches Temperaturminimum und d) Temperaturmaximum; e) Tage mit Temperaturmaximum ≤ 1 . Perzentil der Monate Dezember, Januar und Februar des Zeitraums 1961–1990 sowie f) gleichem Index für das Tagesminimum; g) Anzahl der Frosttage und h) Anzahl der Eistage.

Der Wechsel von maritimer Atlantikluft und kontinentalen Luftmassen charakterisiert das mitteleuropäische Klima. Die im säkularen Zeitraum häufigste Großwetterlage (GWL) ist die zyklonale Westlage (WZ; ca. 17 %), gefolgt von zentralen Hochdruckgebieten über Mitteleuropa (BM und HM; zusammen ca. 16 %). Weitere häufige und wichtige GWL sind zyklonale Südwest- (SWZ) und Nordwestlagen (NWZ) sowie die Troglagen (Trog über Mitteleuropa: TRM; über Westeuropa: TRW). Eine umfassende Abhandlung über deren Häufigkeit und Eigenschaften bietet WERNER und GERSTENGARBE (2010). Für die 29 GWL sind mittlere Häufigkeit, Frequenzänderungen und thermische Eigenschaften auf dem Fichtelberg in Abbildung 5 für Winter und Sommer dargestellt. Es fällt auf, dass im Winter eine weit größere Anzahl der GWL, zumeist mit nordwest- bis südöstlicher Anströmrichtung, für kühlere Wetterbedingungen sorgt, während die wärmeren GWL die durch ihre größere Häufigkeit ausgleichen. Im Sommer tritt dieser Zustand eher in umgekehrter Form auf.

Interessant sind Vergleiche von Fichtelberg und umliegenden Gebieten: Der Fichtelberg befindet sich im Gegensatz zum Umland fast immer oberhalb der Inversionslinie, so dass dieser bei Südwest-, Süd- und Südostlagen sowie zentralen Hochdruckgebieten (vor allem SWA, HM, BM, SEA, SA, SZ) im Winter relativ wärmer als das weitere Umland ist, bei HM und SA häufig auch absolut wärmer als alle Tieflandstationen. Bei Staulagen aus westlichen, nordwestlichen, nördlichen und nordöstlichen Richtungen (vor allem WZ, NWZ, NA, NZ, TRM, NEA, NEZ) ist er hingegen relativ und absolut kälter als das weitere Umland. Im Sommer sind diese regionalen Phänomene geringer ausgeprägt, sind jedoch insbesondere bei Staulagen (WZ, NWZ) durchaus beachtenswert.

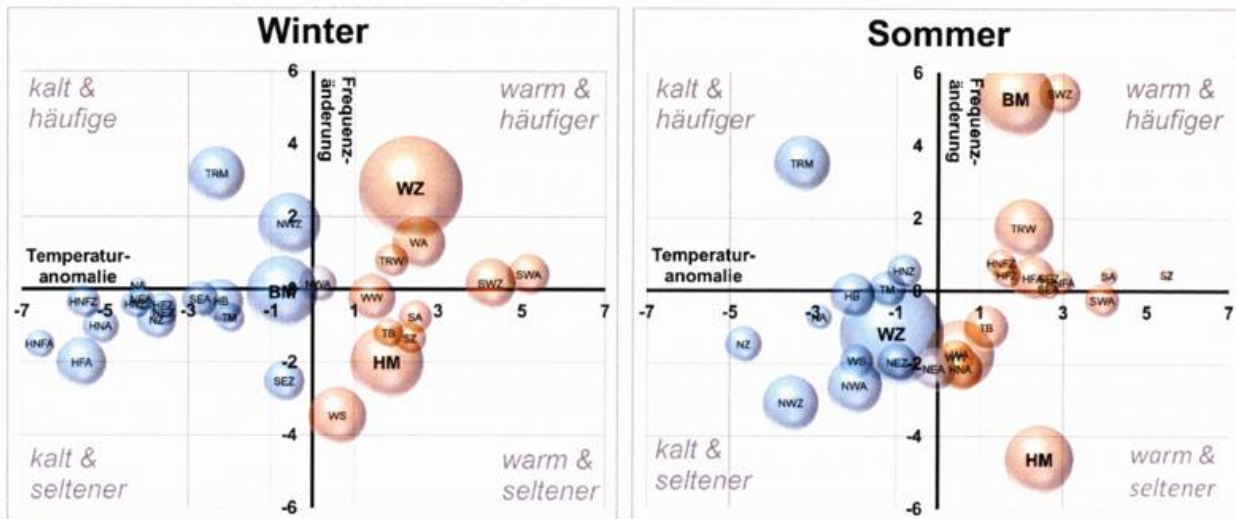


Abbildung 5: Diagramm der Temperaturanomalien auf dem Fichtelberg (1915–2015; in K) und Häufigkeitsänderungen (1989–2015 vs. 1916–1988) der 29 Großwetterlagen für a) Winter und b) Sommer; Blasengröße: mittlere Großwetterlagenhäufigkeit im Zeitraum 1916–2015 (in %); Farbgebung: blau = kälter; orange = wärmer; Temperaturanomalien berechnet auf Basis der jeweiligen langjährigen zentrierten fünftägigen Mittelwerten.

Im Winter besteht ein klarer Zusammenhang zwischen der Häufigkeit kalter (warmer) GWL mit kontinentaler (maritimer) Luftmassenzufuhr und kalten (milden) Wintern auf dem Fichtelberg (HOY 2008). Für die seit dem Jahr 1989 beobachteten wärmeren Winterverhältnisse sind Häufigkeitsveränderungen der GWL nur bedingt ursächlich, was mit den seit den 2000er Jahren wieder verstärkter auftretenden kalten GWL begründet werden kann. Die dennoch registrierte Erwärmung von 1,3 K im Vergleich von 1989–2015 und 1916–1988 ist daher zu großen Teilen von kontinentalen und globalen Entwicklungen abhängig, wie wärmeren Meeresoberflächentemperaturen, der arktischen Erwärmung und der geringeren Eurasischen Schneebedeckung (IPCC 2013).

Die im Vergleich zu anderen Jahreszeiten stärkere sommerliche Erwärmung seit den 1980er Jahren war zu größeren Teilen durch Häufigkeitsveränderungen der GWL bestimmt: mit nur einer deutlichen Ausnahme (TRM) nahmen die kühlen GWL zumeist ab, während die Häufigkeit der warmen etwas zunahm. Kontinentale und globale Entwicklungen verstärkten diese Tendenz noch, insbesondere die seit den 1990er Jahren vorherrschende positive Phase der Atlantischen Multidekadischen Oszillation und weitere begünstigende Entwicklungen (HOY et al. 2006).

Literatur

- Barnston, A.G., Livezey, R.E., 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon Wea Rev* 106: 1083-1126.
- Barry, R.G., Carleton, A.M., 2001: *Synoptic and Dynamic Climatology*. Routledge/London/New York. 620 S.
- Baur, F., 1947: *Musterbeispiele Europäischer Großwetterlagen*, Dietrich'sche Verlagsbuchhandlung, Wiesbaden.

- Hess, P., Brezowski, H., 1977: Katalog der Großwetterlagen Europas 1881-1976, 3. Auflage, Berichte des Deutschen Wetterdienstes 15 (113), Offenbach, 68 S.
- Hoy, A., 2008: Wintertourismus in Sachsens Mittelgebirgen – Marketingstrategien zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Diplomica GmbH, Hamburg, 184 S.
- Hoy, A., 2013: Atmospheric circulation variability and relation to climate. Dissertation. TU Bergakademie Freiberg. 146 S.
- Hoy, A., Hänsel, S., Skalak, P., Ustrnul, Z., Bochnicek, O., 2016: The extreme European summer in a secular perspective. Submitted to International Journal of Climatology.
- Hurrell, J.W., 1995: Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation. *Science* 296: 676-679.
- Huth, R., Beck, C., Philipp, A., Demuzere, M., Ustrnul, Z., Cahynová, M., Kyselý, J., Tveito, O.E., 2008: Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications. *Ann NY Acad Sci* 1146: 105–152.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Thompson, R., 1995: Complex demodulation and the estimation of the changing continentality of Europe's climate. *International Journal of Climatology* 15(2): 175–185.
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W., 2010: Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowski. 7. Auflage, PIK-Report 119, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam, 140 S.

2.4 Die Niederschläge auf dem Fichtelberg (1916-2015)

Falk BÖTTCHER und Holger KANTZ

Vorbemerkungen und Bedingungen für die Niederschlagsmessungen

Der Fichtelberg ist eine der ganz wenigen Stationen, von denen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit behauptet werden kann, dass sowohl Messort als auch Messmethodik im Laufe der 100jährigen Messreihe keine Veränderungen erfuhren. Es sind nur ein paar, nur wenige Meter ausmachende Verschiebungen des Messgerätes im Klimagarten der Fichtelbergwetterwarte bekannt. Selbst Änderungen bei den Niederschlagsmessgeräten können ausgeschlossen werden, denn sowohl die Stationsakten als auch FREYDANK 2014 bestätigen, dass am Fichtelberg seit Beginn der Messungen für die Tagesniederschlagssummenbestimmung immer Niederschlagsmesser mit einer Auffangfläche von 500 cm² eingesetzt wurden, wobei es Zeiten gab, in denen ein Windschutzring wie noch heute verwendet wurde und auch Abschnitte ohne Windschutzring.

Die beschriebene Messmethodik erlaubt keine zeitlich hoch aufgelösten Messwerte, so dass sich die Auswertungen der Extremwerte an dieser Stelle auf Tageswerte beschränken. Zusätzlich stehen am Fichtelberg keine einhundertjährigen Daten anderer Niederschlagsmesssysteme mit höher aufgelöster Messfrequenz als 24stündig zur Verfügung.

In dieser Auswertung werden nur die fallenden flüssigen und festen Niederschläge berücksichtigt, die durch die eingesetzte Messtechnik im Laufe der 100 Messjahre erfasst werden konnten. Unberücksichtigt bleiben Niederschlagsmengen, die durch „Auskämmen“ des Nebels oder durch abgesetzte Niederschläge (Tau, Reif, Raureif, Raufrost, Raueis und deren Mischformen) auftraten. FLEMMING (1983, zitiert in SCHWARZE et al. 2013) gibt für diese Niederschlagsformen für die Hochlagen des Erzgebirges über 1000 m NN maximale Jahressummen von 240 mm an, die sich auf 160 mm im Winterhalbjahr und 80 mm im Sommerhalbjahr verteilen.

Hinsichtlich des Status und der Entwicklung der klimatischen Bedingungen bezüglich einer Schneedecke wird auf die Arbeit von Gerd Franze verwiesen, die in diesem Band folgt.

Klimastatus und Jahreswerte

Neben der Auersbergregion, die etwas westlich des Fichtelberges gelegen ist und dadurch eine noch etwas höhere mittlere jährliche Niederschlagshöhe aufweist, ist die Fichtelberg- und Keilbergregion mit mehreren Gipfeln von deutlich über 1000 m NN die flächenmäßig niederschlagsreichste Region der weiteren Umgebung. Die Ursachen dafür liegen in der Höhenlage und der Exposition des Erzgebirges in Bezug auf die Hauptanströmung und die orographische Unterstützung bei besonders niederschlagsträchtigen Wetterlagen (zyklonale NW/N/NE-Lagen, Vb-Wetterlagen).

Zwischen dem 01.01.1916 und dem 31.12.2015 sind auf dem Fichtelberg 114 797,4 mm Niederschlag gemessen worden. Damit fielen durchschnittlich 3,1 mm Niederschlag am Tag, was einer durchschnittlichen Jahresniederschlagshöhe von 1147,8 mm entspricht und etwa 30 bis 50 Prozent über den Werten des sächsischen Tieflandes liegt. Dabei waren allerdings 41 Prozent aller Tage niederschlagsfrei beziehungsweise zeigten keine messbaren Niederschlagshöhen.

Die höchste Tagesniederschlagsmenge von 137,8 mm wurde am 12. August 2002 bestimmt. Dieser Wert liegt mit weitem Abstand vor den bis dahin und seitdem gemessenen Tagesniederschlagshöhen und kann dementsprechend als absoluter Ausnahmewert angesehen werden. Neben der genannten Tagesniederschlagshöhe von 137,8 mm gab es keine weiteren Fälle von 100 mm oder mehr am Tag und auch oberhalb 80 mm waren es an den 36 525 Tagen in der 100jährigen Betrachtung nur 5 Tage. Neben dem schon genannten Termin der höchsten Tagessumme waren Tagesmengen über 80 mm an folgenden Tagen gemessen worden: 30.07.1926 (98,0 mm), 11.07.1937 (98,6 mm), 20.07.1955 (81,4 mm) und 29.06.1966 (89,4 mm). 50 mm

und mehr konnten an immerhin 46 Tagen und 30 mm oder mehr an 301 Tagen (0,8 Prozent aller Tage) gemessen werden. 10 mm und mehr traten an 3426 Tagen auf. Das sind 9,4 Prozent aller Tage.

Der Jahresgang des Niederschlages auf dem Fichtelberg (Abbildung 1) ist gekennzeichnet durch eine Doppelwelle mit einem primären Maximum von durchschnittlich 127,0 mm im Juli, das umrahmt wird von den Monaten Juni und August, die im Normalfall auch über 100 mm Niederschlag als Monatssumme aufweisen. Ein sekundäres Maximum zeigt sich im Dezember. Es liegt jedoch mit 94,6 mm mehr als 30 mm unter dem Hauptmaximum. Die Minima bezogen auf die durchschnittlichen Monatsniederschlagshöhen sind im Februar und Oktober mit ca. 82 mm zu finden.

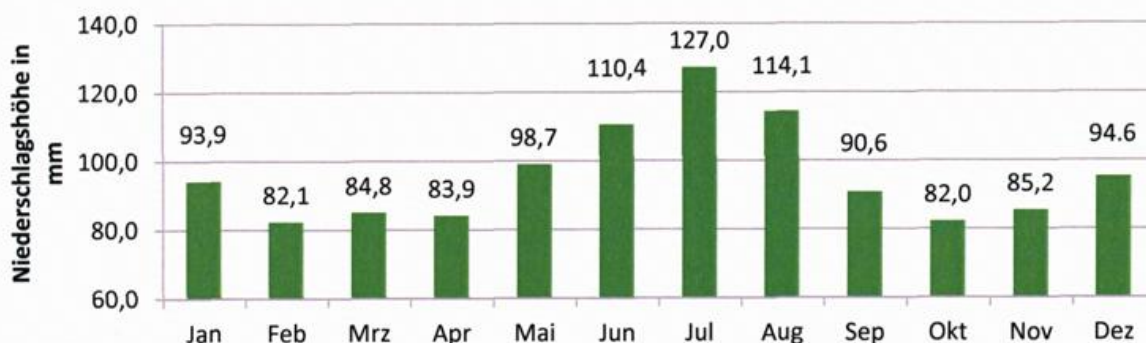


Abbildung 1: Jahresgang der Niederschlagshöhe 1916-2015 an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg.

Um einzuschätzen, ob eine Jahressumme der Niederschlagshöhe extrem ist, wurde auf die Auswertung von Perzentilen zurückgegriffen (Abbildung 2.4.2). Ist ein Jahr extrem zu trocken am Fichtelberg, liegt die Summe der Jahresniederschlagshöhe unterhalb des 5. Perzentils. Das war in 4 Jahren der Fall (1934, 1943, 1951, 1985). Viel zu trocken mit Jahresniederschlagshöhen unterhalb des 10. Perzentils waren 6 Jahre und zu trocken (unterhalb des 20. Perzentils) insgesamt 17 der 100 Jahre.

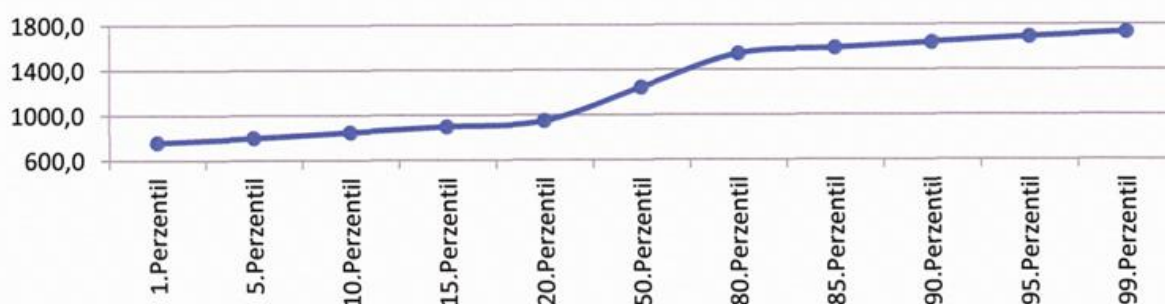


Abbildung 2: Perzentile der Jahressummen der Niederschlagshöhe an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg bezogen auf den Zeitraum 1916-2015.

Zu feucht (Jahressummen oberhalb des 80. Perzentils) waren 4 Jahre, davon waren 3 viel zu feucht (90. Perzentil; 1926, 1965, 2010) und ein Jahr (1922) war mit 1740,6 mm extrem zu feucht. Diese Summe lag nicht nur deutlich über dem 95. Perzentil sondern sogar über dem 99. Perzentil.

Die Perzentile wurden auch für die zehn Dekaden von 1916-25 bis 2006-2015 gebildet. Dabei zeigt sich, dass die Werte der einzelnen Dekaden unterschiedlich sind, aber insbesondere die Perzentile auf der feuchten Seite eine geringfügig abnehmende, statistisch aber nicht absicherbare Tendenz zeigen, die in der letzten Dekade wieder in zunehmende Richtung geht (Abbildung 3).

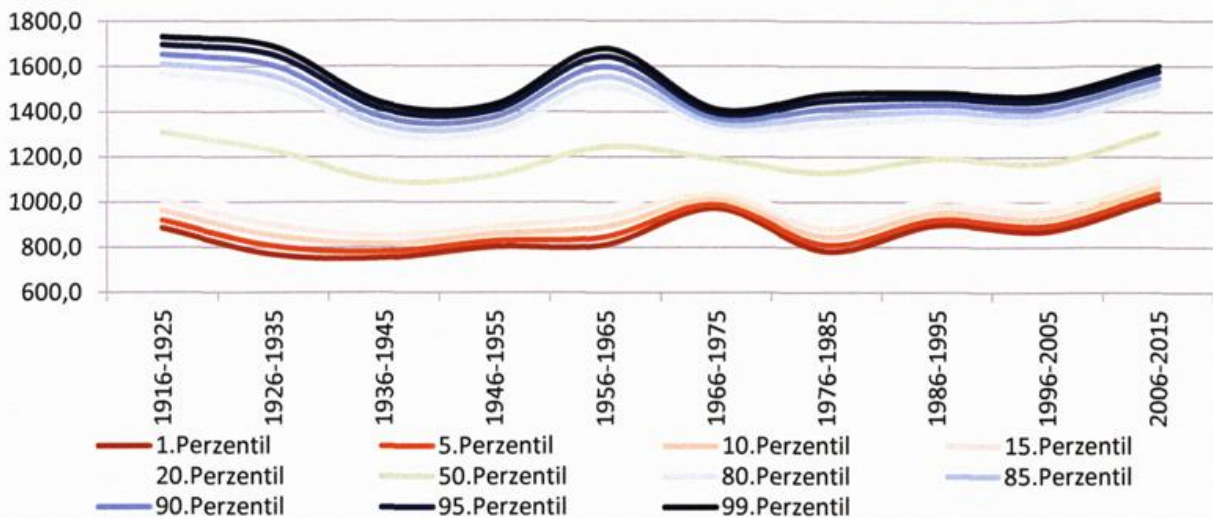


Abbildung 3: Verlauf der Perzentile der Jahressummen der Niederschlagshöhen in den Dekaden von 1916 bis 2015 an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg.

Die Entwicklung der Jahresniederschlagssummen in den letzten 100 Jahren lässt bei einer Standardabweichung von 211,0 mm und einer absoluten Schwankung von 994,5 mm zwischen dem niederschlagsärmsten und -reichsten Jahr keine Tendenz zu höheren oder geringeren Gesamtsummen erkennen, obwohl bei dekadenweiser Betrachtung die letzte Dekade 2006 bis 2015 im Mittel die höchste Jahressumme zeigt. Im Vergleich zwischen der von der WMO definierten Klimanormalperiode 1961-1990 liegt der Mittelwert der einhundertjährigen Reihe 30,7 mm höher, was in etwa einer mittleren Monatsdekade entspricht.

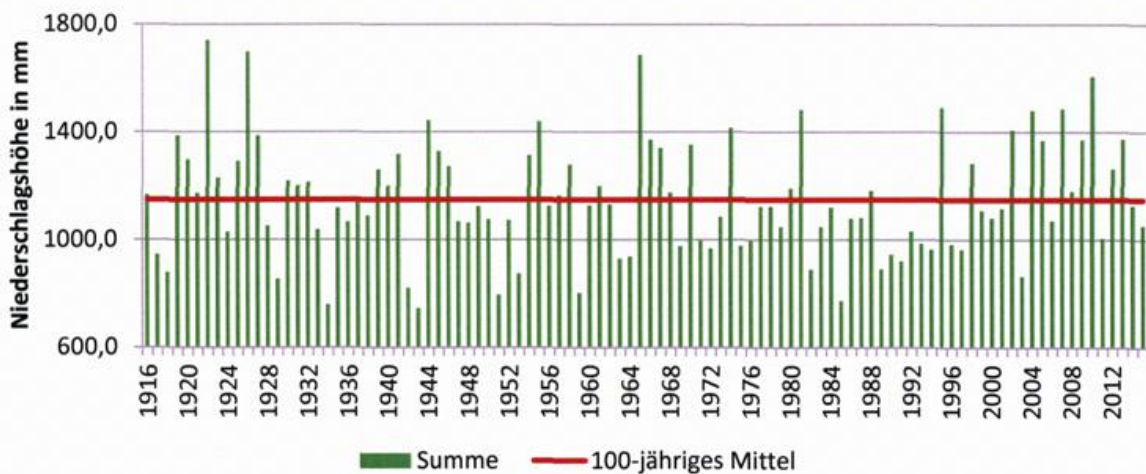


Abbildung 4: Jahressummen der Niederschlagshöhen in mm der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg.

Da sich bei den Jahresniederschlagssummen mit herkömmlichen statistischen Mitteln kein Trend erkennen lässt, wurde versucht mit einem anderen statistischen Herangehen zu zeigen, ob dies belastbar ist. Dabei wurde das Verhältnis von Starkregen (Tage mit Tagessummen ≥ 30 mm) zu „normalen“ Niederschlagshöhen bestimmt. Die Abbildung 5 zeigt, dass auch damit kein Trend bestimmbar war.

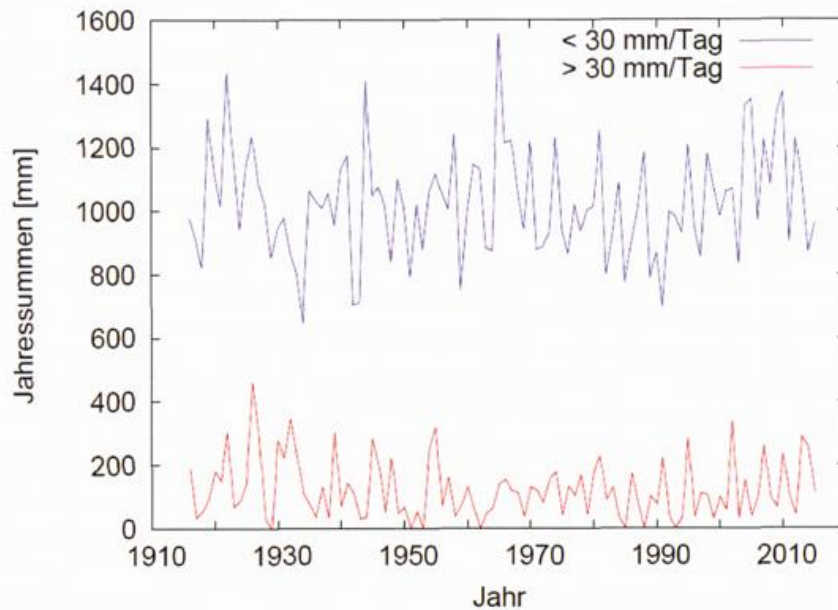


Abbildung 5: Jahressumme der Tagesniederschläge mit Niederschlagshöhen < 30 mm (blau) im Vergleich zur Jahressumme der Tagesniederschlägen \geq 30 mm (rot) auf dem Fichtelberg 1916 bis 2015.

Monatswerte und ihre Entwicklung

Der Januar zeigt auf dem Fichtelberg eine mittlere Monatssumme von 93,9 mm um die sich eine Standardabweichung von 47,3 mm spannt. Am niederschlagsreichsten war der Januar 2012 mit 243,2 mm. Demgegenüber steht der erste Monat des Jahres 1996 mit 12,9 mm. Teilt man die 100 Jahre in zwei Hälften, wird erkennbar, dass der Januar wie weitere 7 Monate in den zweiten 50 Jahren im Durchschnitt geringere Monatssummen der Niederschlagshöhe aufweist. Nur die Monate März, September, November und Dezember zeigen von 1966 bis 2015 höhere Mittelwerte.

Im Februar fallen durchschnittlich 82,1 mm, wobei die Werte in den 100 Jahren zwischen 267,6 mm 1946 und 13,8 mm 1982 schwanken können. Die Standardabweichung beträgt 48,4 mm. Zwischen der ersten und der zweiten Hälfte der 100 Jahre besteht ein durchschnittlicher Unterschied von etwa 10 mm zugunsten der ersten Hälfte. Neben dem Oktober ist der Februar der niederschlagsärmste Monat auf dem Fichtelberg.

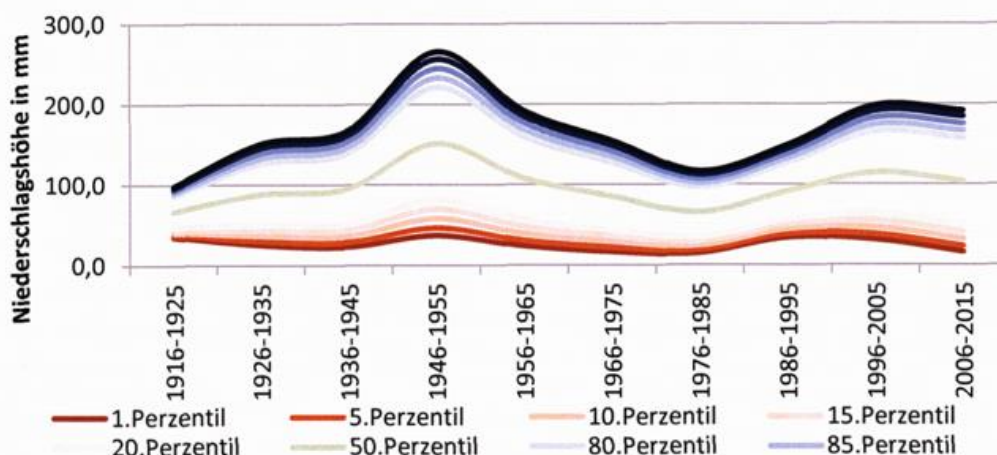


Abbildung 6: Verlauf der Perzentile der Februarsummen der Niederschlagshöhen in den Dekaden von 1916 bis 2015 an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg.

Wie sehr die extremen Monatssummen auf die Perzentile durchschlagen, zeigt Abbildung 6. Die Dekade, in der die höchste Monatssumme festgestellt wurde, zeigt auch die höchsten Perzentilwerte auf der feuchten Seite und die Dekade mit dem minimalen Februarwert bringt auch die geringsten Perzentilwerte auf der trockenen Seite.

