

Klima- und Anthropogene Wirkungen auf den Niedrigwasserabfluss der mittleren Elbe:

**Konsequenzen für Unterhaltungsziele und
Ausbaunutzen**



F. Wechsung, A. Hanspach, F. Hattermann, P.C.Werner & F.-W. Gerstengarbe

Die Studie wurde vom PIK im Auftrag des BUND (Bund für Umwelt und Naturschutz e.V.), des WWF (World Wide Fund for Nature) und der DUH (Deutsche Umwelthilfe e.V.) durchgeführt und durch Mittel des BMBF-Projekt GLOWA-Elbe unterstützt.

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

Telegrafenberg

PF 60 12 03, 14412 Potsdam

Kontakt:

Dr. Frank Wechsung

E-mail: Frank.Wechsung@pik-potsdam.de

Die Studie erscheint 2006 als PIK-Report.

Version 1.31

- mit Korrekturen von Schreib- und Satzfehlern gegenüber der Fassung vom 15.1.2005:
 - o Tabelle 3 ersetzt, Original enthielt die minimalen M7Q-Werte je Periode und nicht die Perioden-Mittelwerte der jährlichen NM7Q, wie angegeben
 - o Seite 27, Mitte erster Absatz: 662 Mio m³/Jahr statt 66.2 Mio m³/Jahr
- Ergänzung der parametrischen Tests durch nichtparametrische Testverfahren im Anhang und explizite Hinweise auf diese im Text
- Der Einfluss von Grubenwassereinleitungen aus dem Braunkohlentagebau auf die Niedrigwassersituation in der Vergangenheit ist wahrscheinlich geringer als zunächst unterstellt, es wird im Zusammenhang mit der Abflussreduktion der Saale nach 1989 um ca. 20 m³/s (Abflussbereich zwischen NQ und 50Q) nun von Folgen eines Bewirtschaftungswechsels gesprochen, die zu berücksichtigen sind.

Potsdam, 13. März 2006

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	7
1. Aufgabe.....	9
2. Material & Methoden.....	10
2.1 Herangehensweise.....	10
2.2 Daten.....	10
2.3 Erläuterungen zum aktuellen Unterhaltungsziel der Elbe (GIW 1989*).....	15
2.4 Analytische Grundlagen.....	16
2.4.1 Abflusskennzahlen.....	16
2.4.2 Langfristige Änderungen im Abfluss.....	17
2.4.3 Mittelfristige Abfluss- und Klimaoszillationen.....	17
2.4.4 Verteilungs- und Niveauvergleiche.....	17
3. Ergebnisse & Diskussion.....	18
3.1 Lang- und mittelfristige Verschiebungen in der Häufigkeit von Niedrigwasserklassen.....	18
3.2 Trends und periodische Schwankungen von Klimavariablen und Abflüssen im Niedrigwasserbereich.....	22
3.2.1 Lineare Trends seit 1951.....	22
3.2.2 Periodische Schwankungen.....	23
3.3 Anthropogene Änderungen im Abflussregime und extreme Niedrigwasserepisoden..	26
3.3.1 Mittellauf der Elbe.....	26
3.3.2 Saale.....	30
3.4 Zeitliche Repräsentanz der GIW89*(20d) Periode.....	32
3.5 Zeitliche Repräsentanz der Periode 1971-2000.....	36
3.6 Dauerlinien, Jährlichkeiten und Nutzen-Kosten Relationen.....	37
3.7 Klimafaktoren für eine weitere Zunahme der Niedrigwasserhäufigkeit.....	39
3.7.1 Klimatische Wasserbilanz.....	40
3.7.2 Häufigkeit von elbweiten Trockenperioden während der Sommermonate.....	42
4. Schlussfolgerungen.....	45
5. Anhang.....	46
6. Literatur.....	48

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Gesamtes Elbe-Einzugsgebiet mit dem Elbe- und Saalestrom sowie den in der Studie berücksichtigten Pegeln an Saale und mittlerer Elbe	12
Abb. 2: Beobachtungszeiträume von Abflüssen (hellblau) und Wasserständen (dunkelblau) der berücksichtigten Elbe- und Saalepegel	13
Abb. 3: Klimastationen und Niederschlagsbeobachtungspunkte auf deutschem und tschechischem Gebiet für die Analysen zur klimatischen Wasserbilanz.....	14
Abb. 4a, b: Langfristige Veränderungen in der Häufigkeit von Abflussklassen (uKg = untere Klassengrenze) und der Summenhäufigkeit (<50%) von Abflüssen (rechts oben) an den Pegeln Dresden (a) und Barby (b) bei Vergleich der 30-Jahres-Perioden 1901-1930, 1931-1960 und 1961-1990. Die angegebenen MNQ und MQ beziehen sich auf den Gesamtzeitraum 1901-1990.	19
Abb. 5a,b,c,d: Mittelfristige Veränderungen in der Häufigkeit von Abflussklassen und der Summenhäufigkeit von Abflüssen analog zu Abb. 4 an den Pegeln Dresden (a), Magdeburg (b), Barby (c) und im Mittel (d) über 8 Elbpegel (vgl. Tabellen 2 und 3)	20
Abb. 5c, d	21
Abb. 6: Klimazeitreihen (T und NS) und Abflüsse (NQ, 5Q, 25Q und 50Q) am Pegel Dresden, gleitende 7-jährige Mittel und mittlere Trendgeraden zu verschiedenen Zeitabschnitten (1901-1938, 1939-1953, 1954-1969 und 1970-2003) für alle Klima- und Abflussreihen. Die Klimazeitreihen basieren auf Mittelwerten der Klimastationen von Tschechien (rot/dunkelblau: 11 Stationen, pink/hellblau: 3 Stationen: Praha Kbely, Tabor, Caslav; vgl. Tab. 1). Die GIW89*-Periode 1973-1986 wurde grau hinterlegt, die einzelnen für die Berechnung des GIW89* aus dieser Periode verwendeten Jahre heben sich davor dunkelgrau ab.....	24
Abb. 7: Jährliche Niedrigwasserabflüsse (NQ) am Pegel Barby, gleitende 7-jährige Mittel und lineare Trendgeraden für verschiedene Zeitabschnitte (1901-1938, 1939-1953, 1954-1969 und 1970-2003).	24
Abb. 8: Jährliche Niedrigwasserabflüsse (NQ) am Pegel Magdeburg analog zu Abb. 7 mit den jährlichen Niederschlagssummen (NS) und den durchschnittlichen Jahrestemperaturen (T) gemittelt über alle Klimastationen aus Teileinzugsgebieten mit Elbemündung südlich Magdeburg ergänzt um die gleitenden 7-Jahresmittel für die dargestellten Größen und linearen Trendgeraden für die Zeitabschnitte bis 1938, 1939-1953, 1954-1969, 1970-2003.	25
Abb. 9 a, b, c, d: Verschiedene Betrachtungsweisen der langfristigen Änderungen bei den Niedrigwasserverhältnissen (schwarze Linien) an den Pegeln Dresden (a,c) und Barby (b, d). Oben sind die langfristigen linearen Trends ohne, unten mit abschnittsweiser Segmentierung, dargestellt. Die Segmentierung unten unterscheidet vier Phasen analog zu Abb. 6. Im Vergleich zu den Niedrigwasserabflüssen (schwarze Linien) sind darunter die Jahresniederschlagssummen (NS) abgetragen. In den unteren Grafiken ist zudem der zeitliche Verlauf des verfügbaren Speicherraums (hellblaue Linien) an der Elbe dargestellt.	28
Abb. 10: Langfristige Änderung der Niedrigwasser-Kenngrößen NQ, NM7Q, NM21Q und NM30Q am Pegel Dresden ohne Trendsegmentierung (hellere Linien im Hintergrund) und bei Segmentierung der Gesamtperioden in die Teilperioden 1900-1954 und 1955-2003.....	29
Abb. 11: Gleitendes 7-Jahresmittel der jährlichen Niedrigwassermengen (NQ) und Niedrigwasserstände (NW) am Pegel Barby seit 1900	30
Abb. 12: Klimazeitreihen (T und NS) und Abflüsse (NQ, 5Q, 25Q und 50Q) am Pegel Calbe, gleitende 7-jährige Mittel und mittlere Trendgeraden zu verschiedenen Zeitabschnitten (1932-1988, 1989-2003 und 1951-2003). Die Klimazeitreihen basieren auf Mittelwerten der Klimastationen aus dem Saale-Einzugsgebiet (vgl. Tabelle 1).....	31
Abb. 13 a, b Jährliche Unterschreitungshäufigkeit des GIW89* an den Pegeln Magdeburg (a) und Wittenberg (b) seit 1970. Hellblau unterlegt ist der Toleranzbereich (20 Tage) an	

	denen der GIW89* unterschritten werden darf (Eisbedingungen nicht berücksichtigt) und grau die Zeitperiode, die für die Berechnung des GIW89* herangezogen wurde.....	32
Abb. 14 a, b, c, d:	Jährliche Abfluss-Unterschreitungshäufigkeiten (a, b) des GIW89* und des MNQ (c, d) an den Pegeln Dresden (a, c) und Neu Darchau (b, d) seit 1900. Hellblau unterlegt ist der Toleranzbereich (20 Tage) an denen der GIW89* unterschritten werden darf (Eis-bedingungen nicht berücksichtigt) und grau die Zeitperiode, die für die Berechnung des GIW89* herangezogen wurde. Die MNQ wurden entsprechend der unterschiedlichen Abflussregime in der Elbe separat für die Perioden 1901-1954 und 1955-2003 kalkuliert	34
Abb. 15:	Summen der MNQ-Unterschreitungen am Pegel Barby in laufenden 30-Jahres-Perioden für den Zeitraum 1901-2003 abgetragen über dem jeweils ersten Jahr der 30-Jahresperiode. Die Perzentilbereiche 0-25, >25-50, >50-75 und >75-100 sind farblich hinterlegt und als feucht, mittel-feucht, mittel-trocken und trocken bezeichnet.....	37
Abb. 16:	Pegel Barby, Dauerlinien der mittleren Abflüsse in verschiedenen Zeitperioden sowie die zu den einzelnen Perioden gehörenden MNQ in m ³ /s. Die an 345 Tagen eines Jahres nicht unterschrittenen Mindestabflüsse in der jeweiligen Periode sind mit einem Pfeil gekennzeichnet. Zusätzlich wurden zur Orientierung die ca. 15 m ³ /s größeren MNQ-Werte angegeben.....	39
Abb. 17a, b:	Mittelwerte (a) und mittlere Trends (b) der klimatischen Wasserbilanz (KWB) im Zeitraum 1951-2000 für den hydrologischen Sommer. Die Werte wurden in die Fläche interpoliert ausgehend von Stationswerten. Die Perzentile der Stationswerte wurden als Grundlage der Klasseneinteilung genutzt. Die maximalen Werte befinden sich in der dunkelblauen Farbklasse, die minimalen in der dunkelroten Farbklasse. Die Zentralwerte (50% Perzentil) der Stationsmittel und Stationentrends für den Sommer lauten -134 mm und -60 mm. Die Zentralwerte der interpolierten Halbkilometer Rasterwerte betragen ca. -134 und -69 mm.....	41
Abb. 17c, d:	Mittelwerte (c) und mittlere Trends (d) der klimatischen Wasserbilanz im Zeitraum 1951-2000 für den hydrologischen Winter analog zu Abb. 17a, b. Die Zentralwerte (50% Perzentil) der Stationsmittel und der Stationentrends für den Winter lauten 213 mm und 57 mm. Die Zentralwerte der interpolierten Halbkilometer Rasterwerte liegen bei ca. 202 und 50 mm.	42
Abb. 18:	Veränderung der Andauer von niederschlagfreien Perioden (ein Tag, zwei Tage, drei Tage und vier Tage) in fortlaufenden 30-Jahre-Klimaperioden (1951-1980, 1952-1981, ..., 1974-2003) für den hydrologischen Sommer im Elbegesamtgebiet mit linearen Trendgeraden und den dazugehörigen Anstiegen.	44
Abb. 19:	Veränderung der Andauer von niederschlagfreien Ein-Tagesperioden in fortlaufenden 30-Jahre-Klimaperioden (1951-1980, 1952-1981, ..., 1974-2003) für den hydrologischen Sommer im Elbegesamtgebiet mit linearen Trendgeraden und den dazugehörigen Anstiegen gegliedert nach oberer Elbe (Stationen südlich Dresdens), mittlerer Elbe (Stationen nördlich von Dresden und südlich von Boizenburg) und unterer Elbe (Stationen nördlich von Boizenburg).....	44

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Synoptische Klimastationen der berücksichtigten Einzugsgebiete	15
Tab. 2: Mittlere tägliche Niedrigwasserabflüsse (MNQ) der Elbpegel über Dreißigjahres-Perioden und Dekaden	22
Tab. 3: Mittlere wöchentliche Niedrigwasserabflüsse (MNM7Q) der Elbpegel über Dreißigjahres-Perioden und Dekaden	22
Tab. 4: Niveauunterschiede von Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung s verschiedener Abflusskennzahlen (NQ, Q5, Q25 und Median) zwischen den Perioden 1901-1938 und 1970-2003 an den Pegeln Dresden und Barby. Die letzte Spalte gibt die prozentuale Änderung im Vergleich der zweiten zur ersten Periode an. Die Symbole NS/ * / ** / *** entsprechen den Signifikanzniveaus nicht signifikant / $p \leq 0.1$ / $p \leq 0.05$ / $p \leq 0.01$ für $Pr > F$, $Pr > t $ zu den Teststatistiken F-Test und t-Test. Tabelle A1 im Anhang enthält weitergehende Prüfungen auf Normalverteilung und Robustheit unter Nutzung nichtparametrischer Verfahren.	29
Tab. 5: Pegel Barby - Unterschreitungen der Trend bereinigten MNQs (vgl. Abb. 14c, d) innerhalb aller im Zeitraum 1901-2003 vorkommenden 14-Jahres-Perioden, unterteilt in gleichhäufige Perioden (25%): Feucht: 0-25% Perzentil, Mittel-feucht: >25-50%, Mittel-trocken: >50-75% und Trocken: >75%. Berücksichtigt wurden nur die 7 trockensten Jahre der 14-Jahres-Periode. Die GLW89*-Periode ist hellgrau unterlegt. Die repräsentativere Periode 1986-1999 ist einen Grauton dunkler markiert.	35
Tab. A1: Verteilungs- und Niveauunterschiede verschiedener Abflusskennzahlen (NQ, Q5, Q25 und Median) zwischen den Perioden 1901-1938 und 1970-2003 an den Pegeln Dresden und Barby. Angegeben sind die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (s) je Periode sowie die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung je Periode, auf Varianzunterschiede bei Normalverteilung (F-Test), auf Verteilungsunterschiede unabhängig vom Verteilungstyp (Kolmogorov-Smirnov Test), auf Mittelwertunterschiede bei Normalverteilung (t-Test) und auf Niveauunterschiede unabhängig vom Verteilungstyp jeweils zwischen den beiden betrachteten Perioden. Aus den Testergebnissen der nichtparametrischen Verfahren ergeben sich keine Widersprüche zu den Darlegungen im Hauptteil.	46
Tab. A2: Verteilungs- und Niveauunterschiede der Unterschreitungshäufigkeiten für den mittleren Niedrigwasserabfluss a) nach GLW89* b) bei periodenbezogenem kalkuliertem mittleren NQ an den Pegeln Dresden und Neu Darchau. Die Unterschreitungshäufigkeiten wurden für die Perioden 1901-1954 und 1955-2003 kalkuliert. Angegeben sind die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (s) je Periode sowie die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung je Periode, auf Varianzunterschiede bei Normalverteilung (F-Test), auf Verteilungsunterschiede unabhängig vom Verteilungstyp (Kolmogorov-Smirnov Test), auf Mittelwertunterschiede bei Normalverteilung (t-Test) und auf Niveauunterschiede unabhängig vom Verteilungstyp jeweils zwischen den beiden betrachteten Perioden. Zusätzlich wurden die Unterschiede im relativen Auftreten von Nichtunterschreitungen ($GLW_U=0$ bzw. $MNQ_U=0$) zwischen den Perioden getestet (Chi-Quadrat-Test). Aus den Testergebnissen der nichtparametrischen Verfahren ergeben sich keine Widersprüche zu den Darlegungen im Hauptteil.	47

Abkürzungsverzeichnis

E _{pot}		Potentielle Evapotranspiration nach Turc-Ivanow [mm]
GIW		Gleichwertiger Wasserstand: Wasserstände in verschiedenen Flussquerschnitten eines Fließgewässers mit gleicher Unterschreitungshäufigkeit (Faulhaber, 2000)
GIW89*(20d)		aktuell gültiger Bezugswasserstand der Elbe, der Wasserstand, der im Mittel an 20 eisfreien Tagen im (in der Bezugsperiode 1973-1986) unterschritten wurde, er liegt in der Größe des langjährigen mittleren Niedrigwassers (MNW) (Faulhaber, 2000, Otte-Witte <i>et al.</i> , 2002)
KWB		Klimatische Wasserbilanz; $KWB = NS - E_{pot}$
NS		Niederschlag [mm]
Q		Abfluss [m ³ /s]
	NQ	Niedrigster Abflusswert in einem bestimmten Zeitabschnitt
	NM7Q	Niedrigstes arithmetisches Mittel des Abflusses an sieben aufeinander folgenden Tagen (BELZ <i>et al.</i> , 2004)
	MNQ	Mittlerer NQ in einer Mehrjahresperiode
	MNM7Q	Mittlerer NM7Q in einer Mehrjahresperiode
5Q		Quantil 0,05 der Abflusswerte (5 % der Werte sind kleiner gleich diesem Wert)
25Q		Quantil 0,25 der Abflusswerte (25 % der Werte sind kleiner gleich diesem Wert)
50Q		Quantil 0,5 der Abflusswerte oder Median (50 % der Werte sind kleiner gleich diesem Wert)
T		Temperatur [°C]
W		Wasserstand [cm]
	NW	Niedrigster Wasserstandswert in einem bestimmten Zeitabschnitt
	MNW	Mittlerer niedrigster Wasserstandswert in einem bestimmten Zeitabschnitt
	MW	Arithmetisches Mittel des Wasserstands in einem bestimmten Zeitabschnitt

Zusammenfassung

Die Abflussverhältnisse der Elbe schwanken sowohl im Jahresverlauf als auch von Jahr zu Jahr erheblich. Extreme Niedrigwasserstände waren in der ersten Hälfte des Jahrhunderts stärker ausgeprägt als in der zweiten. Von Mitte der 50er bis zu Beginn der 70er Jahre waren die jährlichen Niedrigwasserhäufigkeiten rückläufig, da in Tschechien Talsperren und Rückhaltebecken gebaut wurden, die eine gezielte Niedrigwasserauffüllung erlaubten. In den folgenden 20 Jahren war es vergleichsweise feucht. Seit Beginn der 90er Jahre nimmt die jährliche Häufigkeit von Niedrigwasser in der Elbe wieder zu. Diese Entwicklung ging einher mit einer Verschiebung der innerjährlichen Niederschlagsverteilung zugunsten der Winterniederschläge und einer längeren Häufigkeit und Verweildauer von Hochdruck- und Hochdruckbrückenwetterlagen über dem Elbegebiet. Letzteres hatte zur Folge, dass die Häufigkeit niederschlagsfreier Perioden zunahm. Abzüglich Niedrigwasserauffüllung scheinen sich die Niedrigwasserhäufigkeiten in der Elbe wieder den Verhältnissen zu nähern, wie sie für die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts typisch waren. Eine Fortsetzung des regional bereits nachweisbaren Klimawandels insbesondere des elbweiten Temperaturanstiegs um 0.5 (tschechischer Teil) bis 1°C (deutscher Teil) für die letzten 50 Jahre erhöht zudem die Wahrscheinlichkeit, dass die Niedrigwasserhäufigkeit in den kritischen Sommermonaten in Zukunft noch weiter zunimmt. Maßnahmen zum Unterhalt und Ausbau der Elbe als Schifffahrtsweg unterschätzen den damit verbundenen Aufwand, wenn sie von Niedrigwasserverhältnissen ausgehen, wie sie in aus heutiger Sicht relativ feuchten Perioden bestanden, die ungleichmäßige Jahresweise Verteilung von Niedrigwasser vernachlässigen und die künftig nachlassenden Niedrigwasserauffüllungen aus dem Bergbau nicht berücksichtigen. Die gegenwärtig für die Festsetzung der durch Unterhaltungsmaßnahmen zu gewährleistenden Wasserstände genutzten Niedrigwasserstände der 14-Jahres Periode 1973-1986 gehören zu einem relativ feuchten Abschnitt des letzten Jahrhunderts und sind damit AUS HEUTIGER SICHT ungeeignet für die Definition von Unterhaltungszielen in einer frei fließenden Elbe. Die Periode 1971-2000 ist ein annähernd repräsentativer Ausschnitt der klimatischen Verhältnisse des letzten Jahrhunderts. Bei der Abschätzung der Kosten-Nutzen Relationen im Zusammenhang mit dem Saale-Seitenkanal ist jedoch zu berücksichtigen, dass die im Mittel in 340 von 365 Tagen gewährleisteten Mindestabflüsse in jedem dritten Jahr um 7 und jedem vierten Jahr um 37 Tage unterschritten werden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass seit 1989 der Zufluss aus dem Saalegebiet in die Elbe systematisch um ca. 20m³/s zurückging, was teilweise auf die abnehmende Tagebauaktivi-

tät zum anderen aber auch auf andere systematische Änderungen in der Bewirtschaftung des regionalen Wasserhaushaltes zurückzuführen sein dürfte.

