

# Das Jahrhunderthochwasser der Elbe: Synoptische Wetterentwicklung und klimatologische Aspekte

Bruno Rudolf und Jörg Rapp

## 1 Ein Jahrhundertereignis

Meteorologische Ursache der katastrophalen Überschwemmungen an den Flusssystemen der Donau und - im Besonderen - der Elbe im August 2002 war eine außergewöhnliche Wetterlage, bei der verschiedene meteorologische Faktoren gemeinsam zu solch extremen Niederschlägen führten, wie sie zuvor in Deutschland noch nicht registriert wurden. Im Erzgebirge fielen gebietsweise mehr als 300 mm an einem Tag. Am 12. August wurde an der DWD-Station Zinnwald-Georgenfeld die Rekordniederschlagshöhe von 352,7 mm in der Zeitspanne von 5:00 Uhr MESZ bis zur selben Uhrzeit des Folgetags gemessen. Auch in der Region nördlich dieses Mittelgebirges fielen verbreitet in 24 Stunden mehr als 150 mm und sogar im Berliner Raum noch rund 100 mm. Die oben genannten Daten sind Rekordwerte, die - nach den bisherigen Beobachtungen statistisch beurteilt - seltener als einmal in 100 Jahren zu erwarten wären.

Den extremen Niederschlägen folgte ein sehr rasches Ansteigen der Pegelstände der Nebenflüsse der Elbe, insbesondere der Flüsse, die das Erzgebirge nach Norden entwässern. Der Wasserstand der Elbe erreichte anschließend eine Höchstmarke, die seit Jahrhunderten nicht registriert worden war. Die durch das August-Hochwasser insgesamt entstandenen wirtschaftlichen Schäden (Tschechien: 3 Milliarden Euro, Österreich: 3 Milliarden Euro; Deutschland: 9,2 Milliarden Euro) stellen einen neuen europäischen Rekord für Hochwasserschäden dar. Hochwasser hat niemals nur eine einzelne Ursache, daher ist es aus dem Blickwinkel der klimatologischen Forschung wichtig, die einzelnen zu dem Hochwasser führenden meteorologischen Faktoren genauer unter die Lupe zu nehmen. Nur im Vergleich mit der klimatischen zeitlich-räumlichen Niederschlagsverteilung kann eingeschätzt werden, wie außergewöhnlich und extrem die meteorologischen Bedingungen für dieses Ereignis wirklich waren.



Abb. 1: Das Hochwasser der Elbe bei Elster (links) und die überschwemmten Straßen in Meißen (rechts) - Fotos von M. Zebisch, TU Berlin.

## 2 Synoptische Beschreibung der Wettersituation

### 2.1 Synoptische Entwicklung

Ein wesentlicher Auslöser der Katastrophe bestand Tage zuvor im Transport maritimer Kaltluft aus dem isländisch-grönländischen Bereich zum westlichen Mittelmeer, wo sich am 10.08.2002 ein markantes Höhentief bildete. Dynamische Hebungs Vorgänge führten auf der Vorderseite dieses Tiefs über Oberitalien zu raschem Luftdruckfall, so dass sich in der Nacht zum 11.08.2002 über der nördlichen Adria ein sogenanntes Vb-Tief bildete (Kernisobare 1000 hPa). Es bezog extrem feuchte und warme Mittelmeerluft in seine Zirkulation ein, ein für das später über Mitteleuropa vorhandene Niederschlagspotential ganz entscheidender Vorgang (Abb. 2).

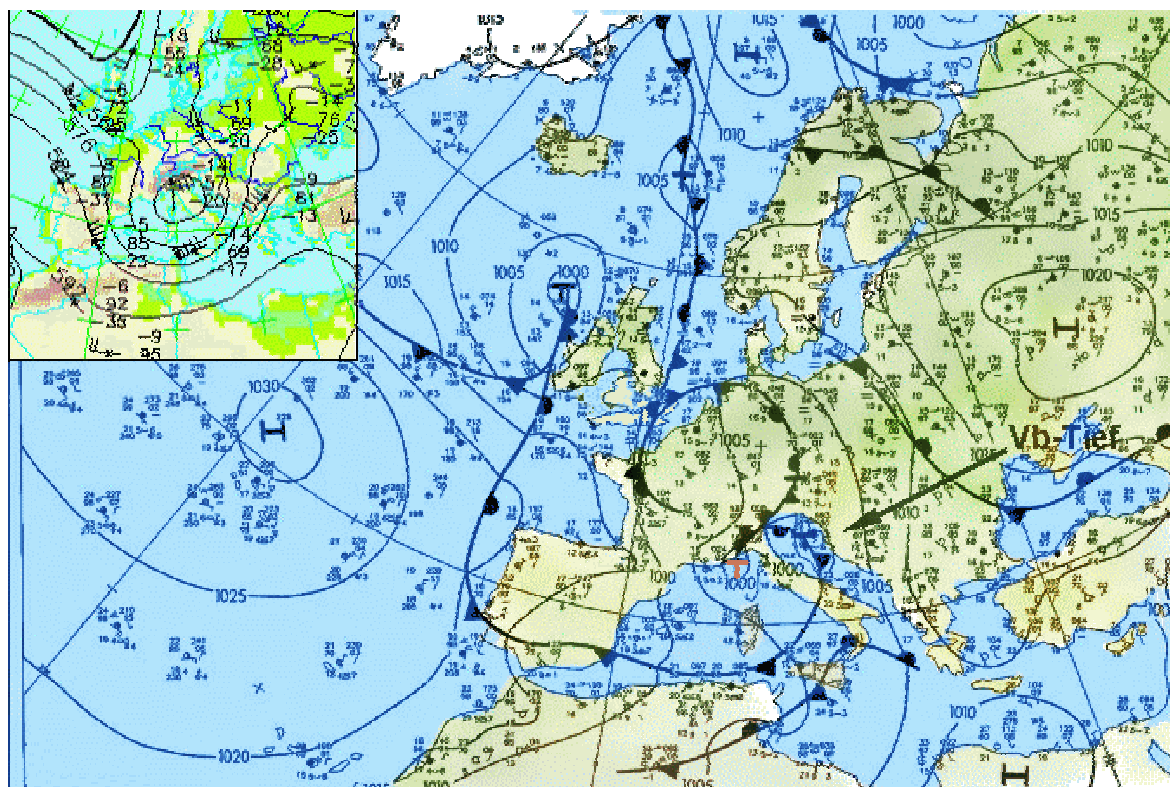


Abb. 2: Bodenwetterkarte des DWD vom 11.08.2002, 00 UTC (großes Bild) und absolute Topografie 500 hPa vom 11.08.2002, 12 UTC (kleines Bild).

Das Tief zog anschließend auf einer "Vb-Zugbahn" nordostwärts (Abb. 3), wobei seine Bewölkungsstruktur immer mehr verwirbelte. Auf der Alpensüdseite und über den Alpen selbst lagen zu diesem Zeitpunkt schon hochreichende frontale Wolkenbänder mit kräftigen Regenfällen, aber auch eingelagerten Gewitterzellen. Bis zum 12.08.2002 verlagerte sich das Tief unter Verstärkung weiter nach Tschechien, später erreichte es Sachsen. Auf der Nord- und Westseite des Tiefs befand sich ein ausgedehntes und starkes Hebungsgebiet im Bereich einer divergenten Höhenströmung (siehe Abb. 4), wodurch lang andauernde und ergiebige flächenhafte (skalige) Niederschläge initiiert wurden. Aufgrund stabiler Hochdruckgebiete über Ost- und Westeuropa wurde das Tief schließlich nahezu stationär und drehte sich gewissermaßen genau über dem Osten Deutschlands ein. Die Atmosphäre erhielt hier immer wieder neuen Nachschub an sehr feuchter, labil geschichteter Mittelmeerluft (Warmluftadvektion), die großskalig gehoben wurde, kondensierte und an Ort und Stelle "ausregnete".

Die Situation wurde dadurch verschärft, dass sich am 12.08.2002 im Bereich des Erzgebirges aufgrund des Luftdruckfalls im Osten und Druckanstiegs im Westen ein starker Druckgradient entwickelte, der einen zunehmenden, im Mittelgebirge stürmisch auffrischenden Nordwestwind zur Folge hatte. Durch diese besondere synoptische Entwicklung wurde die mit Flüssigwasser gesättigte Luftmasse nördlich des Erzgebirges aufgrund des Staueffekts zusätzlich orographisch gehoben, was außerordentlich starke Niederschläge zur Folge hatte.