Der März zeigt gegenüber dem Februar in der Regel eine etwas höhere monatliche Niederschlagssumme. Sie liegt im Mittel bei 84,8 mm über dem einhundertjährigen Zeitraum. Bei dekadenweiser Betrachtung der Anzahl der Tage, an denen eine bestimmte Niederschlagsmenge überschritten wurde, sieht man, dass diese zwar Schwankungen unterlegen sind, aber keine Tendenzen sowohl bei geringen wie bei hohen Tagesniederschlagssummen erkennbar sind.

Im Gegensatz zum März ist im April ein spürbarer Rückgang der Tage mit Niederschlagssummen von 1 mm und mehr festgestellt worden. In der ersten der 10 Dekaden waren 160 Tage mit Werten von $\geq 1 \text{ mm d}^{-1}$ festgestellt worden. In der letzten Dekade sind es nur noch 105 dieser Tage gewesen. Die entgegengesetzte Entwicklung ist bei den niederschlagsfreien Tagen und den Tagen ohne messbare Niederschlagshöhe zu sehen, wie Abbildung 7 zeigt.

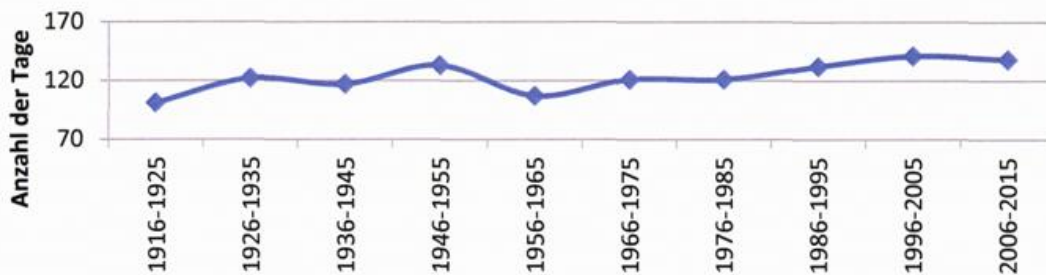


Abbildung 7: Entwicklung der Anzahl der Tage ohne bzw. ohne messbaren Niederschlag im April an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg in den zehn Dekaden von 1916-25 bis 2006-15.

Der April hat in etwa die gleiche mittlere Monatssumme wie der März aufzuweisen. Die Schwankung zwischen dem trockensten (7,9 mm 2007) und dem niederschlagsreichsten (192,4 mm 1954) April in den 100 Jahren ist aber mit 184,5 mm mehr als 30 mm geringer als im März.

Im Mai können durchschnittliche Niederschlagshöhen von 98,7 mm erwartet werden. Bei einer Standardabweichung von 45,0 mm beträgt die maximale Schwankung zwischen dem höchsten und dem niedrigsten in den 100 Jahren gemessenen Mainiederschlag 205,3 mm, wobei 225,2 mm 1965 und 19,9 mm 1992 registriert wurden. Wie auch Januar, September, November und Dezember zeigt der Mai bei dekadenweiser Betrachtung die höchsten Durchschnittswerte in der Dekade 2006-2015. Es sind 118,2 mm und damit 44,6 mm mehr als in der Dekade mit dem geringsten Mainiederschlag von durchschnittlich 73,6 mm (siehe Abbildung 8)

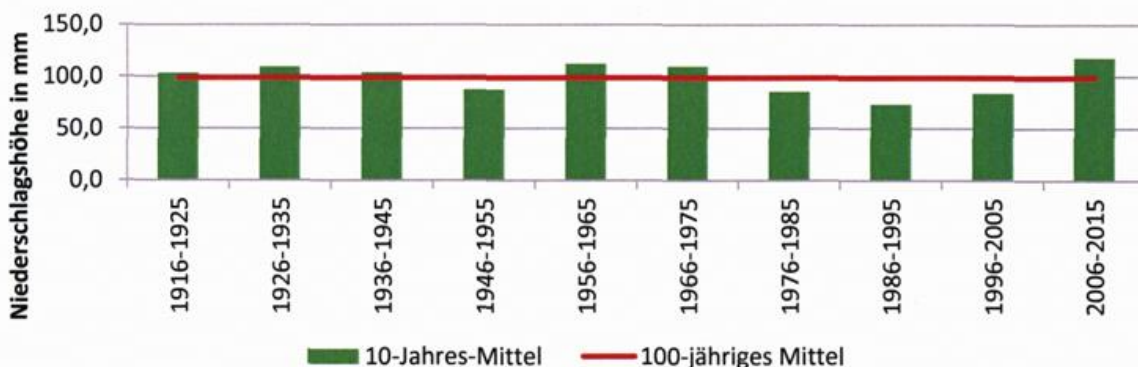


Abbildung 8: Dekadenmittel Mai des Niederschlags an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg 1916-2015.

Einer von drei Monaten mit einer durchschnittlichen Monatssumme der Niederschlagshöhe von über 100 mm in den letzten 100 Jahren ist der Juni mit 110,4 mm bei einer Standardabweichung von 47,5 mm. Die absolute Schwankung spannt sich dabei über 254,1 mm auf und reicht von 288,3 mm 1926 bis 34,2 im Juni 1942. Insgesamt 4 der 100 Junimonate zeigten Niederschlagshöhen von 200 und mehr mm.

Der Juli ist mit 127,0 mm der durchschnittlich niederschlagsreichste Monat auf dem Fichtelberg und zeigt sich dahingehend im Einklang mit vielen anderen tiefer gelegenen Messstellen. Neun von zehn Dekaden des bisher einhundertjährigen Messzeitraumes weisen Durchschnittswerte von über 100 mm auf. Nur die Dekade 1986-1995 erreichte mit 97,9 mm die 100-mm-Marke nicht. Demgegenüber waren in den Julimonaten zwischen 1946 und 1955 152,5 mm im Durchschnitt erreicht worden, was aber maßgeblich durch die 407,2 mm des Juli 1955 geprägt ist. Dieser Monat hatte mit Abstand die höchste Niederschlagssumme in einem der 1200 Monate des betrachteten 100-Jahres-Zeitraums. In den übrigen Monaten des Jahres liegen die absoluten Maximalwerte zwischen 200 und 300 mm, im April sogar knapp unter 200 mm. Insgesamt waren die Julimonate um die Mitte der fünfziger Jahre des 20. Jahrhunderts besonders niederschlagsreich, denn neben dem schon erwähnten Juli 1955 waren auch die entsprechenden Monate 1954 mit 322,2 mm und 1957 mit 305,9 mm überdurchschnittlich mit Niederschlag beschenkt und selbst 1956 lag der Juli mit 135,3 mm - wenn auch knapp - über dem Durchschnittswert.

Auch der August bringt im Lauf der 100 Jahre eine durchschnittliche Monatssumme der Niederschlagshöhe von über 100 mm zustande. Es sind 114,1 mm bei einer Standardabweichung von 51,2 mm und einer absoluten Schwankung, die sich von 299,1 mm im Monat der sächsischen Jahrhundertflut 2002 bis 12,9 mm 1947 über 286,2 mm aufspannt.

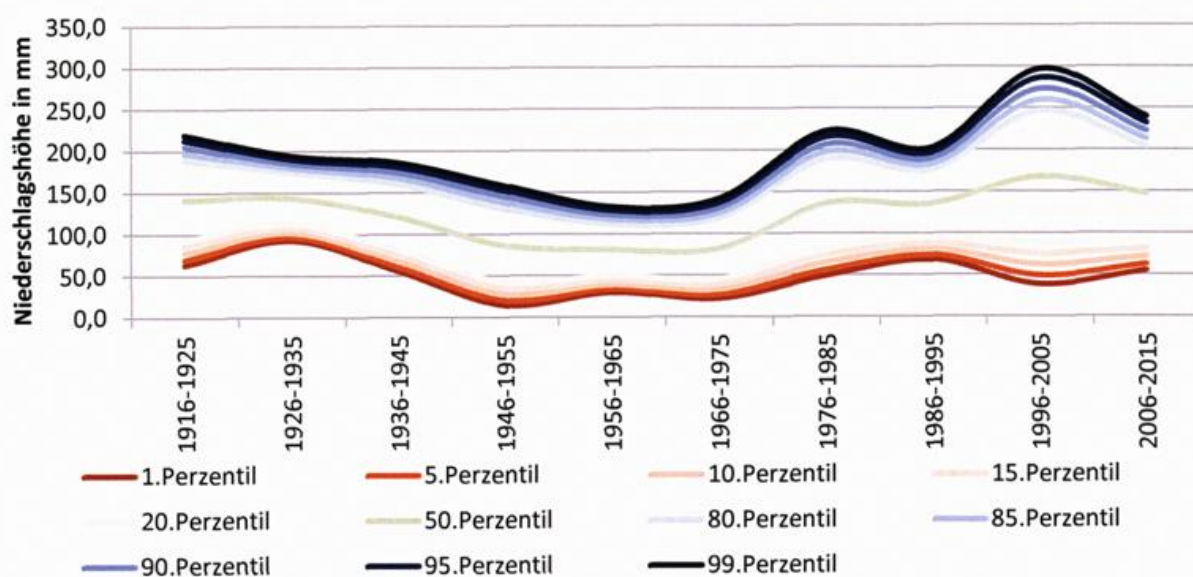


Abbildung 9: Entwicklung der Perzentile der durchschnittlichen Dekadensummen des Augusts an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg 1916-2015.

Auch wenn die Dekade, die den niederschlagsreichsten August enthält, weggelassen würde, zeigt sich in Abbildung 9, dass sich in den Augustmonaten nach einem Rückgang bis in die 70er Jahre des vergangenen Jahrhunderts hinein aktuell ein Anstieg insbesondere der extrem feuchten Augustmonate bemerkbar macht, der in dieser Form in der vorliegenden einhundertjährigen Messreihe bis dato noch nicht dagewesen war.

Auch im September sind vergleichbare Verhältnisse bei der Perzentilentwicklung in den Dekaden des Messjahrhunderts auszumachen: Während sich auf der trockenen Seite die Schwankungen im erlebten Rahmen bewegen, ziehen die Perzentile der feuchten Seite in der letzten Dekade nach oben auf Werte, die bisher noch nicht gemessen worden sind. Insgesamt ist der September gekennzeichnet von einer mittleren

einshundertjährigen Niederschlagshöhe von 90,6 mm bei einer Standardabweichung von 47,1 mm. Absolut schwankten die Werte zwischen 235,9 mm 2007 und 2,0 mm im September 1959. Dies ist der dritttrockenste Monat auf dem Fichtelberg überhaupt. Niederschlagsärmer waren nur der November 2011 mit 0,8 mm im Messgerät und der Oktober 1943, wo gar kein messbarer Niederschlag registriert wurde.

Wie schon erwähnt, ist der Oktober sowohl im einshundertjährigen Durchschnitt mit 82,0 mm als auch absolut (Oktober 1943 mit 0,0 mm) der niederschlagsärmste Monat des Jahres auf dem Fichtelberg. Gleichwohl sind auch Monatsmengen von über 200 mm möglich. Zweimal geschah dies in den 100 Oktobermonaten der messtechnisch belegbaren Zeitreihe. Mit 238,1 mm ist dabei der Oktober 1941 der Spitzenreiter.

Der November zeigt eine durchschnittliche Niederschlagshöhe von 85,8 mm über den Zeitraum von 1916 bis 2015. Die Standardabweichung wurde dabei mit 46,9 mm festgestellt und die absolute Schwankungsbreite erstreckt sich über 217,8 mm (Maximum 218,6 mm im November 2004 und Minimum 0,8 mm November 2011).

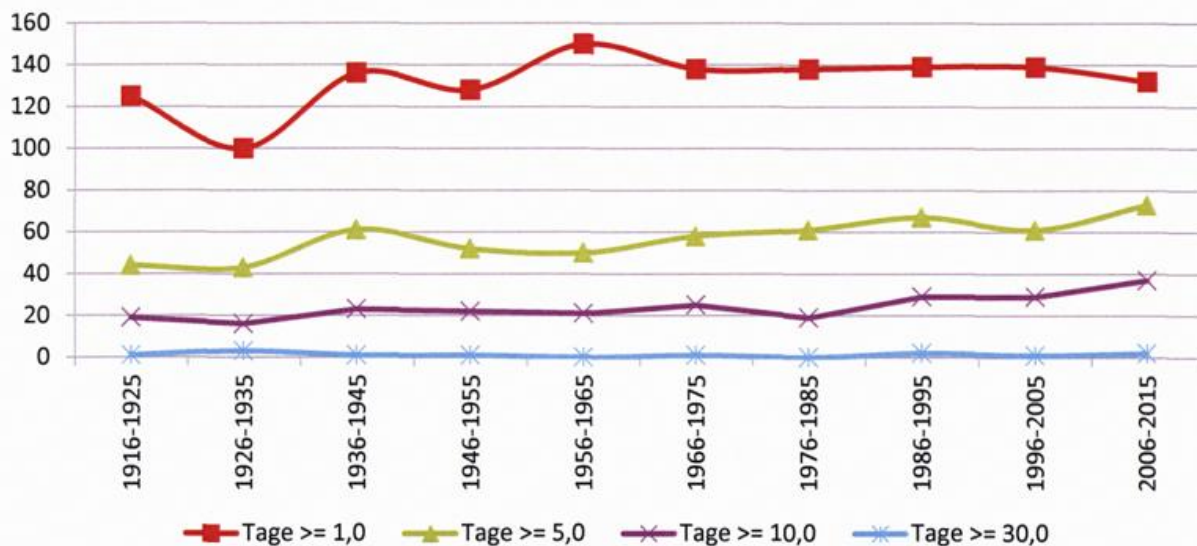


Abbildung 10: Entwicklung der dekadeweisen Niederschlagsereignistage im Monat November an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg 1916-2015.

Die Abbildung 10 stellt die Entwicklung der Anzahl der Niederschlagsereignistage dar. Während sich sowohl im Bereich von Tagen mit 30 mm und mehr wie auch bei den Tagen mit Niederschlagshöhen von 1 mm und mehr wenig Änderung ausmachen lässt, unterliegen sowohl die Tage mit 5 mm und mehr (Zunahme um etwas mehr als 20 Tage) und die Tage mit 10 mm und mehr (Zunahme um mehr als 10 Tage über die 10 Dekaden) deutlichen, beachtenswerten Veränderungen, die beide bei einer linearen Trendberechnung Korrelationskoeffizienten von 0,83 aufweisen.

Auch im Dezember setzt sich die beschriebene Entwicklung der Anzahl der Niederschlagsereignistage im gleichen Sinne fort. Zwar sind die Korrelationskoeffizienten bei den einzelnen Tendenzen der Ereignistage mit Werten knapp über 0,6 nicht so hoch wie im November, aber es kann dennoch von Trends gesprochen werden. Bezogen auf die einshundertjährige Reihe ist im Dezember das sekundäre Maximum im Jahresgang des Niederschlages mit 94,6 mm zu finden. Die Standardabweichung beträgt 51,1 mm bei einer absoluten Schwankungsbreite von 268,2 mm (Maximum 276,1 mm 1974 und Minimum 7,9 mm 1972).

Fasst man nun die Monate zu Jahreszeiten und zu Halbjahren zusammen, zeigt sich, dass Frühling und Sommer tendenziell abnehmende Niederschlagssummen aufweisen, während Herbst und Winter schwache Zunahmen erkennen lassen. So kann man festhalten, dass in den ersten 50 Jahren des Messzeitraumes 55

Prozent der Niederschläge auf dem Fichtelberg im Sommerhalbjahr (April bis September) fielen, so sind es in der zweiten Hälfte der betrachteten 100 Jahre 53 Prozent. Wie im Tiefland auch, tendiert die Summe der Niederschlagshöhe der ersten Hälfte der Vegetationsperiode (April bis Juni) zu geringeren Werten. Anders als im Tiefland (HÄNSEL et al. 2015) zeigt sich diese Entwicklung auch in der zweiten Hälfte der Vegetationsperiode (Juli bis September).

Betrachtung der Tageswerte und ihre Entwicklung

Zum Teil wurde in den einzelnen Monaten schon auf den Status und die Entwicklung der Ereignistage des Niederschlages eingegangen. An dieser Stelle soll nur nochmals ein Blick auf den Zeitraum im Jahr erfolgen, der bei den Ereignistagen die stärksten Änderungssignale im Laufe der Zeit zeigt. Dies ist in der ersten Hälfte der Vegetationsperiode der Fall. Während die Anzahl der niederschlagsfreien Tage beziehungsweise Tage ohne messbaren Niederschlag konstant bleibt, gehen die Tage mit mehr als 1 mm von im Durchschnitt 415 auf unter 380 Tage je Dekade zurück. Bei den Tagen mit mehr als 5 mm und auch bei den Tagen mit mehr als 10 mm beträgt der Rückgang über die 100 Jahre etwa 20 Tage, während sich die Zahl bei den Tagen mit Tagesniederschlagssummen von 30 und mehr mm von etwa 10 auf etwa 5 halbiert.

Von den insgesamt 36525 Tagessummen des Niederschlages zwischen 1916 und 2015 waren 0,8 Prozent (301) Niederschläge mit Mengen von 30 und mehr mm. Dies wird hier als Extremereignis gewertet. Es gab insgesamt nur 5 Tagessummen über 80 mm und 46 über 50 mm. Die Verteilung dieser 301 extremen Tagesniederschlagssummen auf die 10 Dekaden kann der folgenden Tabelle entnommen werden. Wenn man eine Teilung nach 50 Jahren vornimmt, so liegen 141 dieser Werte im Zeitraum von 1966 bis 2015, 160 Werte in der ersten Hälfte der Messzeit.

Tabelle 1: Anzahl der Tage mit Niederschlagstagesummen ≥ 30 mm in den Dekaden.

Dekade	Anzahl der Tagessummen von ≥ 30 mm/d
2006 – 2015	39
1996 – 2005	24
1986 – 1995	25
1976 – 1985	25
1966 – 1975	28
1956 – 1965	20
1946 – 1955	29
1936 – 1945	30
1926 – 1935	49
1916 – 1925	32

Die 301 extremen Tagessummen weisen eine Gesamtniederschlagsmenge von 12 327,5 mm auf. Das sind 10,7 Prozent der Gesamtniederschlagsmenge. Im Mittel zeigen die extremen Tagessummen des Niederschlages einen Wert von 41 mm je Tag.

Zusammenfassung

Die einhundertjährige Messreihe des Niederschlages an der Bergwetterwarte Fichtelberg ist ein besonders hochwertiger Datensatz, denn neben dem nahezu unveränderten Messort und Umfeld auf dem zweithöchsten Berg des Erzgebirges ist von besonderer Bedeutung, dass das gleiche Messsystem, nämlich ein Niederschlagsmesser mit einer Auffangfläche von 500 cm² in einer Aufstellhöhe von 2 m über Grund durchgängig benutzt wurde. Damit sind die wichtigsten Voraussetzungen für eine homogene Messreihe gegeben.

Die Auswertungen ergaben, dass die Jahresniederschlagssumme im Mittel über einhundert Jahre 1147,8 mm beträgt. Dabei zeigt der Jahresgang eine Doppelwelle mit einem primären Maximum im Juli und einem sekundären Maximum im Dezember. Die Minima finden sich mengenmäßig fast identisch im Februar und Oktober.

Beinahe alle Monate weisen Spitzenwerte von über 200 mm auf. Der niederschlagsreichste Monat war der Juli 1955 mit 407,2 mm. Demgegenüber fiel im Oktober 1943 kein messbarer Niederschlag auf dem Fichtelberg.

Die Verteilung der Niederschläge zwischen Sommer- und Winterhalbjahr hat sich geringfügig verschoben. So waren in der ersten Hälfte der einhundert Jahre 55 Prozent der Niederschläge im Sommerhalbjahr registriert worden. In der zweiten Hälfte waren es nur noch 53 Prozent. Dieses Ergebnis korrespondiert gut mit der Abnahme der Anzahl der Ereignistage des Niederschlages in der ersten Hälfte der Vegetationsperiode und einer Zunahme der Ereignistage mit mehr als 5 und 10 mm d⁻¹ im November und Dezember.

301 der insgesamt 36 525 Tage der einhundertjährigen Messperiode wiesen mit Werten über 30 mm d⁻¹ extrem hohe Niederschlagssummen auf. Der Spitzenwert und einzige Wert über 100mm wurde mit 137,8 mm am 12. August 2002 gemessen.

Der enorm umfangreiche Datensatz zwang bei der Auswertung und Darstellung im Rahmen dieser Arbeit zu Kompromissen, so dass es lohnenswert erscheint, diese Auswertungen zu erweitern und zu vertiefen.

Literatur

- Flemming, G., 1983: Verbesserung der Niederschlagsdaten im Saidenbachgebiet, Forschungsbericht im Projekt „Wasser- und Stoffhaushalt in Einzugsgebieten“, April 1983, Wissenschaftsbereich Hydrologie und Meteorologie an der Technischen Universität Dresden.
- Freydank, E., 2014: 150 Jahre staatliche Wetter- und Klimabeobachtungen in Sachsen, Teil 1; Tharandter Klimaprotokolle, Band 21, Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur für Meteorologie
- Hänsel, S., Schucknecht, A., Böttcher, F., Bernhofer, C., Matschullat, J., 2015: Niederschlagsveränderungen in Sachsen von 1901 bis 2100: Starkniederschlags- und Trockenheitstrends; Berichte des Deutschen Wetterdienstes Band 246, Offenbach am Main.
- Schwarze, R., Dröge, W., Hauffe, C., Baldy, A., Wagner, M., 2013: KliWES – Nebelkorrektur, Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 16/2013.

2.5 Schneedeckenbetrachtungen anhand der 100-jährigen Messreihe der Wetterwarte Fichtelberg

Gerd FRANZE

Allgemeines

Mit der Feststellung, dass das 30-jährige Mittel der Lufttemperatur in der jetzt hier vorliegenden 100-jährigen Messreihe um ein Kelvin angestiegen ist, ergibt sich die Fragestellung, ob davon auch die Schneedeckensituation auf dem Fichtelberg beeinflusst wurde. Das ist besonders für Sachsens höchstgelegenes Wintersportzentrum von großer Bedeutung.

Datengrundlage waren die täglichen Schneehöhen zum ersten Klimatermin früh. Schneedeckenausbildungen, die im Laufe des Tages entstanden und bis zum nächsten Morgen wieder abtauten, wurden hier nicht berücksichtigt. Die Anzahl der Tage mit Schneedecke und gemittelte Schneehöhen verschiedener Zeiträume bildeten die Datengrundlage für diese Auswertung.

Schneehöhenbestimmung

Die Schneehöhenbestimmung in Kammregionen oder gar im Gipfelbereich von Bergen ist generell schwierig. Je höher man kommt, umso größer ist der Windeinfluss, der den Schneedeckenaufbau beeinflusst. Daher müssen mit zunehmender Höhe auch mehr Einzelmessungen durchgeführt werden, als weiter unten. Sträucher und Bäume bremsen den Windeinfluss je nach Wuchshöhe allerdings wieder ab, haben aber gleichzeitig den Effekt, dass der fallende Schnee bereits im Gipfelbereich beginnend bis ins untere Stockwerk so abgefangen wird, dass erheblich weniger am Erdboden ankommt. Mit weiterer Zunahme der geographischen Höhe bis zum Erreichen der Baumgrenze und darüber hinaus spielt vor allem die herrschende Windrichtung beim Schneedeckenaufbau eine nicht unwesentliche Rolle. Im Luvbereich geht der Aufbau verlangsamt vor sich und im Leebereich setzt sich der verfrachtete Schnee vermehrt ab und beschleunigt den Schneedeckenaufbau. Je nach vorherrschender Windrichtung mit gleichzeitigem Schneefall tritt dieser Effekt mehr oder weniger in Abhängigkeit von der Windstärke und somit auch in jeder Himmelsrichtung in Erscheinung. Eine Pulverschneedecke wird natürlich ebenso verfrachtet, allerdings nicht im selben Ausmaße. Weiterhin wird die Schneedecke durch Steilheit und Richtung der Hangneigung in Bezug zur Sonneneinstrahlung beeinflusst. Nordhänge halten viel länger den Schnee als Südhänge. Das Abtauen geht in südlicher Hanglage wesentlich schneller vor sich. Dämpfenden Einfluss hat wiederum der Bewuchs mit Bäumen oder Sträuchern. Eine von senkrecht fallenden festen Niederschlägen sich aufbauende Schneedecke ist weniger dicht, als eine vom Wind beeinflusste. Daher rutscht diese auch wesentlich schneller auch ohne herrschendes Tauwetter in sich zusammen. Die Niederschlagsart (nasse oder trockene, große oder kleine Flocken, Graupel, Schneegriesel und Eiskörner) spielt letztlich auch noch eine nicht unwesentliche Rolle. Und nun die Kombinationen all dieser Einflussfaktoren, deren Anteile immer anders gemischt sind, machten das Finden der richtigen Auswahl und Anzahl der Standorte für die Schneehöhenmessung recht schwierig. Das Plateau und das direkt angrenzende Umfeld mit Zufahrtsstraße Schneisen und Skipisten scheiden dazu generell aus. Weil der Fichtelberg weitestgehend bewaldet ist, wurden die Messungen dort vorgenommen, wo der Baumbestand nicht zu dicht und nicht zu hoch war. In den 1940er Jahren waren es 30 Einzelmessungen jeweils 10 Messungen in drei Himmelsrichtungen. Ab 1951 wurde auf 40 Einzelmessungen pro Haupthimmelsrichtung übergegangen und zusätzlich ein Standschneepegel zum Vergleich errichtet. Das Problem der Handschneepegelmessungen war, dass vor allem bei Schneehöhen ab einem Meter kaum feststellbar war, ob man eine Zwischeneisdecke erwischt oder man bereits in den Erdboden gestochen hat. Erst mit der Errichtung von 40 Standschneepegeln ab 1990 wurde dieses Problem behoben. 2006 wurden diese auf 16 (4 pro Haupthimmelsrichtung) als ausreichend eingeschätzt und entsprechend reduziert.

Zahl der Tage mit Schneedecke

Ein Tag mit Schneedecke wird bezeichnet, wenn die Schneedecke geschlossen oder durchbrochen ist. Die Schneedeckenanteile unter 50 % werden als Schneeflecken bezeichnet und erhalten keine Zuordnung eines

Schneehöhenwertes. Sinkt der Schneedeckenanteil unter 10 %, dann werden diese Bestandteile als Schneereste definiert.

Zur Auswertung der 100-jährigen Messreihe 1916-2015 von der Wetterwarte Fichtelberg wurden nicht die Kalenderjahre, sondern die einzelnen Winter betrachtet. Hier eine Ergebnisauswahl:

- 100-jährige durchschnittliche Zahl der Tage mit Schneedecke 1916/17 bis 2014/15: 166,7,
- 30-jährige durchschnittliche Zahl der Tage mit Schneedecke 1920/21 bis 1949/50: 155,1,
- 30-jährige durchschnittliche Zahl der Tage mit Schneedecke 1950/51 bis 1979/80: 178,8,
- 30-jährige durchschnittliche Zahl der Tage mit Schneedecke 1980/81 bis 2009/10: 167,2.

Die meisten Tage mit Schneedecke wurden im Winter 1964/65 mit 211 und die wenigsten Tage 1917/18 mit nur 87 beobachtet.

Der mittlere Beginn einer Schneedecke ist der 18.10., der früheste wurde am 04.09.2007 und der späteste Beginn am 02.12.1920 festgestellt.