1. Aufgabe

Niedrigwasser ist eines der Extreme in der Wasserführung von Flüssen, das bei der Konzeption von flussgebundener Wassernutzung und flussnaher Landnutzung berücksichtigt werden muss, um Kosten-Nutzen-Relationen wirtschaftlicher Aktivitäten realistisch beurteilen zu können. Niedrigwasser in der Elbe kann nicht nur in der Schifffahrt sondern auch in der Landwirtschaft, der Energieproduktion und dem Tourismus zu erheblichen Nutzungsausfällen führen.

In den letzten Jahren verdichten sich die Anzeichen, dass insbesondere der Wasserhaushalt der Elberegion in besonderer Weise vom Klimawandel betroffen sein könnte, wenn mit dem zu erwartenden Temperaturanstieg die Niederschläge zurückgehen sollten. Ein entsprechender Trend bei den Sommerniederschlägen lässt sich in großen Teilen des Einzugsgebietes schon heute beobachten (Wechsung et al. 2005). Für den Wasserhaushalt des Gebietes könnte dies bedeuten, dass die Häufigkeit und Andauer von extremen Niedrigwasserständen insbesondere während der Sommermonate zunimmt.

Im Zusammenhang mit der Gewährleistung von Schiffbarkeit auf der Elbe sind Unterhaltungs- und Ausbaurbeiten von Bedeutung. Erstere sichern einen definierten Status, letztere sollen die bisherigen Bedingungen für die Schiffbarkeit verbessern. In beiden Fällen wird Bezug genommen auf historisch beobachtete Abflussverhältnisse. Sie dienen der Festlegung eines realistischen Unterhaltungszieles und der Nutzensabschätzungen bei möglichen Ausbauprojekten.

Die laufenden Arbeiten zum Unterhalt des Schifffahrtsweges Elbestrom beziehen sich auf die Niedrigwasserstände der Periode 1973-1986 (vgl. Kap. 3.1). Das gegenwärtig wichtigste Projekt zur Verbesserung der Schiffbarkeit in der deutschen Elbe ist der Saale-Seitenkanal, der seit 2002 als Alternative für die verworfene Staustufenregelung zwischen Calbe und der Saalemündung, diskutiert wird. Für die Nutzen-Kosten Analysen zu diesem Projekt (ca. 80 Mill. € Investitionsvolumen) wurden die Niedrigwasserverhältnisse der Periode 1971-2000 herangezogen (Planco GmbH, 2004).

In beiden Fällen wird Repräsentativität der ausgewählten Abflussperioden vorausgesetzt. Sollten diese Perioden die tatsächlich zu erwartenden Niedrigwasserverhältnisse unterschätzen, führt dies zu einer Unterschätzung von Unterhaltungsaufwendungen und einer Überschätzung von Nutzen-Kostenrelationen.

Die vorliegende Studie setzt sich zum Ziel, die beiden oben genannten Abflussperioden einzuordnen. Zwei Fragen werden untersucht:

1) Können die gewählten Abflussperioden vor dem Hintergrund der Niedrigwasserverhältnisse in den letzten 100 Jahren als repräsentativ gewählt gelten?

2) Welches Szenario für die weitere Entwicklung bei den Niedrigwasserverhältnissen in der Elbe erscheint besonders plausibel?

Im Mittelpunkt der Studie stehen die Schiffbarkeitsvoraussetzungen im Elbestrom zwischen Dresden und Magdeburg.

2. Material & Methoden

2.1 Herangehensweise

Im Rahmen der Untersuchungen zur Repräsentanz der in Frage stehenden Perioden werden Abfluss- und Klimatrends analysiert. Die Berücksichtigung von Klimaszenarien bleibt späteren Arbeiten vorbehalten. Es wird wie folgt vorgegangen: Zunächst werden die langfristigen Tendenzen im Niedrigwasserbereich für den Elbestrom und das Teileinzugsgebiet der Saale während des letzten Jahrhunderts analysiert. Anschließend werden die mittelfristigen Fluktuationen der Niedrigwasserabflüsse eingehender betrachtet. Abschließend werden ausgewählte elbweite Klimatrends diskutiert, die für Niedrigwasser relevant sind und Rückschlüsse auf die Richtung der künftigen Entwicklung beim Niedrigwassergeschehen gezogen.

2.2 Daten







Es wurden Pegel der mittleren Elbe und der Saale analysiert. Eine Darstellung der untersuchten Pegel befindet sich in Abbildung 1. Bei dem verwendeten Datenmaterial handelt es sich um Zeitreihen von Abflüssen und Wasserständen der Pegel, welche dem PIK von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz bereitgestellt wurden. Die verfügbaren Datenreihen umfassen dabei längstens einen Zeitraum von 1850 bis 2003 (Pegel Dresden). Die Beobachtungszeiträume sind in Abbildung 2 für die Abfluss- und Wasserstandsreihen dargestellt.

Die Datenreihen zu Niederschlägen und Temperaturen wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellt und durch das PIK homogenisiert. Die tschechischen Datenreihen wurden dem PIK vom Tschechischen Hydrometeorologischen Institut in Prag zu wissenschaftlichen Zwecken überlassen und analog zu den deutschen Datenreihen homogenisiert.

Neben den verfügbaren synoptischen Stationen (Tab. 1), wurden für die Niederschlagsanalysen die Beobachtungen einer Reihe spezieller Niederschlagsbeobachtungspunkte genutzt (Abb. 3). Die Analysen zur klimatischen Wasserbilanz beruhen auf Angaben von 18 synoptischen Statio-

nen in Tschechien und angrenzenden Gebieten und 348 Stationen aus dem deutschen Teileinzugsgebiet. Bei den Stationen aus dem deutschen Teilgebiet handelt es sich sowohl um Klimastationen als auch um Niederschlagsbeobachtungspunkte. Für letztere wurden die nicht vorhandenen Temperaturreihen durch Interpolation, die die Höhenabhängigkeit der Temperatur berücksichtigt, erzeugt. Die klimatische Charakterisierung des tschechischen Teilgebietes ist vergleichsweise grob. Vorzeichenrelevante Interpolationsfehler sind hier wahrscheinlicher als für den deutschen Teil. An einer Verbreitung der Datenbasis analog zum deutschen Teilgebiet wird gegenwärtig intensiv gearbeitet.



-  bearbeitete Pegel
-  Saale
-  Elbe
-  Elbe Flusssystem
-  Bundesländer
-  Elbe - gesamtes Einzugsgebiet

0 50 100 150 200 Kilometer

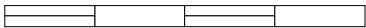


Abb. 1: Gesamtes Elbe-Einzugsgebiet mit dem Elbe- und Saalestrom sowie den in der Studie berücksichtigten Pegeln an Saale und mittlerer Elbe

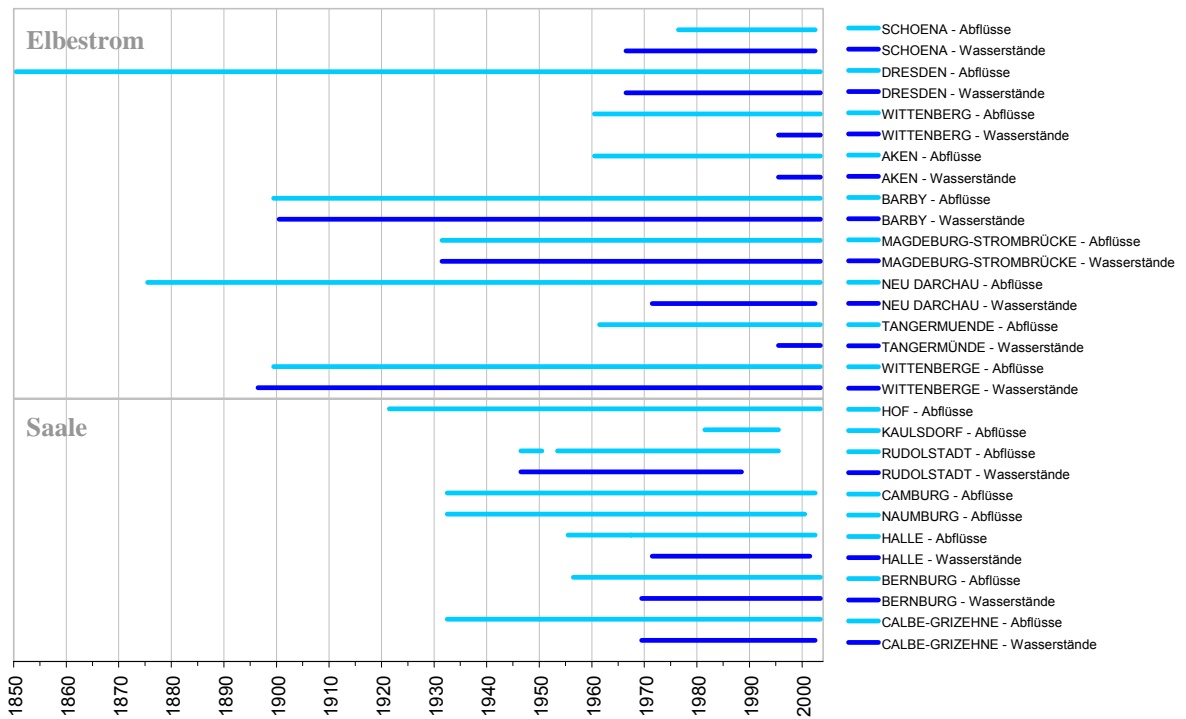


Abb. 2: Beobachtungszeiträume von Abflüssen (hellblau) und Wasserständen (dunkelblau) der berücksichtigten Elbe- und Saalepegel

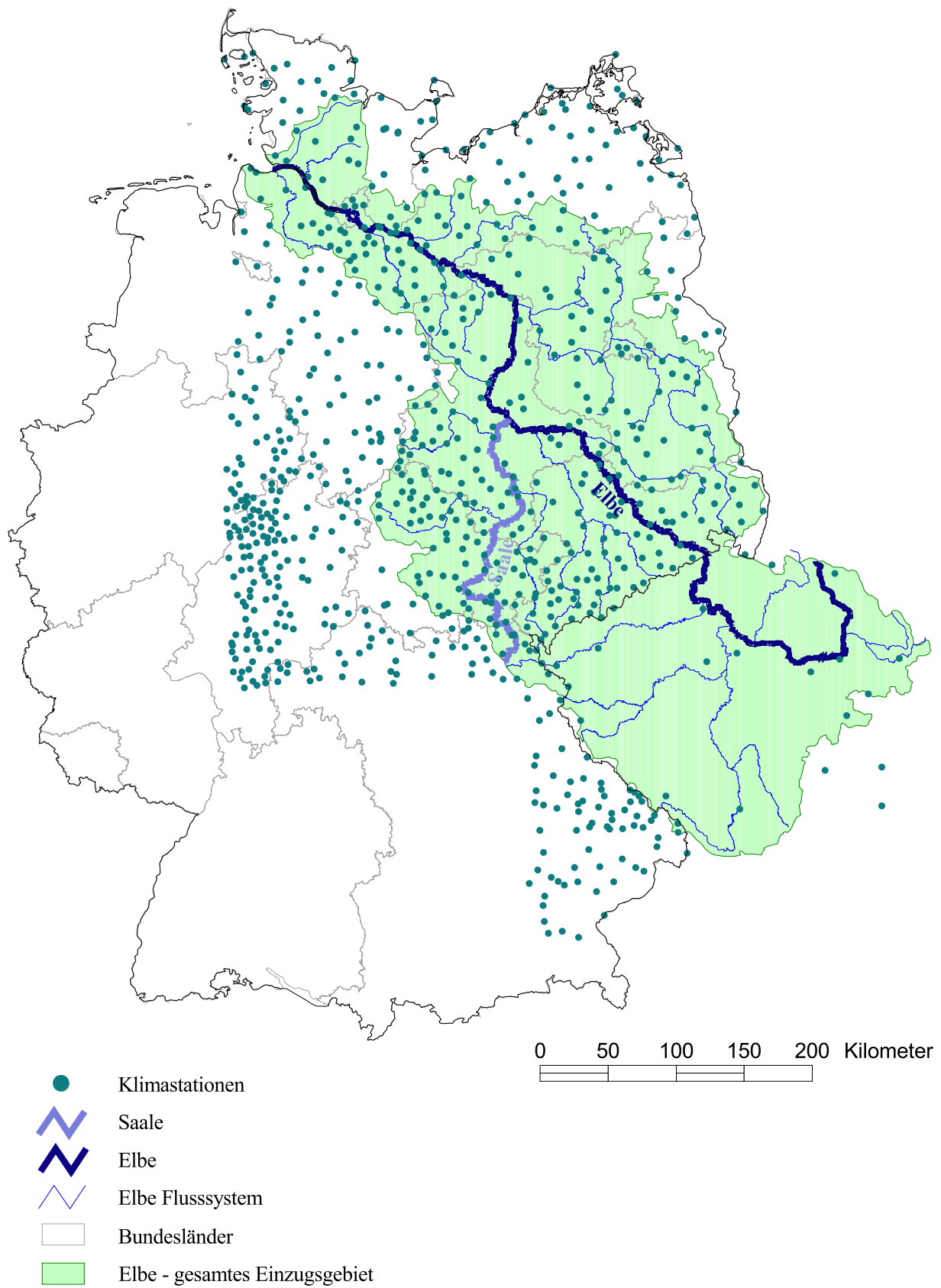


Abb. 3: Klimastationen und Niederschlagsbeobachtungspunkte auf deutschem und tschechischem Gebiet für die Analysen zur klimatischen Wasserbilanz

Tab. 1: Synoptische Klimastationen der berücksichtigten Einzugsgebiete

Tschechisches Teilgebiet	Deutsches Teilgebiet	
	für Saale	
Caslav	Altern (Wst)	X
Ceske Budejovice	Bad Lauchstädt	X
Cheb	Bad Sachsa	X
Churanov	Braunlage (Wst)	X
Doksany	Chemnitz	
Karlovy Vary	Doberlug-Kirchhain (Wst)	
Liberec	Dresden-Klotz. (Flugw.)	
Milesovka	Eisleben-Helfta	X
Praha Kbely	Erfurt-Bind. (Flug.)	X
Pribyslav	Fichtelberg	
Primda	Gera-Leumnitz (Wst)	X
	Gernrode	X
	Halle-Kröllwitz	X
	Harzgerode	X
	Hof (Stadt)	X
	Hof Hohensass (Wst)	X
	Jena (Sternwarte)	X
	Leipzig (Wst)	X
	Magdeburg (Wst)	
	Marienberg	
	Plauen (Mns)	X
	Schierke	X
	Torgau	
	Weimar (Wa)	X
	Wernigerode	
	Wittenberg (Wst)	

2.3 Erläuterungen zum aktuellen Unterhaltungsziel der Elbe (GIW 1989*)

Das gegenwärtige Unterhaltungsziel für die Schiffbarkeit der Elbe liegt bei einer Fahrrinntiefe von 1.60 m unter Bezugwasserstand für die deutsche Elbe mit Ausnahme des Abschnittes Dresden - Schöna, wo 1.50 m angestrebt werden. Die Fahrrinntiefe sollte bis zum Augusthochwasser 2002 für einen Fahrrinnenkasten von 50 m Breite bereitgestellt werden. Gegenwärtige Unterhaltungsmaßnahmen beschränken sich auf die Gewährleistung des Status quo vor dem Hochwasser 2002 (Verbalnote des Auswärtigen Amtes vom 27.7.2005). Abschnittsweise wurden deshalb Abstriche bei der angestrebten Fahrrinnenbreite vorgenommen. Sie beträgt 40m zwischen Dresden und der Saalemündung und 35m im Bereich der Stadtstrecke Magdeburg.

Der Bezugwasserstand ist gegenwärtig durch den GIW89* definiert. Hierbei handelt es sich um einen in verschiedenen Flussabschnitten ‚Gleichwertigen Wasserstand‘. Die Gleichwertigkeit bezieht sich auf den Umstand, dass jeweils an maximal 20 eisfreien Tagen in 7 trockenen und

mittleren Jahren des Bezugszeitraumes 1973-1986 dieser Wasserstand unterschritten wurde (Gabriel 2005, Faulhaber & Williamowski 2005, Otte-Witte et al. 2002).

Der GIW berücksichtigt unterschiedliche Flussquerschnitte innerhalb eines Flussabschnittes. Für die Berechnung des GIW89*, die durch die hierfür autorisierte Bundesanstalt für Wasserbau erfolgt, wurden Niedrigwasser bezogene Dauerzahlen der hydrologischen Jahre 1973, 1976, 1982, 1983, 1984, 1985 und 1986 als Datenbasis genutzt. (Gabriel 2005). Der GIW liegt gewöhnlich in der Nähe des MNQ bzw. MNW, dem mittleren Niedrigwasserdurchfluss bzw. Niedrigwasserstand in der betrachteten Periode (Otte-Witte *et al.* 2002, Faulhaber 1998). Da MNQ und MNW im Unterschied zum GIW nicht an eine Abflussperiode und Körperschaft per Definition gebunden sind und daher einfacher fortzuschreiben sind, werden im Folgenden der Einfachheit wegen MNQ und MNW als Repräsentanten des GIW genutzt.

Der GIW für die Elbe wurde zuletzt im Jahr 1989 offiziell aktualisiert. Eine Neuberechnung des GIW mithilfe der sonst beispielsweise am Rhein üblichen langjährigen Abflussreihen (30-Jahres-Periode), ist für das Jahr 2006 nach Auskunft der Wasserschiffahrtssdirektion Ost geplant. Da die Praxiseinführung eines neuen GIW sich jedoch verzögern kann und in der Zwischenzeit Unterhaltungsmaßnahmen in Angriff genommen werden, die sich auf den GIW89* beziehen, ist es sinnvoll die Notwendigkeit einer Neubestimmung des GIW noch einmal explizit darzustellen.