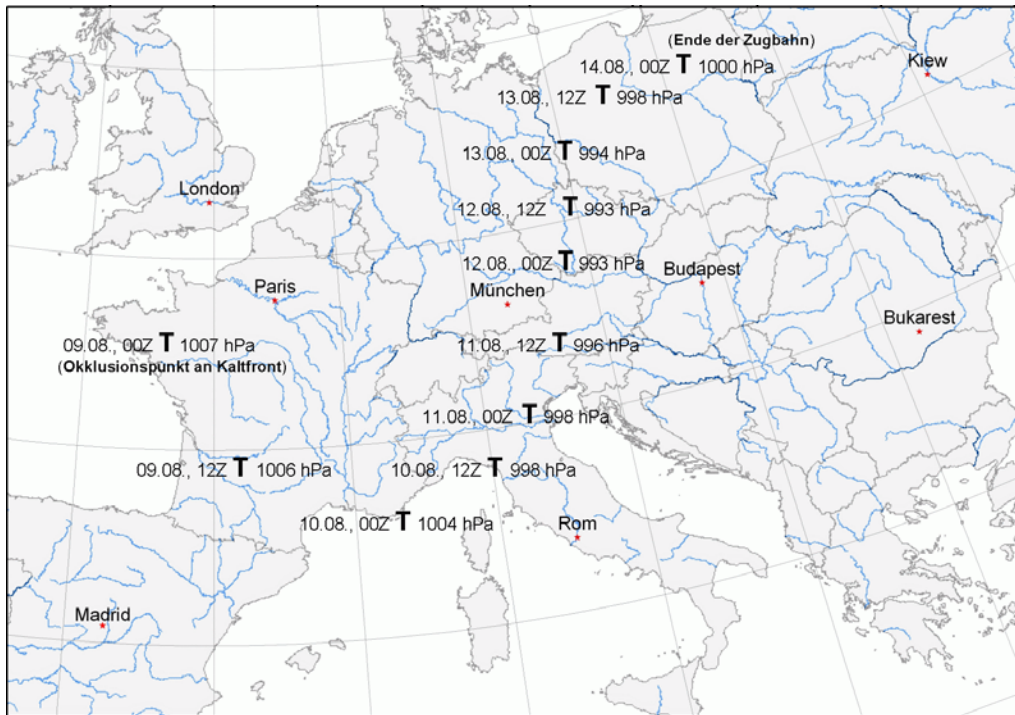


Abb. 3: Zugbahn des „Vb-Tiefs“ mit Angabe des Kerndrucks (Karte M. Neumann, DWD).

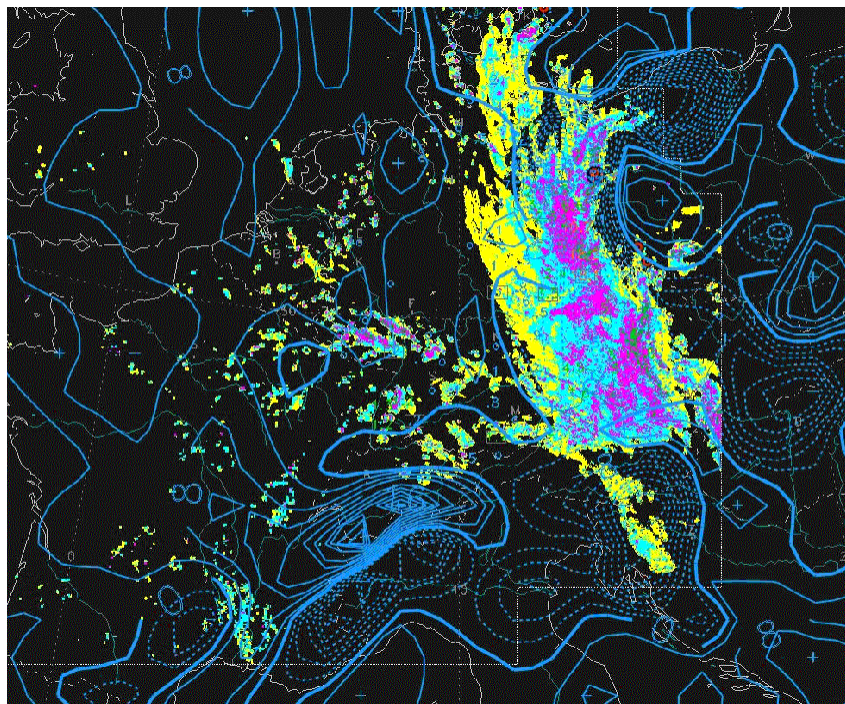


Abb. 4: Radarbild und Omega-Feld (Hebung in 500 hPa gestrichelt) vom 12.08.2002, 12 UTC.

## 2.2 Meteorologische Ursachen

Wie bereits einleitend gesagt, führte das Aufeinandertreffen verschiedener meteorologischer Faktoren zu dem katastrophalen Hochwasser:

### **Das großskalige, starke und quasi-stationäre Hebungsgebiet**

stand im Zusammenhang mit der Entwicklung des Vb-Tiefs (vgl. Abbildungen 2 bis 4) und ist als wesentliche synoptische Voraussetzung der starken Niederschläge einzustufen. Die großräumige Druck- und Strömungskonstellation über Mitteleuropa veränderte sich nur sehr langsam. Aufgrund der typischen Zugbahn des Vb-Tiefs war warme und sehr feuchte Mittelmeerluft mit einem flächendeckend

### **sehr hohen Flüssigwassergehalt**

beteiligt, eine notwendige Voraussetzung für Rekordniederschläge, die im Sommer natürlich wesentlich besser erfüllt ist als im Winter.

### **Konvektive Niederschlagsprozesse (Schauer, Gewitter)**

in der weiter östlich befindlichen feuchtilabilen Luftmasse machten einen lokal nicht unerheblichen Zusatzeffekt aus. Wesentlich bedeutsamer war aber die extreme

### **orographisch bedingte zusätzliche Hebung**

nördlich des Erzgebirges aufgrund einer Verstärkung des Druckgradienten auf der Rückseite des Tiefs. Schließlich war

### **der bereits tief gesättigte Boden und der relativ hohe Wasserstand**

vieler Flüsse durch die kräftigen Regenfälle in den Wochen zuvor verantwortlich für die Brisanz des Hochwassers der Elbe, zumal dieser Fluss im Gegensatz zu den meisten anderen Flüssen das ganze Gebirge und nicht nur eine Gebirgsseite entwässert.

Anhand einer Zusammenschau und Interpretation des verfügbaren Beobachtungsmaterials (an Stationen gemessene Niederschlagshöhen, Wettermeldungen, Radar- und Satellitenbilder, Blitzechos etc.) kann man für den Bereich des Erzgebirges zu folgender Abschätzung der ursächlichen Anteile der verschiedenen Niederschlagsmechanismen kommen:

- Flächenhafter (skaliger) Niederschlag 2 Drittel
- Konvektiver Niederschlag (Schauer, Gewitter) 1 Drittel
- Orografische Verstärkung an den Mittelgebirgen Verdoppelung der Mengen

Die extrem hohen Tagesniederschläge und daraus verursachten verheerenden Sturzfluten, welche die Ortschaften im und nahe am Erzgebirge betrafen, resultierte also vor allem aus dem Stau effekt am Nordrand des Mittelgebirges. Dagegen ging die prekäre Hochwassersituation an der Elbe und ihren größeren Nebenflüssen mit den Überschwemmungen vieler Orte und Städte auf die Verknüpfung der oben beschriebenen fünf Ursachen zurück.

### 3 Messdaten und Vergleich mit Vorhersagen

Die Brisanz der Hochwasserkatastrophe beruhte, wie im Kapitel 2 dargestellt, also auch auf der regenreichen Vorwitterung und der daraus resultierenden Bodenfeuchtesättigung. Abbildung 5 zeigt zunächst links die Niederschlagshöhen in der Periode 6. bis 8. August 2002. Der Schwerpunkt der Regenfälle war zwar zunächst Oberösterreich mit Beträgen über 100 mm (was zu starkem Hochwasser an der Donau führte), aber auch im Erzgebirge regnete es beträchtlich (20 bis 30 mm). Einige Tage später (Abbildung 5 rechts) weiteten sich die Starkniederschläge dann nordwärts aus und erfassten Tschechien, Sachsen und Brandenburg. Verbreitet wurden in der Periode 10.-13. August 2002 100 mm überschritten, im Erzgebirge vielerorts auch die 200 mm-Schwelle erreicht. Zinnwald-Georgenfeld meldete sogar 380 mm Regen. Davon fielen allein an einem Tag (06 bis 06 UTC des Folgetags) 312 mm bzw. 353 mm, falls das Bezugsintervall um drei Stunden verschoben wird (03 bis 03 UTC). Tabelle 1 zeigt weitere eindrucksvolle Einzelwerte der gemessenen Niederschlagshöhe. Beispielsweise fielen in Dresden 158 mm in 24 Stunden. Die Rekordniederschläge führten auch zu ungewöhnlich hohen Monatswerten, die in den betreffenden Gebieten meist zwischen 150 und 300 mm variierten, was 200 bis 350% der normalerweise (im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990) in einem August fallenden Mengen ausmacht.