Das mittlere Ende einer Schneedecke ist der 12.05., das früheste wurde am 11.04.1934 und das späteste Ende am 17.06.1928 festgestellt.

Betrachtet man die Entwicklung der Zahl der Tage mit Schneedecke über den gesamten 100-Jahre-Zeitraum hinweg in mehr oder weniger auflösenden Grafiken, dann zeigt sich in grober Auflösung immer ein kontinuierlicher Anstieg bis in die 1970er Jahre hinein und von da an ein ebenso kontinuierlicher Abstieg allerdings nicht bis zum Ausgangsniveau. Die Kurve des Beginnes der Tage mit Schneedecke lässt keinen Trend erkennen. Das normale Auf und Ab in der Schwankung zeigt von 1916 bis heute keine Auffälligkeiten. Auch die Kurve für das Datum des Endes der Schneedecke lässt keinen Trend erkennen. Die Schwankungsbreite ist aber deutlich größer, als das bei der Kurve für das Datum beim Beginn der Schneedecke der Fall ist.

Eine parallele Abhängigkeit zur Temperaturentwicklung für den gleichen Zeitraum scheint beim Betrachten dieser beiden Auswertungen ausgeschlossen.

Schneedeckenbetrachtung

Schneedecke und Neuschnee der 100-jährigen Messreihe

Von jedem der 365 (366) Kalendertage wurde das 100-jährige Mittel gebildet und in einem Säulendiagramm dargestellt. Damit erhält man einen nahezu optimal geglätteten Jahresverlauf, in welchem die Singularitäten deutlich hervortreten. Beginnend im September wo Einzelereignisse sich über die 100 Jahre unterschiedlich in diesem Monat verteilen, ist noch kein Anstieg erkennbar. Erst ab dem 10. Oktober beginnt er, wird kontinuierlich steiler bis er vom 12. bis zum 14. November von 9,7 auf 9,0 cm leicht abfällt. Von da an erfolgt ein immer steiler werdender Anstieg bis zum 28. Dezember mit 51,7 cm und dem Abfall bis zum 30. Dezember auf 50,5 cm (Jahreswechsellautwetter). Vorher erfolgt pünktlich zu Heiligabend ein Stillstand des Anstiegs und hat am 23. und 24. Dezember jeweils 49,0 cm (Weihnachtstauwetter). Mit dem 31.12. steigt die Kurve erneut steil an und erreicht erst wieder ein Plateau am 30. Januar. Am 06. Februar steigt die Kurve erneut kontinuierlich bis zu ihrem Jahresmaximum von 101,8 cm am 24. Februar an. Danach erfährt sie einen leichten Abfall auf 97,6 cm am 6. März. Ab da steigt diese wieder leicht an und erreicht den zweiten Gipfel mit 100,4 cm am 12. März. Danach geht es erst flach dann immer steiler abwärts vom 31. März bis 6. April, so dass die Schneedecke innerhalb dieser 6 Tage von 78,7 auf 62,3 cm im steilsten Abschnitt somit 16,4 cm an Höhe verliert. Erst am 22. April wird das Abschmelzen so abgebremst, dass eine deutliche Abflachung bis hin zum 25. April mit nur 2,9 cm Schneedeckenverlust stattfindet. Jetzt geht es wieder erneut steil bergab. Mit dem 9. Mai läuft die Kurve horizontal aus. Insgesamt betrachtet, braucht es für den durchschnittlichen Schneedeckenaufbau von 100 cm zirka 135 Tage, deutlich länger als das Abschmelzen einer gleichdicken Schneedecke, wofür nur zirka 80 Tage notwendig sind.

Zur Verdeutlichung der 100-jährigen durchschnittlichen Schneedeckenaufbau- und Schneedeckenabschmelzentwicklung wurden täglich die Differenzen zum Vortag errechnet und in der Abbildung 1

dargestellt. Neben den zu erwartenden Schwankungen fällt eines sofort ins Auge. Der mittlere größte Schneedeckenzuwachs ist für den Fichtelberg nicht, wie es eine Bauernregel formuliert Sankt Dorothee (6. Februar) hier nur mit +1,11 cm, sondern deutlich über dem Doppelten liegend, der 6. Dezember mit +2,67 cm. Mit dem 6. Februar beginnt allerdings nach 7 Tagen Neuschneeflaute der Zeitraum, der deutlich zum Gipfelpunkt der Schneehöhe am 24. Februar strebt. Eine weitere Auffälligkeit ist der 19. Januar mit seinem zweithöchsten Schneedeckenzuwachs von +2,14 cm. Aber das Besondere ist, dass unmittelbar nur ein Tag später, der 20. Januar der Tag ist, der nach dem 30. Dezember das stärkste Schrumpfen der Schneedecke mit -0,65 cm im Hochwinter zeigt. Erst ab dem 26. Februar beginnt die Schneedecke über mehrere Tage hinweg abzuschmelzen. Ein durchgängiges Abschmelzen der Schneedecke tritt mit dem 15. März ein und endet erst am 22. Mai. Das Datum mit dem stärksten Abschmelzen der Schneedecke innerhalb 24 Stunden ist der 22. April mit 3,32 cm, wobei hier ein ähnliches Phänomen wie oben auftritt, dass nur einen Tag später, am 23. April, das geringste Zusammenrutschen der Schneedecke mit nur 1,32 cm zu verzeichnen ist. Die ab dem 23. Mai zu beobachtenden geringen Schneedeckenzuwächse bis zum 16. Juni lassen sich durch kurzzeitige und markante Einzelereignisse erklären.

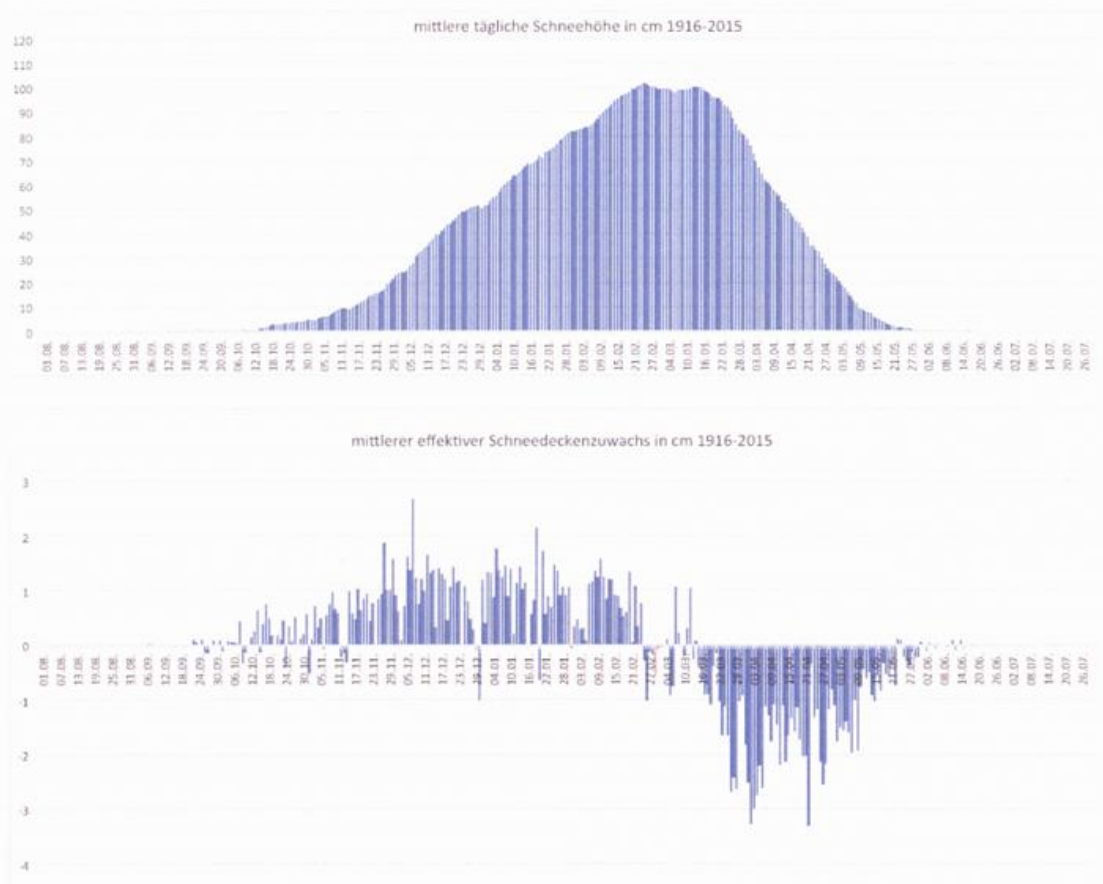


Abbildung 1: Mittlere tägliche Schneehöhe vom Fichtelberg von 1916 bis 2015 und deren Differenzen zum Vortag.



Abbildung 2: 30-jährige gemittelte tägliche Schneehöhen und die jeweiligen täglichen Differenzen zwischen den drei Zeitabschnitten 1921 bis 1950, 1951 bis 1980 und 1981 bis 2010.

Schneedeckenentwicklung anhand der Zeiträume 1921-1950, 1951-1980 und 1981-2010

Mit der Unterteilung des Gesamtzeitraumes in die sich dafür eignenden drei 30-jährigen Zeitabschnitte ergaben sich Messreihen, die sich deutlich voneinander unterscheiden (Abbildung 2). Mit den Betrachtungen im September beginnend, sind aufgrund der geringen Häufigkeit von Einzelereignissen die drei Kurven nahezu horizontal und kaum auffällig. Erst ab 13. Oktober beginnen alle drei Zeitabschnitte mit einem leichten Anstieg, wobei einmal der eine oder der andere „die Nase vorn hat“.

Erst mit dem 14. November fällt der erste Zeitabschnitt der Jahre 1921 bis 1950 beim Schneedeckenzuwachs hinter den beiden späteren Zeitabschnitten zurück. Mit dem 14. November holt Zeitabschnitt I den III. ein und beide steigen danach nahezu deckungsgleich bis zum 24. Februar, jeder seinem Gipfelpunkt entgegen. Für den jüngsten Zeitabschnitt bleibt das auch das Maximum mit 98,33 cm bevor reichlich zehn Tage später der zweite Gipfel mit 98,23 cm nur etwas niedriger ausfällt. Ein steter Abfall geht ab dem 25. März in einen Steilabfall über. Erst vom 10. bis zum 16. April ist eine deutliche Abflachung zu erkennen. Danach geht es erneut steil mit der Schneedeckenhöhe bergab und am 9. Mai ist sie nahezu abgetaut. Obwohl der Zeitabschnitt I der Jahre 1921 bis 1950 wesentlich später beim Aufbau der Schneedecke im zweiten Gipfelpunkt am 12. März mit 102,5 cm sein Maximum erreicht, fällt er danach umso steiler ab, so dass er bereits am 19. März die Kurve des Zeitabschnittes III schneidet und bis zum Ende im Mittel zirka fünfzehn Tage eher abgeschmolzen ist. Der Zeitabschnitt I zeigt ein ausgeprägtes Weihnachtstauwetter, wobei die beiden anderen vom 24. bis 26. Dezember überhaupt keine Auffälligkeiten zeigen, dafür aber deutlich das Silvestertauwetter abbilden, wo beim dritten Zeitabschnitt nur ein Plateaubereich in Erscheinung tritt. Bereits ab dem 10. Dezember baut sich die Schneedecke im Zeitabschnitt II deutlich schneller auf, so dass die Differenz zu den beiden anderen im Maximum zirka 50 cm beträgt. Der Abtauprozess hat sich so um genau einen Monat nach hinten verschoben. Im Vergleich des Erreichens der Schneehöhe von 40 cm ist diese Schwellenwertunterschreitung schon am 6. April im I., am 20. April im III. und erst am 6. Mai im II. Zeitabschnitt erreicht worden. Danach schrumpfen diese Vorsprünge und erreichen Ende Mai weitestgehend, wenn praktisch keine Schneedecke mehr vorhanden ist, nahezu gleichzeitig den „Auslauf“. Vor allem von Mitte März bis Anfang Mai lag im Durchschnitt in den Jahren von 1951 bis 1980 rund 40 cm mehr Schnee als im Vergleichszeitraum von 1921 bis 1950, dreißig Jahre, in denen viele schneereiche Frühlinge zu beobachten waren. Das Maximum entspringt hier am Ende eines 33 Tage langen Plateaus von nahezu gleichbleibenden 120 cm mit 121,63 cm am 21. März. Erst im jüngsten, dem III. Zeitabschnitt ist eine Umkehr vom späten zum früheren Abtauprozess zu erkennen. Das Unterschreiten des 40 cm Schwellwertes tritt hier bereits wieder zirka 15 Tage früher ein, als das in den vorhergehenden dreißig Jahren der Fall war.

Zusammenfassung

Der mittlere Zeitabschnitt der Jahre 1951 bis 1980 ist für den Fichtelberg der schneereichste und hebt sich deutlich gegenüber den beiden anderen ab. Selbst das Abziehen des zirka 20 cm Schneehöhenüberschusses würde nicht ausreichen, dass dieser dann ein ähnliches Niveau im Abschmelzprozess erreichte, dass eines der beiden anderen entspräche. Es bleibt dabei, dass im Zeitraum von 1951 bis 1980 sowohl deutlich mehr Schnee lag, als auch, dass der Abtauprozess später einsetzte und auch später endete. Bemerkenswert bleibt, dass, obwohl die Temperaturen vor allem in den letzten Jahrzehnten deutlich nach oben zeigen, die Schneedecke der Jahre von 1981 bis 2010 vom ungefähr gleichen Ausgangsniveau beginnend fünfzehn Tage später abtaut, als das in den Jahren von 1921 bis 1950 der Fall war. Eine Untersuchung der konkreten Niederschlagsereignisse, deren Verteilung innerhalb der Jahre mit den direkt dazugehörigen Temperaturen sollte die Ursachen aufklären. Die Jahresniederschlagsmengen innerhalb der letzten 100 Jahre haben sich hingegen nur unwesentlich geändert und können nicht den Grund der schneereichen Winter der betrachteten Jahre von 1951 bis 1980 beschreiben.

2.6 Sondermessungen auf dem Fichtelberg: Die chemische Zusammensetzung von Nebelwässern

Stephanie SCHÜTTAUF

Bedingt durch ihre exponierte Lage kommt der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes auf dem Fichtelberg (Sachsen) eine besondere Bedeutung zu. Neben den Messungen vielfältigster meteorologischer Parameter konnten an dieser Station zusätzlich eine Reihe von Sondermessungen durchgeführt werden. Dazu zählt zum Beispiel die Beprobung von Nebelereignissen. Zwischen 2009 und 2011 wurden mit Hilfe passiver Nebelsammler wässrige Proben von insgesamt 43 Nebelereignissen genommen. Diese wurden für die Jahre 2009 und 2010 zunächst auf pH-Wert, Leitfähigkeit und die ionische Zusammensetzung hin untersucht. In 2011 wurde das Messprogramm um 5 zusätzliche Substanzgruppen erweitert: hinzu kamen der wasserlösliche organische Kohlenstoff (WSOC, engl.: water soluble organic carbon), die kurzkettigen und die funktionalisierten Dicarbonsäuren, die Zucker und die Nitrophenole. Die Erweiterung des Messprogramms erfolgte auf Grundlage der immanenten Bedeutung der aufgeführten Stoffgruppen für die Atmosphäre. Im Bereich der Ionen dominierten das Nitrat und das Ammonium. Die organische Zusammensetzung wurde mengenmäßig durch die Zucker bestimmt.

Einleitung

Die Wetterstation auf dem Fichtelberg gehört seit vielen Jahren zum Messnetz des Deutschen Wetterdienstes. Neben den typischen, meteorologischen Parametern wurden hier auch diverse Sondermessungen durchgeführt. Als Beispiel sei die Beprobung von Nebelereignissen zwischen 2009 und 2011 genannt.

Nebel ist ein Phänomen, welches atmosphärenchemisch von großer Bedeutung ist. Seine Flüssigphase ermöglicht beziehungsweise beschleunigt chemische Reaktionen, die in der Gasphase nicht oder nur sehr langsam ablaufen. Seine Mikrostruktur (hohes Oberflächen zu Volumenverhältnis) ermöglicht eine Anreicherung von Spurenstoffen, die zu erhöhten Depositionen von Nähr- und Schadstoffen in Ökosysteme führen können (WRZESINSKI und KLEMM 2000). Toxische Stoffe, die für die Gesundheit der Menschen von Bedeutung sind, können ebenfalls angereichert werden. Damit beeinflusst der Nebel beziehungsweise seine chemische Zusammensetzung die Umwelt immanent.

Bisherige Untersuchungen zur Nebelwasserchemie (zum Beispiel MROSE 1961, ZIER 1992, ACKER et al. 1998, FUZZI et al. 2002, ZIMMERMANN und ZIMMERMANN 2002, LANGE et al. 2003) beschäftigten sich schwerpunktmäßig mit der Bestimmung von pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit sowie mit der Ermittlung der anorganischen Zusammensetzung von Nebel. Diese Arbeit betrachtet neben den An- und Kationen hauptsächlich die organische Zusammensetzung der Nebelwässer. Es wurden Stoffe des WSOC (engl.: water soluble organic carbon), der kurzkettigen Dicarbonsäuren, der funktionalisierten Dicarbonsäuren, der Zucker und der Nitrophenole untersucht. Im Folgenden wird ein Überblick über das Vorkommen der genannten Stoffgruppen und deren Verhalten in der Atmosphäre gegeben.

Methoden

Beprobt wurden Nebelereignisse aus den Jahren 2009 bis 2011. Die Probenahme selbst erfolgte an der Station des Deutschen Wetterdienstes auf dem Fichtelberg in Oberwiesenthal (1214 m NN, 50°25'N; 12°57'E, Zentrales Erzgebirge). Verwendet wurden passive Nebelsammler nach dem Impaktorprinzip (Zier 1992). Insgesamt lagen 43 Proben für die Analyse vor. Untersucht wurden Ionen, der WSOC, kurzkettige Dicarbonsäuren, funktionalisierte Dicarbonsäuren, Zucker und Nitrophenole.

Anionen und Kationen wurden mit Hilfe der Ionenchromatographie (DIONEX DX 120 für Anionen und Metrohm Ion Chromatograph 690 für Kationen) bestimmt; der WSOC wurde mit Hilfe eines Shimadzu TOC-V CPH/HCl analysiert. Zur Bestimmung der kurzkettigen Dicarbonsäuren kam eine Kapillarelektrophorese mit UV-Detektor (Spectra Phoresis 1000 Instrument, Thermo Separation Products, TSP) und für die funktionalisierten Dicarbonsäuren eine Kapillarelektrophorese mit gekoppeltem Massenspektrometer (CE: Agilent3D CE Instrument, MS: ESQUIRE 3000+ ion trap mass spectrometer ITMS, Bruker) zur

Anwendung. Zur Analyse der Zucker wurde die „High performance anion-exchange chromatography with pulsed amperometric detection“ (HPAEC-PAD; ICS 3000 System von Dionex) genutzt. Die Nitrophenole wurden ebenfalls mit Hilfe der Kapillarelektrophorese mit gekoppeltem Massenspektrometer untersucht.

Ergebnisse und Diskussion

Anorganische Zusammensetzung der Nebelwässer

Die anorganische Zusammensetzung der Nebelwässer auf dem Fichtelberg wurde vorrangig durch die Gruppe der Ionen bestimmt. Analysiert wurden jeweils fünf An- und Kationen. Die Basis bildeten die Nebelwasserproben aus den Jahren 2009, 2010 und 2011. In Abbildung 1 sind die Konzentrationsausprägungen der Ionen für die einzelnen Messperioden dargestellt. Für 2010 und 2011 ist eine klare Dominanz des Nitrats und des Ammoniums zu erkennen. Daran an schloss sich das Sulfat. In 2009 erreichten zusätzlich noch das Chlorid und das Natrium hohe Konzentrationen.

Die Quellen der Ionen sind bestens bekannt. Daher wird auf eine Ausführung dazu an dieser Stelle verzichtet. Die Anströmungsrichtungen, die zu den jeweiligen Konzentrationen der Ionen in den Nebelwässern beigetragen haben, sind in Abbildung 2 dargestellt. Das Auftreten der Maximalkonzentrationen in Zusammenhang mit diesen Luftmassenherkünften war über die drei Messperioden sehr heterogen verteilt: in 2009 trugen alle drei Anströmungen (SE, W und NW) zu den Maxima der Ionen bei; in 2010 waren es die Luftmassen aus N, SE, W und NW und in 2011 die aus E, SE, SW und W.

Zum Analyseprogramm zählte des Weiteren eine statistische Untersuchung der Daten, unter anderem mit Hilfe der Spearman-Rangkorrelationsanalyse. Ziel war es, genauere Informationen über die Herkunft und das Verhalten der einzelnen Stoffspezies in der Atmosphäre zu erhalten. Dazu wurden die Ionen den meteorologischen Parametern und einigen Schadstoffen (SO_2 und O_3) gegenüber gestellt. Im Hinblick auf die meteorologischen Parameter fanden sich in allen drei Messperioden keine statistisch signifikanten Korrelationen. Gegenüber den Schadstoffen ergaben sich nur für den Datensatz aus 2011 statistisch signifikante Zusammenhänge. Diese bestanden für Chlorid – Ozon ($r = 0,65$, $n = 11$), Nitrat – Ozon ($r = 0,64$, $n = 11$), Natrium – Ozon ($r = 0,63$, $n = 11$) und Calcium – Ozon ($r = 0,67$, $n = 11$). Die genaue Ursache für diese Korrelationen ist noch unklar.

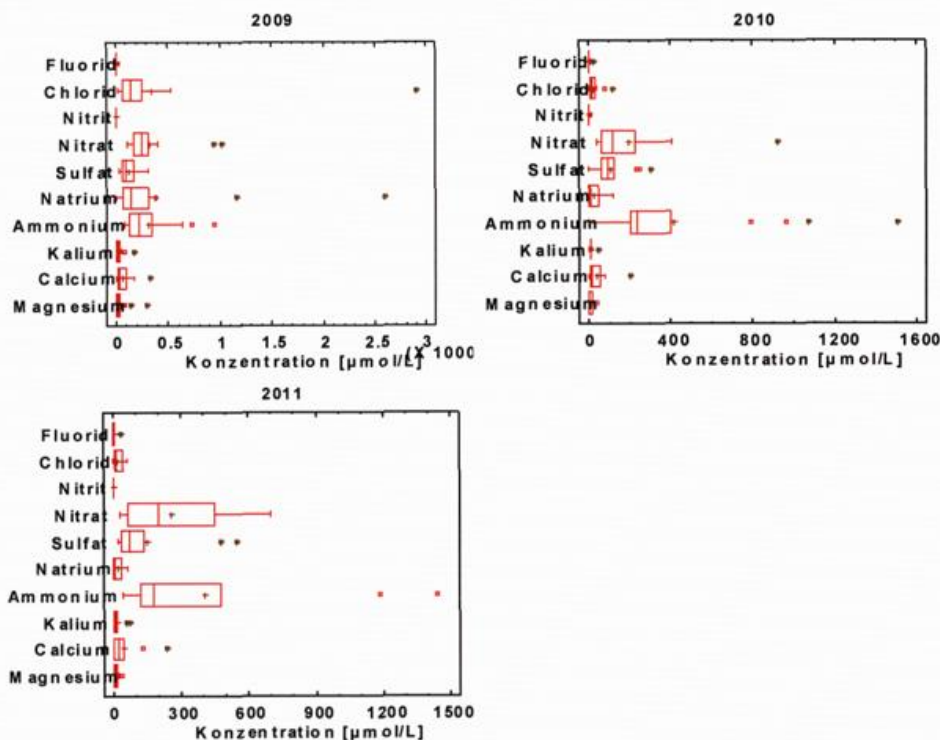


Abbildung 1: Box-Whisker-Plots der An- und Kationen getrennt für 2009, 2010 und 2011.

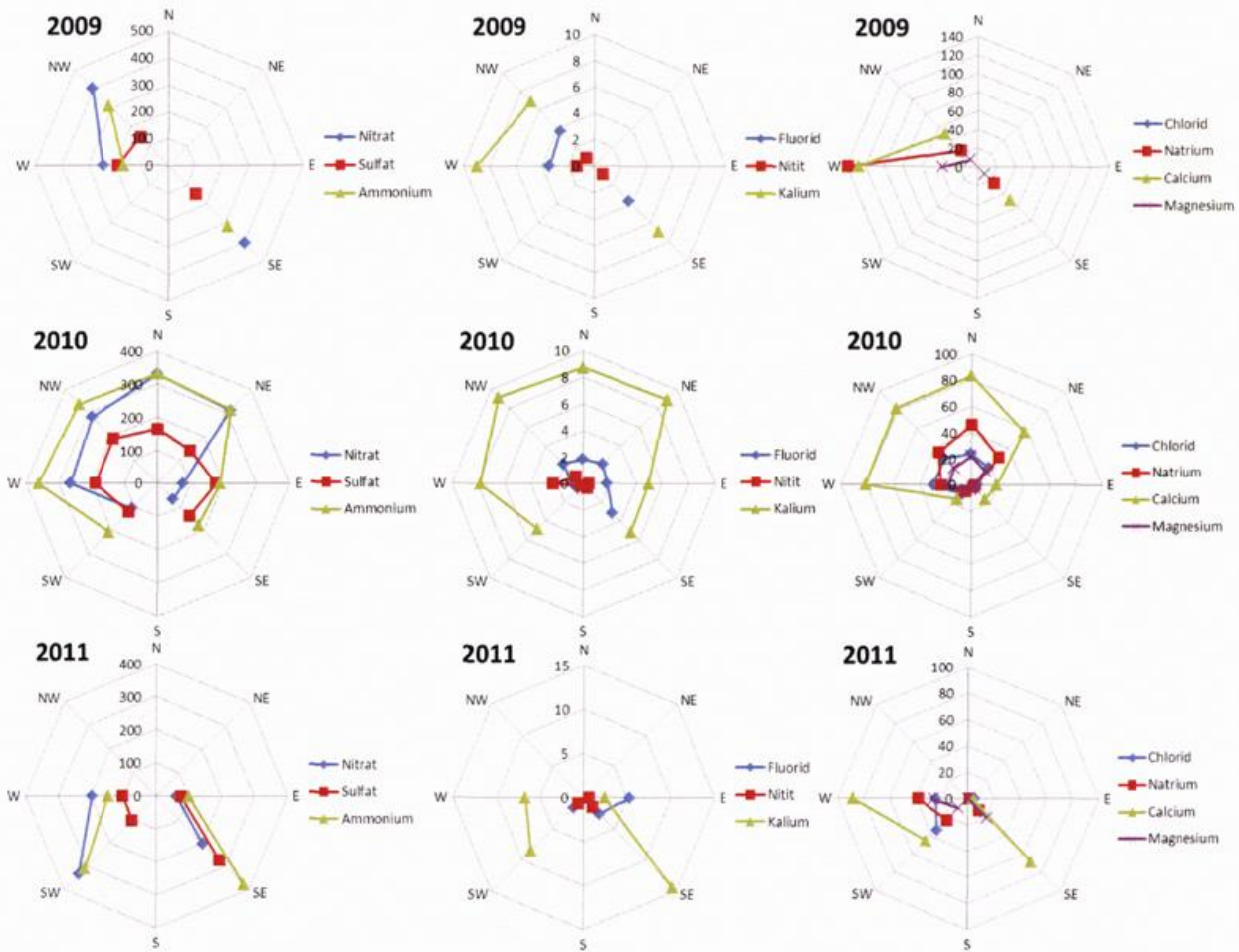


Abbildung 2: Konzentrationen [$\mu\text{mol/L}$] der An- und Kationen in Abhängigkeit der Anströmung, getrennt nach Jahren.