2.4 Analytische Grundlagen

2.4.1 Abflusskennzahlen

Zur Charakterisierung der mittleren Abflüsse wurde der Median (50Q) verwendet, der weniger sensitiv als das arithmetische Mittel auf Extremwerte reagiert. Die tägliche Niedrigwassersituation wird mit den Tagesabfluss-Perzentilen NQ (minimaler täglicher Abfluss), 5Q und 25Q vergleichend beschrieben. Zusätzlich werden der niedrigste mittlere Wochenabfluss (NM7Q), der niedrigste mittlere Drei-Wochen (NM21Q) und der niedrigste mittlere Monatsabfluss (NM30Q) analysiert. Um die mittleren Niedrigwasserverhältnisse über einer längeren Periode zu charakterisieren, werden die je Jahr ermittelten NQ und NM7Q zu MNQ und MNM7Q gemittelt. Die Kennzahlenberechnung erfolgt für volle Kalenderjahre. Da die Niedrigwasserperioden sich gegenwärtig vor allem auf die Monate August, September und Oktober erstrecken ist nur in Ausnahmefällen mit Abweichungen zum hydrologischen Jahr (November-Oktober) zu rechnen.

2.4.2 Langfristige Änderungen im Abfluss

Für eine erste Bestandsaufnahme zur Natur der mittel- und langfristigen Änderungen im Abflussgeschehen wurden die Zeitreihen in gleichlange Intervalle unterteilt. Die langfristigen Änderungen wurden durch den Vergleich von 30-Jahresintervallen verdeutlicht. Zur Aufdeckung mittelfristiger Verschiebungen in den letzten Jahrzehnten wurden die Abflussverhältnisse dekadeweise miteinander verglichen.

2.4.3 Mittelfristige Abfluss- und Klimaoszillationen

Die Niederschlags- und Abflussverhältnisse in der Elbe sind vielfach durch eine 14 Jahresperiodik geprägt: auf sieben eher abflussstärkere folgen sieben eher abflussschwächere Jahre (Helms, Ihringer & Nestmann 2002). Um diese mittelfristigen Oszillationen bei Niederschlägen und Abflüssen zu verdeutlichen wird in den grafischen Darstellungen von Niederschlag, Temperatur und Abflüssen ein gleitendes Siebenjahresmittel verwendet, welches die höherfrequenten Schwankungen herausfiltert und dadurch die mittelfristigen Oszillationen sichtbar macht.

2.4.4 Verteilungs- und Niveauvergleiche

Im Mittelpunkt der Analyse steht ein exploratives Vorgehen, wobei größten Wert auf die Nachvollziehbarkeit der einzelnen Untersuchungsschritte gelegt wird. Vereinzelt werden Verteilungs- und Niveauunterschiede getestet. Als Prüfstatistiken wurden zunächst F- und t-Test genutzt. Die Kalkulationen erfolgten in EXCEL 2003. Ergänzende Prüfungen auf Normalverteilung und auf Robustheit der F- und t-Testergebnisse bei Nichterfüllung der Normalverteilungsvoraussetzung wurden mit dem Statistikpaket SAS durchgeführt. Die Ergebnisse der umfassenden statistischen Prüfungen sind im Anhang dargestellt. Lineare Trendgeraden wurden nicht explizit getestet. Sie dienten vorwiegend der Veranschaulichung von tendenziellen Entwicklungen.

3. Ergebnisse & Diskussion

3.1 Lang- und mittelfristige Verschiebungen in der Häufigkeit von Niedrigwasserklassen

In Abbildung 4a und b wird die im 20. Jahrhundert beobachtbare langfristige Verschiebung in der Häufigkeit einzelner Abflussklassen im mittleren Elbegebiet illustriert. Dabei werden die 30-Jahres-Perioden 1901-1930, 1931-1960 und 1961-1990 verglichen. Ergänzend hierzu sind in den Tabellen 2 und 3 die MNQ und MNM7Q für die jeweiligen 30-Jahres-Perioden aufgeführt. An den Pegeln Dresden und Barby zeigt sich in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts eine deutliche Tendenz zu abnehmender Häufigkeit von Niedrigwasserklassen. Die Häufigkeit der Niedrigwasserklassen ist in der zweiten 30-Jahres-Periode zunächst noch höher als in der ersten Periode (Dresden, Abb. 4a) bzw. unterscheidet sich nur geringfügig von dieser (Barby, Abb. 4b), um dann in der dritten Periode deutlich abzunehmen. Die Summenhäufigkeitskurve (Abb. 4a, b; rechts oben) für die letzte Periode verläuft deshalb an beiden Pegeln deutlich unter den Kurven für die ersten beiden Perioden. Der MNQ steigt bis zur dritten Periode (an den einzelnen Pegeln Dresden, Barby, Tangermünde und Neu Darchau sowie im Mittel über alle Pegel) kontinuierlich an (Tabelle 2). Der MNM7Q als Indikator für die Andauer von Niedrigwasserperioden verhält sich analog (Tab. 3).

Bei einer zeitlich höher aufgelösten Dekaden bezogenen Betrachtung der Abflusshäufigkeiten seit 1960, wie man sie in den Abbildungen 5a - d und ergänzend hierzu in den Tabellen 2 und 3 findet, wird deutlich, dass es in jüngster Vergangenheit zu einer Umkehrung der langfristigen Tendenz abnehmender Niedrigwasserhäufigkeiten gekommen ist. Seit den 90er Jahren nimmt die relative Niedrigwasserhäufigkeit (Abflussklassen im MNQ-Bereich) an allen Pegeln wieder zu. Bisheriger Höhepunkt dieser Entwicklung ist das Trockenjahr 2003, welches somit nicht im Gegensatz zu einem allgemeinen Trend steht, wie dies für den Rhein der Fall ist (Belz, Engel & Krahe, 2004) sondern diesen bestätigt. Die GIW89* Periode befindet sich damit aus heutiger Sicht am Ende einer Phase abnehmender Niedrigwasserhäufigkeit. Die der GIW89* Periode folgenden Zeitabschnitte (90er, 2000er) sind durch ansteigende Niedrigwasserhäufigkeiten charakterisiert.

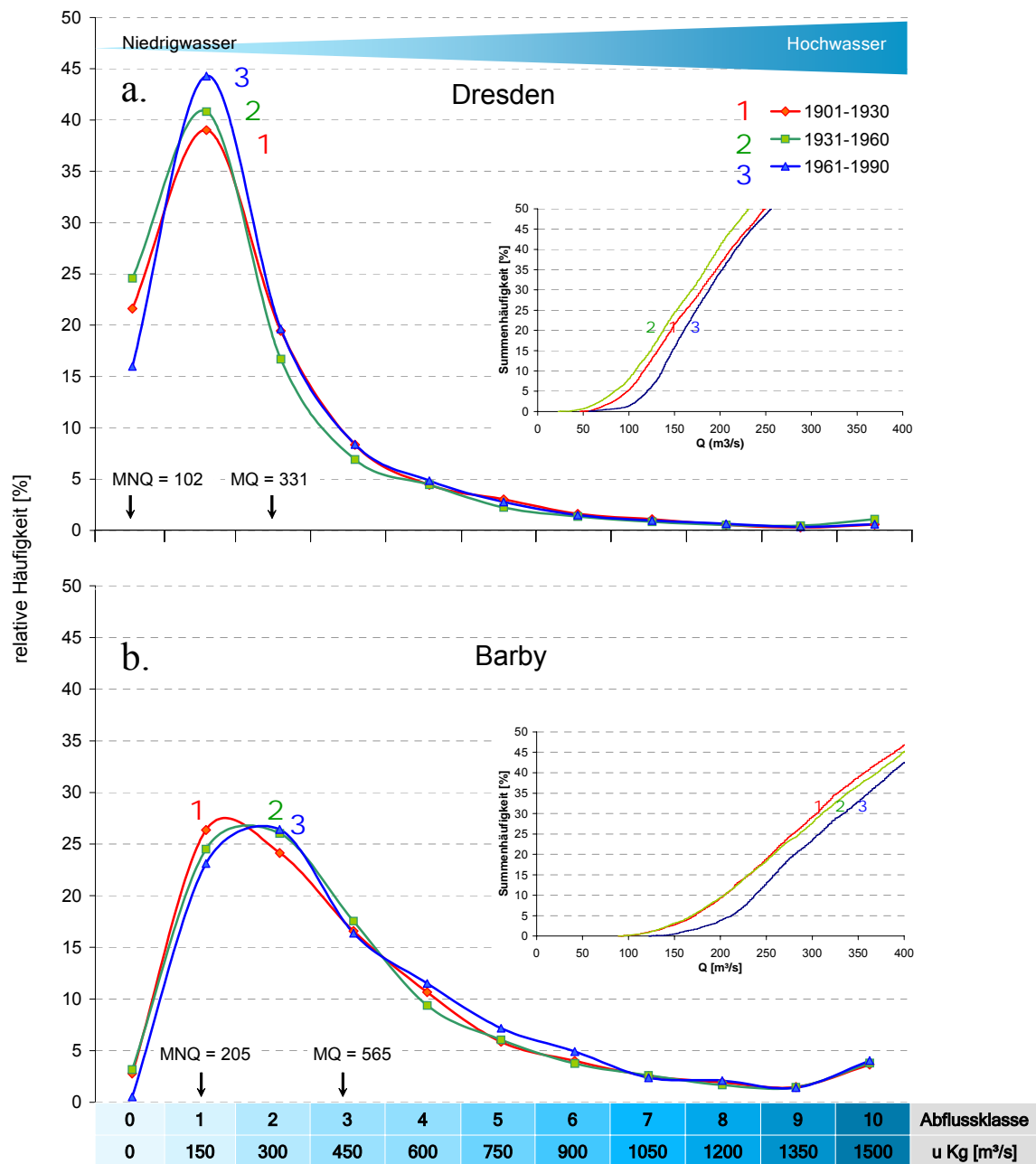


Abb. 4a, b: Langfristige Veränderungen in der Häufigkeit von Abflussklassen (uKg = untere Klassengrenze) und der Summenhäufigkeit (<50%) von Abflüssen (rechts oben) an den Pegeln Dresden (a) und Barby (b) bei Vergleich der 30-Jahres-Perioden 1901-1930, 1931-1960 und 1961-1990. Die angegebenen MNQ und MQ beziehen sich auf den Gesamtzeitraum 1901-1990.

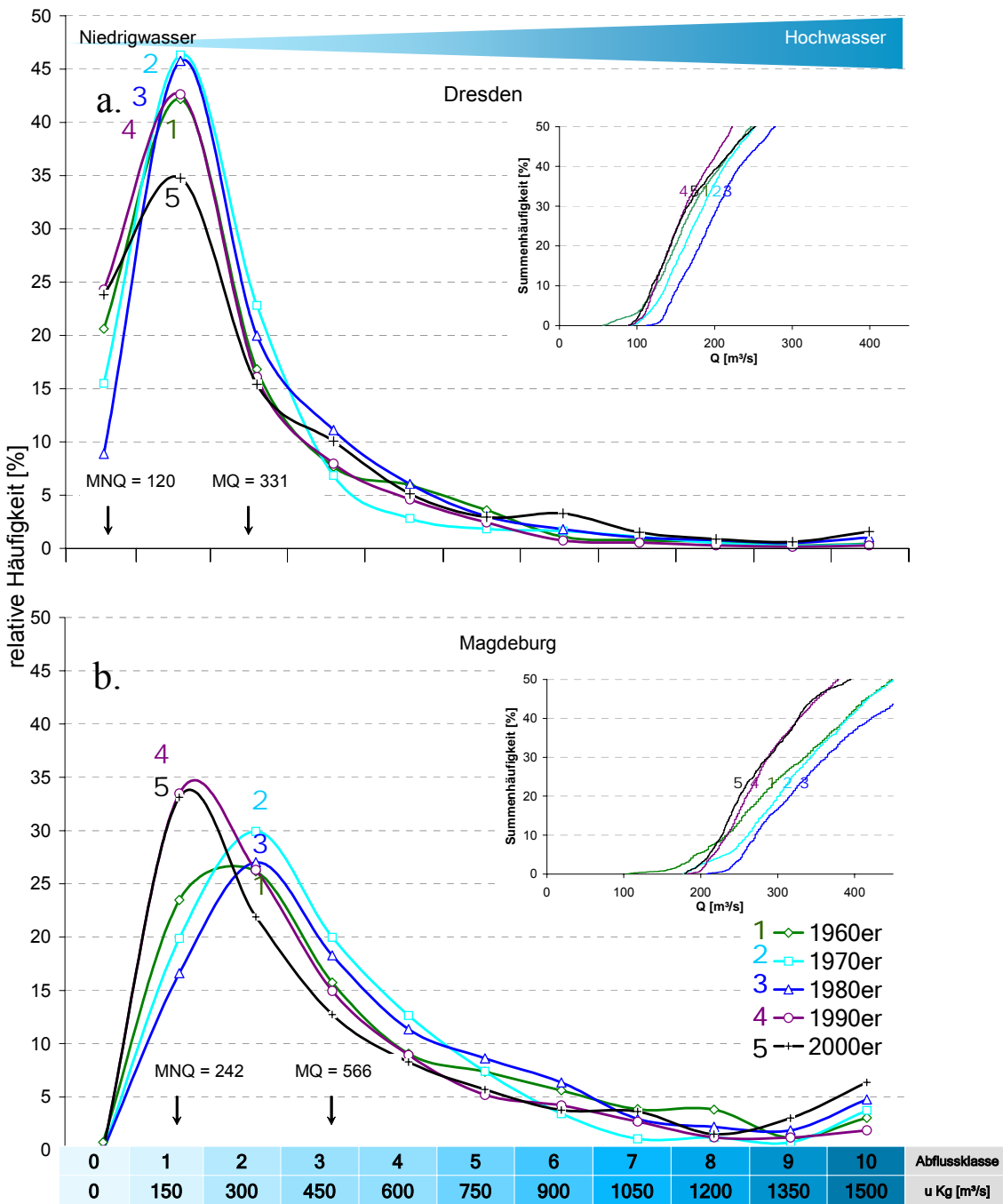


Abb. 5a,b,c,d: Mittelfristige Veränderungen in der Häufigkeit von Abflussklassen und der Summenhäufigkeit von Abflüssen analog zu Abb. 4 an den Pegeln Dresden (a), Magdeburg (b), Barby (c) und im Mittel (d) über 8 Elbpegel (vgl. Tabellen 2 und 3)

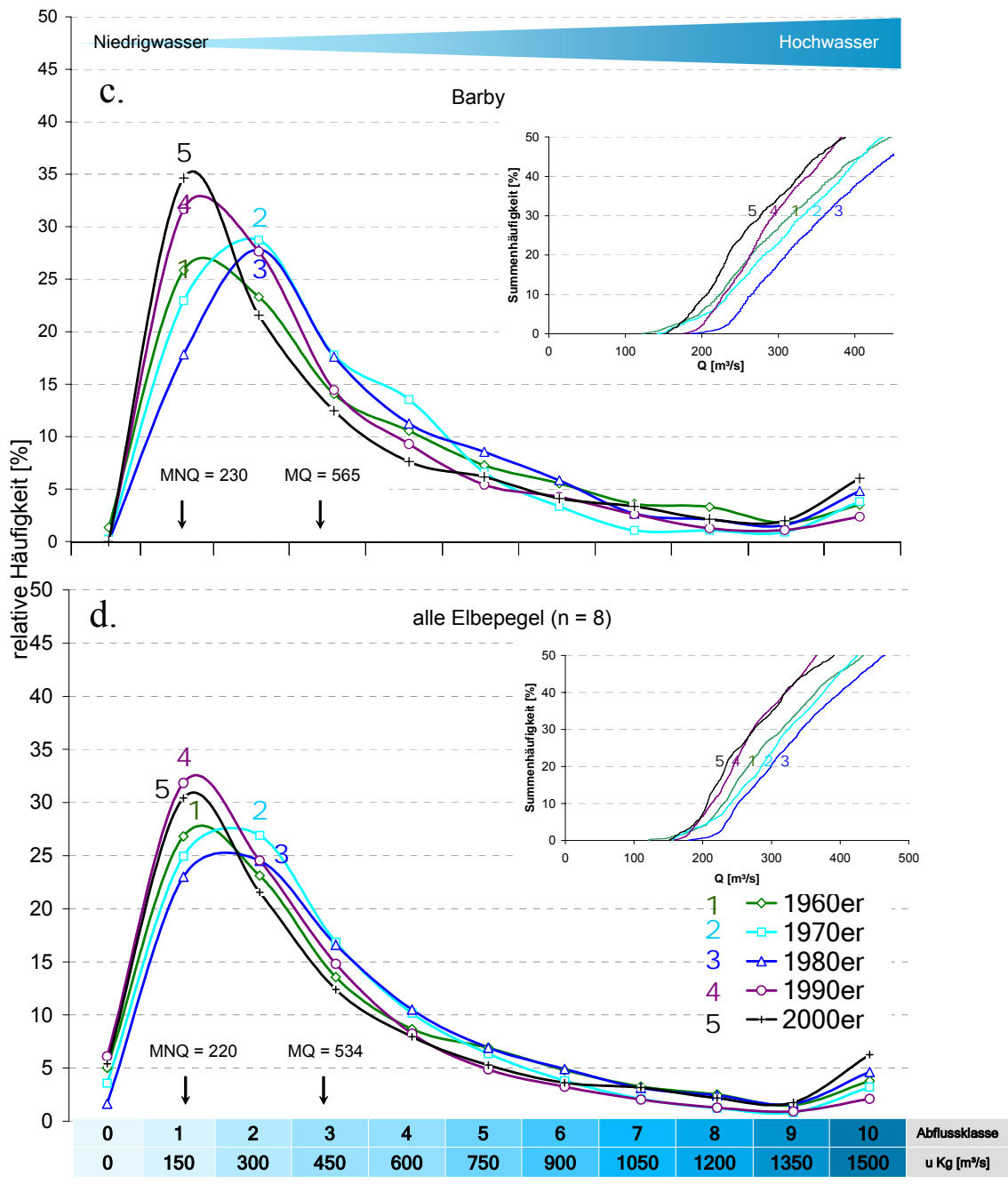


Abb. 5c, d

Tab. 2: Mittlere tägliche Niedrigwasserabflüsse (MNQ) der Elbpegel über Dreißigjahres-Perioden und Dekaden

MNQ [m ³ /s]	Dresden	Wittenberg	Aken	Barby	Magdeburg	Tangermünde	Wittenberge	Neu Darchau	Pegelmittel
1901-1930	89			178			239	250	189
1931-1960	94			206			272	259	208
1961-1990	122			230			315	295	240
1960er	113	140	178	220	242	242	314	304	219
1970er	119	139	170	217	237	245	303	270	212
1980er	140	161	194	263	273	274	347	335	248
1990er	109	124	153	217	223	221	261	258	196
2000er	117	141	161	209	227	224	278	287	205

Tab. 3: Mittlere wöchentliche Niedrigwasserabflüsse (MNM7Q) der Elbpegel über Dreißigjahres-Perioden und Dekaden

MNM7Q [m ³ /s]	Dresden	Wittenberg	Aken	Barby	Magdeburg	Tangermünde	Wittenberge	Neu Darchau	Pegelmittel
1901-1930	103			187			248	258	199
1931-1960	104			214			278	268	216
1961-1990	131			238			323	306	249
1960er	122	146	185	227	248	267	322	317	229
1970er	128	147	177	226	246	251	312	283	221
1980er	149	168	201	272	280	279	356	343	256
1990er	118	130	159	223	228	226	266	263	202
2000er	124	144	163	212	229	230	284	290	210

3.2 Trends und periodische Schwankungen von Klimavariablen und Abflüssen im Niedrigwasserbereich

3.2.1 Lineare Trends seit 1951

Eine Tendenz zu steigenden Temperaturen zeigt sich in allen betrachteten Einzugsgebieten. Interessanterweise ist der Temperaturanstieg je Jahr in Tschechien mit 0.01 °K/a ($p \leq 0.12$) nur halb so hoch wie der an den deutschen Klimastationen (0.02 °K, $p \leq 0.05$). Die Jahressummen der Niederschläge in den betrachteten deutschen Teileinzugsgebieten südlich von Magdeburg zeigen keinen signifikanten Trend. Im tschechischen Bereich der Elbe gibt es an den drei berücksichtig-

ten Stationen ebenfalls keinen positiven Niederschlagstrend, wenn man das Extremjahr 2002 aus der Betrachtung herauslässt. In Konsistenz damit zeigt der Median (50Q) der Abflüsse am Pegel Dresden seit 1951 keinen signifikanten Trend.