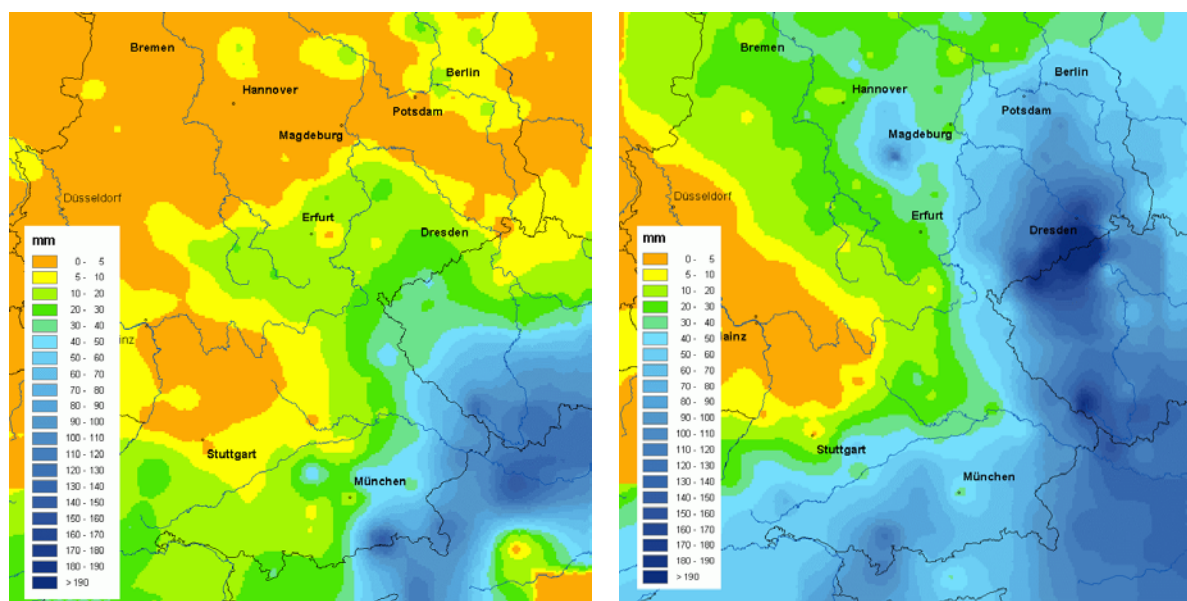


Abb. 5: Niederschlagshöhen der Perioden 6.-8. August (links) und 10.-13. August 2002 (rechts) jeweils von 8 bis 8 Uhr MESZ.

Der genaue zeitliche Verlauf des Ereignisses am 12. und 13. August 2002 ist in Abbildung 6 dargestellt. Die heftigen Niederschläge begannen in der Frühe des 12. August und dauerten, mit stündlichen Schwankungen, bis zum Vormittag des Folgetages an. Dabei wurden am ersten Tag im Erzgebirge (Zinnwald-Georgenfeld) extreme Stundensummen bis zu 30 mm ermittelt. Selbst im nördlichen Vorland (Dresden) fielen wiederholt 15 mm oder mehr. Zum 13. August verminderte sich die Regenintensität auf rund 5 mm/Stunde im Mittelgebirge und 2 bis 3 mm/Stunde in den Niederungen.

Tabelle 1: Gemessene Niederschlagshöhen für verschiedene Zeitspannen im August 2002 im Vergleich zu früher beobachteten Daten und Mittelwerten.  
(Ein Beobachtungstag wird von 06 UTC bis 06 UTC des Folgetags gerechnet.)

Station	Höhe über NN (m)	1d-Maximum im August 2002	Datum für Maximum im August 2002	3d-Summe 10.-12. August 2002	Summe August 2002	Mittelwerte August 1961-1990	Relation August 2002 zu 1961-90
Kempten	705	62,2	10.08.	126,0	360,8	156	231%
Oberstdorf	810	67,1	11.08.	115,1	279,6	213	131%
Berlin-Tempelhof	49	65,1	12.08.	69,0	156,3	61	256%
Potsdam	99	84,1	12.08.	90,9	183,3	60	306%
Cottbus	69	49,9	12.08.	60,0	136,9	69	198%
Doberlug-Kirchhain	97	93,8	12.08.	102,2	165,4	64	258%
Oschatz	150	108,5	12.08.	119,0	181,7	61	298%
Dresden-Klotzsche	222	158,0	12.08.	168,9	233,1	76	307%
Aue	391	79,9	12.08.	145,8	230,5	83	278%
Chemnitz	418	78,0	12.08.	109,2	196,5	78	252%
Marienberg	639	166,5	12.08.	188,3	308,2	89	346%
<b>Zinnwald-Georgenfeld</b>	<b>877</b>	<b>312,0</b>	<b>12.08.</b>	<b>379,9</b>	<b>469,6</b>	<b>103</b>	<b>456%</b>
Fichtelberg	1213	137,8	12.08.	199,7	299,1	106	282%
Großer Arber	1446	88,5	12.08.	121,1	261,6	131	200%

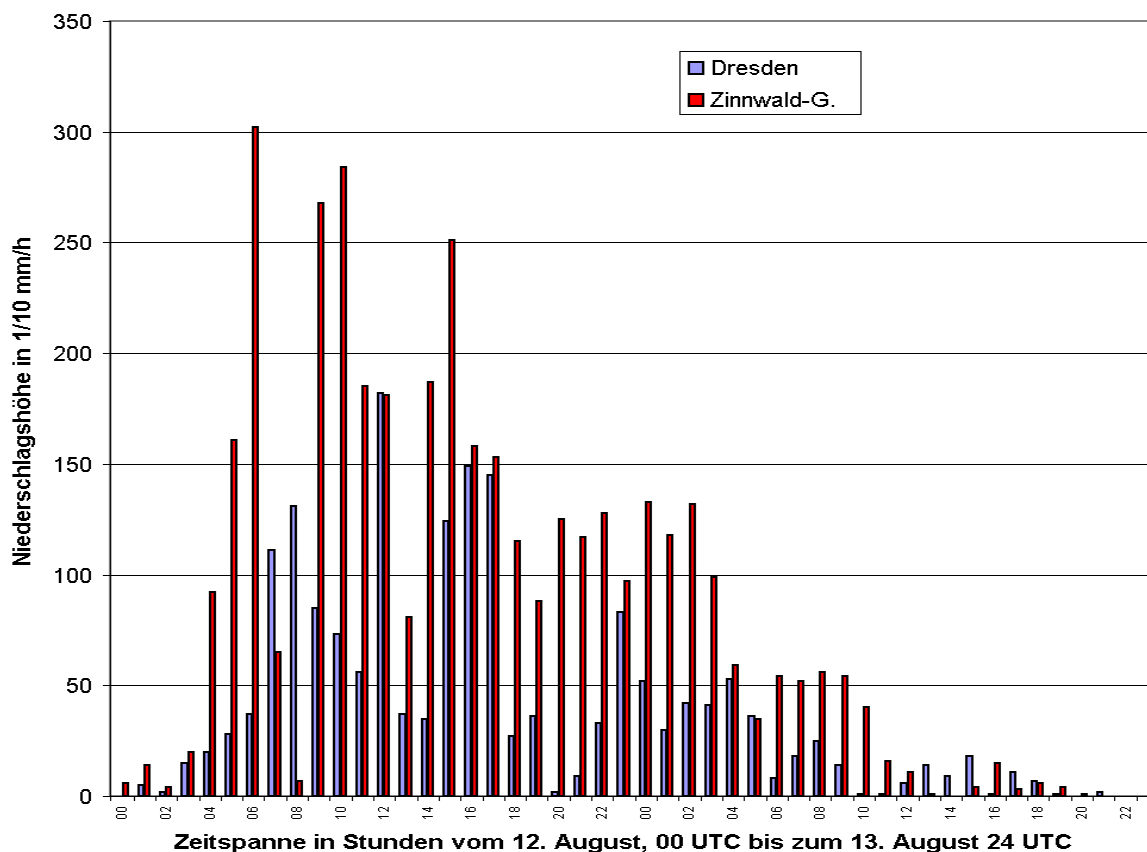


Abb. 6: Stündliche Niederschlagshöhen vom 12.08., 00 UTC, bis zum 13.08., 24 UTC.

Abbildung 7 zeigt die beobachteten und von den Modellen des DWD, GME (global) und LM (lokal), prognostizierten Niederschlagshöhen für den 72-stündigen Zeitraum vom 10.08.2002, 06 UTC, bis 13.08.2002, 06 UTC. Für den Vergleich wurden die täglichen Prognosen für den Vorhersagezeitraum von 6 bis 30 Stunden nach Modellstart (00 UTC) verwendet. Bei dieser relativ kurzen Vorhersagezeit stimmten Position und Eintrittszeitpunkt der Maxima zwar recht gut überein, das absolute Extremum im Erzgebirge stimmt jedoch im Vergleich der Modelle mit den Beobachtungen nicht exakt überein.