Organische Zusammensetzung der Nebelwässer

Die Untersuchung der organischen Bestandteile erfolgte auf Grundlage der Nebelwasserproben von 2011.

WSOC

Ein Teil des in der Atmosphäre vorkommenden Kohlenstoffs ist wasserlöslich. Diese Fraktion wurde für die Nebelwässer als erste Gruppe der organischen Bestandteile näher untersucht. Unter der Bezeichnung „water-soluble organic carbon“ (WSOC) wurde der wasserlösliche Anteil des totalen Kohlenstoffs (WSTC, engl.: water-soluble total carbon), der des organischen (WSTOC, engl.: water-soluble total organic carbon) und der des anorganischen Kohlenstoffs (WSIC, engl.: water-soluble inorganic carbon) bestimmt. Bei dem WSTC handelt es sich um einen Summenparameter, welcher sich aus den Werten des WSTOC und des WSIC zusammensetzt.

Abbildung 3 zeigt einen Überblick über die Konzentrationen der einzelnen Kohlenstoffarten am Fichtelberg. Es wurden Mediankonzentrationen von 5,7 mg/L für den WSTC, 5,6 mg/L für den WSTOC und 0,21 mg/L für den WSIC erreicht. Als mögliche Quellen kommen für den anorganischen Kohlenstoff primäre Emissionen, die zum Beispiel aus nicht vollständigen Verbrennungsprozessen stammen (KAUL et al. 2011), in Frage. Der organische Kohlenstoff kann sowohl primär emittiert (POC: engl.: primary organic carbon) als auch sekundär in der Atmosphäre (SOC, engl.: secondary organic carbon) gebildet werden. Letzteres steht mit so genanntem gas-to-particle-partitioning beziehungsweise -conversion geringflüchtiger Stoffe (VOC, engl.: volatile organic compounds) in Verbindung.

Das Kohlenstoffbudget wurde maßgeblich durch Anströmrichtungen aus E, SE, SW, W und NW bestimmt. Die Maxima für den WSTC und den WSTOC wurden bei SW-Anströmung, das für den WSIC bei SE-Anströmung erreicht.

Unter Verwendung der Spearman-Rangkorrelationsanalyse wurde der WSOC den meteorologischen Parametern (Temperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Sichtweite), einigen Schadstoffen (SO₂ und O₃) und den Ionen gegenübergestellt. Im Hinblick auf die meteorologischen Parameter und die Schadstoffe zeigte der WSOC keine statistisch signifikanten Zusammenhänge (verwendetes Signifikanzniveau: $p \leq 0,05$). Gegenüber den Ionen fanden sich Korrelationen für den WSTC und den WSTOC. Die zugehörigen Korrelationskoeffizienten sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Für den WSTC und den WSTOC wurden jeweils die gleichen Korrelationskoeffizienten ermittelt. Dies ergibt sich aus der Ableitung des WSTC aus dem WSTOC. Als mögliche Ursachen für die Korrelationen kommen sowohl gemeinsame Quellen (zum Beispiel Korrelation zwischen WSTC/WSTOC und Sulfat/Chlorid) als auch eine gemeinsame Stoff-Phasenverteilung (zum Beispiel Korrelation WSTC/WSTOC und Ammonium zeichnet sich durch eine gute Hygroskopizität aus; daher agiert es oftmals als Wolkenkondensationskeim und kommt vermehrt in der flüssigen Phase vor) in Betracht.

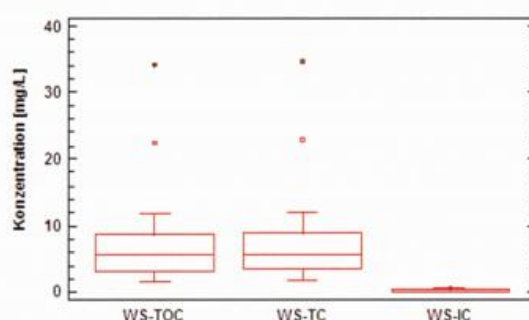


Abbildung 3: Box-Whisker-Plot für WSTC, WSTOC und WSIC.

Tabelle 1: Korrelationen von WSTC und WSOC gegenüber den Ionen für die Station Fichtelberg.

	WSTC	WSTOC
Chlorid	0,62	0,62
Sulfat	0,63	0,63
Natrium	0,80	0,80
Ammonium	0,65	0,65
Kalium	0,75	0,75
Calcium	0,69	0,69

Kurzkettige Dicarbonsäuren

Die erste Stoffgruppe die nachweislich zum Kohlenstoffgehalt der Nebelphase beitrug, war die der kurzkettigen Dicarbonsäuren beziehungsweise deren Salze. Untersucht wurden die Oxalsäure (Oxalat), die Tartronsäure (Tartronat), die Malonsäure (Malonat), die Ameisensäure (Formiat), die Weinsäure (Tartrat), die Äpfelsäure (Malat), die Bersteinsäure (Succinat), die Glutarsäure (Glutarat), die Essigsäure (Acetat) und die Glycolsäure (Glycolat). An der Station Fichtelberg konnten insgesamt fünf der aufgeführten Säuren beziehungsweise deren Salze detektiert werden: Oxalat, Malonat, Formiat, Acetat und Glycolat. Abbildung 4 zeigt die zugehörigen Konzentrationen. Die höchste Mediankonzentration erreichte das Formiat gefolgt vom Acetat.

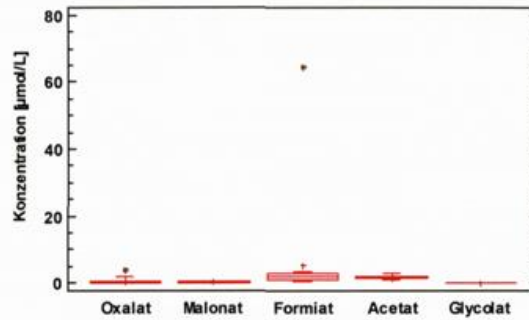


Abbildung 4: Box-Whisker-Plots der kurzkettigen Dicarbonsäuren.

Als Quellen kurzkettiger Dicarbonsäuren werden in der Literatur sowohl direkte Emissionen als auch photochemische Prozesse diskutiert (zum Beispiel VAN PINXTEREN 2002). Erstere umfassen Quellen biogener und anthropogener Art. Biomasseverbrennungen, Tabakrauch, Emissionen chemischer Industrien und Konservierungsfabriken, Plastikverbrennung sowie Tierabfälle sind einige Beispiele für anthropogene Emissionen (CHEBBI und CARLIER 1996). Primäre biogene Emissionen stammen hauptsächlich aus der Vegetation. Zusätzlich kommen Bakterien (Quellen in Form von Stoffwechselprodukten) und formizine Ameisen in Betracht. Bei der Untersuchung photochemischer Prozesse als potentielle Quellen kurzkettiger Carbonsäuren sind vor allem die Vorläuferstoffe der Säuren innerhalb der gasförmigen Phase anzuführen. Diese Vorläuferstoffe umfassen zum Beispiel Kohlenwasserstoffe und deren Abbauprodukte. Das Verhalten dieser Stoffe sowie deren Phasenübergang (zu partikulär und wässrig) sind aufbau- und eigenschaftsabhängig. Als wichtige photochemische Prozesse sind unter anderem die Oxidation von Olefinen durch Ozon sowie Reaktionen mit organischen Peroxy- und Hydroxymethylperoxyradikalen zu nennen.

Die Anströmungsrichtungen die maßgeblich zum Budget der kurzkettigen Dicarbonsäuren beitragen, waren die Luftmassenanströmungen aus E, SE, SW, W und NW. Maximalkonzentrationen wurden für das Oxalat, das Formiat, das Malonat und das Glycolat bei E erreicht. Für das Acetat zeigten sich die höchsten Konzentrationen bei W.

Wie zuvor der WSOC wurden auch die kurzkettigen Dicarbonsäuren einer statistischen Untersuchung unterzogen. In Zusammenhang mit den meteorologischen Parametern konnten keine statistisch signifikanten Korrelationen gefunden werden. Gegenüber den Schadstoffen (SO_2 , O_3) fand sich eine Beziehung für das Oxalat: Oxalat SO_2 ($r = 0,77$, $n = 12$). Dahinter wird eine gemeinsame Quelle in Form von Verbrennungsprozessen vermutet. Sowohl gegenüber den Ionen als auch im Hinblick auf den WSOC konnten ebenfalls keine statistisch signifikanten Zusammenhänge gefunden werden.

Funktionalisierte Dicarbonsäuren

Die zweite Stoffgruppe die zum Kohlenstoffgehalt des Nebels beitrug, war die der funktionalisierten Dicarbonsäuren. Der Begriff „funktionalisiert“ beschreibt in diesem Zusammenhang die Ergänzung der Säurenstruktur durch zusätzliche Gruppen (zum Beispiel Oxogruppe, = O). Untersucht wurden 28 verschiedene Säuren. Aufgrund struktureller Ähnlichkeiten wurden diese zu sechs Gruppen zusammengefasst: aliphatisch, funktionalisierte Monocarbonsäuren, aromatische Monocarbonsäuren, nitrierte, aromatische Monocarbonsäuren, aliphatisch, nichtfunktionalisierte Dicarbonsäuren, aliphatisch, funktionalisierte Dicarbonsäuren und aromatische Dicarbonsäuren. Aufgrund des begrenzten Umfangs wird an dieser Stelle nicht auf die einzelnen Säuren sondern auf das Vorkommen und das Verhalten der gebildeten Gruppen eingegangen. Abbildung 5 zeigt in diesem Zusammenhang die Konzentrationsausprägung der einzelnen Gruppen am Fichtelberg. Dominierend waren die aliphatisch funktionalisierten Monocarbonsäuren, gefolgt von aliphatisch funktionalisierten Dicarbonsäuren und den aliphatisch nichtfunktionalisierten Dicarbonsäuren.

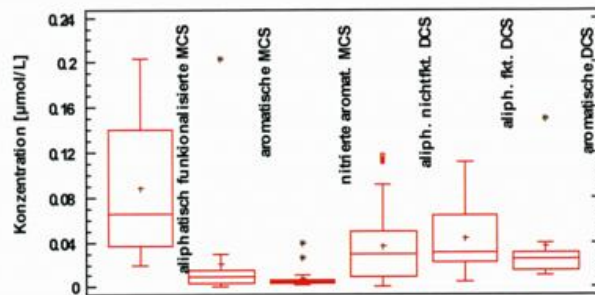


Abbildung 5: Box-Whisker-Plots für die funktionalisierten Dicarbonsäuren.

Das Vorkommen der Säuren bestimmte sich primär nach deren Quellen. Da jedoch ein Großteil der hier genannten Säuren, nach aktuellem Kenntnisstand, nicht oder nur teilweise Gegenstand bisheriger Forschungen waren, treten in diesem Zusammenhang noch erhebliche Unsicherheiten auf. Es wird jedoch vermutet, und diese Vermutungen haben sich bereits durch erste Analysen bestätigt, dass für die funktionalisierten Dicarbonsäuren ähnliche Quellen ausschlaggebend sind wie für die kurzkettigen Dicarbonsäuren. Neben direkten Emissionen aus Verbrennungsprozessen scheinen besonders photochemische Abläufe von erheblicher Bedeutung zu sein.

Hinsichtlich der Anströmungen, welche wesentlich zum Säurevorkommen beitragen, ergab sich eine Dreiteilung. Die aliphatisch funktionalisierten Monocarbonsäuren und die aromatischen Monocarbonsäuren erreichten ihre Maxima bei Luftmassen aus E. Die nitrierten aromatischen Monocarbonsäuren, die aliphatisch funktionalisierten Dicarbonsäuren und die aromatischen Dicarbonsäuren bei SW. Die aliphatisch nichtfunktionalisierten Dicarbonsäuren zeigten ihre Maximalkonzentrationen bei Luftmassen aus NW. Weitere Anströmrichtungen, die zum Säurevorkommen beitragen kamen aus SE und W. Einen Überblick über die Säurenkonzentrationen in Abhängigkeit der Anströmung bietet Abbildung 6.

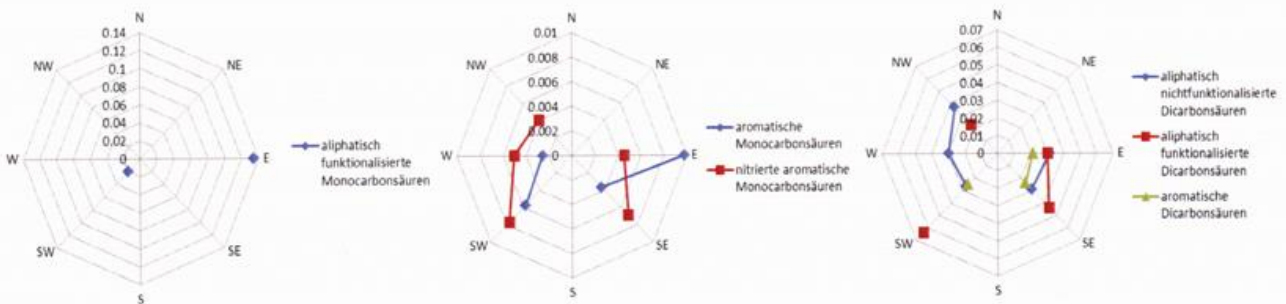


Abbildung 6: Konzentrationen der funktionalisierten Dicarbonsäuren [µmol/L] in Abhängigkeit der Anströmung.

Die statistische Analyse der funktionalisierten Dicarbonsäuren ergab gegenüber den meteorologischen Parametern keine statistisch signifikanten Zusammenhänge (Signifikanzniveau $p \leq 0,05$). Gleiches galt bei der Betrachtung der Säuren in Zusammenhang mit den Schadstoffen (O_3 , SO_2) und den Ionen. Gegenüber dem WSOC konnte eine Verbindung für die 3-Nitrosalicylsäure und den WSIC ($r = 0,70$, $n = 10$, Gruppe der nitrierten aromatischen Monocarbonsäuren) und für die Sebacinsäure und den WSIC ($r = 0,90$, $n = 8$, Gruppe der aliphatisch nichtfunktionalisierte Dicarbonsäuren) gefunden werden. Beide Korrelationen werden als Hinweis auf gemeinsame Quellen verstanden.

Zucker

Unter den bisher betrachteten organischen Stoffgruppen sind die Zucker die Gruppe, die mengenmäßig am meisten zum Kohlenstoffgehalt der Nebelwässer am Fichtelberg beitrug. Untersucht wurden insgesamt vierzehn verschiedene Verbindungen, die zu den Zuckern, den Zuckeralkoholen und den Anhydrozuckern gehören. Fünf dieser Verbindungen konnten für die Nebelwässer am Fichtelberg nachgewiesen werden. Dazu zählen Levoglucosan, Arabitol, Mannose, Glucose und Sucrose. Abbildung 7 bietet einen Überblick über die zugehörigen Konzentrationen. Die Sucrose zeigte sowohl die höchste Mediankonzentration als auch die größte Konzentrationsbreite. Daran an schlossen sich die Glucose und das Levoglucosan.

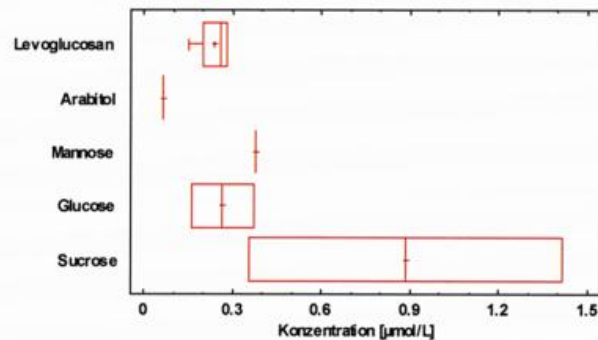


Abbildung 7: Box-Whisker-Plots der Zucker.

Die Quellen für Kohlenhydrate sind meist biogen. Für Glucose und Sucrose wird in der Literatur eine Freisetzung aus Pollen, Farnsporen und anderen Bioaerosolen diskutiert (zum Beispiel FU et al. 2010). Des Weiteren wird die Verbrennung von Biomasse aufgeführt. Diese stellt eine wichtige Quelle für die Anhydrozucker dar. Speziell für Levoglucosan kann an dieser Stelle noch die Hydrolyse oder der mikrobiellen Abbau von Kohlenhydraten angeführt werden (AGARWAL et al. 2010). Zuckeralkohole, zum Beispiel Arabitol, stammen vorwiegend aus Pilzen. Zusätzlich wurden sie auch in der Borke von Bäumen, in Zweigen und in Blättern nachgewiesen (CASEIRO et al. 2007).

Die Anströmungen, welche zum Stoffinventar der Zucker beitrugen, folgten einem breiten Spektrum: Levoglucosan trat bei Anströmungen aus E und SE auf. Arabitol konnte bei Luftmassen aus E, Mannose bei Luftmassen aus NW detektiert werden. Die Zucker Glucose und Sucrose kamen bei Anströmungen aus SW und NW vor.

Die statistische Analyse der Zucker ergab gegenüber den meteorologischen Parametern keine signifikanten Zusammenhänge. In Bezug auf die Schadstoffe (O_3 , SO_2) konnten für die Glucose und die Sucrose zwar Korrelationen nachgewiesen werden, allerdings war der zugehörige Probenumfang so gering, dass diese Ergebnisse als zufällig betrachtet wurden (zum Beispiel Glucose O_3 : $r = 1,0$, $n = 2$). Im Hinblick auf die Ionen ergaben sich ebenfalls keine statistisch signifikanten Zusammenhänge. Gegenüber den einzelnen Komponenten des WSOC ergab sich die gleiche Problematik wie gegenüber den Schadstoffen: Es konnten zwar statistisch gesicherte Korrelationen gefunden werden, jedoch war auch hier der Probenumfang zu gering (zum Beispiel Glucose WSTOC: $r = 1,0$ und $n = 2$) um relevante Aussagen treffen zu können.

Nitrophenole

Die letzte Gruppe organischer Substanzen, die innerhalb der Nebelwässer am Fichtelberg analysiert wurde, war die der Nitro- und Dinitrophenole. Insgesamt neun Verbindungen wurden genauer untersucht. Vier davon konnten innerhalb des Nebels am Fichtelberg nachgewiesen werden: das 4-Nitrophenol, das 3,2-Dinitrophenol, das 2,4-Dinitrophenol und das 3-Methyl-4-nitrophenol. Die zugehörigen Konzentrationen sind in Abbildung 8 dargestellt. Die höchsten Werte wurden für das 2,4-Dinitrophenol erreicht.

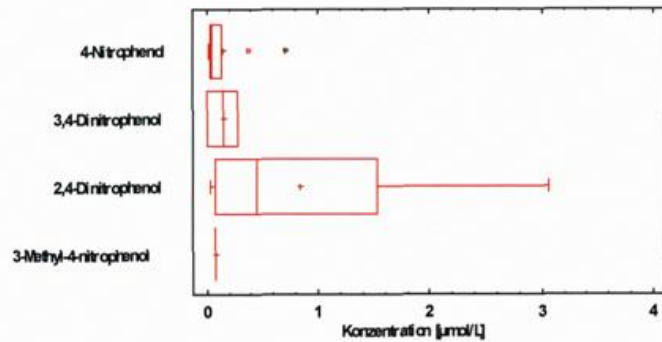


Abbildung 8: Box-Whisker-Plots der Nitro- und Dinitrophenole.

Ihren Ursprung haben die Nitro- und Dinitrophenole in Emissionen aus der Industrie, aus Farbstoffen und Sprengmitteln. Zusätzlich kommen Verbrennungsprozesse, die Verwendung von Herbiziden und Insektiziden sowie Reaktionen aromatischer Verbindungen und photochemische Reaktionen in Betracht.

Die Anströmungen, die maßgeblich zum Stoffinventar der Nitrophenole beigetragen haben, sind in Abbildung 9 zusammengefasst. Die Maximalkonzentrationen des 2,4-Dinitrophenols und des 3-Methyl-4-nitrophenols wurden unter Luftmasseneinflüssen aus SE erreicht. Das 4-Nitrophenol zeigte seine höchsten Konzentrationen bei SW, das 3,4-Dinitrophenol bei NW.

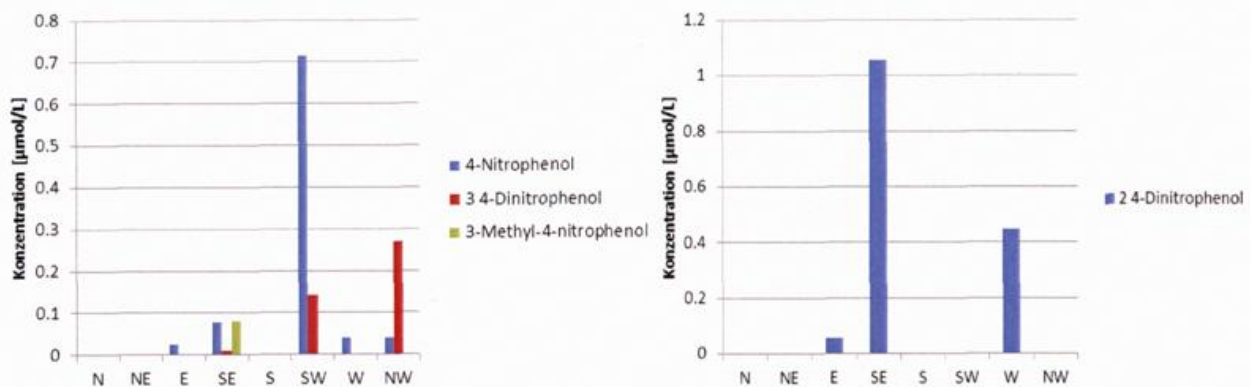


Abbildung 9: Konzentrationen der Nitro- und Dinitrophenole in Abhängigkeit der Anströmung.

Die statistische Analyse der Nitrophenole mit Hilfe der Spearman-Rangkorrelationsanalyse ergab im Hinblick auf die meteorologischen Parameter keine statistisch signifikanten Korrelationen. In Zusammenhang mit den Schadstoffen zeigte das 3,4-Dinitrophenol eine Verbindung zu Ozon ($r = 1,0$; $n = 3$). Gegenüber den Ionen fanden sich Beziehungen zwischen dem 2,4-Dinitrophenol und dem Nitrat ($r = 0,88$; $n = 6$) und dem 2,4-Dinitrophenol und dem Kalium ($r = 0,94$; $n = 6$). Diese werden als Hinweis auf Verbrennungsprozesse verstanden. Des Weiteren ergaben sich Zusammenhänge zwischen dem 3,4-Dinitrophenol und den Ionen Chlorid, Nitrit, Nitrat, Sulfat, Natrium, Ammonium, Kalium, Calcium und Magnesium. Die Korrelationskoeffizienten betragen für jeden dieser Zusammenhänge 1 bei einer Probenanzahl von 2. Daher wurden diese Beziehungen als zufällig angesehen und nicht weiter beachtet. Im Hinblick auf den WSOC zeigte sich am Fichtelberg eine Beziehung zwischen dem 3,4-Dinitrophenol und dem WSIC ($r = 1,0$; $n = 3$). Analog zu den Ionen wurde diese Beziehung nicht weiter beachtet.

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit bietet einen Überblick über die chemische Zusammensetzung der Nebelwässer am Fichtelberg. Es wurden sowohl anorganische als auch organische Bestandteile betrachtet. Ammonium, Nitrat

und Sulfat sind nach wie vor die dominierenden Ionen innerhalb der Nebelphase. Es wurden Mediankonzentrationen von bis zu 244 $\mu\text{mol/L}$ (Nitrat, 2009), 94 $\mu\text{mol/L}$ (Sulfat, 2009) und 238 $\mu\text{mol/L}$ (Ammonium, 2010) erreicht.

Zusätzlich zu den Ionen wurden die organischen Bestandteile der Nebelwässer betrachtet. Aufgrund ihrer Bedeutung für die Atmosphäre wurden der WSOC, die kurzkettigen Dicarbonsäuren, die funktionalisierten Dicarbonsäuren, die Zucker und die Nitrophenole als Untersuchungsgegenstand gewählt. Die Gruppe der Zucker trug mit 196 $\mu\text{g/L}$ mengenmäßig am meisten zum organischen Kohlenstoff bei. Daran angeschlossen sich die kurzkettigen Dicarbonsäuren mit 99 $\mu\text{g/L}$ und die funktionalisierten Dicarbonsäuren mit 68 $\mu\text{g/L}$. Den geringsten Beitrag lieferten die Nitrophenole mit 52 $\mu\text{g/L}$.

Für die Zukunft erscheint es wichtig, den organischen Bestandteilen mehr Beachtung zu schenken und aufgrund ihres Wirkspektrums erweiterte Untersuchungen anzustreben.

Literatur

- ACKER, K., MÖLLER, D., WIEPRECHT, W., KALASS, D., AUDEL, R., 1998: Investigations of ground-based clouds at the Mt. Brocken. *Fresenius J Anal Chem* 361, 59-64.
- AGARWAL, S., AGGARWAL, S.G., OKUZAWA, K., KAWAMURA, K., 2010: Size distributions of dicarboxylic acids, ketoacids, α -dicarbonyls, sugars, WSOC, oC, EC and inorganic ions in atmospheric particles over Northern Japan: implication for long-range transport of Siberian biomass burning and East Asian polluted aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10, 5839-5858.
- CASEIRO, A., MARR, I.L., CLAEYS, M., KASPER-GIEBL, A., PUXBAUM, H., PIO, C.A., 2007: Determination of saccharides in atmospheric aerosol using anion-exchange high performance liquid chromatography and pulsed amperometric detection. *Journal of Chromatography A* 1171: 37-45.
- CHEBBI, A. und CARLIER, P., 1996: Carboxylic acids in the troposphere, occurrence, sources and sinks: a review. *Atmos. Environ.* 30, 4233-4249.
- FU, P.Q., KAWAMURA, K., PAVULURI, C.M., SWAMINATHAN, T., CHEN, J., 2010: Molecular characterization of urban organic aerosol in tropical India: contributions of primary emissions and secondary photooxidation. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10 (6): 2663-2689.
- FUZZI, S., FACCHINI, M., DECESARI, S., MATTA, E., MIRCEA, M., 2002: Soluble organic compounds in fog and cloud droplets: what have we learned over the past few years? *Atmospheric Research* 64, 89-98.
- KAUL, D.S., GUPTA, T., TRIPATHI, S.N., TARE, V., COLLETT, JR. J.L., 2011: Secondary organic aerosol: a comparison between foggy and nonfoggy days. *Environmental Science & Technology* 45, 7307-7313.
- LANGE, C.A., MATSCHULLAT, J., ZIMMERMANN, F., STERZIK, G., WIENHAUS, O., 2003: Fog frequency and chemical composition to atmospheric deposition in the eastern Erzgebirge, Germany. *Atmospheric Environment* 37, 3731-3739.
- MROSE, H., 1961: Ergebnisse von Spurenstoff-Bestimmungen im Niederschlag. *Zeitschrift für Meteorologie* 15, 46-54.
- WRZESINSKY, T., KLEMM, O., 2000: Summertime fog chemistry at a mountainous site in Central Europe. *Atmospheric Environment* 34, 1487-1496.
- VAN PINXTEREN, D., 2002: Bestimmung von Dicarbonsäuren in troposphärischen Partikeln und Wolkenwasser mittels Kapillarzonenelektrophorese. Diplomarbeit an der Universität Leipzig, Fakultät für Chemie und Mineralogie.
- ZIER, M., 1992: Über die Variabilität der Spurenstoffkonzentration im Nebelwasser im Verlauf einzelner Nebelereignisse auf dem Kamm des Erzgebirges. *Meteorologische Zeitschrift, Neue Folge* 1, 221-228.
- ZIMMERMANN, L., ZIMMERMANN, F., 2002: Fog deposition to Norway Spruce stands at high-elevation sites in the eastern Erzgebirge (Germany). *Journal of Hydrology* 256, 166-175.