3.2.2 Periodische Schwankungen

Sowohl die mittleren Abflüsse (50Q) als auch die Niedrigwasserabflüsse (NQ, 5Q, 25Q) widerspiegeln die für das Niederschlags- und Abflussregime der Elbe typische 14-Jahres-Periodik. Die in den Abbildungen 6,7,8 und 12 dargestellten laufenden 7-Jahresmittel für Niederschlag (NS) und verschiedene Abflusskenngrößen zeigen ein periodisches Schwingungsverhalten. Besonders regelmäßig verlaufen die Schwankungen im Einzugsgebiet der Saale (Pegel Calbe, Abb. 12).

Die Periode 1973-1986 (grau unterlegt in Abb. 6) beinhaltet einen vollen Schwankungszyklus der Niederschläge und Abflüsse und bildet diesbezüglich durchaus eine repräsentative Grundlage für die Auswahl von trockenen Jahren zur Ableitung von gleichwertigen Wasserständen (GIW). Es stellt sich allerdings die Frage, in wieweit die mittleren Niedrigwasser-Verhältnisse durch diese Periode tatsächlich wiedergespiegelt werden, oder ob sie möglicherweise aus heutiger Sicht eher zu den feuchteren Perioden des Jahrhunderts gehört, wie sich im vorangegangenen Kapitel bereits andeutet. Die für die Ermittlung des GIW89* berücksichtigten trockenen und mittleren Jahre wurden in Abb. 6 dunkelgrau herausgestellt. Obwohl es sich um vergleichsweise trockene Jahre aus der Periode 1973-1986 handelt, zeigt Abb. 6 auch schon, dass in den Folgezeiträumen deutlich häufiger extreme Niedrigwasserjahre aufgetreten sind.

Im Unterschied zu den Niederschlägen weisen die Temperaturen nur eine schwache zyklische Charakteristik auf. Es lassen sich allerdings bei der sehr langen Reihe für den tschechischen Teil des Einzugsgebietes (Abb. 6) teilweise komplementäre Entwicklungen bei Niederschlag und Temperatur erkennen mit extremen Folgen für den Niedrigwasserabfluss. Anfang der 40er-Jahre gingen z.B. ungewöhnlich niedrige Temperaturen mit sehr hohen Niederschlägen einher (Abb. 6) und in deren Folge kam es zu einer Erhöhung des durchschnittlichen Abflussniveaus (Median) aber auch der Abflüsse im Niedrigwasserbereich (NQ, 5Q, 25Q). Ein anschließender Temperaturanstieg über mehrere Jahre vom Ende der 40er-Jahre bis Anfang der 50er-Jahre ging mit einem kontinuierlichen Rückgang der Jahresniederschläge einher, was extrem niedrige Niedrigwasserabflüsse zur Folge hatte.

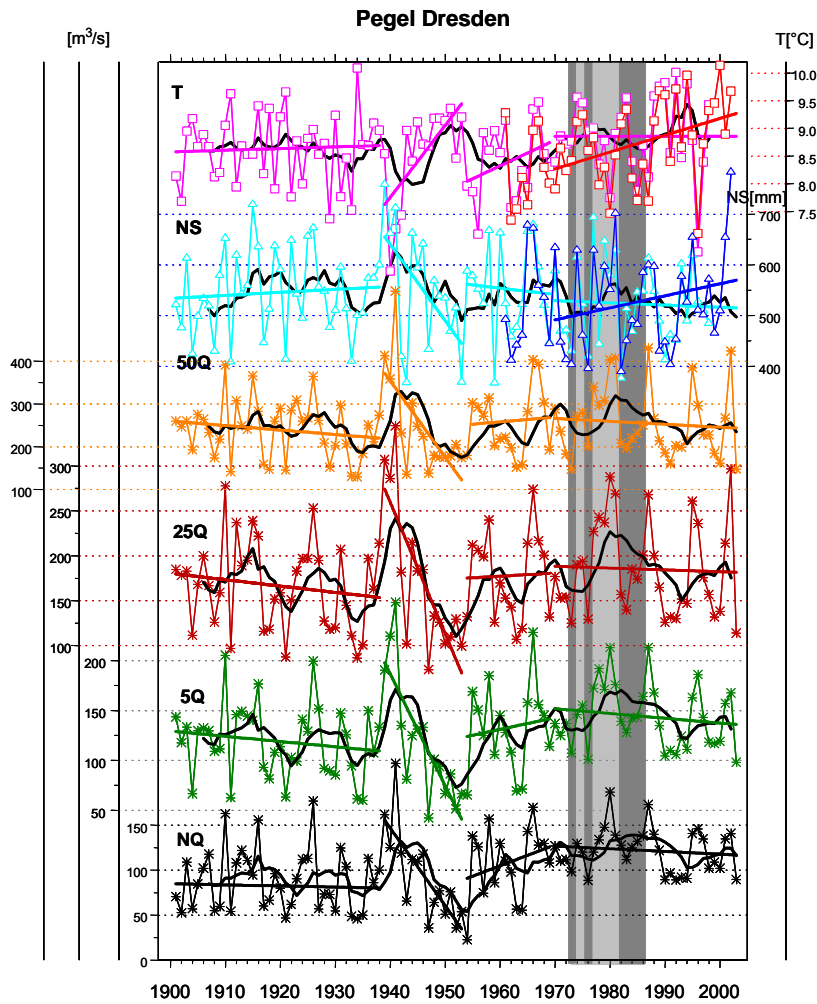


Abb. 6: Klimazeitreihen (T und NS) und Abflüsse (NQ, 5Q, 25Q und 50Q) am Pegel Dresden, gleitende 7-jährige Mittel und mittlere Trendgeraden zu verschiedenen Zeitabschnitten (1901-1938, 1939-1953, 1954-1969 und 1970-2003) für alle Klima- und Abflussreihen. Die Klimazeitreihen basieren auf Mittelwerten der Klimastationen von Tschechien (rot/dunkelblau: 11 Stationen, pink/hellblau: 3 Stationen: Praha Kbely, Tabor, Caslav; vgl. Tab. 1). Die GIW89*-Periode 1973-1986 wurde grau hinterlegt, die einzelnen für die Berechnung des GIW89* aus dieser Periode verwendeten Jahre heben sich davor dunkelgrau ab.

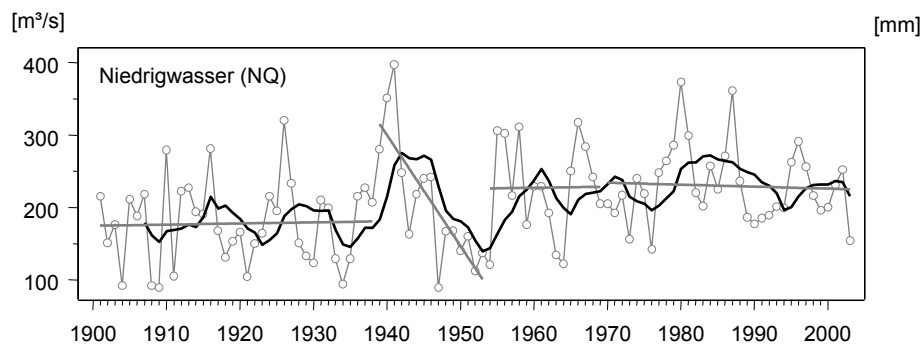


Abb. 7: Jährliche Niedrigwasserabflüsse (NQ) am Pegel Barby, gleitende 7-jährige Mittel und lineare Trendgeraden für verschiedene Zeitabschnitte (1901-1938, 1939-1953, 1954-1969 und 1970-2003).

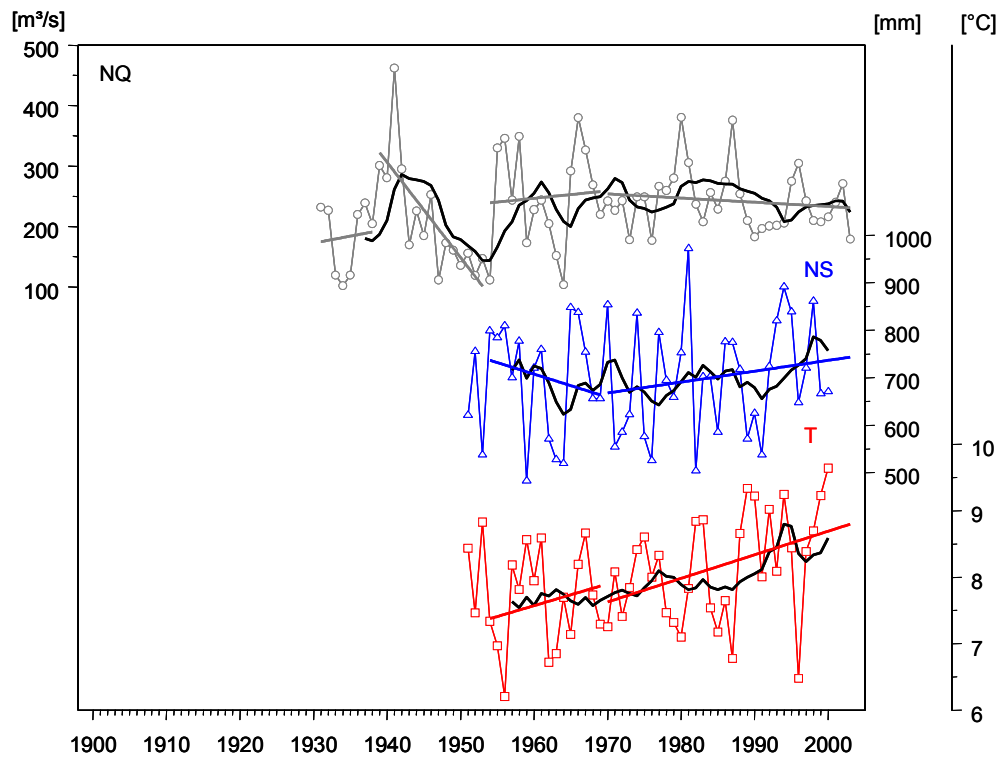


Abb. 8: Jährliche Niedrigwasserabflüsse (NQ) am Pegel Magdeburg analog zu Abb. 7 mit den jährlichen Niederschlagssummen (NS) und den durchschnittlichen Jahrestemperaturen (T) gemittelt über alle Klimastationen aus Teileinzugsgebieten mit Elbemündung südlich Magdeburg ergänzt um die gleitenden 7-Jahresmittel für die dargestellten Größen und linearen Trendgeraden für die Zeitabschnitte bis 1938, 1939-1953, 1954-1969, 1970-2003.

3.3 Anthropogene Änderungen im Abflussregime und extreme Niedrigwasserepisoden

3.3.1 Mittellauf der Elbe

Betrachtet man den langfristigen Trend der NQ-Entwicklung an den Pegeln Dresden und Barby (Abb. 9a, b) und zusätzlich der Niedrigwasserkenngößen NM7Q, NM21Q und NM30Q am Pegel Dresden (Abb. 10) hat man zunächst den Eindruck die Niedrigwasserstände hätten sich kontinuierlich während des letzten Jahrhunderts erhöht. Die Niederschläge zeigen jedoch keinen analogen Trend (Abb. 9a, b) und die Sommerniederschläge haben sich auch nicht überproportional erhöht, sie gingen tendenziell eher zurück.

Aus den Verlaufskurven der jährlichen NQ-Werte an den Elbpegeln Dresden (Abb. 6), Barby (Abb. 7) und Magdeburg (Abb. 8) ist deutlich eine Anhebung des jährlichen NQ-Niveaus während der 50er Jahre zu ersehen. Am Pegel Dresden wird nach einer Phase stetigen Anstiegs zu Beginn der 70er Jahre ein neues stabiles Niveau erreicht, welches sich deutlich von Verhältnissen während der ersten 40 Jahre des 20. Jahrhunderts unterscheidet. An den Pegeln Barby und Magdeburg ist bereits Mitte der 50er Jahre ein sprunghafter Anstieg des MNQ-Niveaus feststellbar. Finke, Krause & Lauschke (2004) datierten die Sprungstelle in den Abflussreihen der Pegel Dresden, Barby und Magdeburg nach entsprechenden Sprungstellentests auf die Jahre 1954/1955. Ursächlich verantwortlich für die Niveauänderung im Niedrigabflussbereich ist die enorme Steigerung des Stauraumes im tschechischen Teil des Einzugsgebietes nach 1954. In den Abbildungen 9c und 9d ist die Entwicklung des Gesamtstauraumes in Tschechien und im gesamten Elbegebiet dargestellt (vgl. Finke *et al.*, 1998). Wenn man nun die langfristige Entwicklung der Abflüsse entsprechend segmentiert in einen Abschnitt vor 1954, dem Beginn des starken Ausbaus in Tschechien, einer Übergangsphase von 1955-1969, in welcher der größte Teil des Ausbaus realisiert wurde und der Periode seit 1970 zeigt sich, dass die in den Abbildungen 9a,b und 10 (helle Linien im Hintergrund) dargestellten langfristigen Niedrigwassertrends auf gar keinen Fall in die Zukunft extrapoliert werden dürfen. Diese Trends sind nicht die Folge kontinuierlicher Änderungen, sondern das Ergebnis eines Stauraumausbaus der auf vergleichsweise wenige Jahre beschränkt war (Abb. 9c,d; Abb. 10). Man kann deshalb keinesfalls davon sprechen, dass die Elbe immer seltener Niedrigwasser führt, wie dies kürzlich im Zusammenhang mit der von Finke *et al.* (2004, 2005) erarbeiteten Studie zu den Niedrigwasserverhältnissen in der Elbe

geschehen ist (vgl. Warnat 2005, BUND 2005). Vielmehr wurde durch den Neubau von Talsperren das Niedrigwasserniveau nachhaltig erhöht. An den Pegeln Dresden und Barby kam es zu einer signifikanten Anhebung des MNQ ($p \leq 0.01$) und zu einer Verminderung der Varianz (signifikant nur für Dresden, $p \leq 0.05$), wenn man die Perioden 1901-1938 und 1970-2003 miteinander vergleicht (Tab. 4). Neben dem MNQ stiegen auch die Werte für den 5Q, 25Q und 50Q an beiden Pegeln, wobei die Effekte erwartungsgemäß vom MNQ bis zum 50Q (Median) absolut und relativ abnehmen. Es ist erstaunlich, dass die absoluten Differenzen zwischen den Periodenmitteln von NQ, 5Q, 25Q und Median in Barby ca. $21 \text{ m}^3/\text{s}$ höher sind als in Dresden. Die zusätzlichen Wassermengen von durchschnittlich $662 \text{ Mio m}^3/\text{a}$ können teilweise auf den während der 50-er Jahre stark ausgeweiteten Braunkohletagebau in der DDR zurückgeführt werden. Die Periodenmittel der Braunkohleförderung aus dem mitteldeutschen Revier (vgl. www.braunkohle.de) liegen bei 43 Mio t (1901-1938, interpoliert) und 75 Mio t (1970-2003). Bei einem Kohle: Wasser-Förderverhältnis von 1:5 ergibt sich daraus eine mittlere Wassermengendifferenz von $160 \text{ Mio m}^3/\text{a}$. Dies entspräche einer mittleren Pegeldifferenz von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ und würde demnach allerdings nur ca. $\frac{1}{4}$ der ‚Wasservermehrung‘ zwischen Dresden und Barby erklären. Wenn man eine Abnahme des Kohle : Wasserverhältnisses auf 1:7 für die zweite Periode annimmt, steigt die Pegeldifferenz auf $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Stellt man diese Unsicherheit in Rechnung, bleiben $11-16 \text{ m}^3/\text{s}$ Differenz zu $21 \text{ m}^3/\text{s}$ für die andere Ursachen zu finden wären. Neben anthropogenen Ursachen, wäre hierbei auch noch mal die Möglichkeit divergierender Niederschlags-trends zwischen Ober- und Mittellauf der Elbe zu testen. Eine endgültige Klärung muss künftigen Untersuchungen z.B. im Rahmen von GLOWA-Elbe vorbehalten werden.

Interessanterweise fällt die Abflussentwicklung im Bereich der mittleren Elbe mit einer erheblichen Intensivierung der Tiefenerosion zwischen den Flusskilometern 120 bis 220 zusammen (Faulhaber 1998). Die Tiefenerosion hatte zur Folge, dass sich das Verhältnis von Wasserdurchfluss zu Pegelstand aufweitete. Am Pegel Barby (Abb. 11) führte diese Entwicklung seit Beginn der 70er Jahre trotz stark erhöhter Durchflussmengen zu sinkenden Pegelständen. Ein ähnliches Bild zeigt sich für den Pegel Magdeburg (nicht dargestellt). Da sich die Flusssohle vertieft, führt dies nicht in gleichem Masse zu einem Verlust an Abladetiefe. Wenn die Vertiefung jedoch nicht gleichmäßig geschieht - und damit ist zu rechnen – hat dies einen höheren Erhaltungsaufwand für den Schifffahrtsweg zur Folge.

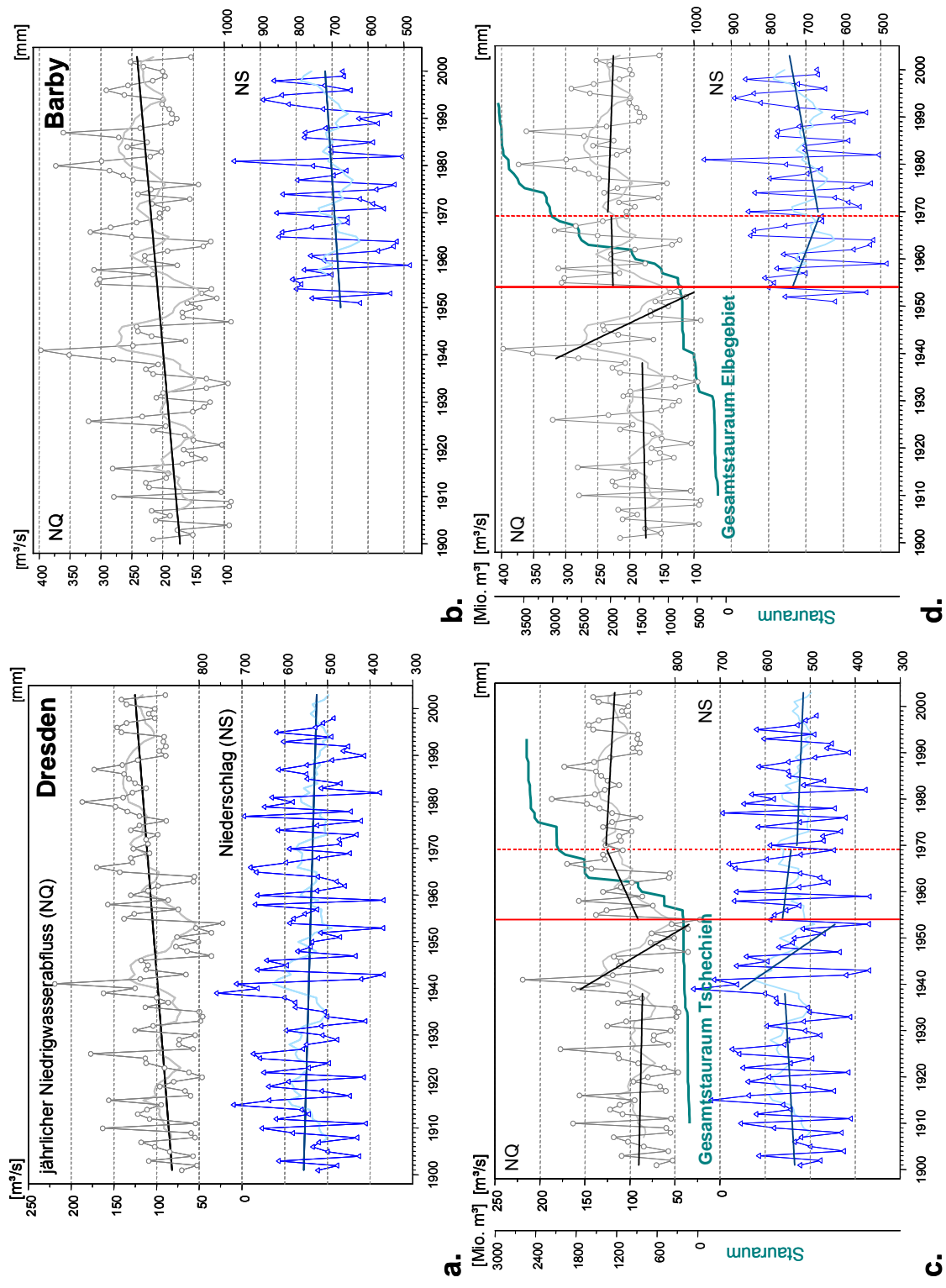


Abb. 9 a, b, c, d: Verschiedene Betrachtungsweisen der langfristigen Änderungen bei den Niedrigwasserverhältnissen (schwarze Linien) an den Pegeln Dresden (a,c) und Barby (b, d). Oben sind die langfristigen linearen Trends ohne, unten mit abschnittsweiser Segmentierung, dargestellt. Die Segmentierung unten unterscheidet vier Phasen analog zu Abb. 6. Im Vergleich zu den Niedrigwasserabflüssen (schwarze Linien) sind darunter die Jahresniederschlagssummen (NS) abgetragen. In den unteren Grafiken ist zudem der zeitliche Verlauf des verfügbaren Speicherraums (hellblaue Linien) an der Elbe dargestellt.

Tab. 4: Niveauunterschiede von Mittelwert \bar{x} und Standardabweichung s verschiedener Abflusskennzahlen (NQ, Q5, Q25 und Median) zwischen den Perioden 1901-1938 und 1970-2003 an den Pegeln Dresden und Barby. Die letzte Spalte gibt die prozentuale Änderung im Vergleich der zweiten zur ersten Periode an. Die Symbole NS/ * / ** / *** entsprechen den Signifikanzniveaus nicht signifikant / $p \leq 0.1$ / $p \leq 0.05$ / $p \leq 0.01$ für $Pr>F$, $Pr>|t|$ zu den Teststatistiken F-Test und t-Test. Tabelle A1 im Anhang enthält weitergehende Prüfungen auf Normalverteilung und Robustheit unter Nutzung nichtparametrischer Verfahren.

Dresden	$\bar{x} (\pm s)$ [m³/s] 1901-1938	$\bar{x} (\pm s)$ [m³/s] 1970-2003	Varianz- unterschied	\bar{x} Differenz [m³/s]	\bar{x} rel. Zunahme [%]
NQ	88.2 (± 34)	121.8 (± 24)	**	33.6***	38.1
Q 5	119.2 (± 36)	143.9 (± 31)	NS	24.7**	20.7
Q 25	166.6 (± 48)	185.0 (± 52)	NS	18.3*	11.0
Median	239.7 (± 66)	254.9 (± 81)	NS	15.2	6.4

Barby	$\bar{x} (\pm s)$ [m³/s] 1901-1938	$\bar{x} (\pm s)$ [m³/s] 1970-2003	Varianz- unterschied	\bar{x} Diffrenz [m³/s]	\bar{x} rel. Zunahme [%]
NQ	177.6 (± 96)	229.6 (± 52)	NS	52.1***	29.3
Q 5	209.1 (± 60)	256.7 (± 60)	NS	47.6***	22.8
Q 25	285.4 (± 79)	323.7 (± 94)	NS	38.3**	13.4
Median	408.3 (± 103)	444.0 (± 138)	*	35.7	8.7

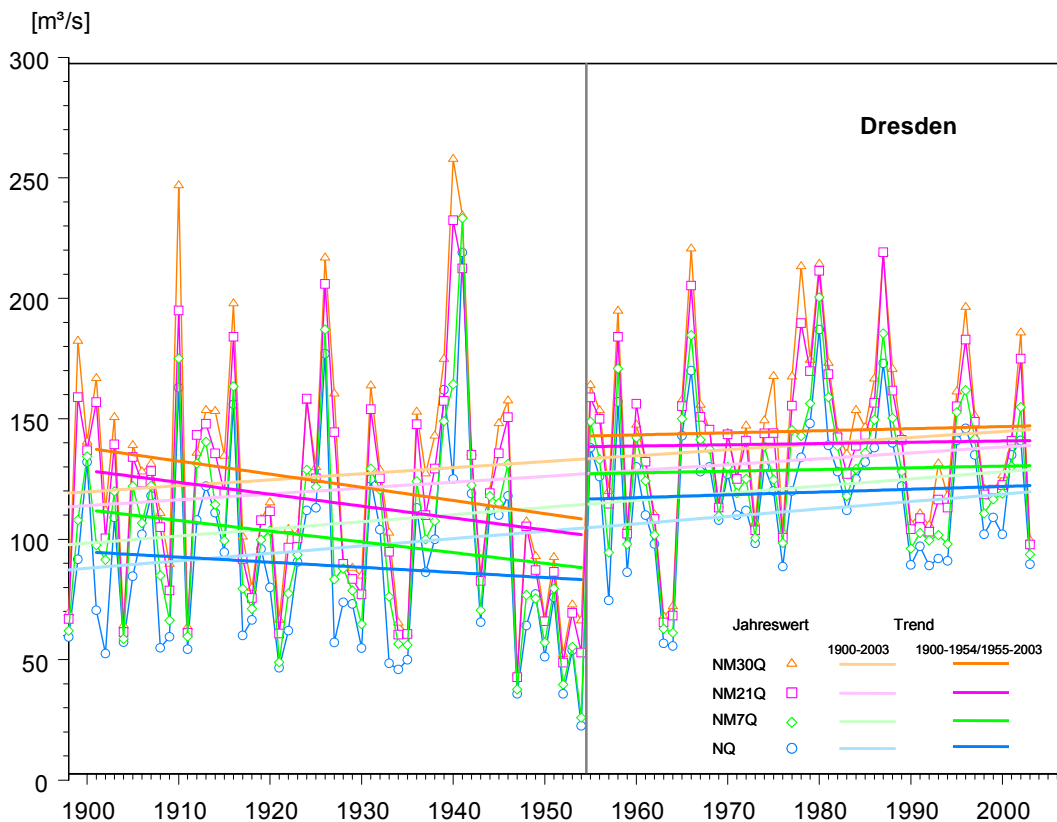


Abb. 10: Langfristige Änderung der Niedrigwasser-Kenngrößen NQ, NM7Q, NM21Q und NM30Q am Pegel Dresden ohne Trendsegmentierung (hellere Linien im Hintergrund) und bei Segmentierung der Gesamtperioden in die Teilperioden 1900-1954 und 1955-2003

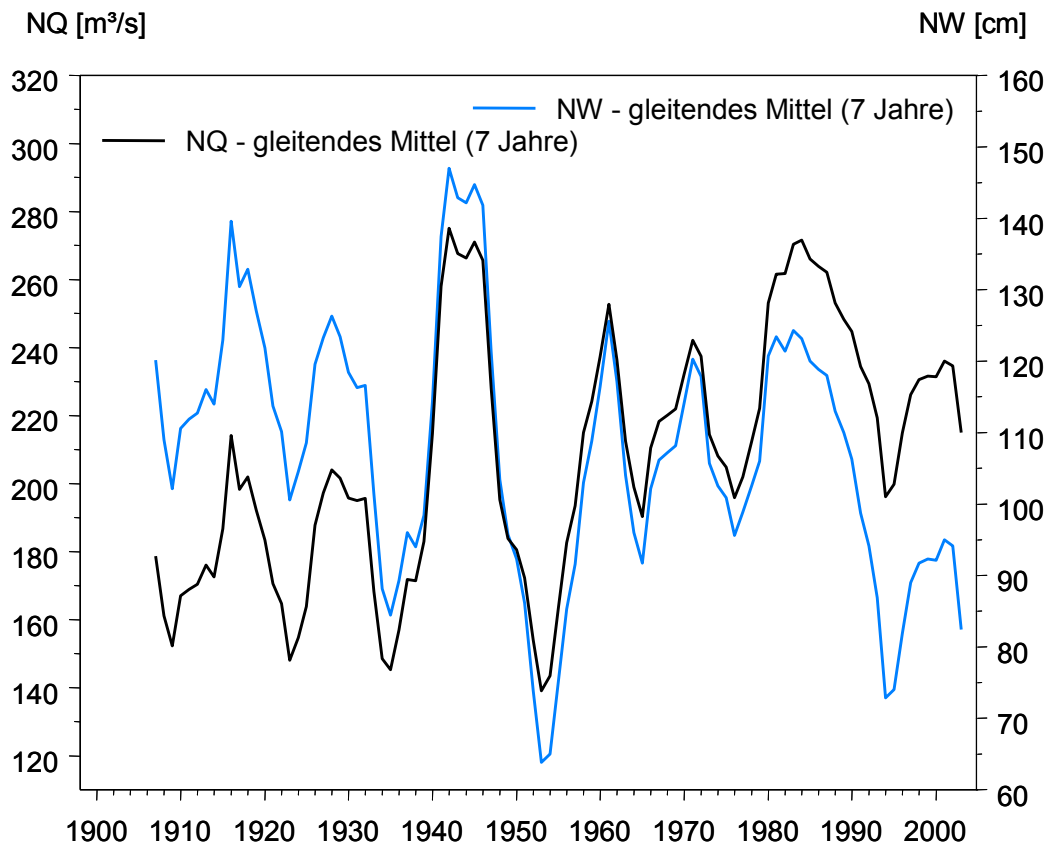


Abb. 11: Gleitendes 7-Jahresmittel der jährlichen Niedrigwassermengen (NQ) und Niedrigwasserstände (NW) am Pegel Barby seit 1900

3.3.2 Saale

Die Abflusskurve der Saale am Pegel Calbe (Abb. 12) vor der Mündung in die Elbe zeigt deutliche Auswirkungen von Änderungen im Bewirtschaftungsregime. Hier treten sie im Zusammenhang mit den politischen Umbrüchen in Ostdeutschland unmittelbar nach 1989 auf. Bis 1989 steigen die Niedrigwasserabflüsse und der Median stetig an. Dabei handelt es sich jedoch nicht um gezielte Niedrigwasserauffüllungen, da die Trendkurven von NQ, 5Q, 25Q und Median weitgehend analoge Anstiege (0.57-0.65 mm/a) aufweisen. Nach dem Jahr 1989 brach der Trend steigender Pegelstände am Pegel Calbe ab. Seit 1989 stagnieren die Niedrigwassermengen auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau obwohl die Niederschläge tendenziell anstiegen. Gegenüber den Trendwerten des Jahres 1989 gingen die Werte für NQ, 5Q, 25Q und 50Q um ca. 20 m³/s zurück. Systematische Änderungen in der Wasserbewirtschaftung u.a. im Zusammenhang mit dem Rückgang der Braunkohleförderung und der Flutung der Tagebaurestlöcher kommen als Ursache in Frage. Hierzu sind weiterführende, klärende Untersuchungen notwendig.

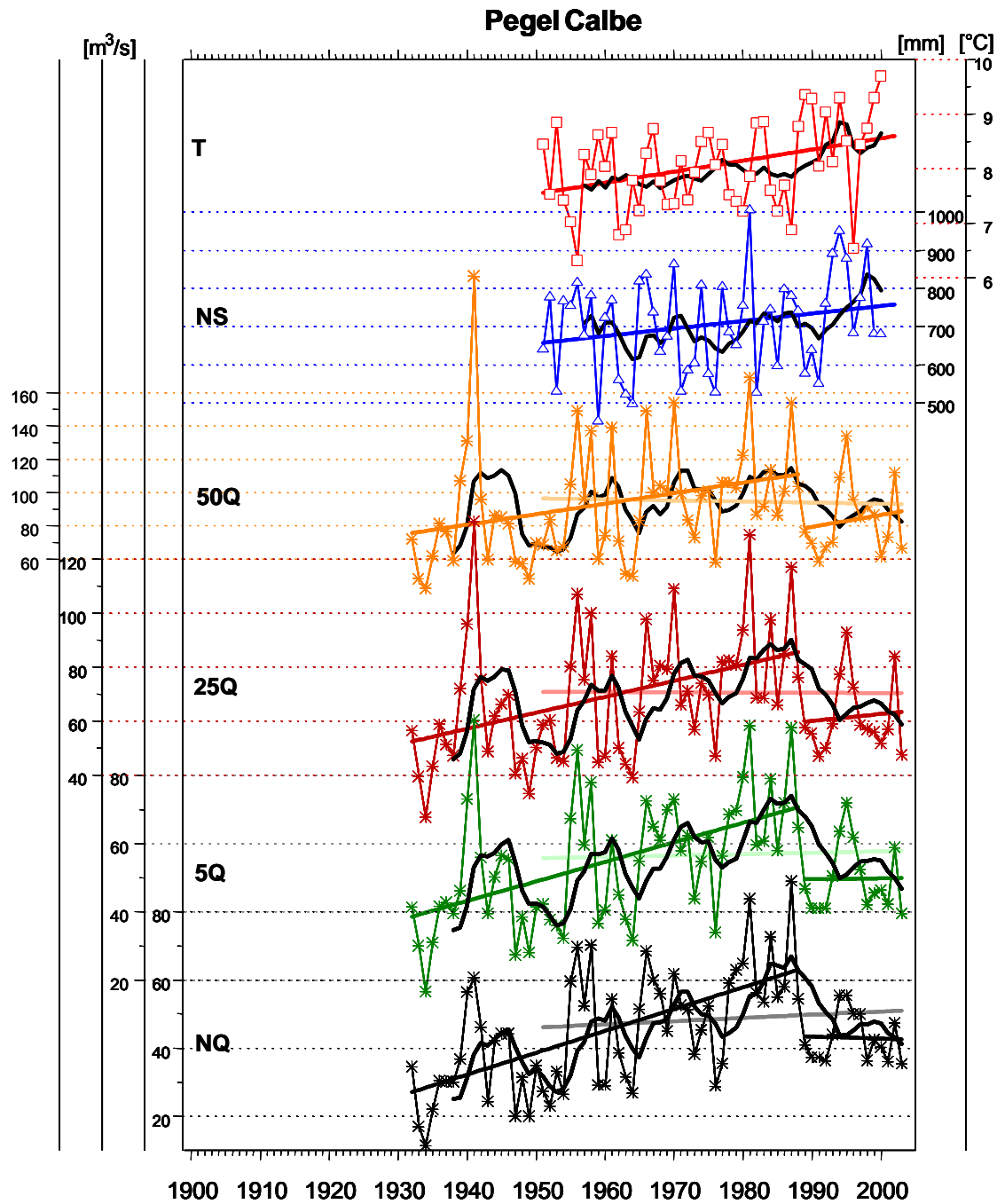
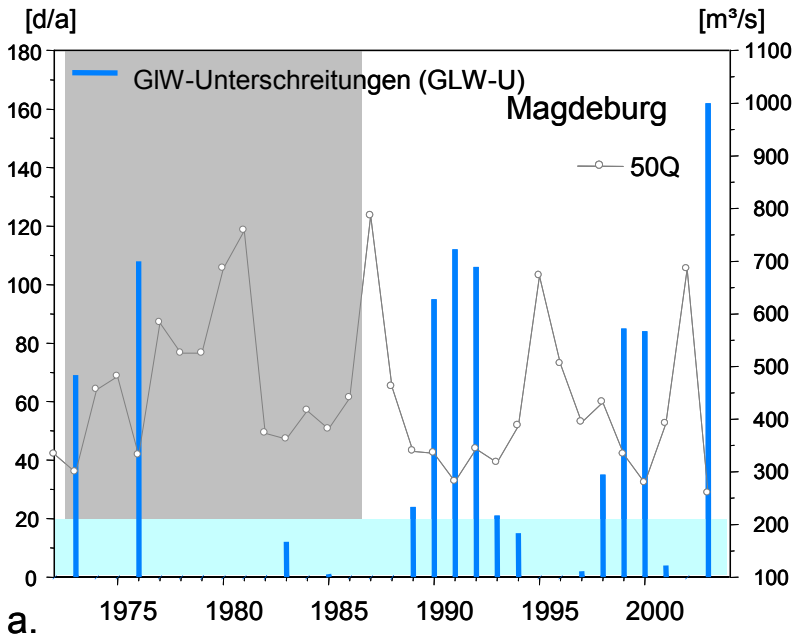


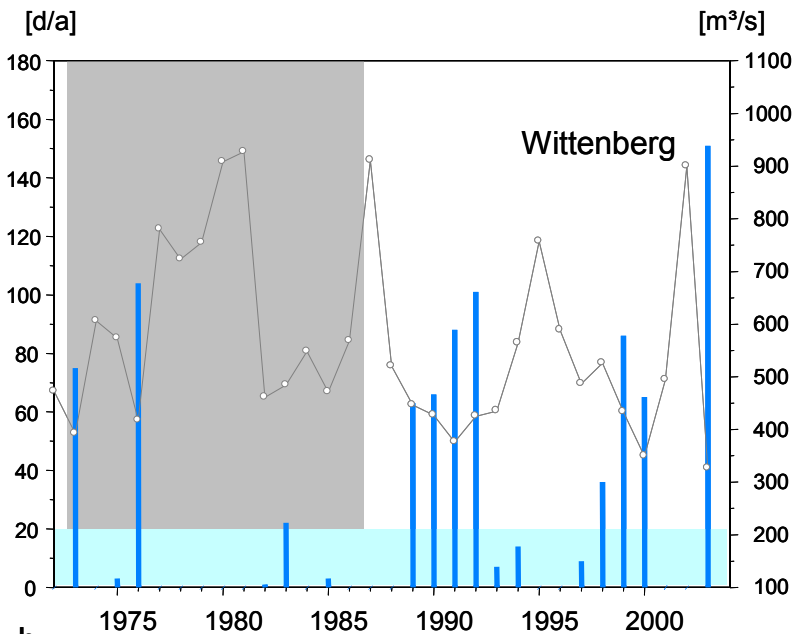
Abb. 12: Klimazeitreihen (T und NS) und Abflüsse (NQ, 5Q, 25Q und 50Q) am Pegel Calbe, gleitende 7-jährige Mittel und mittlere Trendsgeraden zu verschiedenen Zeitabschnitten (1932-1988, 1989-2003 und 1951-2003). Die Klimazeitreihen basieren auf Mittelwerten der Klimastationen aus dem Saale-Einzugsgebiet (vgl. Tabelle 1)

3.4 Zeitliche Repräsentanz der GIW89*(20d) Periode

Die Abbildungen 13a,b illustrieren exemplarisch für die Pegel Magdeburg (Abb. 13a) und Wittenberg (Abb. 13b) die erhebliche Zunahme der Unterschreitungshäufigkeiten des GIW89* im Mittellauf der Elbe seit Beginn der 90er Jahre. Unter Berücksichtigung der in 3.3. beschriebenen zwei Abflussregimes ist es möglich diese Entwicklung zeitlich einzuordnen.



a.



b.

Abb. 13 a, b Jährliche Unterschreitungshäufigkeit des GIW89* an den Pegeln Magdeburg (a) und Wittenberg (b) seit 1970. Hellblau unterlegt ist der Toleranzbereich (20 Tage) an denen der GIW89* unterschritten werden darf (Eisbedingungen nicht berücksichtigt) und grau die Zeitperiode, die für die Berechnung des GIW89* herangezogen wurde.

In Abb. 14a und b ist die Veränderung der Unterschreitungshäufigkeit des GIW89* seit Beginn des Jahrhunderts an den Pegeln Dresden (Abb. 14a) und Neu Darchau (Abb. 14b) dargestellt. Sie ist trendbehaftet, da auf Grund des niedrigen MNQ in der ersten Hälfte des Jahrhunderts, der GIW89* analoge Abfluss häufiger unterschritten wird als in der zweiten Hälfte. Vergleicht man die Mittelwerte und Varianzen der Unterschreitungshäufigkeiten für die Perioden 1901-1954 und 1955-2003 stellt man einen signifikanten Rückgang sowohl der Mittelwerte ($p \leq 0.01$) als auch der Varianzen ($p \leq 0.01$) fest. Obwohl es sich nicht um normalverteilte Größen handelt (Anhang, Tabelle A2), wird dieses Ergebnis bei der Anwendung nichtparametrischer Verfahren bestätigt.

Durch Bezug der Unterschreitungshäufigkeiten auf separate MNQ für die beiden Perioden (1901-1954, 1955-2003), kann dieser Trendeinfluss herausgerechnet werden. Das Ergebnis ist in den Abb. 14c und 14d dargestellt. Die Varianz- und Mittelwertunterschiede bzw. die Verteilungs- und Niveauunterschiede zwischen den Perioden 1901-1954 und 1955-2003 sind nicht mehr signifikant. Die Unterschreitungshäufigkeiten beider Perioden sind damit vergleichbar. Ein oberflächlicher Blick auf die Abbildungen 14c und 14d verdeutlicht, dass die GIW89*-Periode gemessen an den Unterschreitungshäufigkeiten zu den feuchtesten des vergangenen Jahrhunderts zählt. Die Unterschreitungshäufigkeiten folgten mit Ausnahme der 70er und 80er Jahre einem Muster mit sich regelmäßig wiederholenden größeren Unterschreitungshäufigkeiten. Die Wiederholungsspanne liegt zwischen 3 und 14 Jahren, wobei die längste Wiederholungsspanne (1976-1990) zu großen Teilen in den GIW89*-Bereich fällt. Im Mittel der letzten 100 Jahre wird der periodenspezifische MNQ alle 2.6 Jahre um 20 Tage unterschritten. Die mittlere Unterschreitungsdauer beträgt in jedem dritten Jahr mindestens 27 Tage. Alle fünf Jahre beträgt sie mindestens 63 Tage.

Wenn man die Unterschreitungshäufigkeiten der 7 trockensten Jahre innerhalb fortlaufender 14-Jahres-Perioden summiert und gruppiert, zeigt sich, dass die GIW89*-Periode auf Rang 9 von 90 verglichenen 14-Jahres-Periode liegt (Tab. 5). Sie gehört damit zu einer der feuchtesten Perioden, die es in den letzten 100 Jahren gegeben hat. Der Unterschreitungswert, der in 50% aller 14-Jahresperioden erreicht wird, liegt bei 399. Die höchste Auftrittswahrscheinlichkeit (20%) bei der Unterteilung der gesamten Spanne von Unterschreitungshäufigkeiten (154-705) in 10 gleichgroße Klassen besitzt die Klasse 399-460. Von den Perioden der jüngsten Vergangenheit entstammt allein der Zeitabschnitt 1986-1999 diesem Bereich. Der Unterschreitungswert beträgt 450 für diesen Zeitabschnitt.

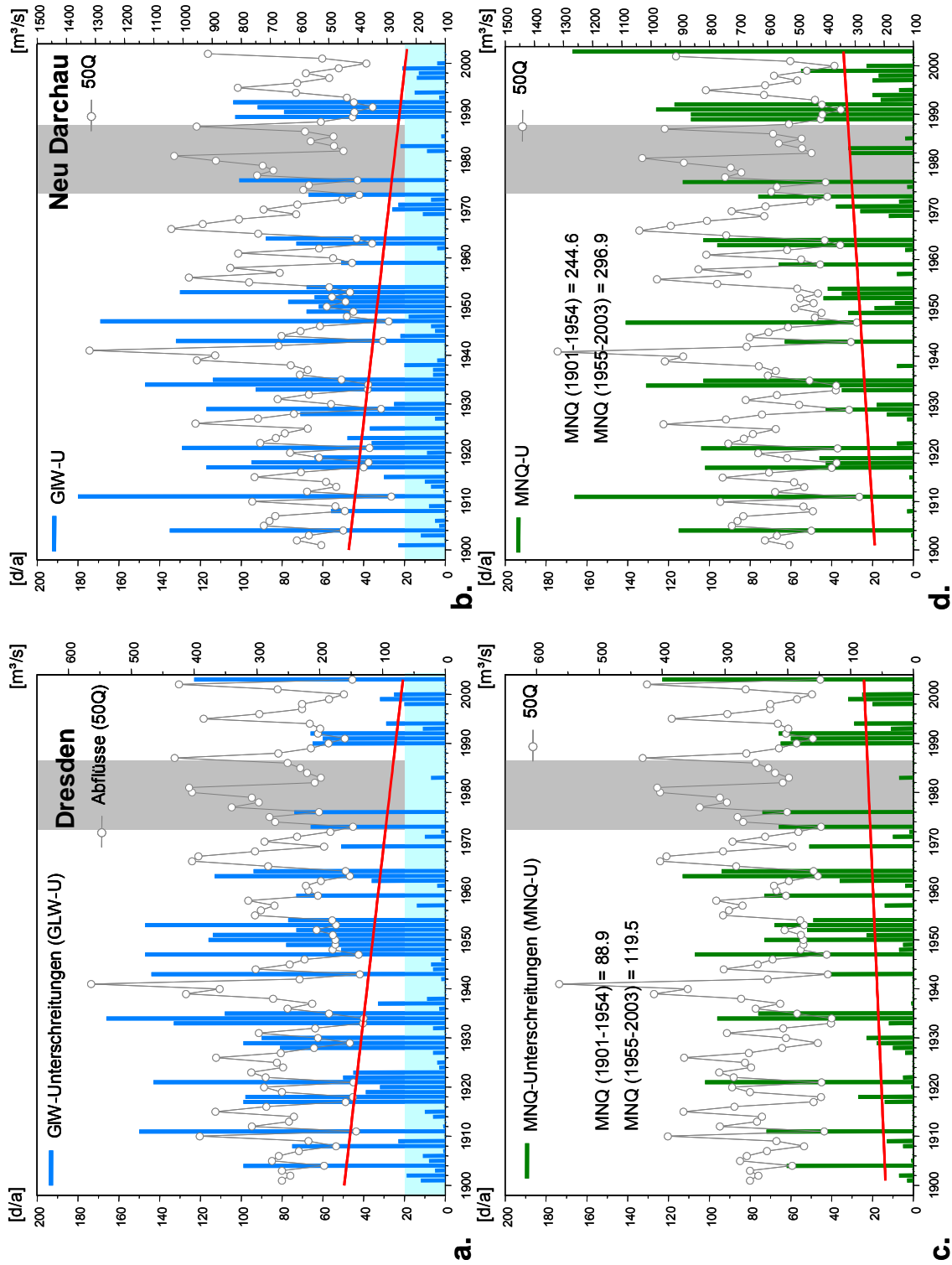


Abb. 14 a, b, c, d: Jährliche Abfluss-Unterschreithäufigkeiten (a, b) des GIW89* und des MNQ (c, d) an den Pegeln Dresden (a, c) und Neu Darchau (b, d) seit 1900. Hellblau unterlegt ist der Toleranzbereich (20 Tage) an denen der GIW89* unterschritten werden darf (Eisbedingungen nicht berücksichtigt) und grau die Zeitperiode, die für die Berechnung des GIW89* herangezogen wurde. Die MNQ wurden entsprechend der unterschiedlichen Abflussregime in der Elbe separat für die Perioden 1901-1954 und 1955-2003 kalkuliert

Tab. 5: Pegel Barby - Unterschreitungen der Trend bereinigten MNQs (vgl. Abb. 14c, d) innerhalb aller im Zeitraum 1901-2003 vorkommenden 14-Jahres-Perioden, unterteilt in gleichhäufige Perioden (25%): Feucht: 0-25% Perzentil, Mittel-feucht: >25-50%, Mittel-trocken: >50-75% und Trocken: >75%. Berücksichtigt wurden nur die 7 trockensten Jahre der 14-Jahres-Periode. Die GIW89*-Periode ist hellgrau unterlegt. Die repräsentativere Periode 1986-1999 ist einen Grauton dunkler markiert.

Feuchte Perioden				Mittel-feuchte und mittel-trockene Perioden				Trockene Perioden			
Rang	Beginn der Periode	Ende der Periode	Anzahl der MNQ-Unterschreitungen	Rang	Beginn der Periode	Ende der Periode	Anzahl der MNQ-Unterschreitungen	Rang	Beginn der Periode	Ende der Periode	Anzahl der MNQ-Unterschreitung
					Mittel-feucht						
1	1974	1987	154					68	1923	1936	473
2	1975	1988	154	24	1931	1944	332	69	1922	1935	487
3	1977	1990	167	25	1932	1945	332	70	1987	2000	505
4	1936	1949	181	26	1933	1946	332	71	1988	2001	505
5	1976	1989	206	27	1970	1983	340	72	1989	2002	505
6	1937	1950	218	28	1979	1992	349	73	1946	1959	508
7	1938	1951	248	29	1915	1928	352	74	1947	1960	508
8	1935	1948	250	30	1930	1943	358	75	1921	1934	514
9	1973	1986	260	31	1984	1997	359	76	1964	1977	520
10	1978	1991	261	32	1919	1932	360	77	1954	1967	521
11	1972	1985	263	33	1980	1993	362	78	1956	1969	526
12	1905	1918	269	34	1985	1998	368	79	1957	1970	546
13	1912	1925	290	35	1983	1996	373	80	1958	1971	597
14	1913	1926	290	36	1981	1994	375	81	1959	1972	598
15	1914	1927	290	37	1982	1995	375	82	1950	1963	605
16	1903	1916	293	38	1934	1947	376	83	1960	1973	619
17	1939	1952	305	39	1965	1978	383	84	1961	1974	619
18	1906	1919	309	40	1966	1979	383	85	1962	1975	623
19	1901	1914	318	41	1967	1980	383	86	1990	2003	625
20	1902	1915	318	42	1968	1981	383	87	1953	1966	631
21	1907	1920	320	43	1929	1942	384	88	1963	1976	677
22	1971	1984	320	44	1969	1982	385	89	1952	1965	688
23	1904	1917	324	45	1920	1933	391	90	1951	1964	705
					Mittel-trocken						
				46	1918	1931	405				
				47	1940	1953	409				
				48	1948	1961	409				
				49	1916	1929	415				
				50	1944	1957	426				
				51	1945	1958	426				
				52	1909	1922	428				
				53	1908	1921	437				
				54	1910	1923	437				
				55	1911	1924	437				
				56	1917	1930	441				
				57	1941	1954	442				
				58	1942	1955	442				
				59	1943	1956	442				
				60	1924	1937	446				
				61	1925	1938	446				
				62	1926	1939	446				
				63	1927	1940	446				
				64	1928	1941	446				
				65	1986	1999	450				
				66	1955	1968	467				
				67	1949	1962	469				

3.5 Zeitliche Repräsentanz der Periode 1971-2000

Die Periode 1971-2000, die den Kosten-Nutzen Betrachtungen zum Saale-Seitenkanal zu Grunde liegt, ist zunächst klimatisch deutlich repräsentativer für die Niedrigwasserverhältnisse der letzten 100 Jahre als die GLW89*-Periode. Dies verdeutlicht eine zu der im vorangegangenen Abschnitt analoge Betrachtung für 30-Jahresperioden (vgl. Abb. 15).

Die Unterschreitungshäufigkeit des MNQ (bezogen auf 1901-1954 bzw. 1955-2003) die in 50% aller 30-Jahresperioden unterschritten wird, beträgt 882. Die häufigste Unterschreitungs-kategorie (20%) umfasst den Bereich von 872-940 MNQ-Unterschreitungen in 30 Jahren. Die Periode 1971-2000 liegt mit 862 Unterschreitungen in der zweithäufigsten und zugleich nächst feuchteren Klasse. Eine klimatisch repräsentativere Alternative aus der jüngsten Vergangenheit bietet nur die 30-Jahre Periode 1974-2003 mit einer summarischen Unterschreitungshäufigkeit von 874. Bei der Abschätzung des Niedrigwasserrisikos sollte zusätzlich berücksichtigt werden, dass seit 1989 systematische Bewirtschaftungsänderungen erfolgten, in deren Folge die Niedrigwasserverhältnisse nicht mehr in dem Maße wie in der Vergangenheit stabilisiert werden. So dürfte der Braunkohlebergbau in den folgenden 30 Jahren im Vergleich zur Periode 1971-2000 im mittleren Niveau erheblich niedriger ausfallen. Diese und andere Bewirtschaftungsänderungen hätten zur Folge, dass die Niedrigwassermengen, die bei Bezug auf die Periode 1971-2000 an 345 Tagen im Jahr überschritten werden, noch einmal zu reduzieren wären. Allein am Pegel Calbe gab es einen Rückgang beim jährlichen NQ nach 1989 um ca. 20 m³/s (vgl. 3.3.2.). Am Pegel Barby entspricht dies gegenwärtig etwa einer Wasserstandsreduktion um 10 cm (Abb. 11). Um diese sollten die Wasserstände der Periode 1971-2000 mindestens vermindert werden, wenn die künftige Schifffahrtsfähigkeit der Mittleren Elbe kalkuliert wird.

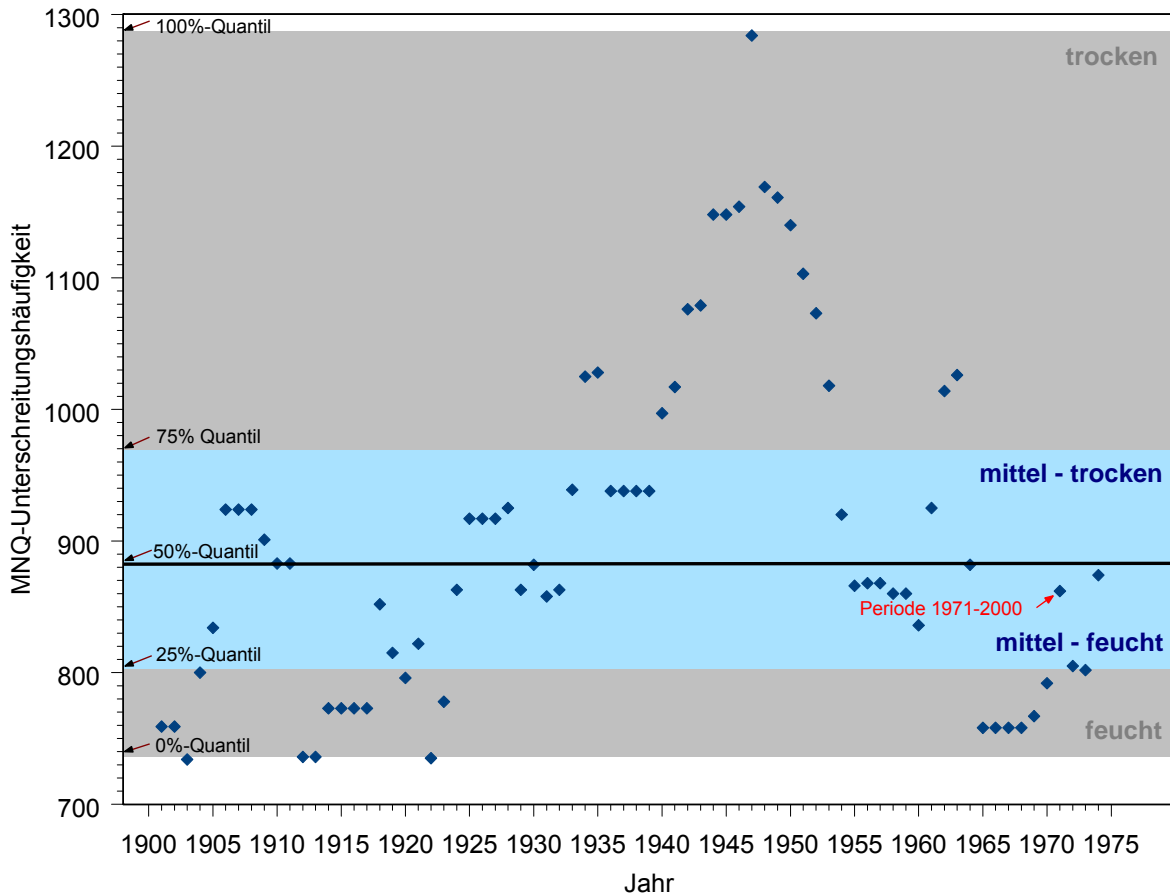


Abb.15: Summen der MNQ-Unterschreitungen am Pegel Barby in laufenden 30-Jahres-Perioden für den Zeitraum 1901-2003 abgetragen über dem jeweils ersten Jahr der 30-Jahresperiode. Die Perzentilbereiche 0-25, >25-50, >50-75 und >75-100 sind farblich hinterlegt und als feucht, mittel-feucht, mittel-trocken und trocken bezeichnet.

3.6 Dauerlinien, Jährlichkeiten und Nutzen-Kosten Relationen

Im Planco-Gutachten wird im Zusammenhang mit dem effektiven Gewinn an Schifffahrtstagen durch den Saale-Seitenkanal auf die Summenhäufigkeit verschiedener täglicher Elbe-Wasserstände (bzw. -Abflüsse) in der Periode 1971-2000 Bezug genommen, wobei die Summenhäufigkeit in Tagesanteilen eines Jahres ausgedrückt wird (Planco 2004 S. 7). In Abbildung 16 ist die Summenhäufigkeit des Abflusses am Pegel Barby für verschiedene Perioden u.a. auch für den Zeitabschnitt 1971-2000 exemplarisch dargestellt.

Von zentraler Bedeutung für die Schifffahrt ist dabei der Wasserstand bzw. Abfluss, der an 345 Tagen eines mittleren Jahres nicht unterschritten wird (Markierungspfeile in Abb. 16). In diesem Zusammenhang sei auf eine oben schon angedeutete Wechselhaftigkeit der Elbe hingewiesen,

die bei der statistischen Abschätzung der Schifffahrttauglichkeit der Elbe zu berücksichtigen ist. Die Tage mit gesicherten Mindestabflüssen, die aus Dauerlinien analog zu Abb. 16 ablesbar sind, werden nur im Mittel über einer längeren Zeitspanne erreicht. Am Elbe-Pegel Barby wurden in den letzten 100 Jahren die von der Schifffahrt tolerierbaren Niedrigwasserstände alle 1.8 Jahre an keinem einzigen Tag unterschritten. Alle drei Jahre wurde diese Grenze jedoch um 8 Tage, alle 4 Jahre um 37 Tage und alle 5 Jahre um 63 Tage unterschritten. Es liegt die Vermutung nahe, dass die theoretisch denkbaren Zusatz-Gewinne aus möglichen Extrafahrten in einem Jahr deutlich schwieriger zu realisieren sind als die ungeplanten Kosten durch Ausfälle in einem anderen Jahr. Letztlich führt diese Wechselhaftigkeit der Elbe wahrscheinlich noch einmal zu einer zusätzlichen Kostenbelastung. Um dem Rechnung zu tragen, sollte bei Kosten-Nutzen Betrachtungen auch die Jährlichkeit von ungünstigen Niedrigwasserperioden als zusätzlicher Kostenfaktor berücksichtigt werden. In den bisherigen Betrachtungen zu den Kosten-Nutzen Relationen des Saa-le-Seitenkanals ist dies nach den vorliegenden Materialien (Planco 2004) bisher nicht geschehen. Zur Ableitung dieser Jährlichkeiten kann auf die homogenisierten Reihen der MNQ-Unterschreitung für den Zeitraum 1901-2003 zurückgegriffen werden. Wenn man sich auf die Jahre 1971-2000 beschränkt, ergeben sich die folgenden Jährlichkeiten:

Alle 1.8 Jahre werden die tolerierbaren Niedrigwasserstände an keinem einzigen Tag unterschritten. Dies entspricht der hundertjährigen Reihe. Alle 3, 4 bzw. 5 Jahre, wird der tolerierbare Niedrigwasserstand um 14, 71 bzw. 88 Tage unterschritten. Im Unterschied zur 100-jährigen Reihe wird die Jährlichkeit geringer Unterschreitungen des MNQ überschätzt, und die von starken Überschreitungen unterschätzt. Als Näherung der langfristigen Verhältnisse kann die Reihe 1971-2000 jedoch zur Ableitung von Niedrigwasserjährlichkeiten durchaus verwendet werden.

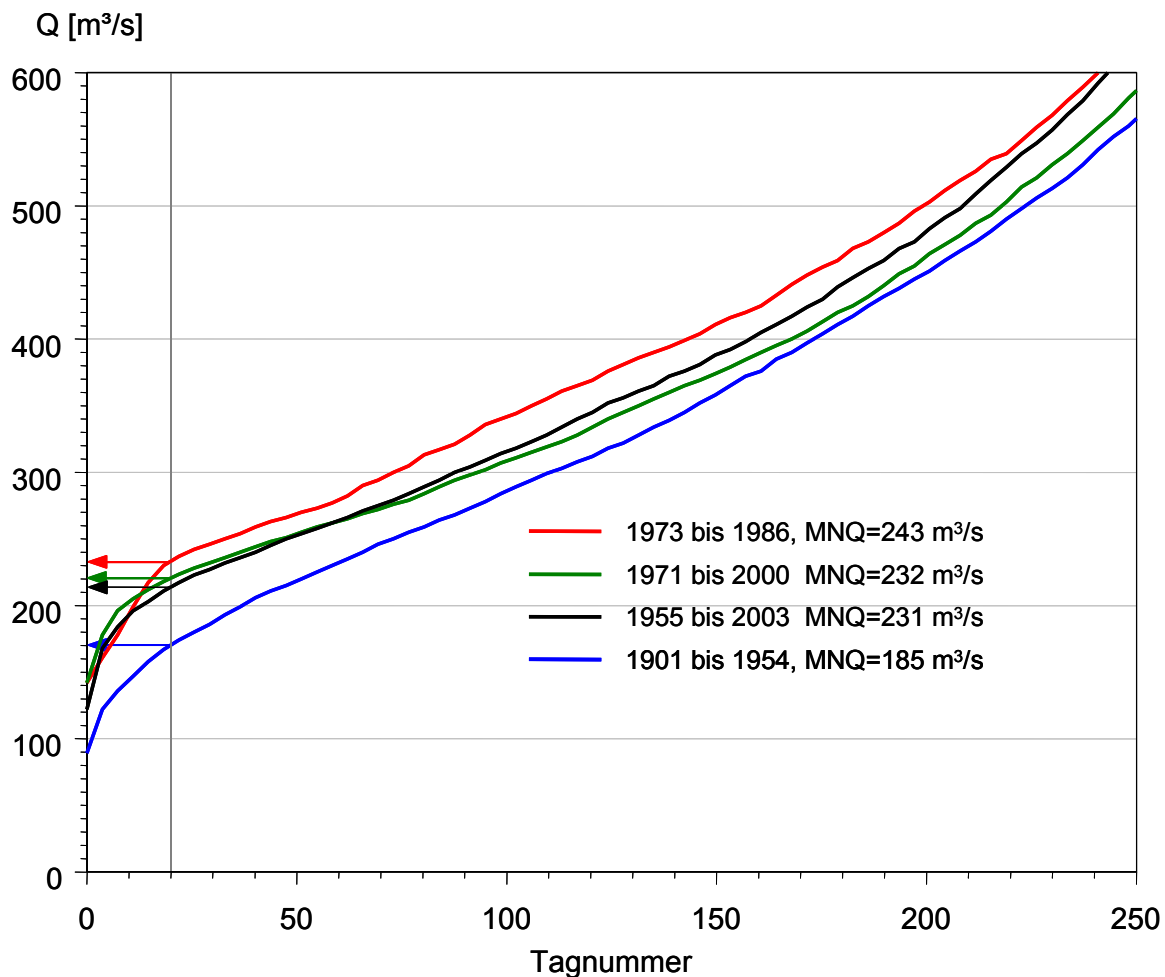


Abb. 16: Pegel Barby, Dauerlinien der mittleren Abflüsse in verschiedenen Zeitperioden sowie die zu den einzelnen Perioden gehörenden MNQ in m^3/s . Die an 345 Tagen eines Jahres nicht unterschrittenen Mindestabflüsse in der jeweiligen Periode sind mit einem Pfeil gekennzeichnet. Zusätzlich wurden zur Orientierung die ca. $15 \text{ m}^3/\text{s}$ größeren MNQ-Werte angegeben

3.7 Klimafaktoren für eine weitere Zunahme der Niedrigwasserhäufigkeit

In den Niedrigwasserabflüssen der letzten 10-15 Jahre deutet sich eine Annäherung an die Verhältnisse während der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts an. Zu den erweiternden Änderungen der klimatischen Verhältnisse, die in diesem Zusammenhang von Interesse sind, zählen die Entwicklung der klimatischen Wasserbilanz und die Häufigkeit niederschlagsfreier Episoden im Gesamtgebiet.

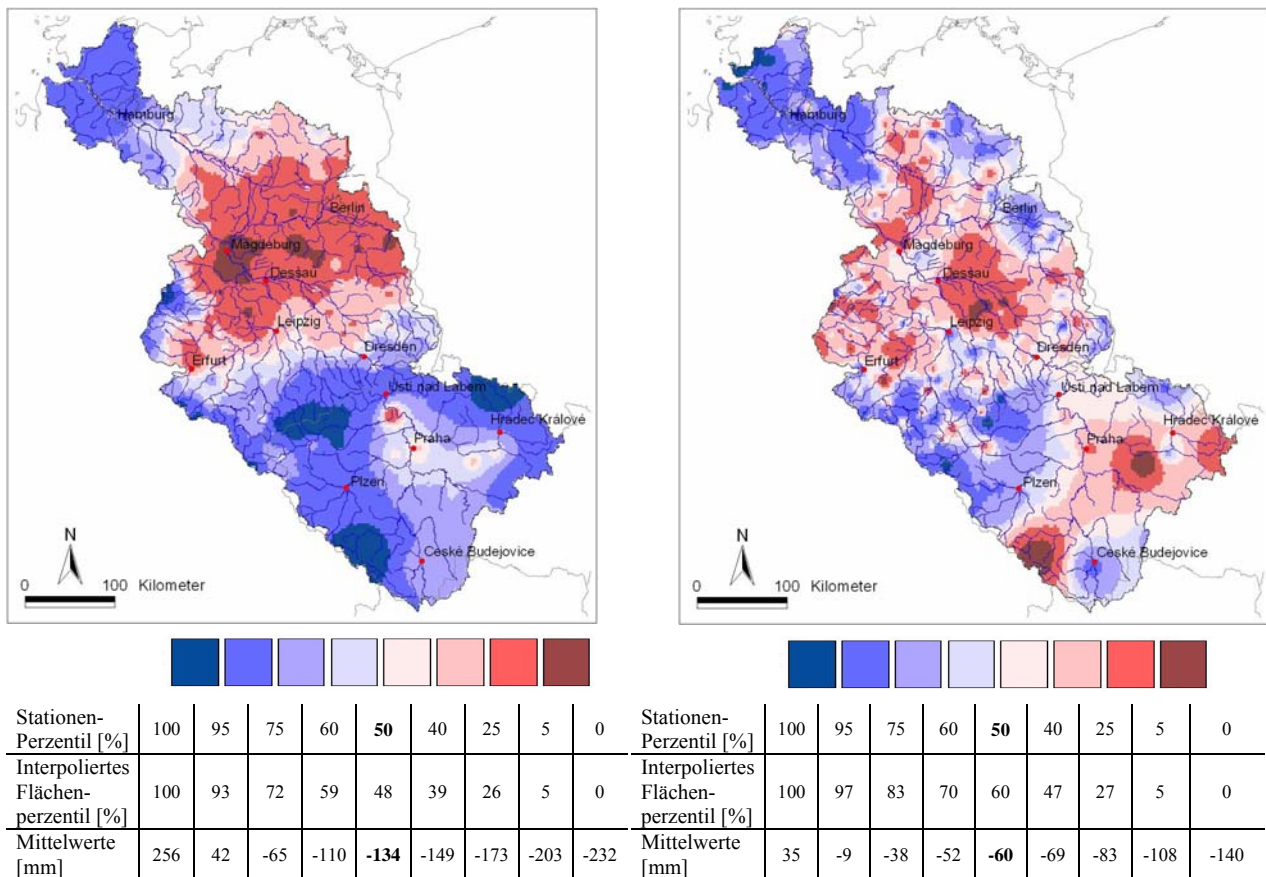
3.7.1 Klimatische Wasserbilanz

Ein wichtiger Indikator für das landschaftliche Wasserdargebot ist die klimatische Wasserbilanz. Die klimatische Wasserbilanz (KWB) wurde aus der Differenz von Niederschlägen (NS) und potentieller Evapotranspiration nach Turc-Ivanow stationsweise berechnet: $KWB = NS - E_{pot}$ [mm]. Die potentielle Evapotranspiration stellt die maximal mögliche Verdunstung einer Landschaftseinheit dar. Sie wird durch die Wasserversorgung nicht beschränkt und verhält sich ansonsten direkt proportional zur Temperatur, der Strahlung, der Windgeschwindigkeit und dem Wasserdampfdruckdefizit der Luft.

Die pro Tag berechneten KWB-Werte wurden zu Halbjahreswerten für den hydrologischen Sommer (Mai-Oktober) und Winter (November-April) aufsummiert. In den Abbildungen 17a-d sind die interpolierten Mittelwerte und Trends der KWB-Halbjahreswerte für den Zeitraum 1951-2003 in Kartenform präsentiert. Die Perzentile der zugrunde liegenden Stationswerte und der auf ein regelmäßiges Halbkilometer-Raster interpolierten Flächenwerte können den zugehörigen Tabellen entnommen werden. Ein deutlicher Nord/West-Süd/Ost Gradient in der klimatischen Wasserbilanz wird deutlich mit höheren Werten im stärker atlantisch geprägten Nord-Westen und niedrigen Werten im eher kontinentalen Einflüssen unterliegenden Süd-Osten. Die Trendkarten zeigen insbesondere im Sommerhalbjahr nahezu flächendeckend Rückgänge in der klimatischen Wasserbilanz während der letzten 50 Jahre (Abb. 17b). Sie werden hervorgerufen durch den im Einzugsgebiet verbreiteten Rückgang der Sommerniederschläge und den gleichzeitig stattfindenden Temperaturanstieg.

Im Winterhalbjahr gibt es eine entgegengesetzt gerichtete Änderung gleicher Größenordnung (Abb. 17d), welche insbesondere durch den Anstieg der Niederschläge während dieser Zeit verursacht war. Nominal gleich hohe Zugewinne des Winters können zwar die Rückgänge des Sommers mildern, aber diese aufgrund von Abfluss- und Speicherverlusten nicht ausgleichen. Im Sommer verbleibt ein Defizit im Wasserdargebot. In dessen Folge die Häufigkeit von Niedrigwasserereignissen, wie beobachtet, zunimmt. Solange dieses Trendverhalten andauert, muss mit einer zunehmenden Häufigkeit von Niedrigwasserperioden insbesondere im Mittellauf der Elbe gerechnet werden. Dies um so mehr, da sich die in den Mittelgebirgsregionen bisher befundenen natürlichen Möglichkeiten zur Speicherung von Niederschlagsüberschüssen des Winters in Form von Schnee bei einer sehr wahrscheinlichen Fortsetzung des Erwärmungstrends verringern werden. Gleichzeitig wird durch den temperaturbedingt zeitigeren Start der Vegetationsperiode auch

der Wasserspeicher Boden früher als bisher gelehrt, was die Sommerabflüsse eher ihr Minimum erreichen lässt. So haben sich die Niedrigwasserperioden in den letzten 150 Jahren deutlich verfrüht. Während sie in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts und der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts am Pegel Dresden zwischen dem 2. und 21. September lagen, treten sie in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zwischen dem 27. August und dem 7. September auf (Finke et al. 2004).



a. KWB Mittelwerte Sommer

b. KWB Trends Sommer

Abb. 17a, b: Mittelwerte (a) und mittlere Trends (b) der klimatischen Wasserbilanz (KWB) im Zeitraum 1951-2000 für den hydrologischen Sommer. Die Werte wurden in die Fläche interpoliert ausgehend von Stationswerten. Die Perzentile der Stationswerte wurden als Grundlage der Klasseneinteilung genutzt. Die maximalen Werte befinden sich in der dunkelblauen Farbklasse, die minimalen in der dunkelroten Farbklasse. Die Zentralwerte (50% Perzentil) der Stationsmittel und Stationentrends für den Sommer lauten -134 mm und -60 mm. Die Zentralwerte der interpolierten Halbkilometer Rasterwerte betragen ca. -134 und -69 mm.

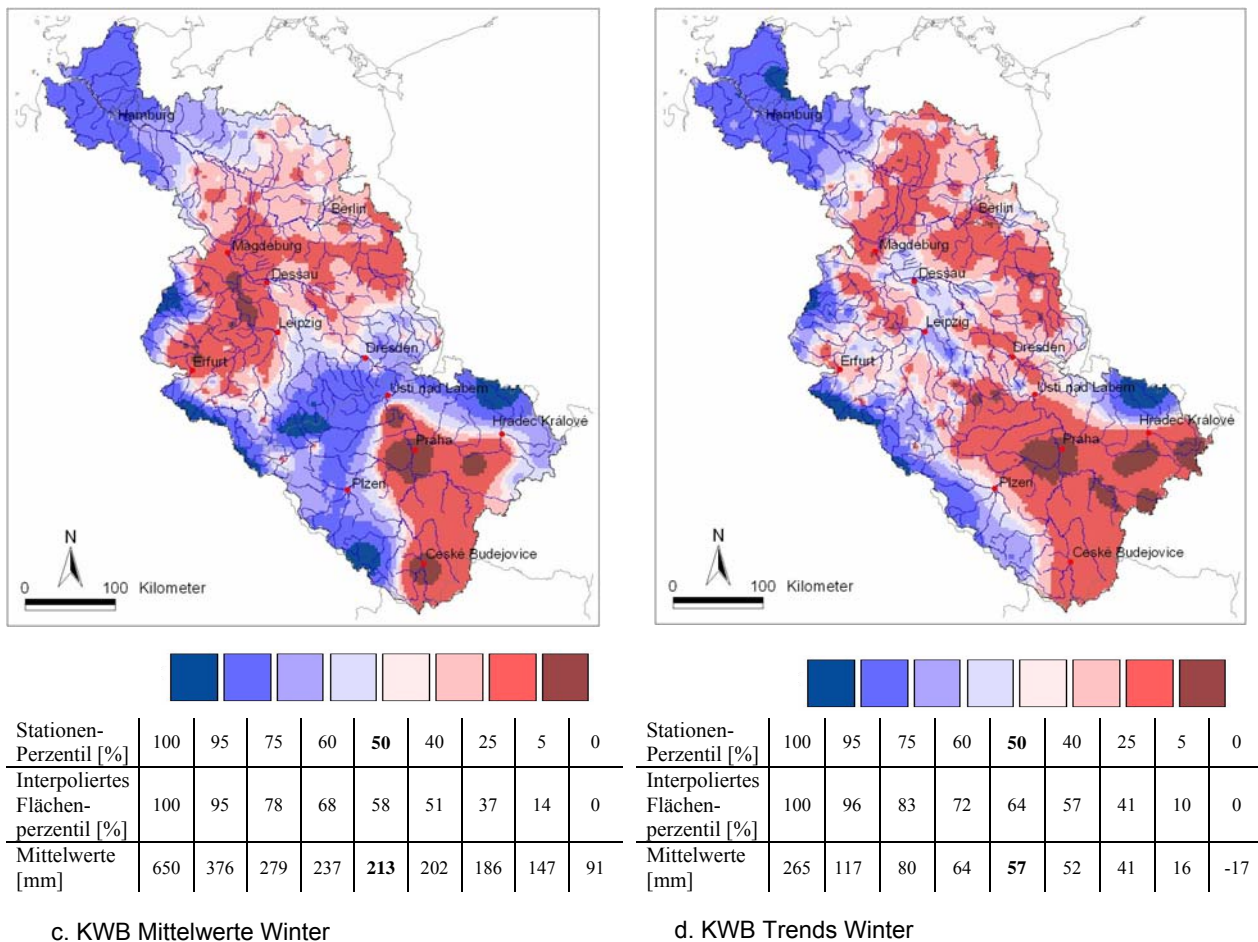


Abb. 17c, d: Mittelwerte (c) und mittlere Trends (d) der klimatischen Wasserbilanz im Zeitraum 1951-2000 für den hydrologischen Winter analog zu Abb. 17a, b. Die Zentralwerte (50% Perzentil) der Stationsmittel und der Stationentrends für den Winter lauten 213 mm und 57 mm. Die Zentralwerte der interpolierten Halbkilometer Rasterwerte liegen bei ca. 202 und 50 mm.

3.7.2 Häufigkeit von elbweiten Trockenperioden während der Sommermonate

Die Häufigkeit von elbweiten Trockenperioden wurde für diese Studie von Werner et al. (2005) separat untersucht. Generell lässt sich feststellen, dass im Vergleich der Dreißigjahres-Perioden 1951-80 und 1974-2003 die Anzahl der Tage an denen an 366 meteorologischen Stationen des Gesamtgebietes während der Sommermonate Juni, Juli und August kein Niederschlag gefallen ist, stark von 85 auf 123 Tage und damit um 45% zugenommen hat. Diese Zunahme ging einher mit einer höheren Häufigkeit und Andauer von Hochdruckwetterlagen. Die Häufigkeit der beiden Wetterlagentypen ‚Hoch Mitteleuropa‘ und ‚Hochdruckbrücke Mitteleuropa‘ erhöhte sich von 433 auf 532. Ihre Andauer stiegen von 4.7 auf 5.9 Tage.

In Abbildung 18 ist die Häufigkeitsentwicklung von niederschlagsfreien Perioden während des hydrologischen Sommers (Mai-Oktober) für alle kontinuierlichen 30-Jahreszeiträume seit 1951 dargestellt. Bis zur Periode 1966-1999 nahm die Häufigkeit von ein- und mehrtägigen nieder-

schlagsfreien Tagen im Gesamtgebiet zu. Seit dem gibt es einen leichten Rückgang bei der Häufigkeit von niederschlagsfreien Ein-Tages- und Zwei-Tagesperioden, während die Häufigkeit von niederschlagsfreien Drei-Tagesperioden weiter zunahm. Da die Ein-Tagestrockenperioden unmittelbar aufeinander folgende Trockentage, wie Zwei- und Drei-Tagesperioden einschließen, lässt sich schlussfolgern, dass die Häufigkeit von Trockenperioden in den letzten zehn 30-Jahresperioden zugunsten ihrer Dauer zurückging.

Eine separate Betrachtung der Entwicklung in den drei Teilgebieten obere, mittlere und untere Elbe zeigt, dass in den Teilgebieten mit Ausnahme der mittleren Elbe die Häufigkeit niederschlagsfreier Ein-Tagesperioden innerhalb laufender 30-Jahresperioden im Unterschied zum Gesamtgebiet kontinuierlich zunahm (Abb. 19). Nur im Bereich der mittleren Elbe gab es von 1964/1993 bis 1969/1998 einen Rückgang in den Häufigkeiten. Seit der Periode 1969/1998 ist jedoch wieder ein kontinuierlicher Anstieg zu beobachten. Die Entwicklung in den Teilgebieten seit 1969/1998 und bei den niederschlagsfreien Drei-Tagesperioden des Gesamtgebietes ging einher mit einem starken Anstieg bei den MNQ –Unterschreitungshäufigkeiten pro Dreißigjahreszeitraum (Abb. 15). Es ist gegenwärtig noch unklar, in wie weit dies schon auf eine etablierte Korrelation zurückzuführen ist oder zufällige Parallelität der Entwicklung. Bei einer trendkonformen Entwicklung der niederschlagsfreien Perioden wird sich insbesondere vor dem Hintergrund einer tendenziell weiter rückläufigen klimatischen Wasserbilanz das Risiko für extreme Niedrigwasserereignisse im Mittellauf der Elbe wahrscheinlich noch erhöhen. Wie lang diese Entwicklung anhält ist nicht abschätzbar. Wie sich in Abb. 18 andeutet ist auch eine Trendumkehr möglich. Zumindest mittelfristig erscheint es jedoch angezeigt, von einem höheren Risiko für das Auftreten von Niedrigwasserverhältnissen als in der 1971-2000 auszugehen.

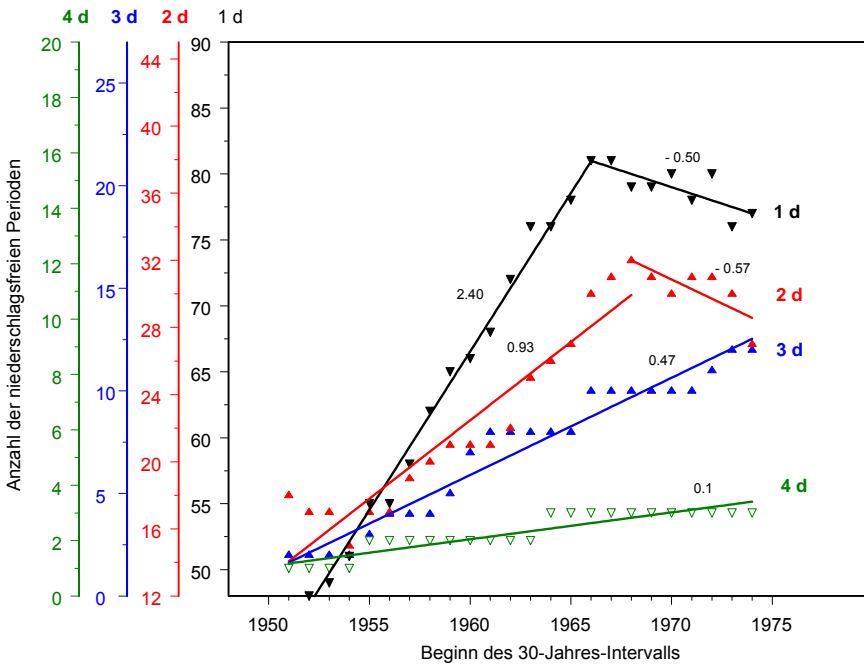


Abb. 18: Veränderung der Andauer von niederschlagsfreien Perioden (ein Tag, zwei Tage, drei Tage und vier Tage) in fortlaufenden 30-Jahre-Klimaperioden (1951-1980, 1952-1981, ..., 1974-2003) für den hydrologischen Sommer im Elbegasamtgebiet mit linearen Trendgeraden und den dazugehörigen Anstiegen. .

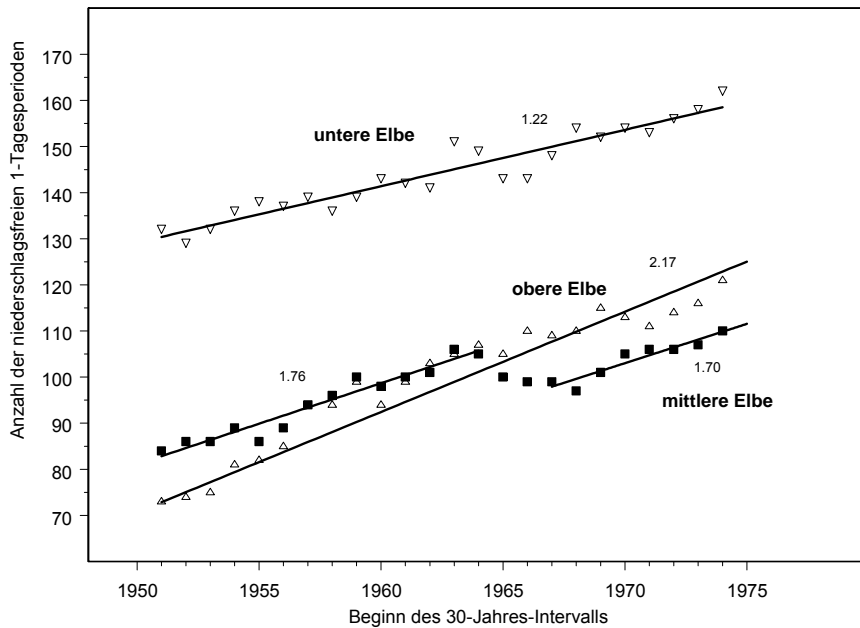


Abb. 19: Veränderung der Andauer von niederschlagsfreien Ein-Tagesperioden in fortlaufenden 30-Jahre-Klimaperioden (1951-1980, 1952-1981, ..., 1974-2003) für den hydrologischen Sommer im Elbegasamtgebiet mit linearen Trendgeraden und den dazugehörigen Anstiegen gegliedert nach oberer Elbe (Stationen südlich Dresdens), mittlerer Elbe (Stationen nördlich von Dresden und südlich von Boizenburg) und unterer Elbe (Stationen nördlich von Boizenburg).

4. Schlussfolgerungen

Die Niedrigwasserverhältnisse der Elbe sind durch eine zunehmende Häufigkeit von extremen Niedrigwassern in den letzten Jahren gekennzeichnet. Durch die in Tschechien vor allem in den 50er und 60er Jahren entstandenen Stauräume konnte das Niedrigwasserniveau gegenüber der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts zwar angehoben werden. Einer weiteren Erhöhung des Niedrigwasserniveaus sind jedoch Grenzen durch das vorhandene Speichervolumen gesetzt. Eine statistische Trendextrapolation dieser in der Vergangenheit beobachteten Entwicklung in die Zukunft ist daher unzulässig.

Die bisher beobachteten stärkeren Klimaänderungen seit Beginn der 90er Jahre, die langfristigen Trends bei der klimatischen Wasserbilanz und bei den niederschlagsfreien Tagen deuten darauf hin, dass die Häufigkeit von Niedrigwasserextremen mittelfristig noch zunimmt und das Niveau der mittleren Niedrigwasserwerte in einer frei fließenden Elbe weiter zurückgeht. Eine Anpassung des GIW-Elbe, dem Wasserstand mit dem an 345 Tagen des Jahres in einem Flussabschnitt gerechnet werden kann, an die veränderten Abflussverhältnisse ist dringend erforderlich. Die bisher als Bezug gewählten Abflussverhältnisse der Periode 1973-1986 müssen mittlerweile als nicht mehr statistisch repräsentativ eingestuft werden.

Hinsichtlich der Planungen für den Saale-Seitenkanal muss davon ausgegangen werden, dass der Kanalnutzen überschätzt wird, wenn die regelmäßig auftretenden deutlichen Unterschreitungen des mittleren Niedrigwasserstandes, der im Durchschnitt der Jahre an 345 Tagen gewährleistet ist, nicht in die Betrachtung einbezogen wird. Zu berücksichtigen bleiben auch die Folgen systematischer Bewirtschaftungswechsel des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet der Saale, die den Elbe Zufluss bei Niedrigwasser reduziert haben. Die extrapolierbare Entwicklung klimatischer Faktoren, die gegenwärtig eher in Richtung zunehmender Häufigkeit und abnehmendem Niveau von Niedrigwasser weist, stellt ein zusätzliches erhebliches Kostenrisiko dar.

5. Anhang

Tab. A1: Verteilungs- und Niveauunterschiede verschiedener Abflusskennzahlen (NQ, Q5, Q25 und Median) zwischen den Perioden 1901-1938 und 1970-2003 an den Pegeln Dresden und Barby. Angegeben sind die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (s) je Periode sowie die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung je Periode, auf Varianzunterschiede bei Normalverteilung (F-Test), auf Verteilungsunterschiede unabhängig vom Verteilungstyp (Kolmogorov-Smirnov Test), auf Mittelwertunterschiede bei Normalverteilung (t-Test) und auf Niveauunterschiede unabhängig vom Verteilungstyp jeweils zwischen den beiden betrachteten Perioden. Aus den Testergebnissen der nichtparametrischen Verfahren ergeben sich keine Widersprüche zu den Darlegungen im Hauptteil.

Die Symbole NS/ * / ** / *** entsprechen den Signifikanzniveaus nicht signifikant / $p \leq 0.1$ / $p \leq 0.05$ / $p \leq 0.01$ für 1) $Pr > K_{Sa}$, 2) $Pr > F$, 3) $Pr > K_{Sa}$, 4) $Pr > |t|$, 5) $Pr > \text{Chi-Quadrat}$ zu den Teststatistiken 1) Kolmogorov-Smirnov (Abweichung von der Normalverteilung), 2) F-Test (Varianzunterschiede), 3) Kolmogorov-Smirnov (Unterschiedlichkeit zweier Verteilungen), 4) t-Test (Mittelwertunterschiede) und 5) Kruskal-Wallis (Niveauunterschiede). Angegeben sind die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (s) je Periode, die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung je Periode, auf Varianzunterschiede bei Normalverteilung (F-Test), auf Verteilungsunterschiede unabhängig vom Verteilungstyp (Kolmogorov-Smirnov Test), auf Mittelwertunterschiede bei Normalverteilung (t-Test) und auf Niveauunterschiede unabhängig vom Verteilungstyp jeweils zwischen den beiden betrachteten Perioden.

	MW(± s) [m³/s]	Ab- weichung von Normal- verteilung ¹	MW(± s) [m³/s]	Ab- weichung von Normal- verteilung	Varianz- unter- schiede ²	Unterschied zwischen Ver- teilungen ³	MW-Differenz [m³/s]	rel. Zunahme [%]	Mittelwert- unterschied ⁴	Niveau- unterschied ⁵
Dresden										
NQ	88.2 (± 34)	(NS)	121.8 (± 24)	(NS)	**	**	33.6	38.1	***	***
Q 5	119.2 (± 36)	NS	143.9 (± 31)	NS	NS	*	24.7	20.7	**	***
Q 25	166.6 (± 48)	NS	185.0 (± 52)	**	NS	NS	18.3	11	*	NS
Median	239.7 (± 66)	NS	254.9 (± 81)	**	NS	NS	15.2	6.4	NS	NS
	1901-1938		1970-2003		1970-2003 vs.1901-1938					
Barby										
NQ	177.6 (± 96)	(NS)	229.6 (± 52)	(NS)	NS	***	52.1	29.3	***	***
Q 5	209.1 (± 60)	NS	256.7 (± 60)	NS	NS	NS	47.6	22.8	***	**
Q 25	285.4 (± 79)	[NS]	323.7 (± 94)	NS	NS	*	38.3	13.4	**	**
Median	408.3 (± 103)	NS	444.0 (± 138)	NS	*	*	35.7	8.7	NS	**

1) Kolmogoroff-Smirnow (KS) und Shapiro-Wilk (SW), (NS) - NS nach KS aber mind. * nach SW, [NS] - NS nach SW aber mind. * nach KS

2) F-Test

3) Kolmogorow-Smirnow

4) t-Test

5) Kruskal-Wallis

Tab. A2: Verteilungs- und Niveauunterschiede der Unterschreitungshäufigkeiten für den mittleren Niedrigwasserabfluss a) nach GLW89* b) bei periodenbezogen kalkuliertem mittleren NQ an den Pegeln Dresden und Neu Darchau. Die Unterschreitungshäufigkeiten wurden für die Perioden 1901-1954 und 1955-2003 kalkuliert. Angegeben sind die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (s) je Periode sowie die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung je Periode, auf Varianzunterschiede bei Normalverteilung (F-Test), auf Verteilungsunterschiede unabhängig vom Verteilungstyp (Kolmogorov-Smirnov Test), auf Mittelwertunterschiede bei Normalverteilung (t-Test) und auf Niveauunterschiede unabhängig vom Verteilungstyp jeweils zwischen den beiden betrachteten Perioden. Zusätzlich wurden die Unterschiede im relativen Auftreten von Nichtunterschreitungen (GLW_U=0 bzw. MNQ_U=0) zwischen den Perioden getestet (Chi-Quadrat-Test). Aus den Testergebnissen der nichtparametrischen Verfahren ergeben sich keine Widersprüche zu den Darlegungen im Hauptteil.

Die Symbole NS/ * / ** / *** entsprechen den Signifikanzniveaus nicht signifikant / $p \leq 0.1$ / $p \leq 0.05$ / $p \leq 0.01$ für 1) $Pr > KS_a$, 2) $Pr > F$, 3) $Pr > KS_a$, 4) $Pr > |t|$, 5) $Pr > \text{Chi-Quadrat}$ und 6) $Pr > \text{Chi-Quadrat}$ zu den Teststatistiken 1) Kolmogorov-Smirnov (Abweichung von der Normalverteilung), 2) F-Test (Varianzunterschiede), 3) Kolmogorov-Smirnov (Unterschiedlichkeit zweier Verteilungen), 4) t-Test (Mittelwertunterschiede), 5) Kruskal-Wallis-Test (Niveauunterschiede) und 6) Chi-Quadrat-Test (gleiche relative Klassenanteile).

		MW(± s) [d/a]	Ab- weichung von Normal- verteilung ¹	MW(± s) [d/a]	Ab- weichung von Normal- verteilung	Varianz- unter- schiede ²	Unterschied zwischen Ver- teilungen ³	Mittelwert- unterschied ⁴	Niveau- unterschied ⁵	Unterschied im relativen Null- Anteil ⁶
a)		GLW-U								
Dresden	alle Werte GLW-U=0	48.7(53)	***	19.9(32.6)	***	***	***	***	***	46% vs. 10%***
Neu Darchau	alle Werte GLW-U=0	45.1(52)	***	19.4(32.7)	***	***	***	***	***	41% vs. 14%***
		1901-1954		1955-2003		1955-2003 vs. 1901-1954				
b)		MNQ-U								
Dresden	alle Werte MNQ-U=0	18.1(30)	***	24.6(42)	***	NS	NS	NS	NS	57% vs. 46% NS
Neu Darchau	alle Werte MNQ-U=0	19.9(30)	***	28.7(43.6)	***	NS	NS	NS	NS	45% vs. 52% NS

1) Kolmogoroff-Smirnow (KS) und Shapiro-Wilk (SW), (NS) - NS nach KS aber mind. * nach SW, [NS] - NS nach SW aber mind. * nach KS

2) F-Test

3) Kolmogorow-Smirnow

4) t-Test

5) Kruskal-Wallis

6) Chi-Quadrat

6. Literatur

- Auswärtiges Amt, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Antwortbeitrag bezüglich der Verbalnote der Tschechischen Republik zur Elbe vom 18.7.2005, Bearbeiter Gerd Dumröse, Referat 407, AZ: EW 21/99.00.00, Berlin, 27.7.2005
- Belz, J.U., Engel, H., Krahe, P., 2004, Das Niedrigwasser 2003 in Deutschlands Stromgebieten, BfG, Referat M1, Wassermengen, Wasserstände, Abflussmodelle
- BUND, 2005, Pressemitteilung vom 9.9.2005 Niedrigwasser der Elbe nimmt zu, http://vorort.bund.net/verkehr/presse/presse_53/presse_305.htm
- Faulhaber, P., 1998, Entwicklung der Wasserspiegel- und Sohlenhöhen in der deutschen Binnenelbe innerhalb der letzten 100 Jahre: - Einhundert Jahre „Elbestromwerk“, Gewässerschutz im Einzugsgebiet der Elbe, 8. Magdeburger Gewässerschutzseminar, Hrsg. Teubner, Stuttgart/Leipzig
- Faulhaber, P., 2000, Veränderung von hydraulischen Parametern der Elbe in den letzten 100 Jahren, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, S. 97-118
- Faulhaber, P., Willamowski, B., 2005, Schiffsbedingungen der Elbe – Ein Überblick über die Bezugswasserstände für Ausbau und Unterhaltung, unveröffentlicht
- Finke, W., Fröhlich, W., Haberkorn, R., Krause, S., Lauschke, C., Oppermann, R., 1998, Untersuchungen zum Abflussregime der Elbe, BfG-Bericht Nr. 1228, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz – Berlin
- Finke, W., Krause, S., Lauschke, C., 2004, Untersuchungen des Einflusses von Klima- und Landnutzungsänderungen mittels statistischer Niedrigwasseranalyse, Ergänzungsbericht zur 4. Fassung des Berichts 1355 (2002) „Wasserwirtschaftliche Verhältnisse des Projektes 17“, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Finke W. & Krause S., 2005, Langzeitverhalten von Niedrigwasserkenngrößen von Pegeln des Havelgebietes und der Elbe, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 49, 2005, H.5, S. 248-254
- Gabriel, T., 2005, Der derzeit gültige Bezugswasserstand an der Elbe – GIW 1989*(20d) (Zusammenfassung aus BAW-Bericht GIW an der Elbe – Pflege eines Bezugswasserstandes

- GIW 1989*(20d),95 – 640054 – Mai 1998), Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost, Magdeburg, unveröffentlicht
- Helms, H., Ihringer, J., Nestmann, F., 2002, Analyse und Simulation des Abflussprozesses der Elbe, Kap. III-1 in Morphodynamik der Elbe – Schlussbericht des BMBF-Verbundprojekts, Hrsg. Nestmann, F. und Büchele, B., Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe ISBN 3-00-008977-2
- IKSE (2005) Die Elbe und ihr Einzugsgebiet. Ein geographisch-hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick 258 S. Selbstverlag
- Otte-Witte, K., Adam, K., Meon, G., Rathke, K., 2002, Hydraulisch.morphologische Charakteristika entlang der Elbe, Kap. III-2 in Morphodynamik der Elbe – Schlussbericht des BMBF-Verbundprojekts, Hrsg. Nestmann, F. und Büchele, B., Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe
- Planco Consulting GmbH, 2004, Neubewertung des Ausbaus der Saale unterhalb Calbe bei Verzicht auf Ausbaumaßnahmen an der Elbe, Schlussbericht für das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost
- UFZ Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, 2003, Stellungnahme zur vorgesehenen Aufnahme des Saaleausbaus in den Bundesverkehrswegeplan
- Warnat, G. (2005) Studie: Die Elbe führt immer seltener Niedrigwasser, Volksstimme, Magdeburg 9.9.2005
- Wechsung F., A. Becker & P. Gräfe, 2005, Integrierte Analyse der Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet, PIK-Report 95, ISSN 1436-0179
- Werner P. C., F.-W. Gerstengarbe, F. Wechsung, 2005, Analysis of extreme events in the Elbe river catchment