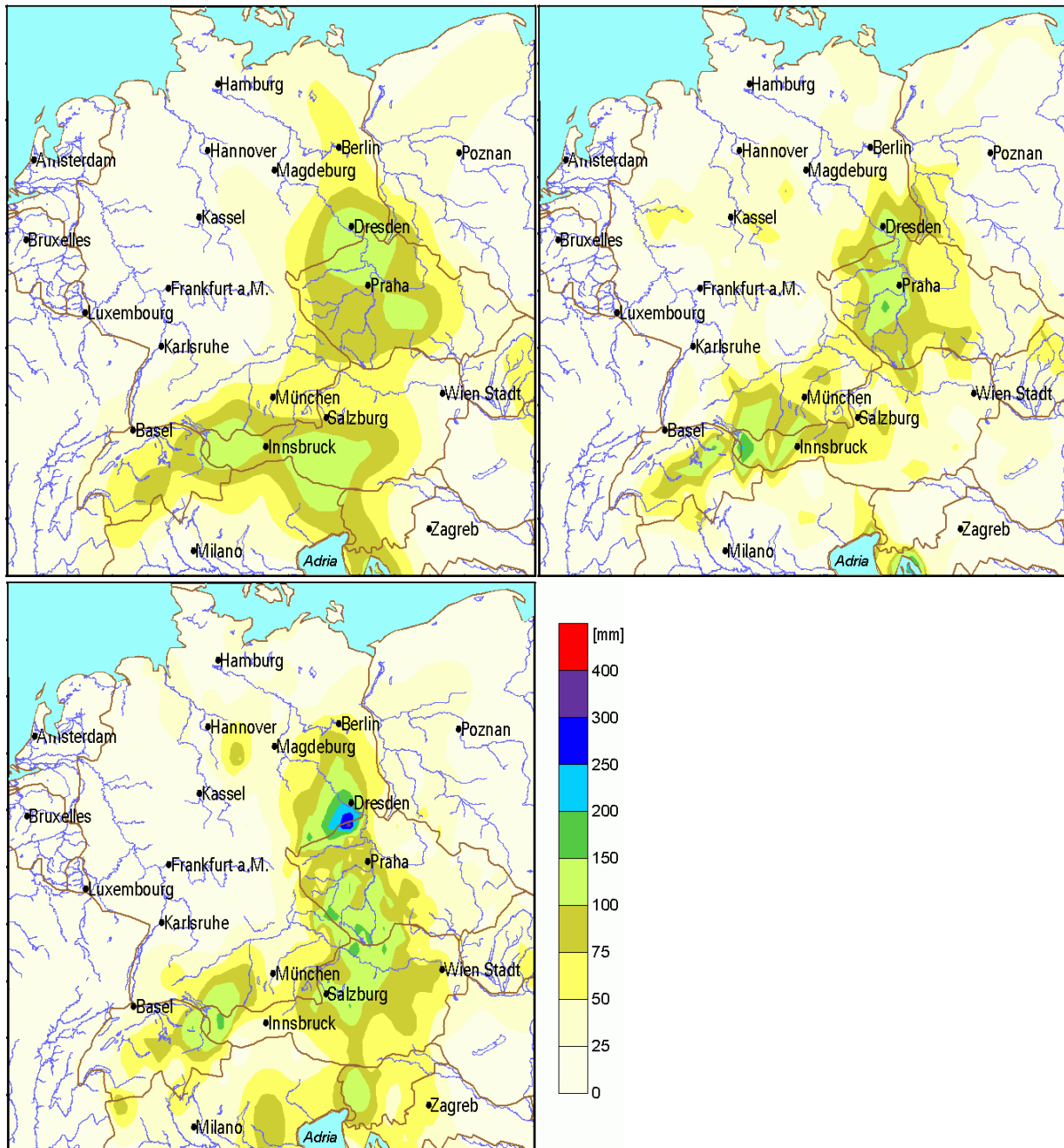


Abb. 7:  
Vergleich von Vorhersage und Beobachtung für den dreitägigen Zeitraum vom 10.08.2002, 06 UTC, bis zum 13.08.2002, 06 UTC.  
Oben links: Niederschläge GME (Global-Modell des DWD),  
oben rechts: Niederschläge LM (Lokal-Modell des DWD),  
unten: Interpolierte Beobachtungen (Daten der DWD-Messnetze).

Die verschiedenen Wettervorhersagemodelle (DWD, EZMW, USA, UK) zeigten im Mittelfristzeitraum (d.h. 3 bis 10 Tage im Voraus) sehr unterschiedliche Prognose-signale. Generell ist zu konstatieren, dass Wettervorhersagemodelle ihre Genauigkeitsgrenzen haben. Dies ist zum einen bedingt durch die begrenzte Dichte der Beobachtungsnetze für die Datenassimilation, zum anderen durch die nicht vermeidbaren Vereinfachungen in der Simulation von subskaligen physikalischen Prozessen der Wolkendynamik und Mikrophysik der Niederschlagsbildung. Auch die einflussreiche Orographie kann in den Modellen nur in geglätteter Form berücksichtigt werden. Daher kann die tatsächliche Zugbahn eines Vb-Tiefs durchaus von der vorhergesagten etwas abweichen. Auch die exakte Lage und Intensität von lokalen Extremniederschlägen sind kaum vorhersagbar, allenfalls deren regionale Wahrscheinlichkeit.

Das Global-Modell GME des DWD lieferte zwar schon am 07.08.02 ein Unwetter-signal, hatte es in den Folgejahren jedoch wieder verworfen. Den ersten konsistenten Hinweis auf die zu erwartenden Unwetter lieferte das US-amerikanische AVN-Modell am 11.08.02, im 00 UTC-Lauf. Die anderen Modelle (EZMW, GME, LM) zogen am 11.08.02, 12 UTC und am 12.08.02, 00 UTC nach. Das LM schließlich hatte die Situation am 12.08.02, 00 UTC sehr gut erfasst.

Der DWD gab im Vorfeld der Entwicklung bereits am 08.08.02 und 09.08.02 entsprechende Hinweise auf die gefährliche Wetterentwicklung in den Standard-Wettervorhersagen aus. Am 11.08.02, 13:59 Uhr MESZ folgte eine Unwettervorwarnung und um 23:08 Uhr MESZ die Aktualisierung zur Unwetterwarnung. Weitere Aktualisierungen der Unwetterwarnungen wurden vom 12.08.02 bis zum 14.08.02 ausgegeben.

Zwar bildete sich das Signal "Starkregengebiet" schon etliche Tage vorher in einigen Modellen heraus, doch konnte die genaue Lage, speziell auch bezogen auf einzelne Einzugsgebiete, und die absolute Niederschlagshöhe nicht genau genug prognostiziert werden. Zudem war das Signal bei den aufeinanderfolgenden Modellläufen zeitlich nicht konsistent. Aus all dem resultiert, dass im Sinne eines "Early Warning" die Modelle zwar schon Tage vorher Hinweise auf eine extreme Wettersituation lieferten, die zu erhöhter Aufmerksamkeit bei den Vorhersagemeteorologen führten, dass aber die Genauigkeit offenbar zu diesem Zeitpunkt nicht ausgereicht hat, um schon konkret zu warnen. Europaweit wird daher intensiv daran gearbeitet, die Vorwarnzeit und -güte für Hochwasserwarnungen weiter zu verbessern.





## 4 Klimatologische Einordnung

Bereits in der ersten Augushälfte fielen in einem Streifen von Berlin und Brandenburg über Sachsen und Tschechien bis nach Oberösterreich 200 Prozent der dort für den August registrierten mittleren monatlichen Niederschlagshöhe. Im Erzgebirge und im Süden Tschechiens trat in dieser Zeit sogar das Dreifache der mittleren monatlichen Niederschlagshöhe auf. Mit einer maximalen monatlichen Niederschlagshöhe von 470 mm für den August 2002 in Zinnwald-Georgenfeld wurde mehr als das Vierfache der dort normalerweise beobachteten mittleren Augustniederschläge erreicht.