2.7 Ergebnisse aus 100 Jahren Klima- und Umweltbeobachtung in Radebeul-Wahnsdorf

Klima – Geschichte der Messungen

Johannes FRANKE, Eberhard FREYDANK

Auch nach der Verlegung des Königlich Sächsischen meteorologischen Instituts nach Dresden im Jahre 1905 und der auf Empfehlung des mächtigen Landeskulturrates erfolgten Umbenennung in Königlich Sächsische Landeswetterwarte im Jahre 1907 hatte deren Direktor Paul Schreiber größere Schwierigkeiten, eine an die Zentrale gebundene, geeignete und langfristig gesicherte Beobachtungs- und Forschungsstation zu etablieren. An einer solchen Station sollte es zum Beispiel möglich sein, die Prüfung neuer Geräte und Methoden oder Gerätevergleichen vornehmen zu können. Die räumlichen und lokalklimatischen Gelegenheiten auf dem Gelände der Landeswetterwarte in der Großen Meißner Straße 15 in Dresden Neustadt waren hierfür nicht geeignet. Dem gegenüber wurde im Sächsischen Landtag und in dem als Lobby für die Landwirtschaft agierenden Landeskulturrat die Notwendigkeit von Klimamessungen- und Wetterbeobachtungen auf dem Fichtelberg durchaus anerkannt und befürwortet. Beispielsweise wurde nach den gescheiterten Versuchen, diese Aufgaben durch die ehrenamtlich fungierenden Bergwirte bewerkstelligen zu lassen, bereits 1912 eine Beamtenstelle hierfür bewilligt. So nutzte Schreiber die sich 1912 bietende Gelegenheit, als im Finanzausschuss die Errichtung einer Wetterwarte auf dem Fichtelberg diskutiert wird, zu einem erneuten Vorstoß. In seinem Antrag begründete er erstmals den Zusammenhang der gleichzeitigen Beobachtungen und Messungen auf dem Fichtelberg und einer Flachlandstation: "... Die Aufzeichnungen einer Gipfelstation erhalten erst dann einen vollen Wert, wenn gleichzeitige Beobachtungen auf einer möglichst tiefen aber auch günstig gelegenen zweiten Station, die man einfach als Basisstation bezeichnet, stattfinden. Allerdings würde dies erfordern, dass beide Stationen möglichst geringe horizontale Entfernungen haben. Schon lange musste ich dem Wunsche Ausdruck geben, für die Niederungen Sachsens eine gute Beobachtungsstelle einzurichten. Nach der Sachlage kommt hierzu ein gut gelegener Ort in der Nähe von Dresden in Frage. Diese Angelegenheit wird jetzt dringlich, da die nach der Elbe gelegenen Gärten, in denen wir jetzt die wichtigsten Messungen der Temperatur usw. anstellen müssen, bald verschwinden werden. Es ist auch allseits anerkannt worden, dass unsere jetzige Einrichtung nicht genügen kann. Es ist nicht wünschenswert, dass Observatorium völlig isoliert zu errichten, es möchte dasselbe in der Nähe von Untersuchungen anderer Art, für welche Witterungsbeobachtungen von Wichtigkeit sind, sich befinden. Die Planung eines Flugplatzes bei Boxdorf ließ mich hoffen, in der dort befindlichen alten Windmühle einen günstigen Platz für ein zwar einfaches aber genügendes Observatorium gefunden zu haben. ..."

In der Diskussion um den geeigneten Standort erwies sich schließlich aus verschiedenen Gründen die Wahnsdorfer Kuppe als die geeignete. Aus verschiedenen Äußerungen Schreibers ist zu entnehmen, dass ihm die lokalklimatische Beeinflussung dieses Standortes durch das Elbtal durchaus bewusst war, doch stellte er diesen Gesichtspunkt hinten an, um des Gesamtprojekts nicht zu gefährden. So konnte er im Jahre 1918 schreiben: "... Das Jahr 1914, so schicksalsreich, inhaltsschwer und verhängnisvoll wie kaum eines seiner Vorgänger, hatte auch eine besondere Bedeutung für die Landes-Wetterwarte. Bei seinem Beginn konnte ich mich am Ziele der Bestrebungen und Bemühungen langer Jahre nach Stätten der meteorologischen Forschung an geeigneter Stelle und in geeigneter Gestalt sehen. Es wurden für zwei Wetterwarten auf dem Fichtelberg und der Wahnsdorfer Kuppe die nötigen Mittel im Gesamtbetrage von rund 150 000 Mark bewilligt. ..." Mit diesen Worten beginnt Professor Paul Schreiber im Jahre 1918, nunmehr im 70. Lebensjahr, seinen Bericht über die „Einrichtung und Aufgaben der im Weltkriegsjahr 1915 erbauten Wetterwarten auf der Wahnsdorfer Kuppe bei Dresden und auf dem Fichtelberge“.

Die notwendigen Flächen waren gekauft und zur Verfügung gestellt, die Projekte für die Gebäude und die gesamte Ausgestaltung von Schreiber selbst entworfen und genehmigt, so dass die Wetterwarten Fichtelberg am 1. Januar und Wahnsdorf am 1. August des Jahres 1916 ihre Tätigkeit aufnehmen konnten (Abbildung 1, Abbildung 2). Weitsichtig hatte er die Gebäude und Anlagen so konstruiert, dass sie sowohl die Belange einer Wetterwarte, als auch einer Forschungsstation in äußerst exponierter Lage, wie auf dem Fichtelberg, als auch in der Stadtrandlage in Wahnsdorf sicher und zukunftssträhig gewährleisteten.



Abbildung 1: Die Wetterwarte Wahnsdorf nach der Inbetriebnahme 1916, die Schreibersche große Wetterhütte und die Niederschlagsmessenrichtungen.

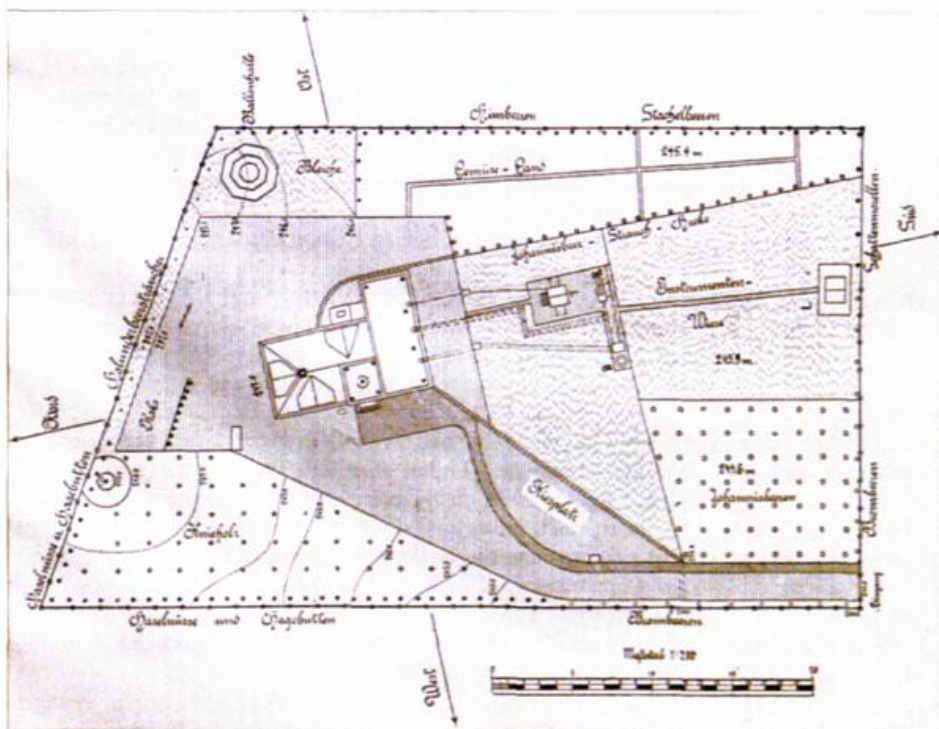


Abbildung 2: Grundriss des Geländes der Wetterwarte Wahnsdorf, in der Mitte: Standort der Wetterhütte und der Niederschlagsmessenrichtung, rechts Hütte für luftelektrische Messungen, hinten links: Ballonfüllhalle.

Für fast alle meteorologischen Elemente ließ Schreiber Registriergeräte nach eigenen Ideen in der diensteigenen Werkstatt anfertigen. Für die Zwecke der Klimaroutine verwendete er aber die bereits im sächsischen Netz etablierten Geräte (Stationsbarometer, Schalenkreuzanemometer System Schreiber, Aspirationsspsychrometer in der Schreiberschen großen Wetterhütte (FREYDANK 2014).

Es war Schreiber noch gelungen, im Zuge der Einrichtung für die Warte Wahnsdorf drei Beobachter bewilligt zu bekommen. Damit waren die Bedingungen gegeben, in Wahnsdorf kontinuierliche Klimamessungen zu den drei Terminen 7, 14 und 21 Uhr Mittlerer Ortszeit durchzuführen. Am Fichtelberg blieb es bis 1946 bei der bereits vor 1914 bewilligten einen Beamtenstelle. Umso mehr ist zu achten, dass es an beiden Stationen gelang, auch das Jahr 1945 ohne Messausfälle zu bestehen.

Als 1934 die Landeswetterwarte in den Reichswetterdienst (RWD) aufging und aus ihr 1935 mit dem Standort der Wetterwarte Wahnsdorf das Observatorium Wahnsdorf hervorging, wurde die Verantwortung für die routinemäßige Datengewinnung der Abteilung Klimadienst des RWD übertragen. Die am Observatorium gewonnenen Daten, wozu auch die Stundenwerte der meisten meteorologischen Größen (auch der Globalstrahlung und der Sonnenscheindauer) hinzu kamen, wurden mit den Daten der anderen Observatorien im Deutschen Meteorologischen Jahrbuch Teil IV, als Heft 2 veröffentlicht.

Nach 1945 wurde auf Befehl der Sowjetischen Militäradministration in Deutschland das sächsische meteorologische Netz wieder aufgebaut bzw. fortgeführt. Das Observatorium wurde zum Sammelpunkt aller sächsischen Wetterbeobachter, Techniker und Meteorologen, die die Hoffnung hegten, hier überleben zu können. Die Mitarbeiter rückten im wörtlichen wie im übertragenen Sinne eng zusammen. Im Gebäude waren die neu gegründete sächsische Landeswetterwarte mit den Abteilungen Wetterdienst, Klimadienst und Radiosondendienst untergebracht.

Die Klimabeobachtungen wurden in gewohnter Weise weiter geführt. Hinzu kam ab April 1946 auf sowjetischem Befehl hin die Aufnahme 4-terminiger synoptischer Beobachtungen, die bis zur Aufnahme der Arbeit an der synoptischen Station am Flugplatz Dresden-Klotzsche im Jahre 1954 fortgeführt wurden.

Selbstverständlich galten für die "Klimamessungen" in Wahnsdorf alle Vorschriften, die auch sonst für den Klimadienst erlassen wurden. Einzelheiten findet man bei FREYDANK 2014.

Im Jahre 1974 entschied man, wegen der räumlichen Nähe zur Wetterstation Dresden-Klotzsche und weil sich das Aufgabenprofil des Observatoriums geändert hatte, die Klimamessungen hier am 30. Juni einzustellen und ab 1. Juli 1974 nach Dresden-Klotzsche zu verlagern. Zur Interpretation der Luftmesswerte (siehe Kapitel zur Luftqualität) wurden und werden aber weiter meteorologische Messungen durchgeführt. Eine Übersicht über eingesetzte Messgeräte zur Erfassung meteorologischer Parameter befindet sich im Anhang.

Wenn wir in diesem Jahr an die einhundertste Wiederkehr der beiden Wetterwarten auf dem Fichtelberg und auf der Wahnsdorfer Kuppe bei Dresden erinnern, können wir uns auch auf viele Details von Festschriften berufen, die aus Anlass ihrer Eröffnung sowie der 50. und 75. Wiederkehr dieses für die Meteorologie Sachsens und Deutschlands bedeutsamen Ereignisses herausgegeben wurden. Die Festschrift "Fünfzig Jahre Meteorologisches Observatorium Wahnsdorf und Meteorologische Station Fichtelberg" behandelt in großen Teilen und notgedrungen die schweren Jahre des Wiederbeginns nach den beiden Weltkriegen und den Konzentrationsprozess des Meteorologischen Observatoriums Wahnsdorf zur Leiteinrichtung für die meteorologischen Aspekte der Luftreinhaltung in der Deutschen Demokratischen Republik. Den Redakteuren Gerhard KOHL (1966) sowie Hans SCHMIDT (1991) und Gerhard HERRMANN et al. (1991) für die beim 75-jährigen Jubiläum bereits zwei verschiedenen Dienstherrn unterstellten Standorte ist zu danken, dass die Festschriften jeweils eine wahrscheinlich nahezu vollständige Bibliographie über die Publikationen und Forschungsarbeiten von und über beide Einrichtungen enthalten. Die von G. Herrmann wesentlich verfasste Schrift „Von der Landeswetterwarte zum Landesamt für Umwelt und Geologie“ zeigt auf, dass mit den Arbeiten zu den meteorologischen Aspekten der Luftreinhaltung, am Observatorium zu Recht der Grundstein für das sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie gelegt wurde.

Die an beiden Stationen gewonnenen Daten sind für den Zeitraum bis etwa 1955 von H. PLEISS (1961) und von J. GOLDSCHMIDT (1950, 1953), dem ehemaligen Direktor des Observatoriums, ausgewertet beziehungsweise dargestellt worden. Ebenso wie bei J. Goldschmidt in seiner Beschreibung des Klimas von Sachsen wird in der gemeinsamen Abhandlung des Meteorologischen Dienstes der DDR und Hydrometeorologischen Dienstes der ČSSR über „Klima und Witterung im Erzgebirge“ die von Schreiber in den Mittelpunkt gerückte Dualität von Bergstation Fichtelberg zur Basisstation Wahnsdorf aufgelöst und das Klima im regionalen Maßstab betrachtet.

Klima – Ausgewählte Messergebnisse 1917 bis 2015

Vorab soll darauf hingewiesen werden, dass eine Stationsverlegung von Radebeul-Wahnsdorf nach Dresden-Klotzsche (ca. 6 km Luftlinie) erfolgte. Die hier verwendeten Messreihen wurden von 1917 bis 1966 in Wahnsdorf und ab 1967 in Klotzsche erhoben. Demnach kann den 99-jährigen Zeitreihen Inhomogenität im längerfristigen Kontext unterstellt werden. Vor diesem Hintergrund erfolgt eine Visualisierung der Messungen für die Lufttemperatur und den Niederschlag im Raum Wahnsdorf/Klotzsche, wobei einige wichtige Aspekte hervorgehoben werden sollen.

Abbildung 3 und Abbildung 4 gewähren einen Einblick in die zeitliche Entwicklung der Monats- und Jahresmitteltemperaturen im Raum Wahnsdorf/Klotzsche. Seit den 1960er Jahren ist eine kontinuierliche Zunahme der Jahresmitteltemperatur festzuhalten, wobei die beiden bisher wärmsten Jahre 2014 und 2015 waren. Auffallend sind insbesondere die höheren Sommertemperaturen seit Beginn der 1980er Jahre, was auch mit einem häufigeren Auftreten von Sommertagen und heißen Tagen einhergeht (Abbildung 5). Neben einer erhöhten Anzahl von Sommertagen treten diese auch früher im Jahr auf. Damit korrespondieren die Abnahmen der Frosttage (Nachtfrost) und insbesondere der Eistage (Tagfrost), wobei sich diese aus dem Frühjahr „zurückziehen“ (Abbildung 5). Insgesamt zeigt sich ein erhöhtes Temperaturniveau, wobei der Herbst hierbei noch den geringsten Anteil hat.

Für den Niederschlag sind besonders die abnehmenden Summen seit den 1970er Jahren in der Vegetationsperiode I (Monate April, Mai, Juni) zu erwähnen (Abbildung 6). Am Beispiel des Jahres 2013 soll für diesen Zeitraum im Jahr eine Tendenz verdeutlicht werden. Die vergleichsweise hohe Niederschlagssumme (ca. 350 mm) bildet sich im Wesentlichen aus einem mehrtägigen Starkregenereignis (25.05.-03.06.2013, ca. 185 mm in 10 Tagen), wobei 2/3 der Tage ohne hydrologisch wirksamen Niederschlag (das heißt < 1 mm pro Tag) waren (Abbildung 7).

Die Schwüle kombiniert die vorherrschenden Temperatur- und Feuchtebedingungen zu einem Maß für das menschliche Wohlbefinden. In Verbindung mit der bereits angesprochenen erhöhten sommerlichen Wärmebelastung (Abbildung 5 a, b) ergibt sich aus einem hohen Niveau an sommerlichen Starkregenereignissen (R90p, das heißt Ereignis gehört zu den größten 10 %) eine zunehmende Anzahl an schwülen Tage, insbesondere in den letzten ca. 15 Jahren (Abbildung 8, Abbildung 9).

Jahresmitteltemperatur im Raum Wahnsdorf/ Klotzsche, 1917-2015
(11-jährig gleitendes Mittel)

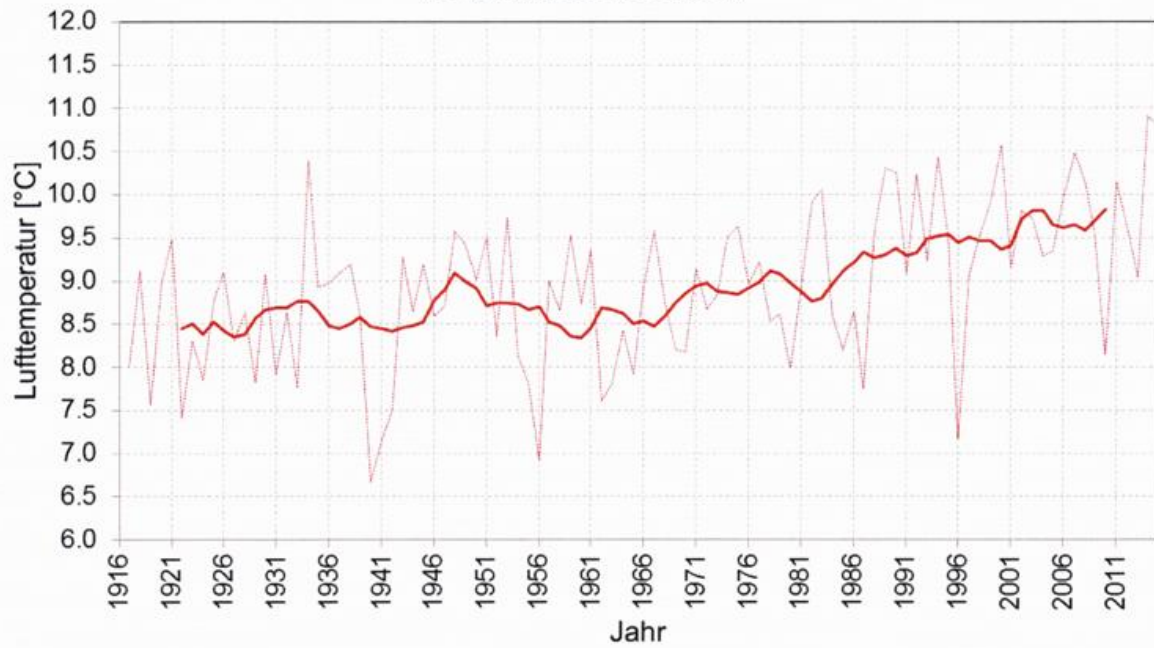


Abbildung 3: Lufttemperatur (°C) im Raum Wahnsdorf/Klotzsche, 1917-2015: Jahresmittel.

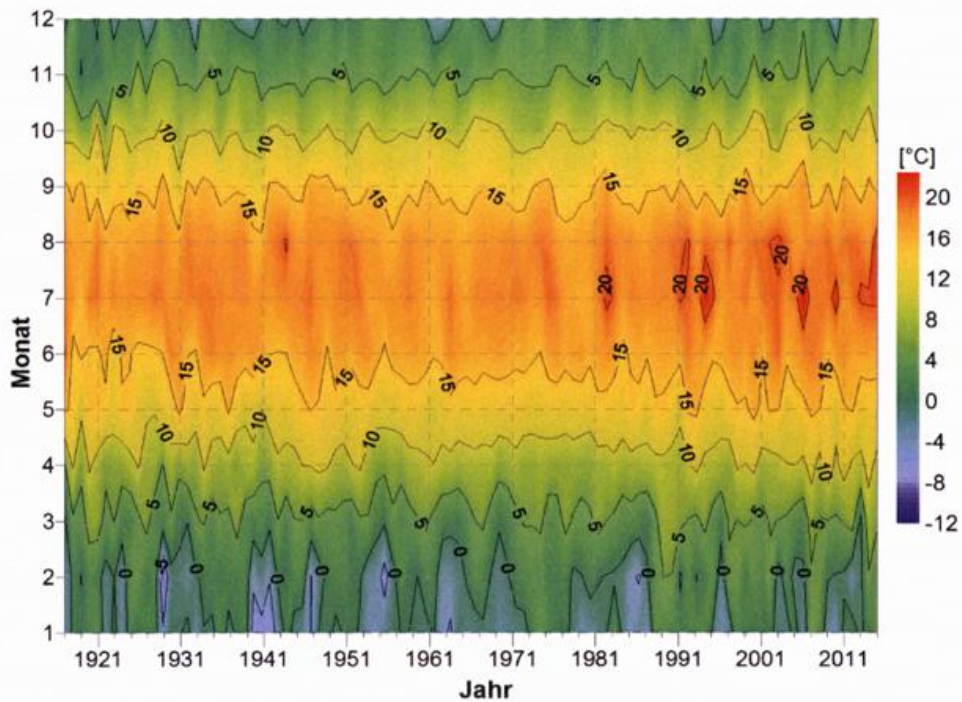


Abbildung 4: Lufttemperatur (°C) im Raum Wahnsdorf/Klotzsche, 1917-2015: Monatsmittel.

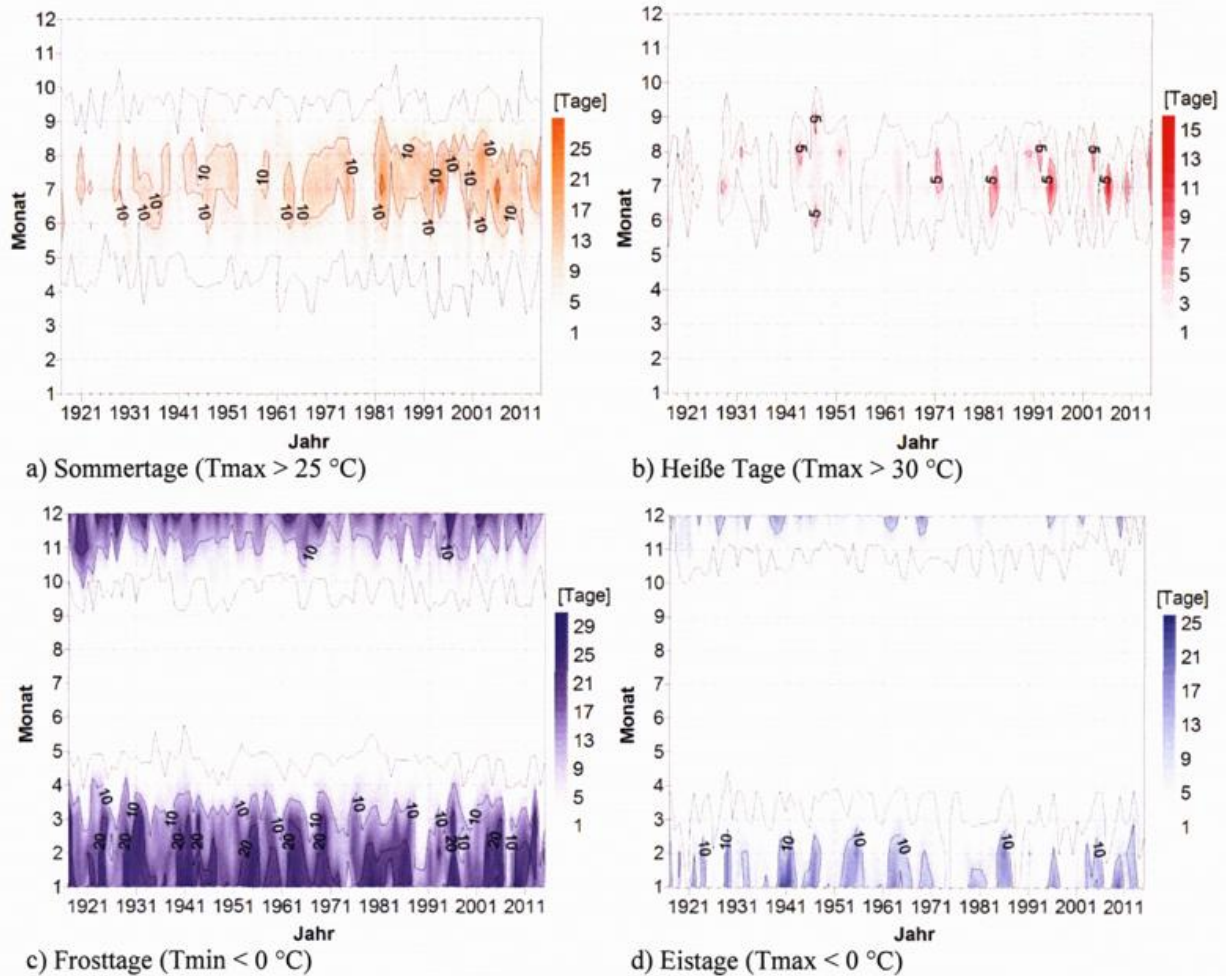


Abbildung 5: Temperaturabgeleitete Ereignistage im Raum Wahnsdorf/Klotzsche, 1917-2015: a) Sommertage, b) Heiße Tage, c) Frosttage, d) Eistage.

Niederschlag VP I im Raum Wahnsdorf/ Klotzsche, 1917-2015 (11-jährig gleitendes Mittel)

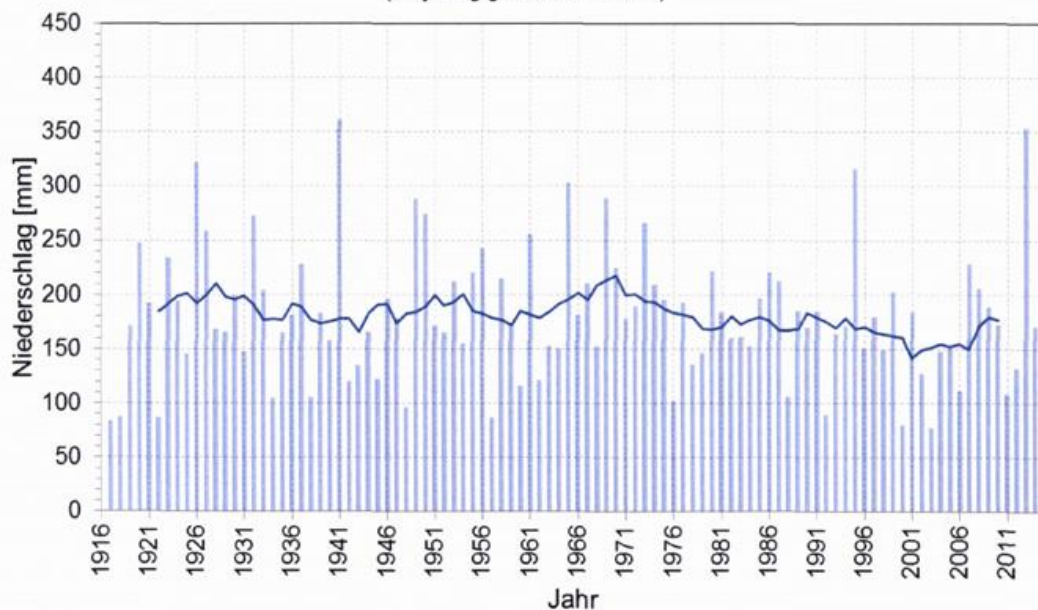


Abbildung 6: Niederschlag (mm) in der Vegetationsperiode I (VP I: April-Juni) im Raum Wahnsdorf/Klotzsche: 1917-2015.

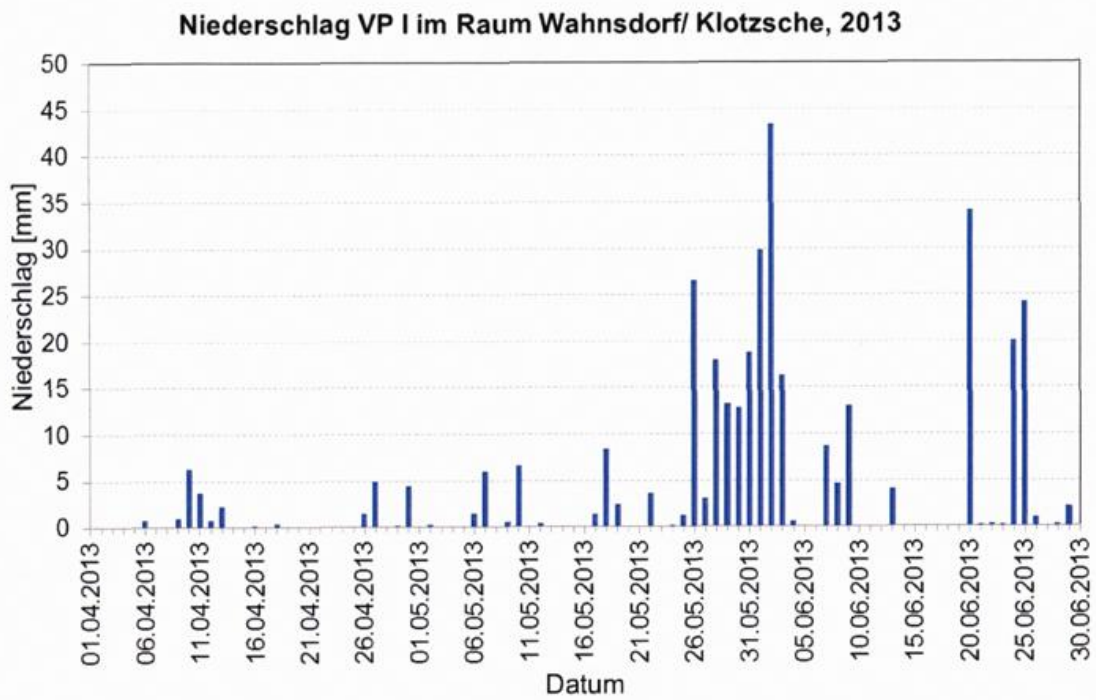


Abbildung 7: Niederschlag (mm) in der Vegetationsperiode I (VP I: April-Juni) im Raum Wahnsdorf/Klotzsche: 2013.

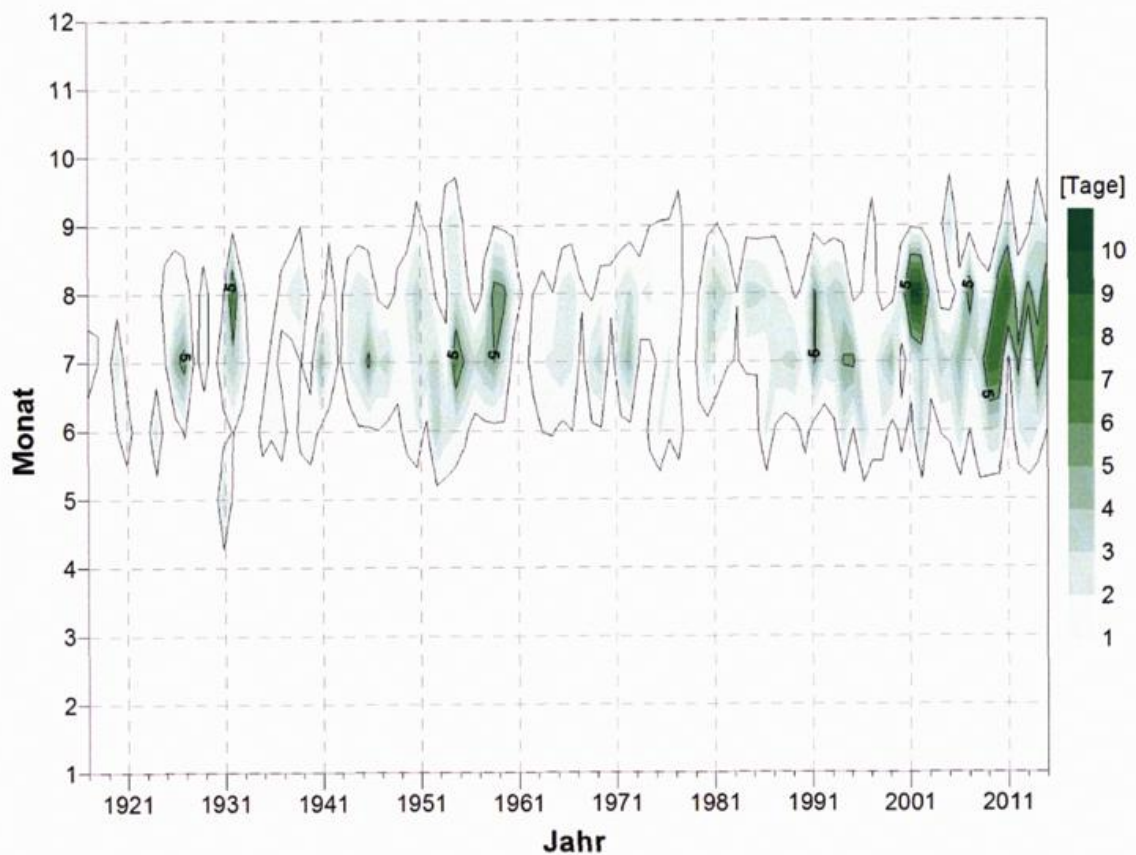


Abbildung 8: Anzahl Schwüler Tage (Dampfdruck > 18 hPa) im Raum Wahnsdorf/Klotzsche, 1917-2015 in der Vegetationsperiode II (Juli-September).

**Starkregenerenisse (R90p) VP II im Raum Wahnsdorf/ Klotzsche,
1917-2015**
(11-jährig gleitendes Mittel)

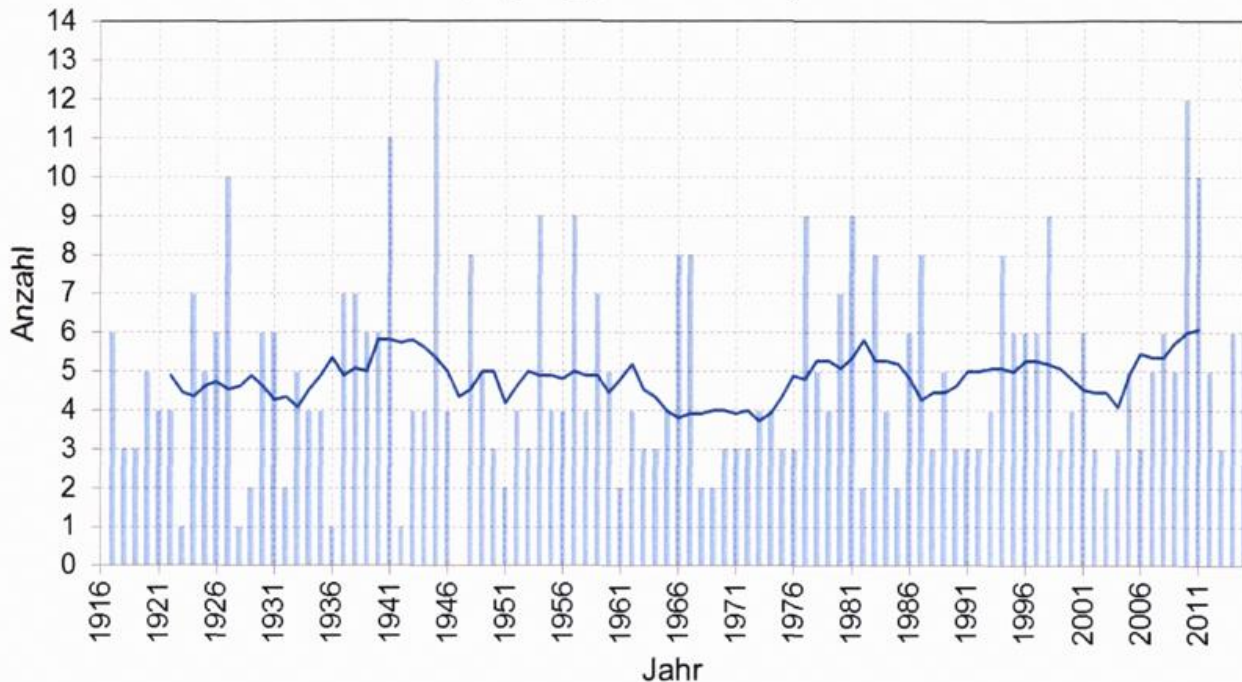


Abbildung 9: Starkregenerenisse (R90p) im Raum Wahnsdorf/Klotzsche 1917-2015 in der Vegetationsperiode II (Juli-September).

Luftqualität

Andrea HAUSMANN, Peter FLEISCHER, Horst-Günter KATH, Udo KÖNIG, Cornelia OELKE, Annette PAUSCH, Beate SCHIMMEL, Philipp SELINGER, Uwe WOLF

Bereits im Jahr 1952 begannen die Mitarbeiter des Meteorologischen Observatoriums Wahnsdorf (MOW) mit dem Aufbau eines Messnetzes für bodennahes Ozon (O_3). Die Messungen von Schwebstaub kamen 1964, die von Schwefeldioxid (SO_2) und Stickstoffdioxid 1967, Stickstoffmonoxid und Staubinhaltsstoffen (Sulfat, Blei, Eisen, Chlorid) 1974 sowie Ruß 1987 hinzu. Die dafür benötigten Messgeräte und –verfahren sowie die Qualitätssicherung der Messwerte mussten aufgrund der ökonomischen und politischen Zwänge oft selbst gebaut beziehungsweise entwickelt werden. Waren es zunächst Einzelprobenanalysen zu bestimmten Uhrzeiten, folgten später kontinuierlich arbeitende Analytoren. 1974 wurde das Observatorium „Forschungsdienststelle für meteorologische Aspekte der Luftreinhaltung“, am 1. Juli 1991 „Landesmessstelle für Umweltradioaktivität und Luftschadstoffe“ (HERRMANN et al. 1991).

Nach einer Phase wechselnder Zuordnung (1991 Landesamt für Umwelt und Geologie, 1993 bis 1996 Privatisierung/Rückabwicklung der Privatisierung) gehört das Luftmessnetz seit 1997 zur Staatlichen Umweltbetriebsgesellschaft (seit 2008: BfUL). Der Geschäftsbereich Messnetzbetrieb Luft hat folgende Aufgaben:

- Laufende Messung der Luftgüteparameter SO_2 , NO_x , O_3 , Benzol, Toluol, Xylol, Schwebstaub, Ruß,
- Gewinnung meteorologischer Daten zur Einschätzung der Luftgüteparameter,
- Sammlung von Schwebstaub (PM 10- und PM 2,5-Fractionen) und Sedimentationsstaub zur analytischen Bestimmung von Schwermetallen, polyzyklischen Kohlenwasserstoffen und Ruß,
- Messdatenverarbeitung und Kommunikation,
- Qualitätssicherung, Betrieb eines Referenz- und Kalibrierlabors,
- Betreuung eines Depositionsmessnetzes (Niederschlag),

- Durchführung von Sondermessungen (Emission, Immission),
- Betrieb von Messsystemen für die Zählung ultrafeiner Partikel in Dresden.
- Unterstützung des LfULG bei der Überwachung bekannt gegebener Messstellen.

Die Auswertung und Veröffentlichung der Luftqualitätsdaten obliegt seit 1991 dem Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie, seit 2008: LfULG.

Die Ergebnisse der Luftqualitätsüberwachung werden seit 1990 in den jährlichen Immissionsberichten veröffentlicht, zunächst als gedruckte Broschüren, seit 2004 als Dateien im Internet. Eine interaktive Datenrecherchemöglichkeit steht ebenso zur Verfügung (LfULG 2016).

Die Luftgütemessstation Radebeul-Wahnsdorf befindet sich im ländlichen Hintergrund, stadtnah zu Dresden. Im Umfeld befinden sich landwirtschaftliche Nutzflächen und kleine Wohngebäude. Sie ist heute eine von 29 Stationen des stationären Luftmessnetzes und eine von 10 Depositionsmessstellen.

Als Beispiele werden im Folgenden einige Ergebnisse langer Messreihen zu O₃- und SO₂-Konzentrationen sowie pH-Werten im Niederschlagswasser vorgestellt. An diesen drei Parametern lassen sich die Einflüsse sowohl des Klimawandels als auch des Stellenwertes von Ökonomie und Umweltschutz sehr gut verfolgen. Dass wir heute die Möglichkeit dazu haben, verdanken wir der vorausschauenden, beharrlichen und innovativen Arbeit unserer Vorgänger! Die Interpretation insbesondere solcher langer Messreihen geschieht im Idealfall unter Berücksichtigung der Entwicklung von Messtechnik und Qualitätssicherung. Allerdings sind die Angaben dazu nicht mehr vollständig verfügbar, so dass eine Homogenisierung der Zeitreihen nicht möglich ist. Den folgenden Analysen liegen deshalb die Originaldaten zugrunde. Die gefundenen Angaben zur Messtechnik werden mit genannt. Nach dem politischen Umbruch 1989, folgenden Umstrukturierungen, Bauarbeiten und Platzmangel sind leider auch Unterlagen und Messgeräte verloren gegangen.

Abbildung 10 zeigt die Entwicklung der Mittelwerte für die O₃-Konzentrationen im Sommer- und Winterhalbjahr sowie im Kalenderjahr seit 1960. Zwar gibt es auch Messwerte seit 1954, aber dort sind die den Umständen zuzuschreibenden Lücken in der Messreihe für eine Mittelwertbildung zu groß. O₃ ist kein Luftschadstoff, der direkt emittiert wird. O₃ entsteht durch chemische Reaktionen aus Stickstoffdioxid und Kohlenwasserstoffen. Die Reaktion wird durch hohe Temperaturen und intensive Sonneneinstrahlung gefördert. Hohe Ozonkonzentrationen entstehen deshalb bei länger anhaltenden Hochdruckwetterlagen mit Temperaturen über 30 °C. Unter solchen Bedingungen reichert sich Ozon von Tag zu Tag in der Atmosphäre mehr an. Die O₃-Konzentrationen in den bodennahen Luftschichten weisen einen ausgeprägten Jahresgang mit Höchstwerten im Sommerhalbjahr auf. Die O₃-Belastung ist in ländlichen Gebieten und im Mittelgebirge aufgrund der geringen O₃-Abbauraten durch andere Schadstoffe (zum Beispiel Stickstoffmonoxid) und der Höhenlage am höchsten. Der vor 1970 liegende Anstieg der O₃-Konzentrationen ist wahrscheinlich überwiegend auf die im Laufe der Entwicklung des Messverfahrens erkannten Fehlerquellen (WARMBT 1963: Länge der Ansaugleitung, unterschiedliche Probenahmehöhen, ggf. Einfluss der Heizung der Stationsgebäude im Winter) zurückzuführen. Der belastbare Langzeittrend an dieser Station zeigt ab Anfang der 70er Jahre bis Mitte der 90er Jahre einen Anstieg der O₃-Konzentrationen in allen drei Bezugszeiten. Danach ändern sich die O₃-Konzentrationen nicht mehr signifikant. Eine Tendenz zu im Mittel leicht rückläufigen Konzentrationen sowie weniger sehr hohen und sehr niedrigen Einzelwerten wurde festgestellt. Die Schwankungen in der O₃-Belastung zwischen den Jahren sind heute eher auf Witterungseinflüsse (zum Beispiel Episoden mit hohen Temperaturen, Häufigkeit von Wind aus Richtung relevanter Industriegebiete) zurückzuführen (PAUSCH und BASTIAN 2015).

Folgende Faktoren hatten zum beobachteten Anstieg der Konzentrationen der Mittelwerte (= chronische Belastung) bis Mitte der 90er Jahre beigetragen:

- Emissionen durch zunehmende Motorisierung und zunehmenden Einsatz lösemittelhaltiger Produkte,
- durchgreifender Erwärmungstrend, Zunahme der Sommertage, Zunahme der Sonnenscheindauer. Die Zunahme der Sonnenscheindauer steht auch in Verbindung mit der Verbesserung der Luftqualität nach 1990 (BERNHOFER et al. 2014, FRANKE et al. 2015),
- Ferneintrag von Ozon aus Amerika im Winterhalbjahr beim Großwettertyp West (für 1976-1992 untersucht von KÜCHLER et al. 1996).

Mittelwerte der Ozonkonzentrationen in Radebeul - Wahnsdorf

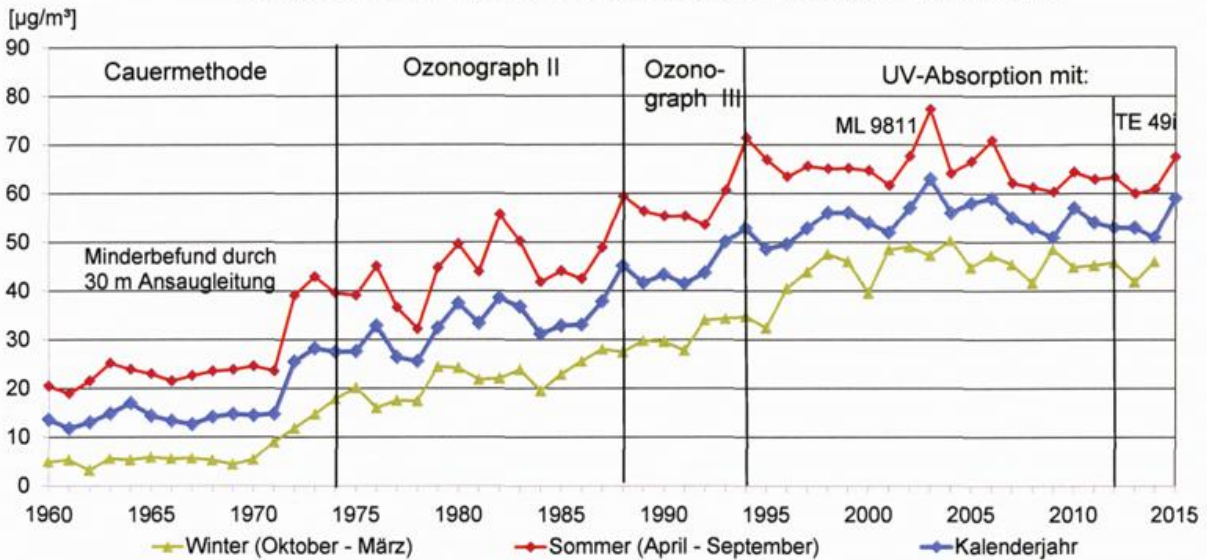


Abbildung 10: Ozon-Mittelwerte.

Die Entwicklung der mittleren SO_2 -Konzentrationen zeigt Abbildung 11. Bei diesem Parameter sind sowohl die extrem hohe Luftbelastung bis 1990 als auch die Verbesserung der Luftqualität sofort mit dem Zusammenbruch der Wirtschaft unmittelbar zu erkennen. Zwischen 1970 und 1989 wurden im Gebiet der DDR 40 Episoden (insgesamt 227 Episodentage) mit extrem hohen SO_2 -Konzentrationen registriert. Als Kriterium wurde im Wesentlichen das Überschreiten des 95-Perzentils (Tageswert) an zwei aufeinanderfolgenden Tagen verwendet (BERGER 1990). Nach Ablauf der letzten Fristen für die Ertüchtigung von Altanlagen (1. März 1994 gemäß TA Luft 1986) und weitgehender Ablösung des Energieträgers Braunkohle in Kleinfeuerungsanlagen bis Mitte der 90er Jahre (SCHREIBER 2012) sanken die Konzentrationen nochmals deutlich. Die Modernisierung von Industrieanlagen in unseren Nachbarstaaten entsprechend der EU-Vorschriften hat ebenfalls zur Verbesserung der Luftqualität in Sachsen beigetragen. 2008 wurde die SO_2 -Messung in Radebeul-Wahnsdorf sowie an mehreren Stationen des sächsischen Luftmessnetzes eingestellt, da die Konzentrationen seit mehreren Jahren unter der unteren Beurteilungsschwelle gemäß 39. BImSchV gelegen hatten. Aktuell wird SO_2 noch an acht Stationen gemessen. Braunkohle ist zwar immer noch der mit Abstand bedeutendste Energieträger für die Stromerzeugung in Kraftwerken der Energieversorgungsunternehmen (2012: 87 %), Großfeuerungsanlagen die bestimmende Quelle für SO_2 -Emissionen in Sachsen (2012: 79 %, (SCHREIBER 2016)). Die Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit für Langzeit- und akute Belastungen sowie die kritischen Werte für den Schutz der Vegetation werden aber seit Jahren weit unterschritten. Vereinzelt treten bei südöstlichen Windrichtungen Episoden mit höheren SO_2 -Stundenmittelwerten auf. Diese sind vermutlich auf Emissionen aus Industrieanlagen in Nordböhmen bei Wartungsarbeiten oder Havarien zurückzuführen. Der Grenzwert für das Stundenmittel ($350 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 24 Überschreitungsstunden pro Station im Kalenderjahr sind zulässig) wurde innerhalb der letzten zehn Jahre aber nur selten überschritten (7 Stunden am Schwartenberg, 4 Stunden am Fichtelberg, je 3 Stunden in Annaberg-Buchholz und Zinnwald), zuletzt eine Stunde am 11.11.2014 an der Messstation auf dem Schwartenberg (LfULG, 2016).

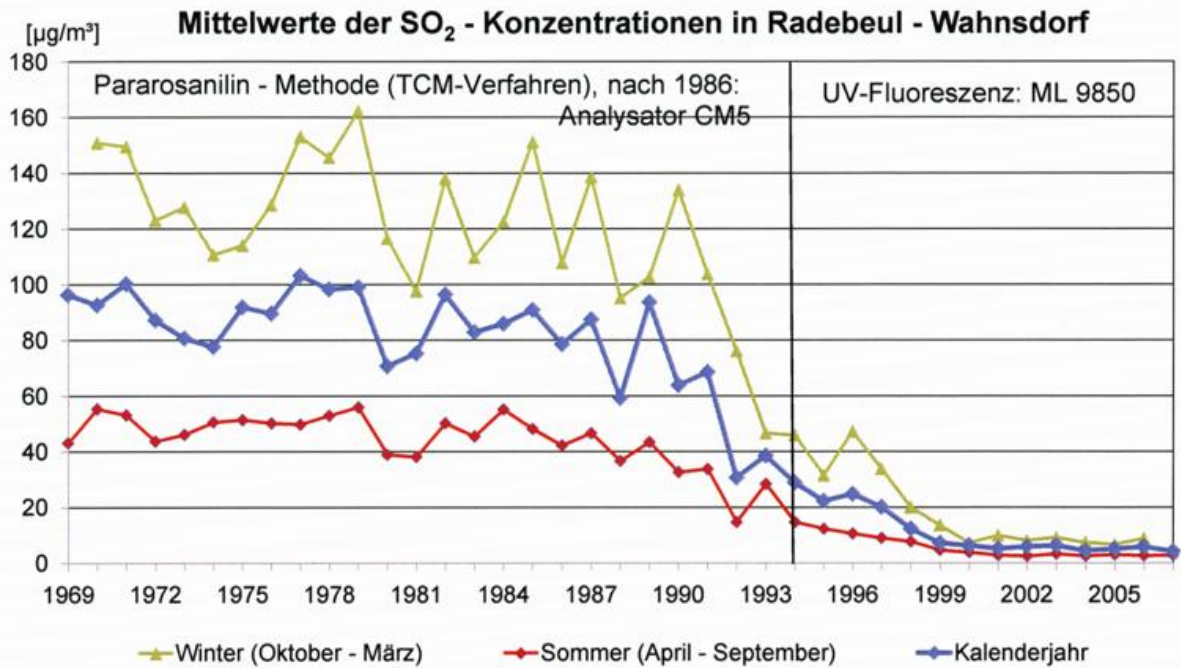


Abbildung 11: SO₂-Mittelwerte.

Die oben genannten Veränderungen spiegeln sich auch im zeitlichen Verlauf des pH-Wertes im Niederschlag wider (Abbildung 12). Insbesondere die Verbrennung schwefelhaltiger Braunkohle ohne ausreichende Abgasreinigung hatte zu saurem Niederschlag geführt. Nach 1990 sank der pH-Wert nochmals deutlich. Ursachen waren die schnellere Nachrüstung von Abgasreinigungen zur Staubabscheidung (basische Komponenten) zur Entschwefelung sowie gleichzeitig die schnelle Zunahme der versauernd wirkenden NO_x-Emissionen aus dem Straßenverkehr. Seit Mitte der 90er Jahre hat sich in Sachsen der pH-Wert des Regenwassers langsam aber – abgesehen von meteorologisch bedingten Schwankungen - stetig erhöht. (Der pH-Wert für natürlichen Regen beträgt 5,6 (WIKIPEDIA)).

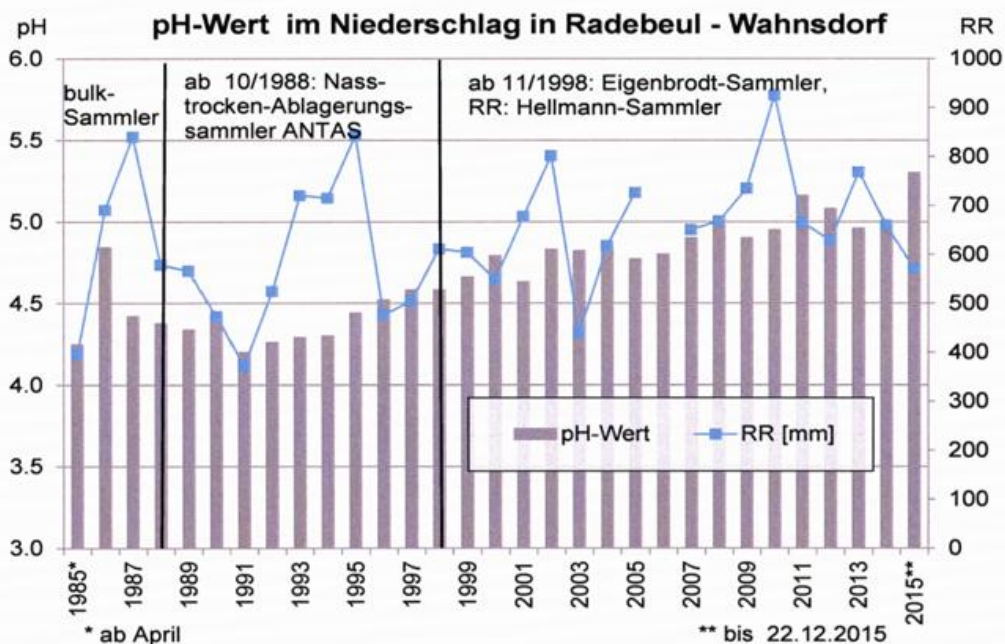


Abbildung 12: pH-Werte im Niederschlag.