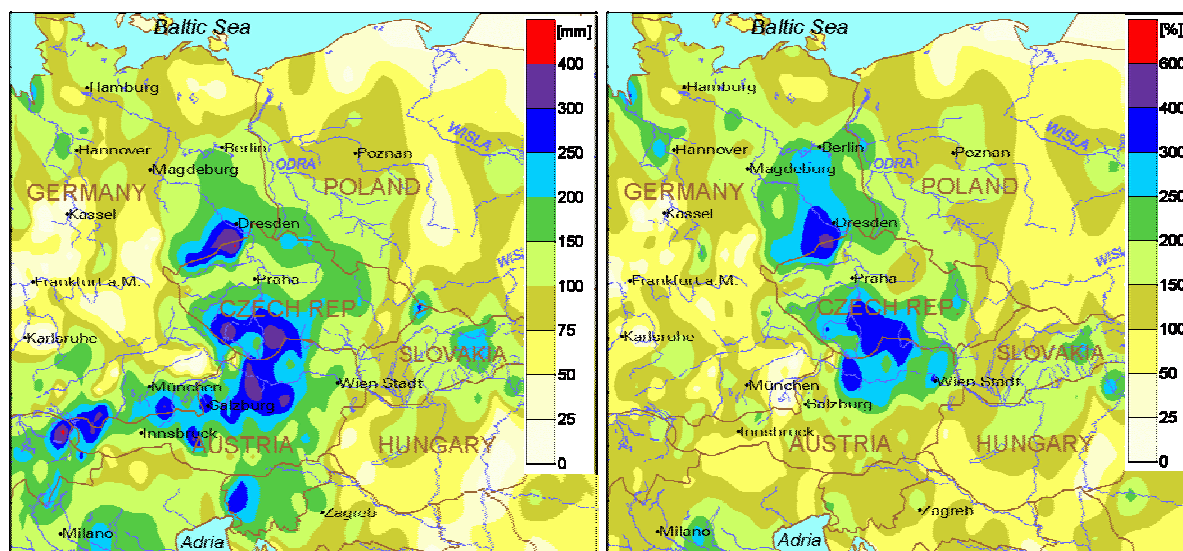


Abb. 8: Monatliche Niederschlagshöhe in mm/mon für den August 2002 (links) und prozentuale Niederschlagsmenge bezogen auf den Zeitraum 1961-1990 (rechts).  
Datenbasis: Messwerte von 614 Stationen (links), 415 Stationen (rechts).

Das Maximum der durch Interpolation und Rasterung regionalisierten Niederschlagshöhe liegt ebenso wie das Maximum der Niederschlagsanomalie über dem Erzgebirge. Der Streifen der ungewöhnlich hohen monatlichen Niederschläge folgt weitgehend dem Verlauf des Einzugsgebietes der Elbe (Abb. 8). Die Messungen von vielen Stationen im Bereich von Österreich über Sachsen bis Berlin/Brandenburg ergaben im August 2002 die jeweils dort seit Beobachtungsbeginn höchste im August gemessene Niederschlagshöhe. Abbildung 9 zeigt die Zeitreihen der Augustniederschläge für ausgewählte Stationen.

Am 12. August 2002 wurde mit 312 mm/d an der DWD-Station Zinnwald-Georgenfeld der größte jemals in Deutschland gemessene Tagesniederschlag registriert. Korrekt gilt dieser Wert für die Zeitspanne vom 12., 06 UTC, bis zum 13., 06 UTC (= 07 MEZ bzw. 08 MESZ), was dem üblichen Beobachtungsintervall entspricht. Da in Zinnwald stündlich registriert wird, konnte auch der absolut höchste 24stündige Niederschlag mit 352,7 mm/24h festgestellt werden, und zwar in der Zeitspanne vom 12., 03 UTC, bis zum 13., 03 UTC. Bis dahin galt als Rekordniederschlag für einen Tag 260 mm, beobachtet am 6. Juli 1906 in Zeithain, Kreis Riesa. Die in Zinnwald gemessenen Dreitages- (406 mm) und Monatsniederschlagshöhen (470 mm) wurden dagegen früher bereits deutlich übertroffen, und zwar in Stein, Landkreis Rosenheim, im Juli 1954 mit 458 mm in drei Tagen und 779 mm im Monat (vgl. Tabelle 2).

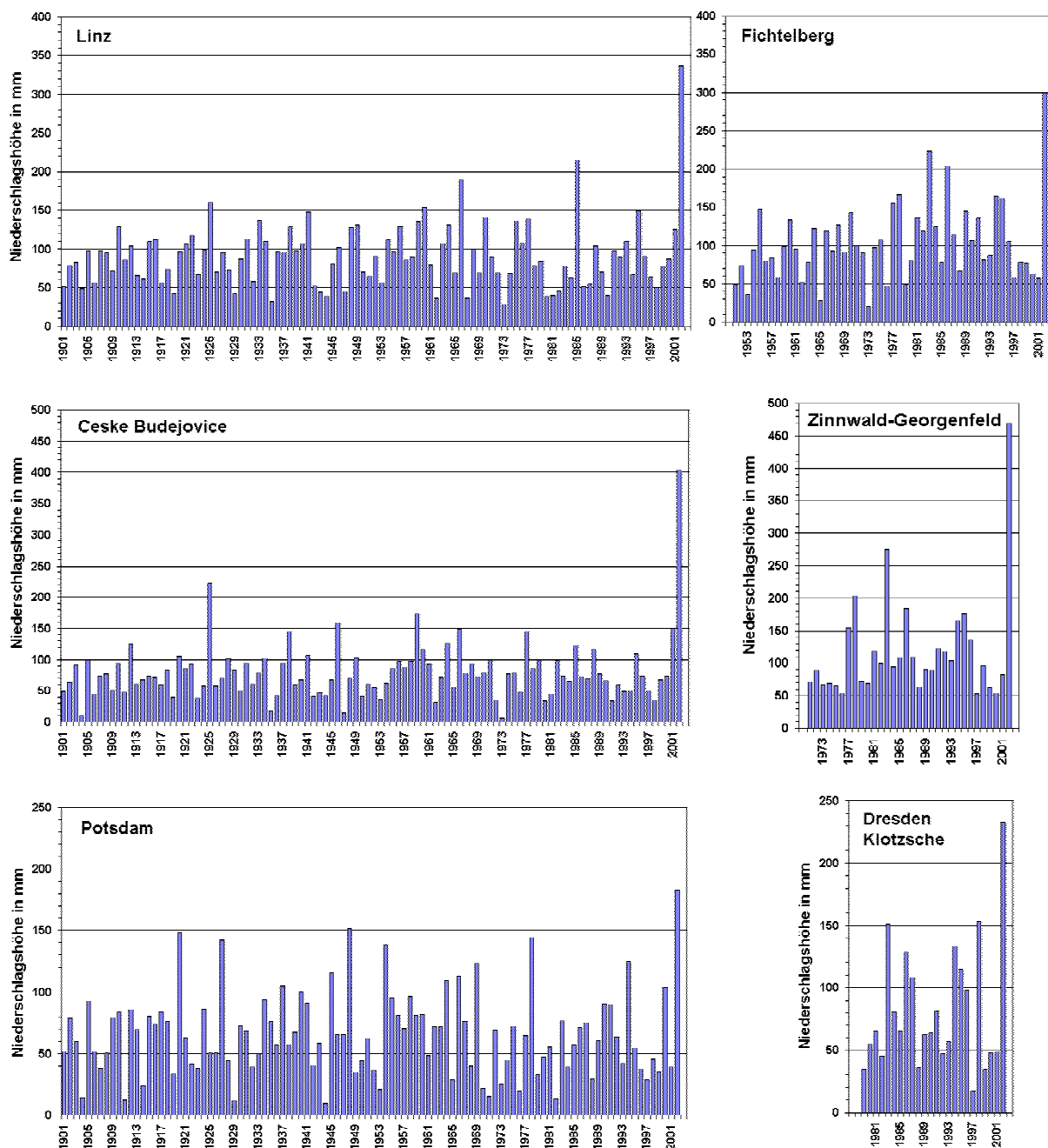


Abb. 9: Zeitreihen der monatlichen Niederschlagshöhe für den August an den Stationen Linz (Donau), Ceske Budejovice (Tschechien), Potsdam, Dresden-Klotzsche (Elbe), Fichtelberg und Zinnwald-Georgenfeld.

Ein Vergleich zu den weltweit beobachteten Rekorden (Abb. 10) zeigt, dass in Mitteleuropa für Niederschlagsandauern von mehr als einer Stunde keineswegs weltweite Spitzenwerte erreicht werden, was aus den im Vergleich zu den Tropen und zu Taifun-gefährdeten Gebieten günstigen klimatischen Bedingungen Mitteleuropas resultiert.

Tabelle 2: Die größten in Deutschland beobachteten Niederschlagshöhen für verschiedene Beobachtungszeitintervalle (1 Beobachtungstag = 06 UTC bis 06 UTC Folgetag). In **Rot** die Rekordwerte von August 2002. - Datenquelle: DWD.

Intervall	Niederschlags- höhe (mm)	Messort	Datum
8 min	126	Füssen (Ostallgäu)	25. Mai 1920
1 h	200	Miltzow (Nordvorpommern)	15. September 1968
2 h	239	Daudenzell (Baden-Württemberg)	27. Juni 1994
1 Tag	260	Zeithain, Kr. Riesa (Sachsen)	6.-7. Juli 1906 (6 – 6 UTC)
<b>1 Tag</b>	<b>312</b>	<b>Zinnwald-Georgenfeld (Sachsen)</b>	<b>12.-13. August 2002 (6 – 6 UTC)</b>
<b>24h</b>	<b>353</b>	<b>Zinnwald-Georgenfeld (Sachsen)</b>	<b>12.-13. August 2002 (3 - 3 UTC)</b>
2 Tage	377	Seehaus bei Ruhpolding (Kreis Traunstein)	7.-9. Juli 1954
<b>3 Tage</b>	<b>406</b>	<b>Zinnwald-Georgenfeld (Sachsen)</b>	<b>11.-14. August 2002 (6 – 6 UTC)</b>
3 Tage	458	Stein (Kreis Rosenheim)	7.-10. Juli 1954
7 Tage	515	Schneizreuth-Weißbach (Berchtesgaden L.)	7.-14. Sept. 1899
10 Tage	652	Stein (Kreis Rosenheim)	1.-11. Juli 1954
<b>1 Monat</b>	<b>470</b>	<b>Zinnwald-Georgenfeld (Sachsen)</b>	<b>August 2002</b>
1 Monat	779	Stein (Kreis Rosenheim)	Juli 1954
30 Tage	810	Baiersbronn-Zwiggabel (Schwarzwald)	7. Dez.1993 - 6. Jan. 1994
12 Monate	3661	Purtschellerhaus (Berchtesgadener Land)	Dez.1943 - Nov.1944

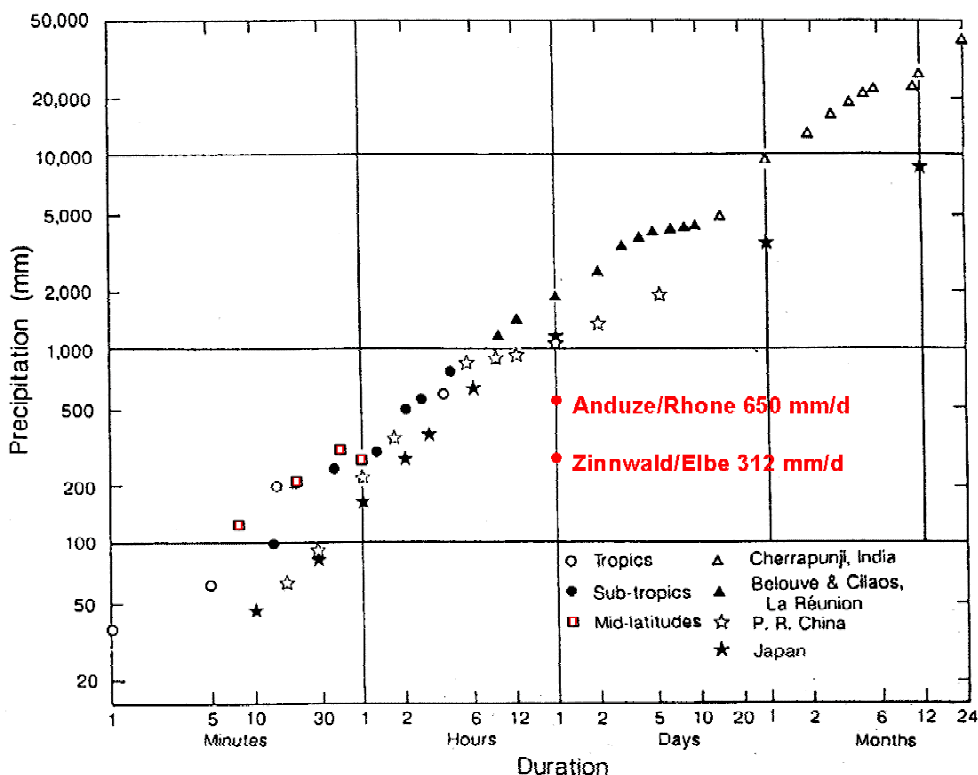


Abb. 10: Weltweit gemessene Rekordniederschläge für verschiedene Andauerstufen (Diagramm nach Matsumoto, 1993, ergänzt durch die europäischen Extremwerte von Zinnwald, 12. 8. 2002, und Anduze, Südfrankreich, 8. 9. 2002).

Aber auch für unser Klima wurden höhere, theoretisch mögliche Niederschlagshöhen errechnet: Die Studie "Maximierte Gebietsniederschlagshöhen in Deutschland", die der DWD im Auftrag des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. durchführte (DVWK 1997), lieferte für den östlichen Teil des Landes Branden

burg eine "regional ausgeglichene maximierte Punktniederschlagshöhe" von 375 mm/24h und 445 mm/72h sowie für den östlichen Teil der Bayerischen Alpen von 800 mm/24h und 1340 mm/72h. Entsprechende Werte für das Gebiet Erzgebirge wurden nicht publiziert. Die Abschätzung dieser Werte erfolgte auf der Basis der in der Region beobachteten Extremwerte, der regionalen Geländeform (Orographie) sowie Vorgaben für Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit, welche den ungünstigsten entsprechen. Die Autoren der Studie schränken wohl ein, dass die Ergebnisse eine "Annäherung an das mögliche physikalisch / klimatologische Maximum" darstellen und "nach menschlichem Ermessen nicht erreicht" werden, konstatieren aber auch, dass diese Werte für die heute gegebenen Klimaverhältnisse gelten.

Diese Einschränkung gilt insbesondere für die in der Angewandten Hydrologie, insbesondere im Wasserbau verwendeten Wiederkehrzeiten von Starkniederschlagshöhen, die auf beobachteten Niederschlagsdaten aus dem 30jährigen Zeitraum von 1951 bis 1980 beruhen (Bartels et al. 1997). Die Auszählung der nach Andauer und Niederschlagshöhe klassifizierten Messwerte und Anwendung einer statistischen Extremwertverteilung ergab stationsbezogene Wiederkehrzeiten für Zeitspannen bis zu 100 Jahren. Nach diesen Statistiken sind die an den Stationen Zinnwald-Georgenfeld, Fichtelberg, Marienberg und Dresden-Klotzsche im August 2002 beobachteten maximalen 24- und 72-stündigen Niederschlagshöhen seltener als einmal in 100 Jahren zu erwarten.

Der DWD plant die Fortschreibung des Atlas der Wiederkehrzeiten für den Zeitraum 1951 bis 2000. Ein Vergleich der Ergebnisse für Teilzeiträume könnte dann auch Informationen über Änderungen des Extremwertverhaltens, speziell der Wiederkehrzeiten, infolge der Klimaänderung während der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts liefern. Von diesem Projekt unabhängig zeigen bereits die ersten Ergebnisse einer anderen Studie mit den wenigen verfügbaren langen Datenreihen (Grieser und Beck 2003, in diesem Heft), dass eine Änderung des Extremwertverhaltens täglicher Niederschlagshöhen in Deutschland signifikant nachzuweisen ist.

In den bisherigen Betrachtungen wurde noch nicht betont, dass der Niederschlag nicht nur eine grundsätzlich zeitbezogene Größe (es gibt keine exakte Momentaufnahme, sondern es können nur - wenn auch kurze - Zeitintervalle betrachtet werden), sondern auch grundsätzlich eine flächen- bzw. gebietsbezogene Größe ist. Selbst der Messpunkt, der Trichter des Niederschlagsmessers, ist streng genommen eine Fläche. Nach allgemeiner fachlicher Meinung gelten die Niederschlagsmessungen für Tage oder längere Intervalle bei repräsentativer Aufstellung des Instruments auch im Umkreis von etwa 3 km oder für eine Fläche von 25 km<sup>2</sup>.

Zur Beurteilung der meteorologischen Bedingungen, die zum Hochwasser eines größeren Flusses, ob Elbe, Weichsel, Oder, Main, Mosel oder Ems, geführt haben, ist der einzelne lokal gemessene Niederschlag als solcher ohne Aussagekraft. Der Abfluss des Wassers, d.h. der Pegelstand der Flüsse und im Extremfall deren Hochwasser, hängt vom Gebietsniederschlag im hydrologischen Einzugsgebiet der Flüsse ab. Es ist also notwendig, die flächendeckende Verteilung der Niederschlagshöhe aus den Punktdaten der Messnetze zu ermitteln, wobei Radarbilder und numerische Modelle im Einzelfall zusätzliche Informationen liefern. Aus der Flächenverteilung des Niederschlags sind dann die in den maßgeblichen Einzugsgebieten gefallenen Wassermengen zu berechnen.

Aufgrund der Mechanismen der Niederschlagsentstehung besteht eine Beziehung zwischen der maximalen Niederschlagshöhe, der Andauerzeit und der räumlichen Ausdehnung des betroffenen Gebietes. Vereinfacht kann man voraussetzen, dass, je länger ein extremer Niederschlag andauert, desto größer auch das betroffene Gebiet ist. Hierbei spielen aber verschiedene Faktoren eine große Rolle, zunächst generell die regionalen orographischen und klimatischen Bedingungen und dann im Einzelfall die Wetterlage.

In der bereits oben genannten DVWK-Studie wurden empirisch berechnete maximierte Gebietsniederschläge verschiedener Andauerzeiten (1, 12, 24 und 72 Stunden) und Gebietsgrößen (25, 100, 500, 1000 km<sup>2</sup>) getrennt für Sommer- und Winterbedingungen für Deutschland kartiert. Für eine Gebietsgröße von 1000 km<sup>2</sup> liegt das nördliche Erzgebirge in den Klassen 300 mm/24h bis 400 mm/24h bzw. 450 mm/72h bis 550 mm/72h. Die dort im August 2002 beobachteten Niederschlagshöhen zeigen, dass die Ergebnisse dieser DWD-Studie keinesfalls unrealistisch sind.

Starkniederschläge, die regional zu Sturzfluten führen, sind im Erzgebirge durchaus nicht außergewöhnlich (Marx 1966, 1966a und 1967). Am Abend des 8. Juli 1927 zum Beispiel gingen über der Wasserscheide zwischen der Müglitz und der Gottleuba zwei außergewöhnliche "Platzregen" nieder, die in kürzester Zeit Niederschlagshöhen von bis 200 mm erbrachten (Alt und Fickert 1936). Diese hatten verheerende Sturzfluten der betroffenen Flüsse zur Folge, die aber regional eng eingegrenzt waren. Die für das Elbhochwasser von August 2002 verantwortlichen Niederschläge waren jedoch nicht nur intensiver, sie hielten auch deutlich länger an und bedeckten - gekoppelt mit der nach Norden ziehenden Vb-Zyklone - ein bedeutend größeres Gebiet.

### **Noch einmal zum Klimatrend**

Die in diesem Heft erstmalig veröffentlichten Statistiken von Grieser und Beck zeigen insbesondere, dass sich der Anteil der Starkniederschläge am Gesamtniederschlag vom Jahr 1961 bis zum Jahr 2000 erhöht hat.

Ein Klimaszenario des Max-Planck-Instituts für Meteorologie für den Verlauf der nächsten 50 Jahre hat eine Fortsetzung dieses Trends ergeben (Jacob 2002, Bülow 2003). Bei diesem Szenario wurde vorausgesetzt, dass die globale CO<sub>2</sub>-Emission weiterhin mäßig ansteigt (IPCC-Emissions-Szenario SRES B2). Dies ist weder die günstigste Annahme (kein weiterer Anstieg) noch die ungünstigste (Anstieg wie bisher). Die Niederschlagsverteilung wurde mit dem MPI-Regionalmodell REMO (eine Variante eines DWD-Vorhersagemodells) simuliert, das Regionalmodell selbst wurde vom globalen MPI-Klima-Simulationsmodell ECHAM4 angetrieben (Jacob 2002). Nach diesem Szenario ergeben sich für den Zeitraum 2040 bis 2049 deutlich größere Anteile der höheren Niederschlagsintensitäten am Gesamtniederschlag im Vergleich zum Zeitraum 1990 bis 1999 (vgl. Abb. 11). Eine Bewertung dieser noch nicht abgeschlossenen Studie steht noch aus.

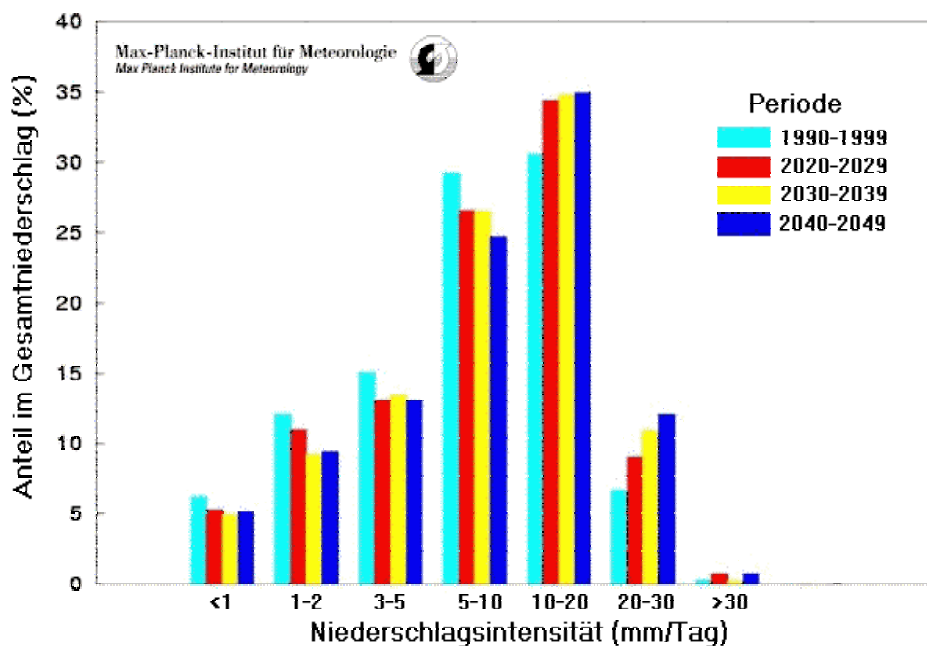


Abb. 11: Berechnete Zunahme der starken Niederschläge im Laufe der nächsten 40 Jahre (GLOWA-Elbe: Bülow 2003)

## 5 Zur Häufigkeit von Hochwasser

Schließlich kommen wir zu den Fragen, die von Politikern, Journalisten und nicht zuletzt von denjenigen gestellt werden, die in den letzten Jahren durch Überschwemmungen an Flüssen betroffen waren: Hat sich die Häufigkeit von Hochwasser der deutschen Flüsse im Laufe der letzten Jahre erhöht? Werden Überschwemmungen an deutschen Flüssen künftig noch häufiger?

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO 2002) hat ein Diagramm publiziert, welches eine fast kontinuierliche und dramatische Zunahme der katastrophalen Überflutungen in Europa vom Jahr 1975 bis zum 2001 aufzeigt. Aber Vorsicht bei der Interpretation! Kriterium für die Einstufung eines Hochwassers als katastrophal ist seine Folge von 10 oder mehr getöteten Menschen. Aus klimatologischer wie auch hydrologischer Sicht ist dies kein geeignetes Kriterium. Für diese Zahl ist entscheidend, ob durch das Hochwasser bewohnte Gebiete überschwemmt, Dörfer von Schlammlawinen verschüttet oder, wie auch geschehen, Campingplätze weggerissen wurden. Fraglich ist auch, wie indirekt resultierende Todesfälle eingestuft wurden und ob beim Aufbau der Datenbank Informationszufluss und Sensibilität der Erfassung von Jahr zu Jahr gleichgeblieben oder angestiegen sind.

Aus den letzten 10 Jahren sind uns eine Anzahl außergewöhnlicher Überschwemmungen in Europa, darunter mehrere „Jahrhunderthochwasser“ in Erinnerung, wovon hier nur die wichtigsten aufgezählt werden können:

- Jahrhunderthochwasser von Rhein und Mosel im Dezember 1993
- Jahrhunderthochwasser erneut von Rhein und Mosel im Januar 1995
- Jahrhunderthochwasser der Oder im Juli 1997
- Hochwasser von Donau und Bodensee im Mai 1999
- Weit ausgedehnte, lang anhaltende Hochwasser in Westeuropa, insbesondere in Südengland und Wales, im Herbst 2000

- Hochwasser der Weichsel im Juli 2001
- Hochwasser der Donau im August 2002
- Jahrhunderthochwasser der Elbe im August 2002
- Rekordniederschläge und furchtbare Überschwemmungen in Südfrankreich im September 2002
- Hochwasser und teilweise schwere Überschwemmungen an vielen deutschen Flüssen im Januar 2003

Eine Auswertung von Pegelmessungen an verschiedenen Flüssen ergab keine oder nur sehr schwache Trendsignifikanzen für die jährlichen Höchstabflüsse (Arbeitskreis KLIWA 2002). Die Schwierigkeit der statistischen Analyse der Hochwasserwahrscheinlichkeit liegt zum einen in den vielfältigen Ursachen, zum anderen im meist sehr großen Zeitabstand zwischen ursächlich vergleichbaren Extremereignissen. Meteorologische Faktoren sind die variantenreiche zeitlich-räumliche Niederschlagsverteilung, Schneeschmelze, Bodenfeuchte und Flusseisbildung. Nicht meteorologische Einflüsse sind u.a. die im Laufe der Zeit aufgetretenen natürlichen und die vom Menschen vorgenommenen Veränderungen des Flussbettes, Abflussmanagement (Talsperren) und Damm- oder Deichbrüche während der Hochwasserlage. Betrachtet man die sechs größten Höchstpegelstände der Elbe in Dresden der letzten 300 Jahre (März 1784/857cm, Februar 1799/824cm, März 1845/877cm, Februar 1862/824cm, Juni/Juli 1890/837cm, August 2002/940cm (BfG 2002)), so ist das Auguthochwasser der Elbe ein nicht vergleichbares Ereignis. Bei den früheren vier Fällen handelt es sich um Winterhochwasser, die Sommerflut von 1890 liegt nicht nur 112 Jahre zurück, der Pegelstand war auch um 1m geringer. In einer statistischen Untersuchung von Pegelmessungen ließ sich auch kein Trend erkennen.

Trotz der augenscheinlichen Anhäufung extremer Hochwasser in den letzten Jahren kann also aus Hochwasserdaten nicht mit statistischen Methoden auf eine klima-bedingte Änderung der Hochwasserhäufigkeit geschlossen werden. Denn jedes Hochwasser ist unter Berücksichtigung der vielfältigen meteorologischen und nicht meteorologischen Einflussfaktoren als ein individuelles Einzelereignis anzusehen.

Die Frage nach einer Zunahme von Starkniederschlägen jedoch kann mit einem klaren "Ja" beantwortet werden. Für die Vergangenheit zeigen dies die Statistiken der Niederschlagsbeobachtungen ebenso wie physikalisch begründete Schlussfolgerungen aus dem beobachteten Anstieg der Lufttemperatur. Was die zukünftige Klimaentwicklung und ihre Auswirkungen auf die Häufigkeit extremer Ereignisse betrifft, so stimmen die Einschätzungen maßgeblicher Klimaforscher überein (z.B. Graßl 1998, IPCC 2001, Rahmstorf 2002, MPI 2003), dass mit der globalen Erwärmung der Wasserkreislauf intensiviert wird. Höhere Temperaturen bedingen, soweit die Erdoberfläche feucht ist, eine höhere Verdunstung. Dies führt gebietsweise zur stärkeren Austrocknung des Bodens, während die verdunstete Wassermenge irgendwo als Niederschlag zum Boden zurück fließen muss. Die Intensivierung des Wasserkreislaufs ist mit einer Intensivierung der Energieumsätze in der Atmosphäre direkt gekoppelt, was sich in einer Verstärkung der Dynamik äußern muss. Damit kann auch von einer Erhöhung der Labilität der atmosphärischen Schichtung ausgegangen werden. All dies spricht für eine Zunahme der Extremereignisse wie Stürme und Starkniederschläge. Auch die numerischen Klimamodelle, welche die geschilderten physikalischen Zusammenhänge, wenn auch nicht mit letzter Genauigkeit, so doch in numerisch objektiver Form enthalten, bestätigen diese Schlussfolgerungen.

## 6 Fazit

Die großen Hochwasser des letzten Jahrzehnts haben gezeigt, dass trotz aller Regulierungs- und Eindämmungsversuche katastrophale Überschwemmungen weiter auftreten. Etliche Menschen kamen um ihr Leben, und es wurden schwere ökologische und wirtschaftliche Schäden verursacht. Die klimatischen Voraussetzungen werden in Zukunft vermutlich nicht besser, sondern eher ungünstiger. Daher sind intensivere Anstrengungen zum Klimaschutz und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels nötig. Unsere Gesellschaft muss die Möglichkeit von zukünftigen Überschwemmungen berücksichtigen, indem ausreichende Überflutungsräume wiederhergestellt oder geschaffen werden. Hochwassergefährdete Gebiete sollten von Besiedlung frei gehalten werden, dies erfordert korrigierte Flächennutzungs- und Raumordnungspläne. Nicht zuletzt muss auch weiter an der Verbesserung von länderübergreifenden Vorwarn- und Katastrophenmanagementsystemen gearbeitet werden, da sich Hochwasser, wie im August 2002 an der Elbe und ihren Nebenflüssen, auch bei bester Vorsorge nie völlig vermeiden lassen werden.

Die Autoren danken für die Bereitstellung von Daten, Tabellen, Bildern und Literatur sowie für fruchtbare Diskussionen: Peter Finger, Tobias Fuchs, Astrid Heller, Anja Meyer-Christoffer, Peter Otto, Udo Schneider, Peter Stender und Jan Nicolas Breidenbach (alle DWD/FE22-WZN), Jürgen Grieser und Christoph Beck (DWD/FE22, Projekt VASCLimO), Hermann Mächel (DWD/FE22, Projekt ACSYS-APDA), Ute Heil (DWD/FE23), Gerhard Müller-Westermeier und Volker Zins (DWD/FE24), Manfred Neumann (DWD/VB), Gabriele Malitz und Bernd Dietzer (DWD/HM), Udo Damrath (DWD/FE15), Lubomir Coufal (Czech Hydromet. Inst.), Reinhard Böhm (ZAMG Wien), Tanja Cegnar (Environm. Agency Slovenia), Katharina Bülow (MPI-Met Hamburg) und Marc Zebisch (TU Berlin).

### Literatur:

- Alt, E., und R. Fickert (1936): Die Hochwasserkatastrophe im östlichen Erzgebirge am 8. und 9. Juli 1927. Reichsamt für Wetterdienst, Wiss. Abhandl., Band II, Nr. 4, 15 Seiten, 6 Kartenbeilagen. Julius Springer, Berlin.
- Arbeitskreis KLIWA (2002): Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Berichte Heft 2 (<http://www.kliwa.de>). 98 Seiten.
- Bartels, H., G. Malitz, S. Asmus, F. M. Albrecht, B. Dietzer, T. Günther, H. Ertel (1997): Starkniederschlagshöhen für Deutschland. KOSTRA Atlas, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- BfG (2002): Das Augusthochwasser 2002 im Elbgebiet. Broschüre der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. Koordination und Redaktion H. Engel. 48 Seiten, September 2002. Verfügbar auch im Internet (<http://www.bafg.de>).
- Bülow, K. (2003): Niederschlag im Elberaum: Heute und in 30 Jahren. Beitrag des Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Hamburg, zum BMBF-Projekt GLOWA-Elbe. Im Internet ([http://www.glowa-elbe.de/status\\_praes/mpi/gesamt.html](http://www.glowa-elbe.de/status_praes/mpi/gesamt.html)).
- DWD (2002): Starkniederschläge im August 2002. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Oktober 2002.
- DVWK (1997): Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland. Bearbeiter T. Schmidt (DWD). Mitteilungen des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (Gluckstr. 2, 53115 Bonn), Heft 29, 112 Seiten.
- Graßl, H., und H. Vieser (1998): Des Menschen gefährlichstes Experiment: Dürre, Flut und Stürme. Bild der Wissenschaft, Heft 11-1998, S. 61-72.
- Grieser, J., und C. Beck (2003): Extremniederschläge in Deutschland - Zufall oder Zeichen? DWD Klimastatusbericht 2002, im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main 2003.
- IPCC (2001): Climate Change 2001 – The Scientific Basis. Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report of the International Panel on Climate Change (IPCC). Zu beziehen durch: IPCC Secretariat c/o World Meteorological Organization (WMO), Genf.
- Jacob, D. (2002): High resolution climate change signal for regional impact studies. TerraFlops, News Letter des Deutschen Klimarechenzentrums DKRZ, Hamburg, Mai 2002, S. 4-5.
- Marx, S. (1966): Ein Beitrag zu den Niederschlagsverhältnissen im Osterzgebirge. Nachtrag. Zeitschrift für Meteorologie 18 Nr. 1-2, S. 44-50.
- Marx, S. (1966a): Über große und starke Niederschläge im Osterzgebirge und im südlichen Elbsandsteingebirge. Zeitschrift für Meteorologie 18 Nr. 5-7, S. 259 – 267.
- Marx, S. (1967): Ein Beitrag zur Hochwasserhäufigkeit im Osterzgebirge. Zeitschrift für Meteorologie 19 Nr. 9-10, S. 304.
- Matsumoto, J. (1993): Global Distribution of Daily Maximum Precipitation. Japanese Progress in Climatology 25, 1-6.
- MPI (2003): Werden Hochwasser in deutschen Flüssen häufiger? Internet-Seite des Max Planck Instituts für Meteorologie, Hamburg (<http://www.mpimet.mpg.de>).
- Rahmstorf, S. (2002): Flutkatastrophe - Befinden wir uns im Klimawandel? Essay für Brockhaus Jahrbuch 2002, Internet-Publikation (<http://www.pik-potsdam.de/~stefan>).
- WHO (2002): Floods: Climate change and adaption strategies for human health. Report on a WHO meeting, London, UK, 20 June – 2 July 2002. World Health Organization, Regional Office for Europe, Kopenhagen, Report EUR/02/5036813, 55 Seiten.
- Zebisch, M. (2002): Luftbilddaufnahmen zum Ausmaß der Elbeflut. ([http://www.glowa-elbe.de/status\\_praes/marc/gesamt.html](http://www.glowa-elbe.de/status_praes/marc/gesamt.html)).