Umweltradioaktivität

Thomas HEINRICH

Bereits 1959 wurden am MOW Messungen zur luftgetragenen Radioaktivität durchgeführt. Mit der Überführung von Teilen des Meteorologischen Dienstes der DDR ging 1990 diese Messaufgabe zum Deutschen Wetterdienst über. Das MOW selbst wurde mit Wirkung vom 01. Januar 1991 auf den Freistaat Sachsen überschrieben. Daraus entstand die Landesmessstelle für Umweltradioaktivität und Luftschadstoffe als Bestandteil des in Gründung befindlichen Landesamtes für Umwelt und Geologie. Mit der Gründung der Staatlichen Umweltbetriebsgesellschaft im Jahr 1994 (seit 2008: BfUL) wurde die Landesmessstelle für Umweltradioaktivität dort im Geschäftsbereich Umweltradioaktivität weitergeführt.

Die Aufgaben des Geschäftsbereichs Umweltradioaktivität sind:

- Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt nach dem Strahlenschutzvorsorgegesetz für den Freistaat Sachsen,
- Überwachung der anlagenbezogenen Radioaktivität nach dem Atomgesetz am Forschungsstandort Rossendorf,
- Überwachung von Lebensmitteln (unter anderem Amtshilfe für die Landesuntersuchungsanstalt für das Gesundheits- und Veterinärwesen Sachsen),
- Betrieb der Radonberatungsstelle,
- Überwachung der anlagenbezogenen Radioaktivität nach der Verordnung zur Gewährleistung von Atomsicherheit und Strahlenschutz an den Standorten der Wismut GmbH),
- Überwachung der anlagenbezogenen Radioaktivität an den Altstandorten des Uranerzbergbaus,
- Aufsichtliche Messungen nach der Strahlenschutzverordnung inkl. Sicherheitstechnisch bedeutsame Ereignisse und Nukleare Vorkommnisse.

In den Jahren 1991 und 1992 erfolgte schrittweise der Aufbau der Landesmessstelle und ab 1992 die Übernahme der Messaufgaben zur Kontrolle der Emissions- und Immissionsüberwachung am Standort Rossendorf. Nach Aktualisierung der bundesweiten Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) im Jahre 1993 wurde das Überwachungsprogramm in den Jahren 1994/95 angepasst und im Zuge dessen der Standort Radebeul-Wahnsdorf als Referenzstandort für die Überwachung nach REI eingeführt.

Seit Mai 1993 beziehungsweise Januar 1994 werden daher eine Dosis- und eine Niederschlagsmessstelle betrieben. Seit 1995 wird zweimal pro Jahr an einem festen Ort im Gelände Boden und Bewuchs beprobt. Das Bundesamt für Strahlenschutz hat ferner etwa seit dem gleichen Zeitraum eine Dosisleistungsmessstelle auf dem Gelände installiert. Durch umfangreiche Baumaßnahmen am Standort in den Jahren 2001/03 und 2009/12 mussten die Messstellen innerhalb des Geländes jedoch zum Teil mehrfach verlegt werden.

Abbildung 13 zeigt zum einen die gemessenen Jahresdosen und zum anderen die Aktivitätskonzentrationen von Cäsium-137 seit 1994. Die Dosis wird vor allem von natürlich radioaktiven Stoffen in der Erdkruste und der kosmischen Höhenstrahlung bestimmt und ist im betrachteten Zeitraum praktisch konstant. Sowohl die Verlegung des Messpunktes im Zusammenhang mit den beschriebenen Baumaßnahmen als auch die Verwendung von im Laufe der Jahre drei verschiedenen Messsystemen zeigt im Rahmen der Messunsicherheit von typischerweise ca. 15 bis 20 % keinen signifikanten Einfluss. Die Cäsium-137-Aktivität im Boden stammt vom Kernwaffenfallout der 50er Jahre und zum größeren Teil vom Reaktorunglück in Tschernobyl im Jahre 1986. Durch die Verlegung des Messpunktes innerhalb des Objektes ergibt sich ab dem Jahr 2008 eine deutlich kleinere Aktivitätskonzentration. Der neue Messpunkt war leider im Zuge früherer Baumaßnahmen bereits verändert worden, während der alte Messpunkt ein bis zum Jahr 2008 unveränderter natürlicher Oberboden war.

Neben diesen Aufgaben im Zusammenhang mit der Überwachung von Rossendorf wird der Standort Radebeul-Wahnsdorf auch für weitere systematische Untersuchungen genutzt. Aufgrund von Schwankungen des Untergrundes von Gammaspectren war schon lange bekannt, dass es in einigen Räumen der Landesmessstelle zu erhöhten Radonaufkommen kommt. Die vorgefundenen Radonkonzentrationen waren zwar unter Berücksichtigung der tatsächlichen Raumnutzung unbedenklich, sie waren aber bei einer geplan-

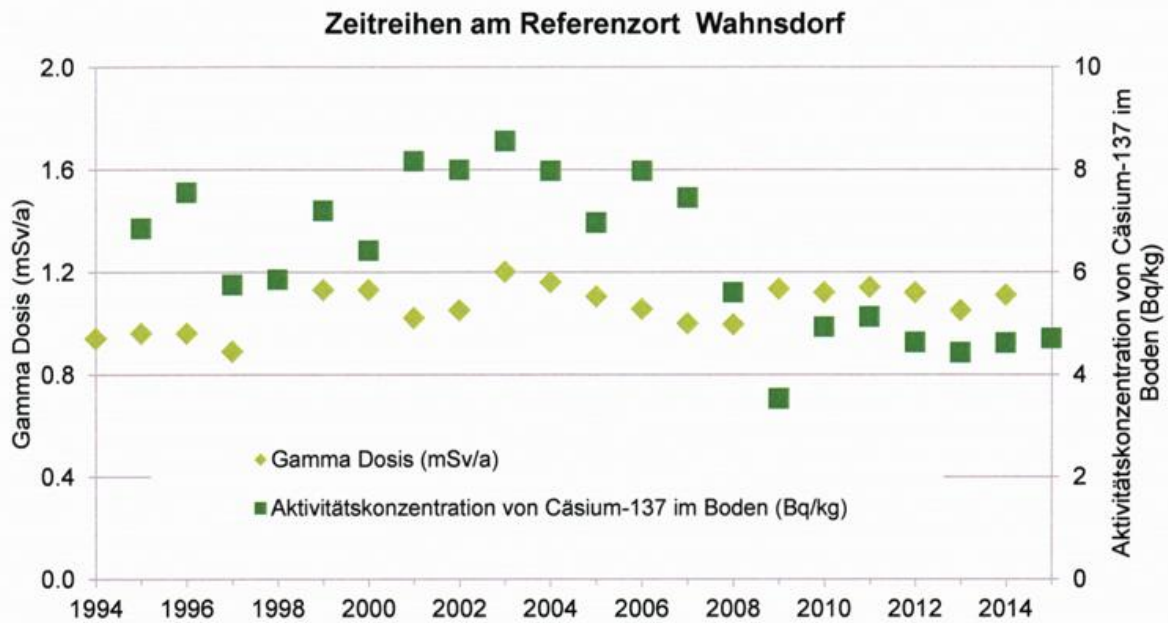


Abbildung 13: Jahresdosen und Aktivitätskonzentrationen von Cäsium-137.

ten Baumaßnahme der Anlass, an mehreren Stellen im Gelände die Radonkonzentration im Bodengas in ca. 1 m Tiefe zu messen. Aus dieser sporadischen Messung entwickelte sich ein Messnetz, das nunmehr seit Dezember 2005 mindestens monatlich beprobt wird. Ursprünglich bestand das Messnetz aus sechs Probenahmestellen. Durch die bereits mehrfach erwähnten Baumaßnahmen wurde jedoch eine Stelle liquidiert.

Die nachstehende Abbildung 14 zeigt den Jahresmittelwert von Radon-222 an einer ausgewählten Bodenmessstelle seit 2005. Er ist nahezu konstant und mit ca. 400 kBq/m³ sehr hoch. Die Messstelle war bis 2009 mit einem Schlauch, seit 2011 mit einem Edelstahlrohr ausgebaut.

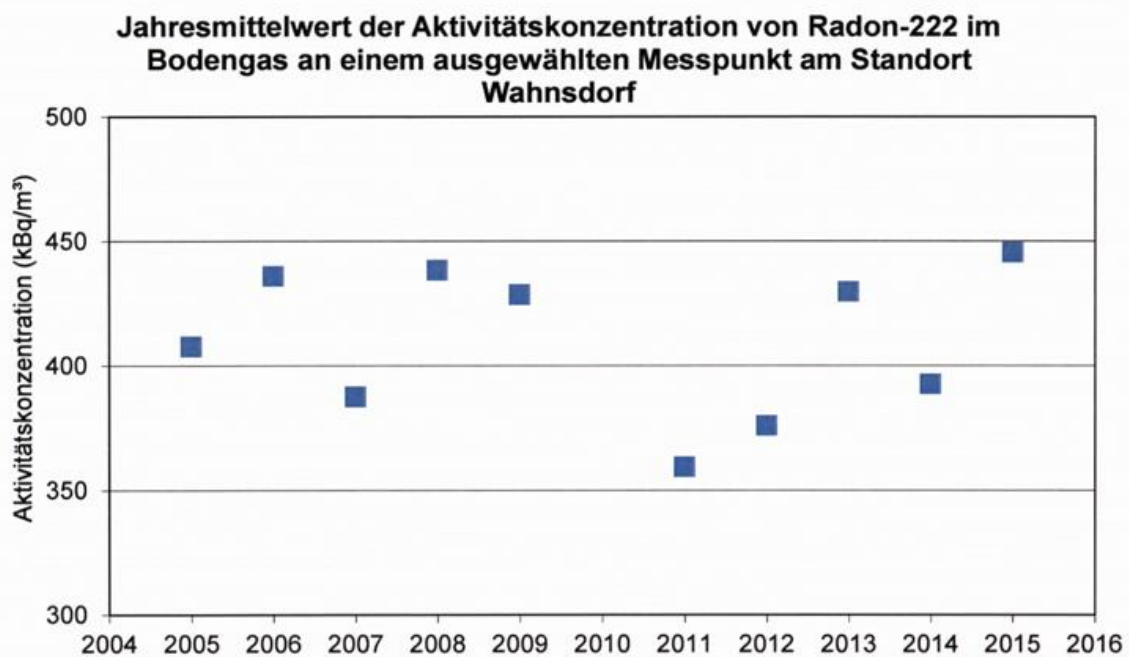


Abbildung 14: Jahresmittelwerte von Radon-222 im Bodengas.

Grundwasser

Peter BÖRKE, Ralf ENDE, Falk NÜSSLER

Seit Mitte der 19. Jahrhunderts begann man, sich in Deutschland intensiver mit der Erfassung des unterirdischen Wassers für die Wassergewinnung zu beschäftigen. Im Mittelpunkt stand zunächst das Auffinden und Fassen natürlicher Quellen. Mit der stärkeren Industrialisierung und dem Bevölkerungswachstum wurde die Wassergewinnung stark erhöht und erste Nutzungskonflikte, zum Beispiel im Leipziger Raum, zeichneten sich ab. Im Jahre 1910 wurde daher ein erster Versuchsbetrieb eines Grundwassermessnetzes im Gebiet der Kreishauptmannschaft Leipzig eingeführt, welcher mit dem Auftrag des Sächsischen Finanzministeriums vom 27. Juli 1912 an die Sächsische Königliche Geologische Landesanstalt landesweit ausgedehnt wurde:

1. „Feststellung der Verbreitung und der Ergiebigkeit der in Sachsen gewinnbaren Grundwassermengen, sowie ihrer bisherigen und ihrer überhaupt möglichen Ausnützung und
2. Feststellung des Grundwasserhaushaltes durch Überwachung der Schwankungen von Brunnenpegeln oder von Quellschüttungen. Diese Aufgabe bedingt ein dichtes, über das ganze Land gespanntes Netz von dauernden Beobachtungsstellen, den ‚Landesgrundwasserdienst‘.“

Diese beiden Aufgaben werden durch die staatliche Verwaltung dem Grunde nach bis heute (zur Zeit etwa 1100 Grundwasserstands- und 550 Grundwasserbeschaffenheitsmessstellen) auf der Basis des bestehenden Sächsischen Wasserrechts wahrgenommen (LfULG 2012). Die sächsischen Grundwassermessnetze „Menge und Beschaffenheit“ werden von der BfUL, Geschäftsbereich Messnetze Wasser und Meteorologie, betrieben. Seine Aufgaben sind:

- Messung und statistische Auswertung von Wasserständen und Durchflüssen,
- Ermittlung von Bodenwasserhaushalts- und Beschaffenheitsgrößen aus Lysimetern,
- Grundwasser-Probenahme,
- Erfassung von Niederschlags- und Wetterdaten,
- Betrieb der entsprechenden Messnetze,
- Mitarbeit in sachbezogenen, teils länderübergreifenden Arbeitsgruppen.

Zur langen Tradition der staatlichen Grundwasserbeobachtung in Sachsen gehört auch, dass sie seit Beginn an hauptsächlich von ehrenamtlichen Beobachtern durchgeführt wird. Zurzeit sind dies in Sachsen etwa 500. Dieses Ehrenamt wurde oft von Generation zu Generation weitergereicht und gehört in manchen Familien zur Tradition (LfULG 2012).

Der Brunnen in Radebeul-Wahnsdorf wird durchgängig von 1959 (Abbildung 15, Abbildung 16) bis heute beobachtet (Daten bis 1976 liegen nicht digital vor). Erste ehrenamtliche Beobachterin war Frau Gertrud Münch von 1959 bis 1979. Ab 1979 bis 1991 beobachtete den Brunnen Herr Tobias Weiß. Von 1991 an übernahm Herr Rainer Schulze den Messdienst. Der Brunnen wird jeweils am 1., 8., 15. und 22. des Monats gemessen. Die Messstelle befindet sich im Übergangsbereich zweier hydrogeologischer Großräume, a) dem Quartär des Elbtalgrabens, und b) dem des „Meißner Massives“. Unter der 2 Meter mächtigen eiszeitlichen Lößlehmschicht befindet sich Monzonit (ältere Bezeichnung: Syenodiorit). Die Grundwasserführung ist auf das Festgestein beschränkt. Beeinflussungen des Brunnens im Zuge der häufigen Bauarbeiten können nicht ausgeschlossen werden. Aus der Grundwasserstandsganglinie (Abbildung 17) lässt sich deshalb keine regionaltypische Hydrodynamik erkennen.

Brunnenbeschreibung (Einzelbrunnen)

1. Ort: *Radebeul*

2. a) Kreis: *Dresden* b) Bezirk: *Dresden*

3. Zuständiges AMH/HFH: *WWD Dresden*

4. Karte (1:25 000); Name: _____ Nr.: _____

5. Koordinaten: rechts: _____ hoch: _____

6. Nähere Bezeichnung der Meßstelle:
Im Gelände des Observatoriums bei den Wetterhütten

7. Beobachtet seit: _____

8. Wann ist der Brunnen errichtet worden? *1974 gebaut vom Baumstr. Höhe f. Gebäude*

9. Art des Brunnens: *Wirtschaftsbrunnen*

10. Art des Meßpunktes, von dem der Wasserstand zu messen ist?
OKA

11. Höhe des Meßpunktes über N.N.: _____ Eingemessen am: *30.6.1959*

12. Der Meßpunkt liegt *0,35* cm ^{über} ~~unter~~ der Erdoberfläche.

13. Tiefe der Brunnensole vom Meßpunkt ab gemessen: *15,77* m.

14. Am *30.6.1959* 19 _____ Wasserpiegel vom Meßpunkt ab gemessen: *5,74* m.

15. Verzeichnis der bei der Anlage des Brunnens vorgefundenen Bodenschichten: *nicht vorhanden!*

Heftrand

Abbildung 15: Erstbeschreibung des Brunnens von Herrn Meißner (Ausschnitt, 1959).

Anweisung für den Beobachter		5. Quellschüttung genau bestimmen:	Werden bei mehreren Quellen unterschiedlich große Gefäße benutzt, sind die Inhalte hinter jeder Einzelquelle in der Bemerkungsspalte einzutragen.
Die Messungen sind regelmäßig an dem von der für die Meßstelle zuständigen Dienststelle festgelegten Tag und nach der gegebenen Vorschrift auszuführen. (Anschrift der Dienststelle siehe Innenseite des Umschlages).		a) bei Meßgefäßen auf Liter und Sekunde;	6. Wassertemperatur auf Zehntel Grad genau messen, die Ergebnisse sind in der Zeile unter den Ergebnissen zu 1. einzutragen.
Dabei sind folgende Hinweise zu beachten:		b) bei Meßbecken auf Sekunde und Zentimeter Wuchs; (ggf. am Pegel)	
1. Wasserstand unter Meßpunkt auf 1 cm genau bestimmen. Bei Entnahmebrunnen ist die Messung vor der ersten Wasserentnahme durchzuführen.	Vorkommnisse vermerken.	c) bei Meßwehren auf Millimeter mit Meßstab oder Stechpegel.	7. Besondere Witterungserscheinungen, Eintragungen erfolgen in der Bemerkungsspalte.
2. Maßnahmen, durch die eine künstliche Beeinflussung des Grundwasserspiegels erfolgt (Betrieb von Pumpen größerer Industrieanlagen, Staßhaltungen, Räumung von Gräben und Bächen usw.), als besondere	3. Ergebnisse der Messungen und Beobachtungen sofort in das Meßbuch eintragen.	In den Spalten „Wasserstand (cm) unter Meßpunkt“ sind im Falle	
	4. Jede Veränderung an den Meßstellen, z. B. Beschädigung, Verstopfung, insbesondere Veränderungen des Meßpunktes, sowie Beschädigung oder Verlust des Meßgerätes ist sofort der zuständigen Dienststelle zu melden.	a) die Sekunden,	9. Ergebnisse der Messungen und Beobachtungen sofort in das Meßbuch eintragen.
		b) die Sekunden und in die zweite darunter liegende Zeile der Wuchs in Zentimeter;	
		c) die Millimeter einzusetzen. Der Gefäßinhalt in Liter bzw. der Behälterinhalt in m ³ ist in der dafür vorgesehenen Spalte „Inhalt“ einzutragen.	

Abbildung 16: Anweisung an den Beobachter (Auszug aus dem Beobachtungsbuch mit Beginn November 1967, zur Verfügung gestellt von Herrn Rainer Schulze).

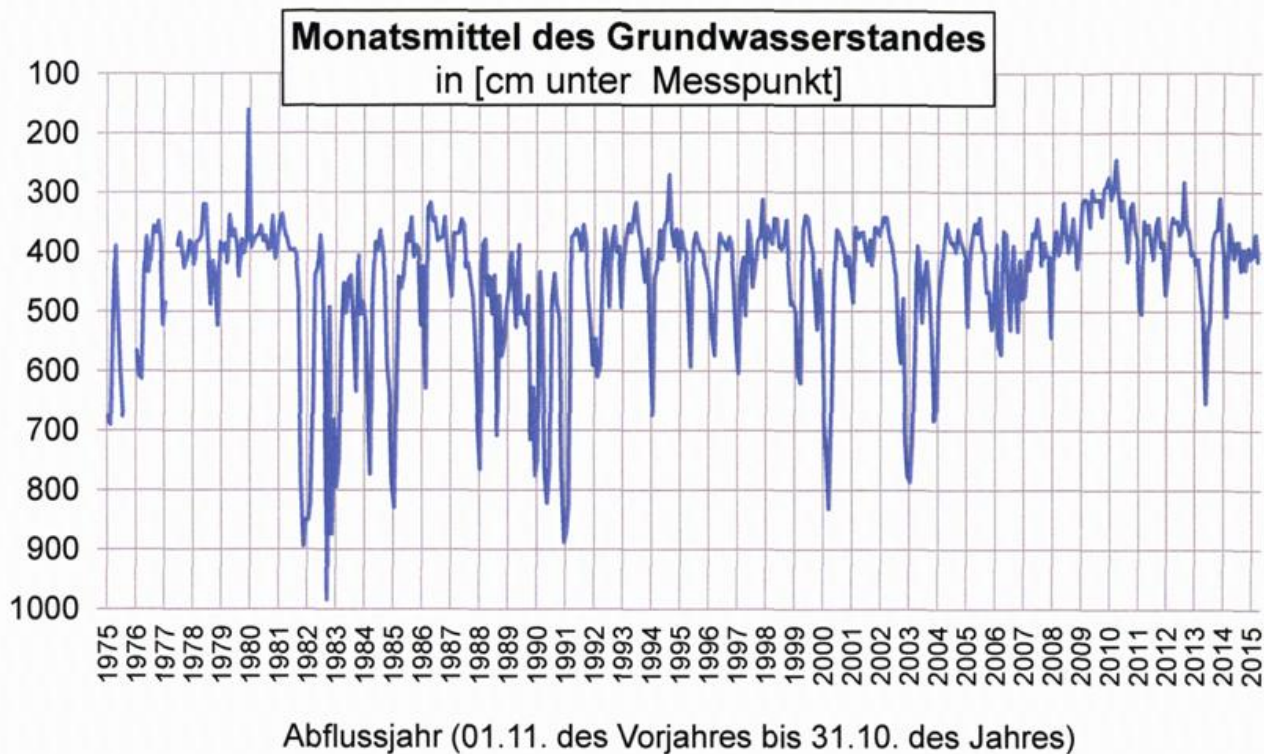


Abbildung 17: Grundwasserstandsganglinie des Brunnens in Radebeul-Wahnsdorf.

Abkürzungen

BfUL	Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
Bq/kg	Becquerel pro Kilogramm
DWD	Deutscher Wetterdienst
EU	Europäische Union
kBq/m ³	Kilobecquerel pro Kubikmeter
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
mm	Millimeter
MOW	Meteorologischen Observatorium Wahnsdorf
mSv/a	Millisievert pro Jahr
nm	Nanometer
NO _x	Stickoxide
O ₃	Ozon
pH	Negativer, dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration
REI	Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen
RR	Regenmenge
RWD	Reichswetterdienst
SO ₂	Schwefeldioxid
TA	Technische Anleitung (Verwaltungsvorschrift)
TCM	Tetrachloromercurat
UV	Ultraviolettstrahlung
VP	Vegetationsperiode
µg/m ³	Mikrogramm pro Kubikmeter

Literatur

39. BImSchV: Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065), die durch Artikel 87 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist, http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimsv_39/gesamt.pdf.
- BERGER, F., 1990: Katalog der Episoden mit hohen SO₂-Konzentrationen (SO₂-Episoden) 1970 bis 1989, Herausgeber: Meteorologischer Dienst der Deutschen Demokratischen Republik, Meteorologisches Observatorium Wahnsdorf.
- BERNHOFER, C., FRANKE, J., FISCHER, S., KIRSTEN, L., KÖRNER, P., KOSTROWSKI, D., PRASSE, H., SCHALLER, A., DONIX, T., 2014: Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen, Schriftenreihe des LfULG, Heft 3/2015, <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/23868>.
- FLEISCHER, P., POHL, K., 1995: Aufbereitung der Immissionsmessreihen des ehemaligen Meteorologischen Dienstes der DDR für wissenschaftliche Auswertungen, Bericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- FRANKE, J., SCHREIBER, U., HAUSMANN, A., WOLF, U., BÖTTCHER, F., SCHMIDT, M., 2015: 2014 - Wetter trifft Klima, gemeinsames Pressegespräch DWD, LfULG, Fachbeitrag, http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/Jahresueckblick2014_Fachbeitrag_2015-01-28.pdf.
- FREYDANK, E., 2014: 150 Jahre staatliche Wetter- und Klimabeobachtungen in Sachsen, Tharandter Klimaprotokolle Band 21, Technische Universität Dresden, Institut für Hydrologie und Meteorologie, Professur für Meteorologie.
- GOLDSCHMIDT, J., 1950: a) Die Singularitäten im jährlichen Witterungsverlauf von Wahnsdorf. Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik Nr. 2, Akademie-Verlag Berlin. (in der Druckversion steht fälschlich "H." statt "J. Goldschmidt"), b) Das Klima von Sachsen. Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik Nr. 3, Akademie-Verlag Berlin.
- GOLDSCHMIDT, J., 1953: Die 25jährige Beobachtungsreihe von Wahnsdorf. Abhandlungen des Meteorologischen und Hydrologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik Nr. 11, Bd. II, Akademie-Verlag Berlin.
- HERRMANN, G., HESSE, N., SCHEIBE, G., ZIER, M., 1991: 1916-1991, Von der Wetterwarte zum Landesamt für Umwelt und Geologie, 75 Jahre Meteorologisches Observatorium Wahnsdorf, Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- KOHL, G. (Redaktion), 1966: Fünfzig Jahre Meteorologisches Observatorium Wahnsdorf und Meteorologische Station Fichtelberg, Festschrift des Meteorologischen Dienstes der DDR.
- KÜCHLER, W., CONRADT, S., KUSS, H., 1996: BMFT-Verbundforschungsprojekt SANA, Wissenschaftliches Begleitprogramm zur Sanierung der Atmosphäre über den neuen Bundesländern, Abschlussbericht 1996, Hrsg.: Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltforschung (IFU), Garmisch-Partenkirchen, Teil I, Subprojekt B 1.5 „Trend von Schadstoffkonzentrationen in der planetaren Grenzschicht“.
- LfULG (2012): 100 Jahre staatliche Grundwasserbeobachtung in Sachsen, Herausgeber: Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/10852>.
- LfULG (2016): Luftqualität, Luftmessnetz in Sachsen, Informationen im Internet <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/luft/3611.htm>.
- METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR (Herausgeber), 1973: Klima und Witterung im Erzgebirge, Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik Nr. 104 (Band XIII), Akademie-Verlag Berlin.
- PAUSCH, A., BASTIAN, S., FRANKE, J., LÖSCHAU, G., 2015: Luftqualität in Sachsen – Jahresbericht 2014, Herausgeber: LfULG, <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/24641>.
- PAUSCH, A., BASTIAN, S., 2015: Ozonsituation in Sachsen 2015 – vorläufige Ergebnisse, Fachbeitrag, Hrsg.: LfULG, http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/luft/Fachbeitrag_Ozon_2015.pdf.
- PLEISS, H., 1961: Wetter und Klima des Fichtelberges. Abhandlungen des Meteorologischen und Hydrologischen Dienstes der DDR, Nr. 62 (Band VIII); Die Meteorologie des Fichtelberges. Zeitschrift für Meteorologie, Bd.15, 1961, 330-349.
- RAT DER STADT OBERWIESENTHAL, 1991: 75 Jahre Wetterwarte Fichtelberg, Redaktion H. Schmidt; u.a. mit Beiträgen von H. Schmidt (75 Jahre Bergstation Fichtelberg mit Basisstation Wahnsdorf, Aus dem Gästebuch), F. Handschack (Das Klima von Wahnsdorf und vom Fichtelberg – Unterschiede und

Gemeinsamkeiten), H. Gäbler (Besondere Wettererscheinungen auf dem Fichtelberg), W. Spanowsky (Der Pflanzgarten auf dem Fichtelberg) und einer Liste der Mitarbeiter und Stationsleiter von 1915 bis 1991.

- SCHMIDT, H., 1991: 75 Jahre Wetterstation Fichtelberg, Informationsschrift des Deutschen Wetterdienstes, Wetteramt Dresden.
- SCHMIDT, H., FREYDANK, E., 1991: 75 Jahre Bergstation Fichtelberg mit Basisstation Wahnsdorf, Zeitschrift für Meteorologie, Bd. 41 (1991) Heft 4, 306–308.
- SCHREIBER, U., 2012: Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen in Sachsen 2010, Herausgeber: LfULG, <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14813>.
- SCHREIBER, U., 2016: Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen in Sachsen 2012 (in Vorbereitung).
- WARMBT, W., 1963: Luftchemische Untersuchungen des bodennahen Ozons 1952-1961, Methoden und Ergebnisse, Habilitationsschrift Fakultät für Forstwirtschaft der TU Dresden, veröffentlicht in Abhandlungen des meteorologischen Dienstes der DDR, Band X, Nr. 72-80, Akademie-Verlag Berlin 1966.
- WIKIPEDIA: <https://de.wikipedia.org/wiki/PH-Wert>.

Anhang: Meteorologische Messparameter, eingesetzte Messmethoden in Radebeul-Wahnsdorf
(vorläufig, Stand 26.01.2016)

Parameter	Messzeitraum	Messmethode
Windrichtung	1934 (1916 Beginn Windregistrierung) -1974/92	bis 1916 Schätzung, ab 1916 Windfahne, ab Sommer 1936 Fuess Universalwindmessgerät, ab 1950 Pethenwindanzeigergerät, 1936 bzw. 1944 Messbeginn mit UMG Fuess 82a, aktuell: Thies – kombinierter Windgeber 4.3324.31.041
Windgeschwindigkeit	1934 (1916 Beginn Windregistrierung) -1974/92	bis 1916 Schätzung nach Bft-Skala, ab 1916 Robinsonanemometer, System Schreiber/Kühn, ab Sommer 1946 Fuess Universalwindmessgerät, ab 1916 Winddruckplatten, ab 1950 Böenschreiber 82a, ab Ende 1960er Jahre Ablösung 82a durch Typ Junkalor, aktuell: Thies – kombinierter Windgeber 4.3324.31.041
Temperatur	ab 1916	bis 1967 Flüssigglasthermometer, ab 1968 Widerstandsthermometer, ab 1977 Minimum-Maximum-Thermometer, Messungen bis 1954 in Schreiberscher Großhütte, ab 1954: große englische Hütte, aktuell: Thies-Hygro-Thermogeber Compact 1.1025.55.241
Luftdruck	ab 1916	Stationsbarometer, aktuell: Thies-Barogeber 3.1150.10.015
Luftfeuchte	ab 1916	Aspirationsspsychrometer nach Assmann, aktuell: Thies-Hygro-Thermogeber Compact 1.1025.55.241
Sonnenscheindauer/ Globalstrahlung	ab 1920/ ab 1937 genaue Messungen (1.12.1967-aktuell)	Sonnenscheinautograph nach Campall/Stokes, ab 1995 zusätzlich Pyrheliometer, aktuell: Thies-Pyranometer CM 3 7.1415.03 (305 – 2800 nm)
Niederschlags- höhe	ab 1917	bis 1934 Regenmesser, System Bruhns-Schreiber, bis 1965 Einsatz eines Schneekreuzes, 11/98 (?) Hellmann-Sammler

Abbildungsverzeichnis

Kapitel	Seite	
1.1	Abbildung 1: Regionaler Meeresspiegelanstieg bis zum Zeitraum 2081-2100 durch Abschmelzen von Gebirgsgletschern, des grönländischen und antarktischen Eisschildes, bezogen auf 1986-2005; nach SLANGEN et al. 2014; aus LOZAN, GRASSL, KASANG, NOTZ, ESCHER-VETTER (Herausgeber): Das Eis der Erde	9
1.2	Abbildung 1: Vieljährige Mittel der Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 116 m über Grund im Monat Januar für den 20-jährigen Zeitraum 1995-2014 (BORSCHKE et al. 2016)	13
1.3	Abbildung 1: Nutzerspezifischer Wissenstransfers durch transdisziplinäres und iteratives Vorgehen	16
	Abbildung 2: Prototypische Entwicklung nutzerspezifischer Klimaservices nach dem Baukasten-Prinzip	17
1.4	Abbildung 1: Mittlerer korrigierter Jahresniederschlag in Sachsen, Zeitraum 1981-2010 (Quelle: rekis-Datenbank)	19
	Abbildung 2: Mittlere Jahrestemperatur in Sachsen, Zeitraum 1981-2010 (Quelle: rekis-Datenbank)	19
1.5	Abbildung 1: Extremes Klareis am Windsensor	22
	Abbildung 2: PT 100-Widerstandsthermometer und HMP 45D-Feuchtesensor nach Schneesturm	24
	Abbildung 3: Automatische Sichtweitenmessung vor und nach der Reinigung von Eisablagerungen	28
1.6	Abbildung 1: Anzahl „großer Naturkatastrophen“ weltweit seit 1980, aufgeschlüsselt nach Tsunamis, Erdbeben und Vulkanen („geophysikalisch“, rot), Stürmen (grün), Hochwasser, Murenabgängen u.ä. (blau) sowie Hitzewellen, Dürren und Waldbränden (gelb); Quelle: MUNICHRE 2015	31
	Abbildung 2: Zeitliche Änderung der PDF (links Normalverteilung und August-Temperatur in Frankfurt/Main, rechts Gumbel-Verteilung und Winter-Niederschlag in Eppenrod bei Limburg) von 1901 bis 2006 bzw. 2003 und farbliche Markierung der Flächenanteile, die ein Maß für die Unter- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit der verwendeten Schwellenwerte sind (hier nach SCHÖNWIESE 2013b)	32
1.7	Abbildung 1: Kartendarstellung der Dürrebedingungen im August 2003 mittels SPI (links) und SPEI (rechts) auf den Zeitskalen 3 (oben) und 12 (unten) Monate	35
	Abbildung 2: Sachsenmittelwert der Dürreindizes SPI und SPEI sowie deren Differenz für die Zeitskalen von 3 und 12 Monaten	36
1.8	Abbildung 1: Kerngebiete der Änderungen für das Eintreten von Starkregenereignissen (R90p, R95p) 1981-2010 vs. 1961-1990 in Sachsen (Verhältnis Zu-/Abnahme 12:1)	42
	Abbildung 2: Kerngebiete von Änderungen in der mittleren Intensität pro Starkregenereignis (R90p, R95p) 1981-2010 vs. 1961-1990 in Sachsen (Verhältnis Zu-/Abnahme 6:1)	42
1.9	Abbildung 1: Gesamtniederschlag 06.-14.08.2002, Sachsen; Ergebnis des RADOLAN-Verfahrens: Echtzeitverfahren unter Verwendung der automatischen Stundenniederschlagswerte (links); Reprozessierung unter zusätzlicher Verwendung der disaggregierten Tagesniederschlagswerte (rechts); BRENDEL et al. (2015)	44

Kapitel	Seite	
1.9	Abbildung 2: Münster, 28.07.2014: Interpolierte Bodendaten (REGNIE) (links); RADOLAN-Echtzeitverfahren unter Verwendung der automatischen Stundenniederschlagswerte (Mitte); Reprozessierung unter Verwendung zusätzlicher verfügbarer Niederschlagswerte (rechts)	45
1.10	Abbildung 1: Niederschlagssummen in 1 km Auflösung für den Zeitraum April 2004 bis Dezember 2009 im Freistaat Sachsen für die Datensätze a) RADOLAN, b) RADN, c) RAKLIDA, d) REGNIE (modifiziert nach KRONENBERG und BERNHOFER 2015)	48
	Abbildung 2: Tägliche Niederschlagssummen des 15.6.2007, a) RAKLIDA, b) aufsummiertes RADOLAN rw-Produkt, c) RADN; d) Differenz zwischen RADOLAN- (rw-Produkt) und RADN-Daten	49
1.11	Figure 1: The long-term variability of annual mean air temperature at Śnieżka (1901-2014) and Jelania Góra (1951-2014) stations (dark blue line – linear trend in the years 1901-2014, black line – linear trend in the years 1951-2014)	52
	Figure 2: Coefficient of the linear trend of mean annual air temperature at Śnieżka for 30-year moving periods in 1901-2014	53
1.12	Abbildung 1: Zugbahnkarten aus ERA-40. Die roten Punkte kennzeichnen den Startpunkt der jeweiligen Zugbahn	56
	Abbildung 2: Darstellung der einzelnen definierten Niederschlagsregionen, die sich aus der Zusammenfassung all jener Gitterboxen ergeben, die eine ähnliche Niederschlagsvariabilität zeigen – auf Jahres- und jahreszeitlicher Basis	56
	Abbildung 3: Generalisierter Vergleich der Veränderung regionaler Starkniederschlagssummen gegenüber 1971-2000 aus Zugbahn-Analyse (ZB) und Zirkulationstyp-Analyse (ZT), basierend auf dem ECHAM6-Ensemble-Mittel für die Szenarien RCP4.5 und RCP8.5. Rot: in beiden Analysen Abnahme der regionalen Starkniederschlagssummen Blau: in beiden Analysen Zunahme der regionalen Starkniederschlagssummen Grün: unterschiedliches Vorzeichen der Veränderung	58
1.13	Abbildung 1: Risiko als Resultat der Interaktion von Gefährdung und Vulnerabilität, MÜLLER (2010)	59
	Abbildung 2: Kreislauf Hochwasserrisikomanagement, MÜLLER (2010)	60
1.14	Abbildung 1: Bewirtschaftungsintegrierte Verwaltungen in einer Tiefenlinie eines Ackerschlag	64
	Abbildung 2: DGM des beflogenen Erosionsgrabens am Großräschener See und dessen Volumen (KUNTH et al. 2015)	65
1.16	Abbildung 1: Landschaftsplan Dresden – Strategisches Leitbild „Dresden – Die kompakte Stadt im ökologischen Netz“, Quelle: Umweltamt der Landeshauptstadt Dresden	72
	Abbildung 2: Synthetische Klimafunktionskarte – Ausschnitt, Quelle: Umweltamt der Landeshauptstadt Dresden	73
1.18	Abbildung 1: Beispiele für die Unterrichtsmaterialien	76
	Abbildung 2: Der Klimapavillon für die Präsentation an Schulen in Sachsen	77

Kapitel	Seite	
2.3	Abbildung 1: Innerjährlicher täglicher Verlauf der Lufttemperatur (1916–2015): links: Messwerte und rechts: Anomalien von den jeweiligen säkularen Tagesmittelwerten	88
	Abbildung 2: a) Jahresmitteltemperatur, b) jahreszeitliche Temperaturveränderungen (Basis: 1961–1990; 11jährig gleitende Mittelwerte), c) Häufigkeitsvergleich der Tagesmitteltemperaturen im Vergleich der Perioden 1916–1988 und 1989–2015 (Klassengröße: 1 K) sowie d) jährliche Anzahl der Wärme- und Kälterekorde für die Tagesmitteltemperatur	89
	Abbildung 3: Panel aus 6 Temperaturkenntagen zur Charakterisierung der Sommerwärme für 1916–2015; a) Temperaturmittelwert der Monate Juni, Juli und August; b) jährliche Wärmesumme der Tagesmitteltemperaturen >10°C; c) höchstes jährliches Temperaturmaximum und d) Temperaturminimum; e) Tage mit Temperaturmaximum ≥ 99 . Perzentil der Monate Juni, Juli und August des Zeitraums 1961–1990 sowie f) gleichem Index für das Tagesminimum	91
	Abbildung 4: Panel aus 8 Temperaturkenntagen zur Charakterisierung der Winterkälte für 1916–2015; a) Temperaturmittelwert der Monate Dezember, Januar und Februar; b) jährliche Kältesumme der Tagesmitteltemperaturen <0°C; c) niedrigstes jährliches Temperaturminimum und d) Temperaturmaximum; e) Tage mit Temperaturmaximum ≤ 1 . Perzentil der Monate Dezember, Januar und Februar des Zeitraums 1961–1990 sowie f) gleichem Index für das Tagesminimum; g) Anzahl der Frosttage und h) Anzahl der Eistage	93
	Abbildung 5: Diagramm der Temperaturanomalien auf dem Fichtelberg (1915–2015; in K) und Häufigkeitsänderungen (1989–2015 vs. 1916–1988) der 29 Großwetterlagen für a) Winter und b) Sommer; Blasengröße: mittlere Großwetterlagenhäufigkeit im Zeitraum 1916–2015 (in %); Farbgebung: blau = kälter; orange = wärmer; Temperaturanomalien berechnet auf Basis der jeweiligen langjährigen zentrierten fünftägigen Mittelwerten	94
2.4	Abbildung 1: Jahresgang der Niederschlagshöhe 1916-2015 an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg	97
	Abbildung 2: Perzentile der Jahressummen der Niederschlagshöhe an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg bezogen auf den Zeitraum 1916-2015	97
	Abbildung 3: Verlauf der Perzentile der Jahressummen der Niederschlagshöhen in den Dekaden von 1916 bis 2015 an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg	98
	Abbildung 4: Jahressummen der Niederschlagshöhen in mm der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg	98
	Abbildung 5: Jahressumme der Tagesniederschläge mit Niederschlagshöhen < 30 mm (blau) im Vergleich zur Jahressumme der Tagesniederschlägen ≥ 30 mm (rot) auf dem Fichtelberg 1916 bis 2015	99
	Abbildung 6: Verlauf der Perzentile der Februarsummen der Niederschlagshöhen in den Dekaden von 1916 bis 2015 an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg	99
	Abbildung 7: Entwicklung der Anzahl der Tage ohne bzw. ohne messbaren Niederschlag im April an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg in den zehn Dekaden von 1916-25 bis 2006-15	100
	Abbildung 8: Dekadenmittel Mai des Niederschlages an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg 1916-2015	100
	Abbildung 9: Entwicklung der Perzentile der durchschnittlichen Dekadensummen des Augusts an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg 1916-2015	101

Kapitel	Seite	
2.4	Abbildung 10: Entwicklung der dekadeweisen Niederschlagsereignistage im Monat November an der DWD-Bergwetterwarte Fichtelberg 1916-2015	102
2.5	Abbildung 1: Mittlere tägliche Schneehöhe vom Fichtelberg von 1916 bis 2015 und deren Differenzen zum Vortag	107
	Abbildung 2: 30-jährige gemittelte tägliche Schneehöhen und die jeweiligen täglichen Differenzen zwischen den drei Zeitabschnitten 1921 bis 1950, 1951 bis 1980 und 1981 bis 2010	108
2.6	Abbildung 1: Box-Whisker-Plots der An- und Kationen getrennt für 2009, 2010 und 2011	111
	Abbildung 2: Konzentrationen [$\mu\text{mol/L}$] der An- und Kationen in Abhängigkeit der Anströmung, getrennt nach Jahren	112
	Abbildung 3: Box-Whisker-Plot für WSTC, WSTOC und WSIC	113
	Abbildung 4: Box-Whisker-Plots der kurzkettigen Dicarbonsäuren	114
	Abbildung 5: Box-Whisker-Plots für die funktionalisierten Dicarbonsäuren	115
	Abbildung 6: Konzentrationen der funktionalisierten Dicarbonsäuren [$\mu\text{mol/L}$] in Abhängigkeit der Anströmung	115
	Abbildung 7: Box-Whisker-Plots der Zucker	116
	Abbildung 8: Box-Whisker-Plots der Nitro- und Dinitrophenole	117
	Abbildung 9: Konzentrationen der Nitro- und Dinitrophenole in Abhängigkeit der Anströmung	117
2.7	Abbildung 1: Die Wetterwarte Wahnsdorf nach der Inbetriebnahme 1916, die Schreibersche große Wetterhütte und die Niederschlagsmessenrichtungen	120
	Abbildung 2: Grundriss des Geländes der Wetterwarte Wahnsdorf, in der Mitte: Standort der Wetterhütte und der Niederschlagsmessenrichtung, rechts Hütte für luftelektrische Messungen, hinten links: Ballonfüllhalle	120
	Abbildung 3: Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$) im Raum Wahnsdorf/ Klotzsche, 1917-2015: Jahresmittel	123
	Abbildung 4: Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$) im Raum Wahnsdorf/ Klotzsche, 1917-2015: Monatsmittel	123
	Abbildung 5: Temperaturabgeleitete Ereignistage im Raum Wahnsdorf/ Klotzsche, 1917-2015: a) Sommertage, b) Heiße Tage, c) Frosttage, d) Eistage	124
	Abbildung 6: Niederschlag (mm) in der Vegetationsperiode I (VP I: April-Juni) im Raum Wahnsdorf/ Klotzsche: 1917-2015	124
	Abbildung 7: Niederschlag (mm) in der Vegetationsperiode I (VP I: April-Juni) im Raum Wahnsdorf/ Klotzsche: 2013	125
	Abbildung 8: Anzahl Schwüler Tage (Dampfdruck > 18 hPa) im Raum Wahnsdorf/ Klotzsche, 1917-2015 in der Vegetationsperiode II (Juli-September)	125
	Abbildung 9: Starkregenereignisse (R90p) im Raum Wahnsdorf/ Klotzsche 1917-2015 in der Vegetationsperiode II (Juli-September)	126
	Abbildung 10: Ozon-Mittelwerte	128
	Abbildung 11: SO ₂ -Mittelwerte	129
	Abbildung 12: pH-Werte im Niederschlag	129
	Abbildung 13: Jahresdosen und Aktivitätskonzentrationen von Cäsium-137	131

Kapitel	Seite
Abbildung 14: Jahresmittelwerte von Radon-222 im Bodengas	131
Abbildung 15: Erstbeschreibung des Brunnens von Herrn Meißner (Ausschnitt, 1959)	133
Abbildung 16: Anweisung an den Beobachter (Auszug aus dem Beobachtungsbuch mit Beginn November 1967, zur Verfügung gestellt von Herrn Rainer Schulze)	133
Abbildung 17: Grundwasserstandsganglinie des Brunnens in Radebeul-Wahnsdorf	134

Tabellenverzeichnis

Kapitel		Seite
1.6	Tabelle 1: Kleine Auswahl „großer Naturkatastrophen“ seit dem Jahr 2000, volkswirtschaftliche und versicherte Schäden im Mill. US\$, Quelle: MUNICHRE 2002 ... 2015	30
1.7	Tabelle 1: Zusammenhänge zwischen den Dürreindizes SPI und SPEI mit Auswirkungen in den Bereichen Land-, Forst- und Wasserwirtschaft anhand einiger Studien (nach MICHEL 2015)	38
2.3	Tabelle 1: Säkulare Charakterisierung (1916-2015) der monatlichen und jährlichen Temperatureigenschaften; Wärmesumme: Summe der Temperaturmittel $> 10^{\circ}\text{C}$, Kältesumme: Summe der Temperaturmittel $< 0^{\circ}\text{C}$	88
	Tabelle 2: Rekordliste verschiedener winterlicher Temperaturkenntage	92
2.4	Tabelle 1: Anzahl der Tage mit Niederschlagstagesummen ≥ 30 mm in den Dekaden	103
2.6	Tabelle 1: Korrelationen von WSTC und WSOC gegenüber den Ionen für die Station Fichtelberg	113

Autorenverzeichnis

- in der Reihenfolge des erstmaligen Auftretens in diesem Band -

Prof. Dr. Jörg MATSCHULLAT
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum
Brennhausgasse 14
09599 Freiberg
Joerg.Matschullat@ioez.tu-freiberg.de

Prof. Dr. Christian BERNHOFER
Technische Universität Dresden
Professur für Meteorologie
Piener Straße 23
01737 Tharandt
Christian.Bernhofer@tu-dresden.de

Prof. Dr. Hartmut GRASSL
Max-Planck-Institut für Meteorologie
Bundesstraße 53
20146 Hamburg
hartmut.grassl@mpimet.mpg.de

Dr. Paul BECKER
Deutscher Wetterdienst
Geschäftsbereich Klima und Umwelt
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach am Main
Paul.Becker@dwd.de

Prof. Dr. Daniela JACOB, Dr. Irene FISCHER-BRUNS, Dr. Peer SEIPOLD
Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH (GERICS)
Fischertwiete 1 (Chilehaus Eingang B)
20095 Hamburg
Daniela.Jacob@hzg.de

Dr. Valeri GOLDBERG
Technische Universität Dresden
Professur für Meteorologie
Piener Straße 23
01737 Tharandt
Valeri.Goldberg@tu-dresden.de

Gerd FRANZE
Deutscher Wetterdienst
Wetterwarte Fichtelberg
Fichtelbergstraße 3
09484 Kurort Oberwiesenthal
Gerd.Franze@dwd.de

Prof. Dr. Christian-Dietrich SCHÖNWIESE
Goethe-Universität
Institut für Atmosphäre und Umwelt
Postfach 11 19 32
60054 Frankfurt a.M.
schoenwiese@meteor.uni-frankfurt.de

Dr. Stephanie HÄNSEL, Dominic RUMPF
Technische Universität Bergakademie Freiberg
Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum
Brennhausgasse 14
09599 Freiberg
Stephanie.Haensel@ioez.tu-freiberg.de

Dr. Johannes FRANKE
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Abteilung 5
Postfach 540137
01311 Dresden
Johannes.Franke@smul.sachsen.de

Dr. Tanja WINTERRATH
Deutscher Wetterdienst
Abteilung Hydrometeorologie
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach am Main
Tanja.Winterrath@dwd.de

Dr. Rico KRONENBERG
Technische Universität Dresden
Professur für Meteorologie
Pienner Straße 23
01737 Tharandt
Rico.Kronenberg@tu-dresden.de

Dr. Irena OTOP, Dr.-Ing. Mariusz ADYNKIEWICZ-PIRAGAS, Bartłomiej MISZUK
Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute
Wrocław Branch
30 Parkowa Street
51-616 Wrocław, Poland
Irena.Otop@imgw.pl

Dr. Annemarie LEXER, Michael HOFSTÄTTER, Barbara CHIMANI, Manfred GANEKIND
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Fachabteilung Klimavariabilität und Modellierung / Bereich Daten, Methoden, Modelle
Hohe Warte 38
A-1140 Wien
annemarie.lexer@zamg.ac.at

Prof. Dr. Jucundus JACOBET, Markus HOMANN, Dr. Andreas PHILIPP, Dr. Christoph BECK
Universität AugsburgAugsburg
Institut für Geographie
86135
jucundus.jacobeit@geo.uni-augsburg.de

Dr.-Ing. habil. Uwe MÜLLER
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Abteilung 4
Zur Wetterwarte 11
01109 Dresden
Uwe.Mueller@smul.sachsen.de

Ellen MÜLLER, Dr. Walter SCHMIDT
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Abteilung 7
Postfach 540137
01311 Dresden
Ellen.Mueller@smul.sachsen.de

Phoebe HÄNSEL, Franziska KUNTH, Andreas KAISER und Marcus SCHINDEWOLF
TU Bergakademie Freiberg
Soil and Water Conservation Unit
Agricolastrasse 22
09599 Freiberg
Phoebe.Haensel@tbt.tu-freiberg.de

Dr. Heike HÜBENER
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Fachzentrum Klimawandel Hessen
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden
heike.huebener@hlnug.hessen.de

Dr. Christian KORNDÖRFER, Franziska REINFRIED
Landeshauptstadt Dresden
GB7 Umweltamt (Amtsleitung)
Grunaer Str. 2
01069 Dresden
umweltamt@dresden.de

Frank BÖTTCHER
Institut für Wetter- und Klimakommunikation GmbH
Jenfelder Allee 80 Haus N, 4. OG
22045 Hamburg
boettcher@klimagipfel.de

Werner SOMMER
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Abteilung 5
Postfach 540137
01311 Dresden
Werner.Sommer@smul.sachsen.de

Falk BÖTTCHER
Deutscher Wetterdienst
Abteilung Agrarmeteorologie
Postfach 32 11 08
04208 Leipzig
Falk.Boettcher@dwd.de

Dr. habil. Eberhard FREYDANK
Uhdestraße 30
01219 Dresden
e.freydank@kabelmail.de

Dr. Andreas HOY
Früher: Technische Universität Bergakademie Freiberg, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum
Jetzt: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Fachzentrum Klimawandel Hessen
Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden
Andreas.Hoy@hlnug.hessen.de

Prof. Dr. Holger KANTZ
Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems
Noethnitzer Str. 38
01187 Dresden
kantz@pks.mpg.de

Stephanie SCHÜTTAUF
Leibniz Institut für Troposphärenforschung – TROPOS
Permoserstraße 15
04318 Leipzig
stephanie.schuettauf@tropos.de

Dr. Andrea HAUSMANN, Peter FLEISCHER, Udo KÖNIG, Cornelia OELKE, Annette PAUSCH,
Dr. Peter BÖRKE, Philipp SELINGER, Uwe WOLF
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Abteilung 5
Postfach 540137
01311 Dresden
Andrea.Hausmann@smul.sachsen.de

Ralf ENDE, Dr. Horst-Günter KATH, Dr. Thomas HEINRICH, Beate SCHIMMEL, Falk NÜSSLER
Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
Altwahnsdorf 12
01445 Radebeul
Ralf.Ende@smul.sachsen.de

Annalen der Meteorologie

- Nr. 48 Phenology 2015: Third International Conference on Phenology, 5.-8. October 2015, Kusadasi (Turkey), Programme and Abstracts. 2015
- Nr. 47 METTOOLS IX: Programm, Übersicht, Kurzbeiträge. Tagung des Fachausschusses Umweltmeteorologie FAU MET der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft DMG e.V. vom 17. bis 19. März 2015 in Offenbach (Main). 2015
- Nr. 46 Goethes weiteres Erbe : 200 Jahre Klimastation Jena (Beiträge des Jubiläumskolloquiums „200 Jahre Klimamessstation Jena“. 2013
- Nr. 45 125 Jahre Wetterstation Geisenheim 1884 - 2009 (Jubiläumsband mit Beiträgen aus der agrarmeteorologischen Forschung und Beratung). 2009
- Nr. 44 Programme & Extended Abstracts, 30th International Conference on Alpine Meteorology : 11 - 15 May 2009, Badnerhalle, Rastatt, Germany. 2009
- Nr. 43 125 Jahre Deutsche Meteorologische Gesellschaft : Festveranstaltung am 7. November 2008 in Hamburg. 2008
- Nr. 42 50 Jahre Überwachung der Radioaktivität in der Atmosphäre durch den Deutschen Wetterdienst : Festveranstaltung am 8. - 9. Juni 2005, Langen, Deutschland. 2006
- Nr. 41 17th International Congress of Biometeorology - ICB 2005. 2005
- Nr. 40 SIRWEC 2004 - 12th International Road Weather Conference, Bingen. 2004, CD-ROM
- Nr. 39 4. Fachtagung BIOMET (19. - 20. April 1999 in München) des Fachausschusses BIOMET der DMG gemeinsam mit der Gesellschaft zur Förderung Medizin-Meteorologischer Forschung e. V. 1999
- Nr. 38 Herbstschule Radarmeteorologie 1998 vom 2. bis 6. November in Oberpfaffenhofen. 1998
- Nr. 37 Deutsche Meteorologen-Tagung vom 14. bis 18 September 1998 in Leipzig, Band 1 und 2. 1998

Gesamtliste der „Annalen der Meteorologie“ unter www.dwd.de/bibliothek.



Deutscher Wetterdienst

Fachinformationsstelle und Deutsche Meteorologische Bibliothek
Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach