

Entwicklung des Abflussregimes und der Saisonalität der Hoch- und Niedrigwasserabflüsse der Elbe zwischen 1931 und 2010

1. Methodenbeschreibung

1.1. Pardé-Analyse

Zur Kennzeichnung des durchschnittlichen innerjährlichen Abflussverhaltens bzw. des Abflussregimes des Flusses wurde die ebenso einfache wie verbreitete **Klassifizierungsmethode von PARDÉ** (1947/1964) angewendet. Grundlage dieser Klassifizierung ist der vieljährige mittlere Jahresgang des Abflusses an einem Pegel, dargestellt in den sogenannten Pardé-Diagrammen. Deren Datenbasis wird gelegt durch die Berechnung des Verhältnisses jedes einzelnen der zwölf vieljährigen Monats-MQ zu dem entsprechenden vieljährigen Jahres-MQ (Pardé-Koeffizient). Die Berechnung von Pardé-Koeffizienten bewirkt eine Normierung, die den direkten Vergleich verschiedener Jahresganglinien miteinander erleichtert.

Der Abflusskoeffizient k_i ist wie folgt definiert:

$$k_i = \frac{\overline{mMQ}_i}{\overline{MQ}}$$

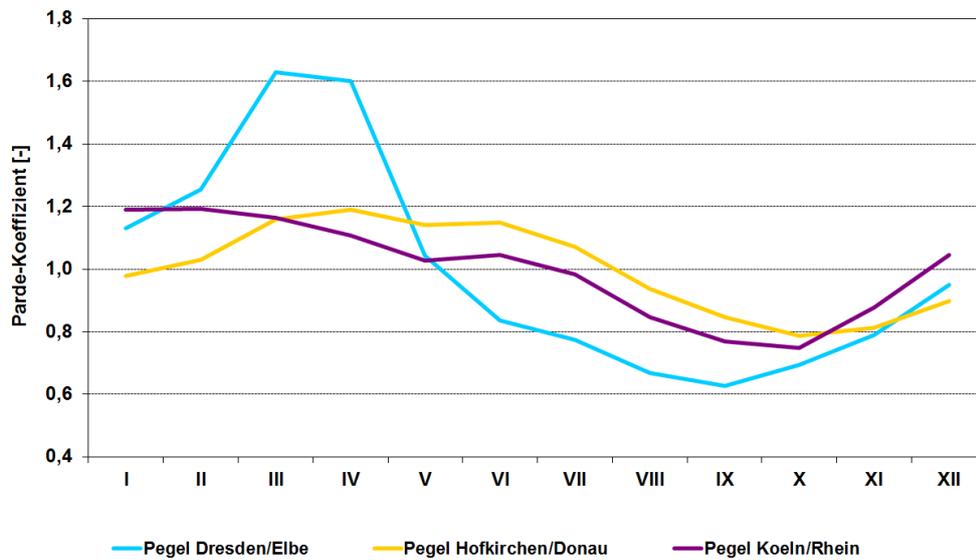
mit \overline{mMQ}_i – vieljährig gemittelter monatlicher Abfluss im Einzelmonat i , ($i=I, XII$) [m^3/s]

$$\text{d. h. } \overline{mMQ}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n mMQ_{i,j}$$

mit n = Anzahl der Jahre der Untersuchungsperiode

und \overline{MQ} – vieljährig gemittelter jährlicher Abfluss [m^3/s]

$$\overline{MQ} = \frac{\sum_{j=1}^n MQ_j}{n}$$



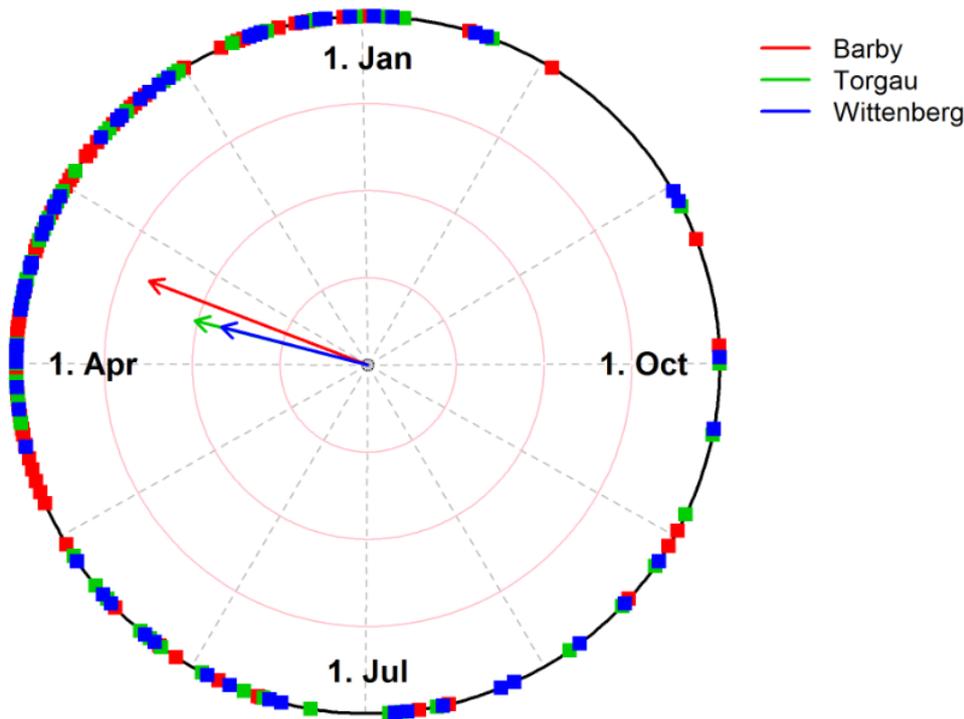
Beispiel: Pardé-Koeffizient (Quelle: BfG)

Aus den zwölf normierten monatlichen Koeffizienten kann man sogenannte Regimekurven bilden. Deren Verlauf wird wesentlich durch die monatliche Wasserbilanz im Einzugsgebiet bestimmt. PARDÉ unterscheidet aufgrund von Anzahl und Lage der Maxima und Minima im Jahresgang, Speisungsart des Abflusses sowie Schwankungsbreite der Koeffizientenwerte eine Vielzahl von Abflussregime-Typen, die hier nicht im Einzelnen erläutert werden sollen. Die wichtigste Unterscheidung ist die in einfache (im Diagramm eingipfelige) Typen und in komplexe, im Jahresgang durch Überlagerung verschiedener Vorgänge mehrgipfelig erscheinende Abflussregime. Die Abflussmaxima werden entweder durch Gletscherschmelzwasser (glaziäres Regime), Schneeschmelzwasser (nivales Regime) oder Regenwasser (pluviales Regime) gespeist.

1.2. Saisonalitätsindex nach BURN

Der **Saisonalitätsindex nach BURN** (1994) erlaubt eine Aussage darüber, wann im Kalenderjahr und mit welcher Wahrscheinlichkeit ein (Hoch- oder Niedrigwasser-)Extremereignis auftritt. Im Ergebnis erhält man das wahrscheinlichste Eintrittsdatum für ein Extremereignis mit dem Stabilitäts- bzw. Regularitätsmaß dafür, dass das Ergebnis tatsächlich an diesem Tag im Jahr eintritt.

Zur Berechnung wird D_i als das Datum des Auftretens des i -ten Ereignisses definiert, wobei $D=1$ für den 1. Januar und $D=365$ für den 31. Dezember steht. D wird in Polarkoordinaten auf dem Einheitskreis mit dem Winkel Θ dargestellt. Die Richtung des mittleren Vektors für alle Ereignisse ergibt das mittlere Eintrittsdatum MD und die Länge r des mittleren Vektors ist ein Maß für die Variabilität des Eintrittsdatums. Werte für \bar{r} liegen zwischen 0 (Ereignisse treten gleichwahrscheinlich während aller Tage des Jahres auf) und 1 (alle Ereignisse treten an einem einzigen Tag im Jahr auf).



Beispiel: Saisonalität der höchsten mittleren Tagesabflüsse im Zeitraum 1890 – 2010
 (Quelle: BfG)

Die Berechnung von MD und \bar{r} erfolgt nach folgenden Gleichungen:

$$\theta = D_i \left(\frac{2\pi}{365} \right), i = 1, n$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(\theta), \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin(\theta)$$

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}} \right)$$

$$MD = \bar{\theta} \frac{365}{2\pi}$$

$$\bar{r} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$$

Es ist zu beachten, dass die beim BURN-Test resultierenden taggenauen Datumsangaben eher orientierenden Charakter im Sinne einer probabilistischen Angabe haben und nicht als Vorhersagewert missinterpretiert werden sollten.

2. Ergebnisse

Das Abflussregime der Elbe wird durch die fünf Pegel an der Elbe Brandýs n. L. bzw. Kostelec n. L. (Einzugsgebietsfläche 13 183 km²), Děčín (51 120 km²), Dresden (53 096 km²), Barby (94 060 km²), Neu-Darchau (131 950 km²) und am Pegel Prag an der Moldau (26 730 km²) aufgezeichnet.

An allen bewerteten Pegeln handelt es sich um ein Regen-Schnee-Regime mit Abflussspitzen im März oder April und Abflussminima vorwiegend im August bzw. September (Abbildung 1A). Die höchsten Niederschlagswerte hingegen treten im Sommer und die niedrigsten im Winter auf, was mit dem größeren Anteil an intensiven konvektiven Niederschlägen im Sommer zusammenhängt (Abbildung 1B).

An allen sechs Pegeln zeigt die Analyse der zeitlichen Variabilität des Niederschlags- und Abflussregimes anhand von vier 20-Jahresblöcken der 80-jährigen Zeitreihe 1931 – 2010 ein beständiges Abflussregime mit relativ geringen Verschiebungen (Abbildungen 1A und 1B).

Die Abbildungen 2A und 2B veranschaulichen die Abweichungen der Pardé-Koeffizienten der Abflüsse für die einzelnen 20-Jahresblöcke im Hinblick auf deren Werte für die Zeitreihe 1931 – 2010, und zwar für die Monate April bis August (2A) und Dezember bis März (2B). Deutlich wird, dass die Abweichungen bis auf Ausnahmen keine stetige Entwicklung aufweisen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Abflussregime nach und nach durch den Betrieb von wasserwirtschaftlichen Stauanlagen, z. B. die Talsperren der Moldaukaskade seit den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts beeinflusst worden ist, die im Sommer die Niedrigwasserabflüsse aufheben. Dies ist an den Pegeln an der Moldau in Prag sowie an der Elbe in Děčín an den Augustabflüssen zu erkennen. An der Elbe in Dresden ist dieser Effekt schon weniger offensichtlich und weiter stromab an der Elbe gar nicht mehr sichtbar.

Auch durch den Vergleich der Anomalien bei den Abweichungen der Pardé-Koeffizienten der Abflüsse und Niederschläge vom vieljährigen Pardé-Koeffizienten lässt sich auf ein Regen-Schnee-Abflussregime schließen (Abbildung 3). Zu erkennen ist ein zeitlicher Zusammenhang der beiden Parameter (insbesondere im Zeitraum 1951 – 1970), Niederschlagsanomalien wirken sich jedoch häufiger leicht verzögert auf den Abfluss aus.

Die Saisonalität der Hoch- und Niedrigwasserabflüsse gemäß der Methode nach Burn ermittelt tagesbezogene Punkte der Jahresmaxima der Tageswerte des Abflusses und der 7-tägigen Niedrigwasserabflüsse (in Abbildung 4 jeweils in einem Kreisdiagramm abgebildet). Das wahrscheinlichste Eintrittsdatum wird als auf den jeweiligen Tag deutender Pfeil dargestellt. Zusätzlich wird über die Pfeillänge im Sinne eines Stabilitäts- bzw. Regularitätsmaßes angegeben, wie variabel dieser Eintrittstermin ist.

Aus Abbildung 4A geht hervor, dass die Abflussmaxima in der Regel im März auftreten, am Oberlauf der Elbe in Kostelec n. L. für den dritten und den vierten bewerteten Zeitraum bereits im Februar, in Prag an der Moldau hingegen für die zweite und dritte Doppeldekade im April und im Mai sowie in Děčín an der Elbe für den dritten Zeitraum Anfang April. Am Pegel Dresden ist in der jüngsten Doppeldekade eine leichte zeitliche Verschiebung der Termine der Hochwasserabflüsse auf Ende Februar festzustellen, an den Pegeln Neu Darchau und Barby fallen die Unterschiede gering aus. Insgesamt zeigt sich hochwasserbezogen angesichts der

über die Zeit überwiegend verringerten Regularitätswerte an allen untersuchten Pegeln eine Tendenz zur terminlichen Destabilisierung.

Analog zu den Hochwassern wurde eine Analyse der Niedrigwassersaisonalität durchgeführt und im Gegensatz zum Regime des Eintritts der Hochwasserabflüsse zeigt sich an allen sechs bewerteten Pegeln eine Veränderung. Im betrachteten Zeitraum ist in den letzten vierzig Jahren zwar eine geringere Variabilität beim Auftreten der Minima (erhöhte Regularitätswerte), aber gleichzeitig auch ihr früheres Eintreten festzustellen. In der Doppeldekade 1991 – 2010 betrug diese Vorverlegung 6 bis 7 Wochen und die Minima traten bereits Mitte August auf. Ursache für den früheren Eintritt der Minima sind die ansteigende Lufttemperatur (siehe Abbildung 5), die im Frühjahr und Sommer zu einer stärkeren Verdunstung führt, sowie auch das frühere Tauen der Schneedecke und häufigeres Tauwetter selbst im Winter.

Die Abbildung 5 zeigt die Pardé-Koeffizienten (A) und ihre Abweichungen von den vieljährigen Mittelwerten für den Zeitraum 1931 – 2010 (B) für die Werte der mittleren Monatstemperatur der Luft flächengemittelt für das Einzugsgebiet von der Quelle bis zum Pegel Neu Darchau an der Elbe. Insbesondere aus der Abbildung 5B geht der über die Zeit zunehmende Anstieg der Lufttemperatur deutlich hervor: Seit der 70er Jahren des 20. Jahrhunderts ist eine Erwärmung (d. h. positive Abweichungen von den vieljährigen Mitteln) in den Wintermonaten ersichtlich, die sich in der Doppeldekade 1991 – 2010 unter Verstärkung fortsetzte und auf alle Monate zwischen Januar und September ausweitete.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Zeitraum 1931 – 2010 für alle untersuchten Pegel in gewissem Maße Änderungen des Abflussregimes zu beobachten sind. Während beim Eintreten der Hochwasserabflüsse kein klarer Trend deutlich wird, verschiebt sich der Eintrittszeitraum der Niedrigwasserabflüsse: Die Minima treten früher auf. Die saisonalen Veränderungen des Abflussregimes sowie die beobachteten Änderungen in der Saisonalität der Niedrigwasserabflüsse werden durch den Einfluss der ansteigenden Lufttemperatur verursacht, wie Abbildung 5 belegt. Dieser bewirkt eine frühere Schneeschmelze sowie auch eine stärkere Verdunstung im Frühjahr und insbesondere im Sommer. Auch die Auswirkungen wasserwirtschaftlicher Stauanlagen sind wesentlich am Abflussregime und dessen Veränderung beteiligt, durch die es in Niedrigwasserzeiten zu einer Abflusstützung, während der Schneeschmelze hingegen zu einem Wasserrückhalt und einer Verringerung der Frühjahrsabflüsse kommt.

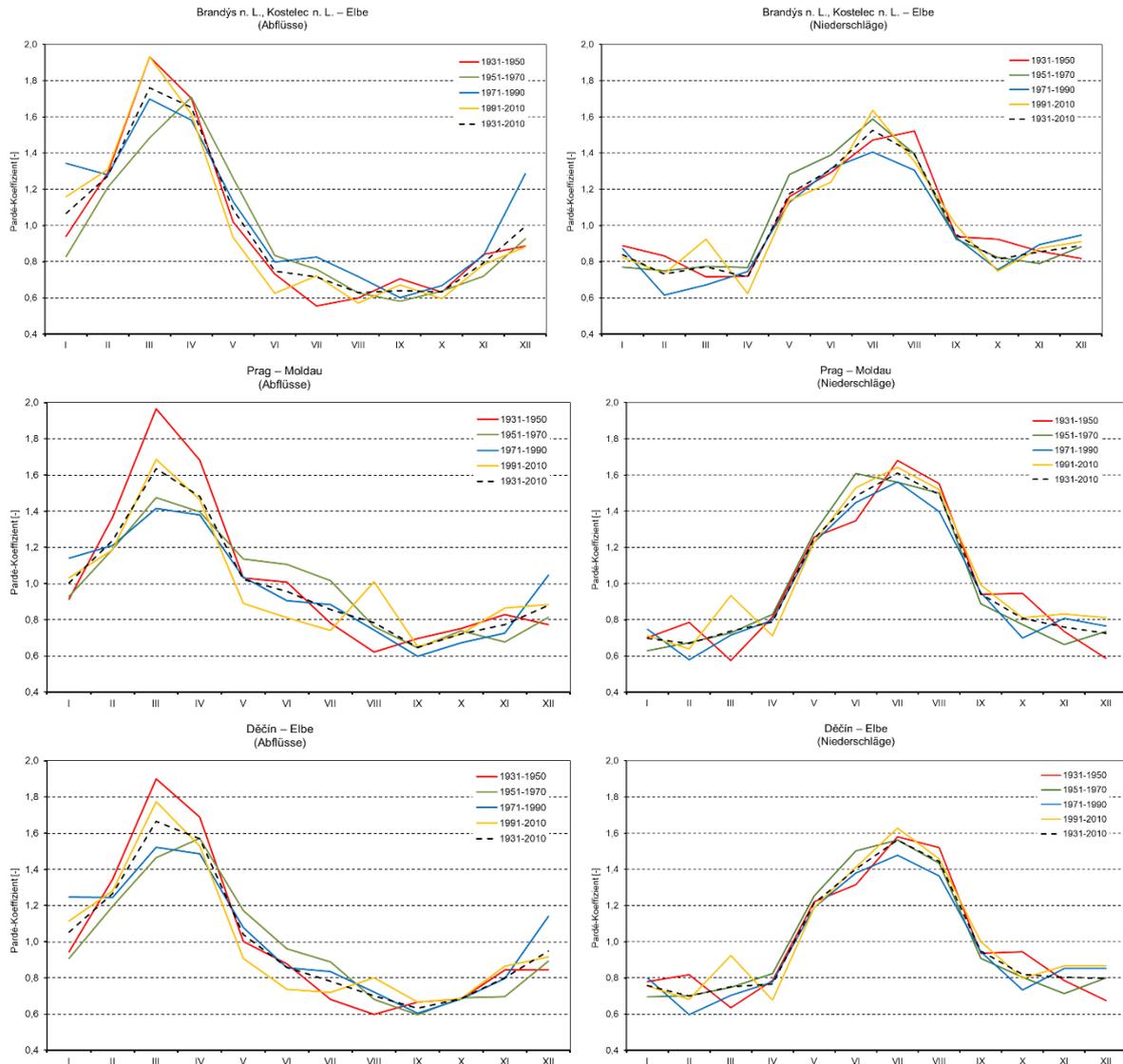


Abbildung 1:

- A) Linke Seite: Abflussregime an den Pegeln Brandýs n. L. bzw. Kostelec n. L., Prag und Děčín zwischen 1931 und 2010, dargestellt in Pardé-Koeffizienten (Quelle: ČHMÚ)**
- B) Rechte Seite: Gebietsniederschlagsregime des Einzugsgebiets der Elbe bis Brandýs n. L. bzw. Kostelec n. L., Prag und Děčín zwischen 1931 und 2010, dargestellt als Pardé-Koeffizienten (Quelle: BfG, Daten: GPCC)**

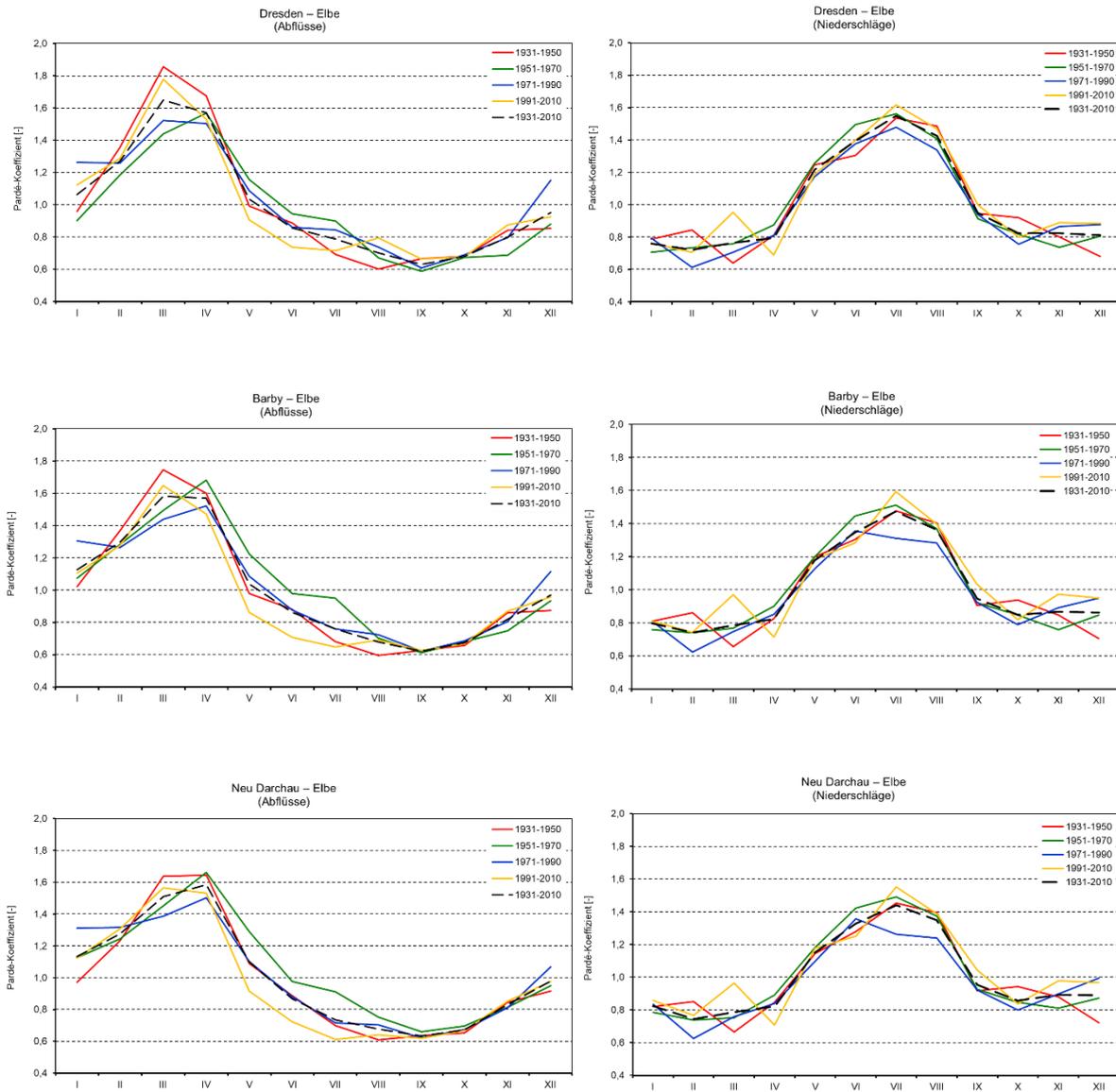


Abbildung 1 (Fortsetzung):

- A) Linke Seite: Abflussregime an den Pegeln Dresden, Barby und Neu-Darchau zwischen 1931 und 2010, dargestellt in Pardé-Koeffizienten (Quelle: BfG)**
- B) Rechte Seite: Gebietsniederschlagsregime des Einzugsgebiets der Elbe bis Dresden, Barby und Neu-Darchau zwischen 1931 und 2010, dargestellt als Pardé-Koeffizienten (Quelle: BfG, Daten: GPCC)**

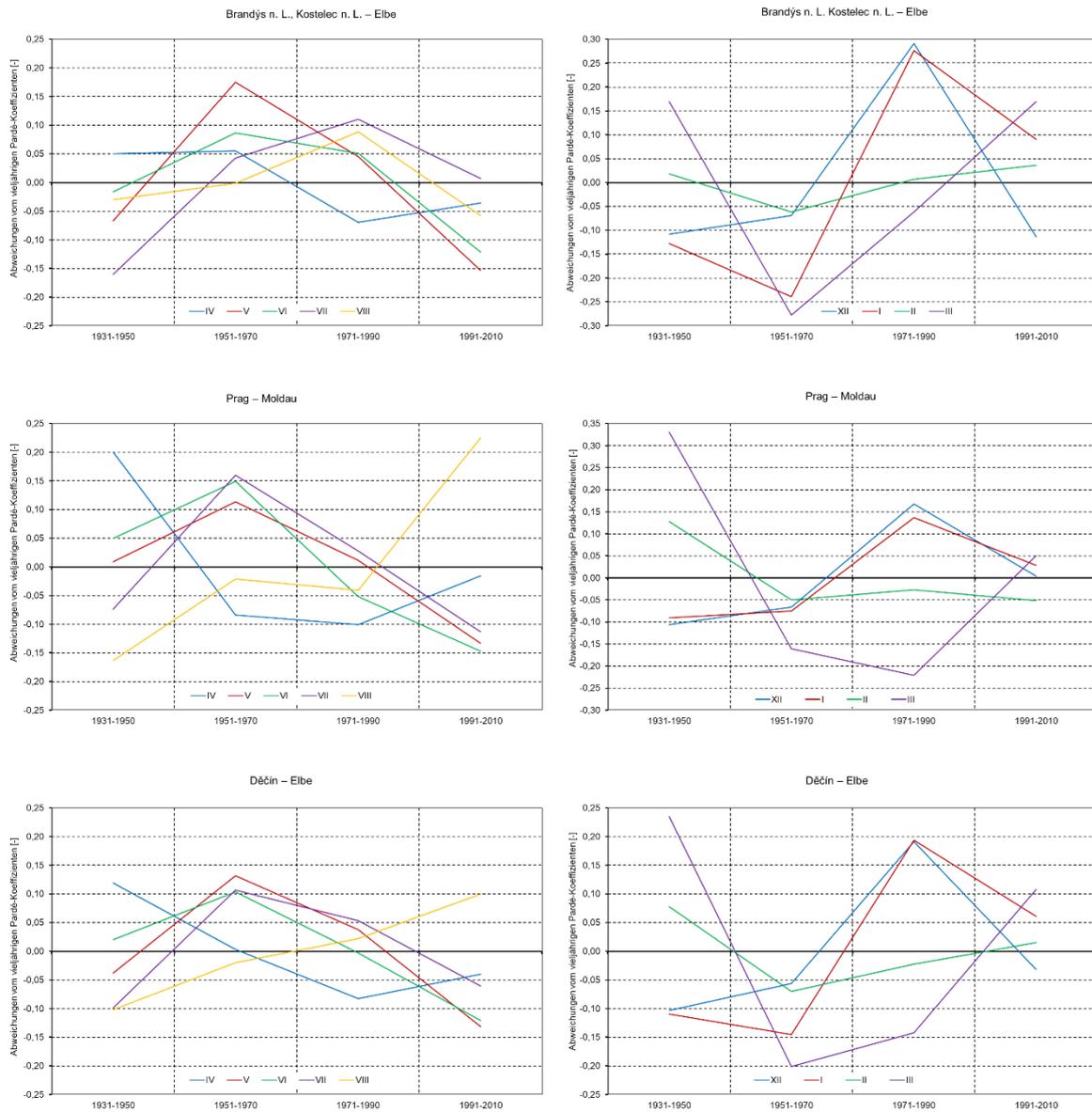


Abbildung 2:

Abweichungen der Abfluss-Pardé-Koeffizienten vom vieljährigen Abflussregime an den Pegeln Brandýs n. L. bzw. Kostelec n. L., Prag und Děčín (Quelle: ČHMÚ)

- A) Linke Seite: für die Frühjahrs- und Sommermonate April bis August**
- B) Rechte Seite: für die Wintermonate Dezember bis März**

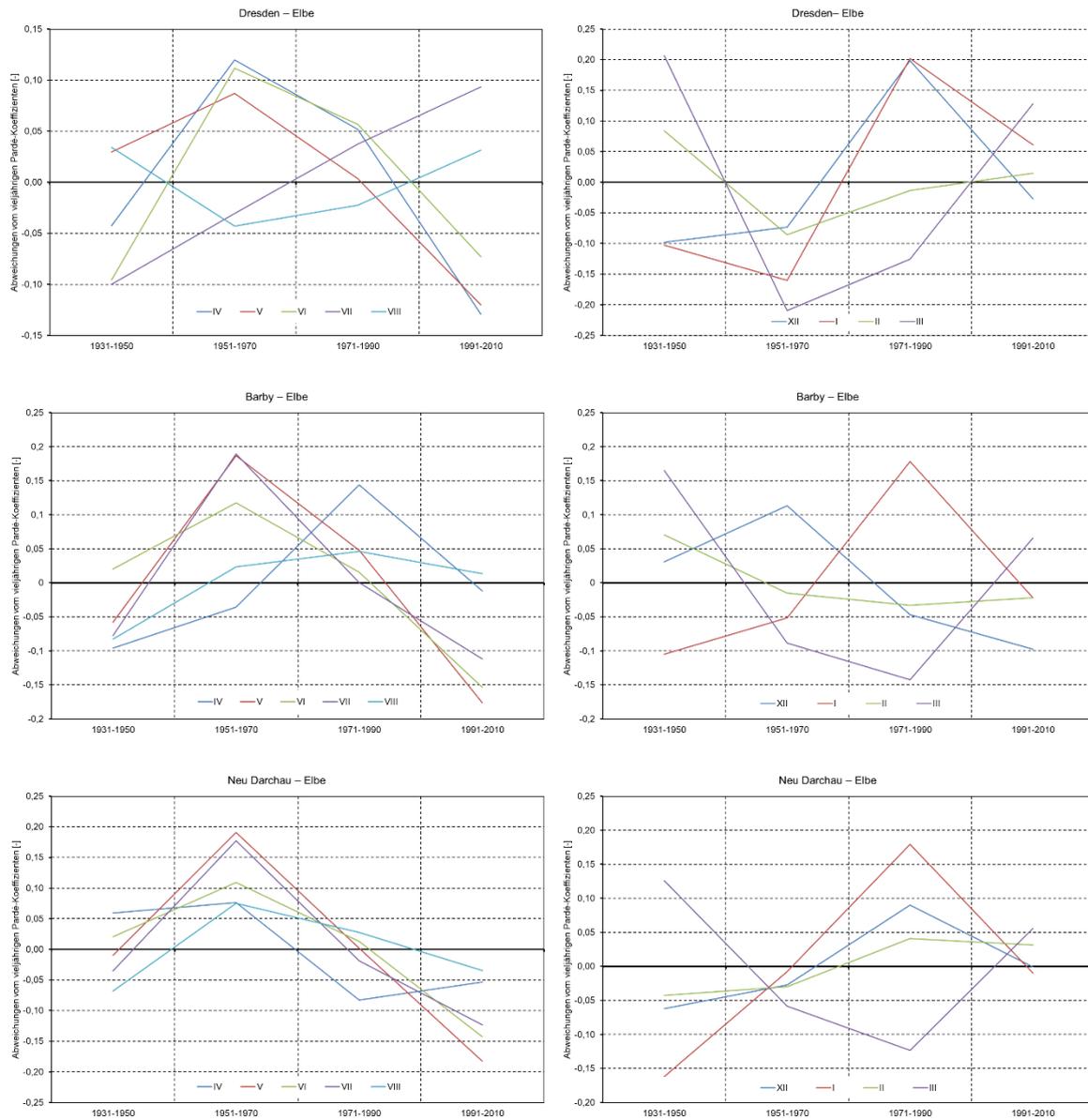


Abbildung 2 (Fortsetzung):

Abweichungen der Abfluss-Pardé-Koeffizienten vom vieljährigen Abflussregime an den Pegeln Dresden, Barby und Neu-Darchau (Quelle: BfG)

A) Linke Seite: für die Frühjahrs- und Sommermonate April bis August

B) Rechte Seite: für die Wintermonate Dezember bis März



Abbildung 3:
Vergleichende Darstellung der Abweichungen von den Pardé-Koeffizienten für Niederschlag (blau) und Abfluss (rot) für die vier 20-Jahresblöcke (Quelle: ČHMÚ, BfG, Niederschlagsdaten: GPCC)

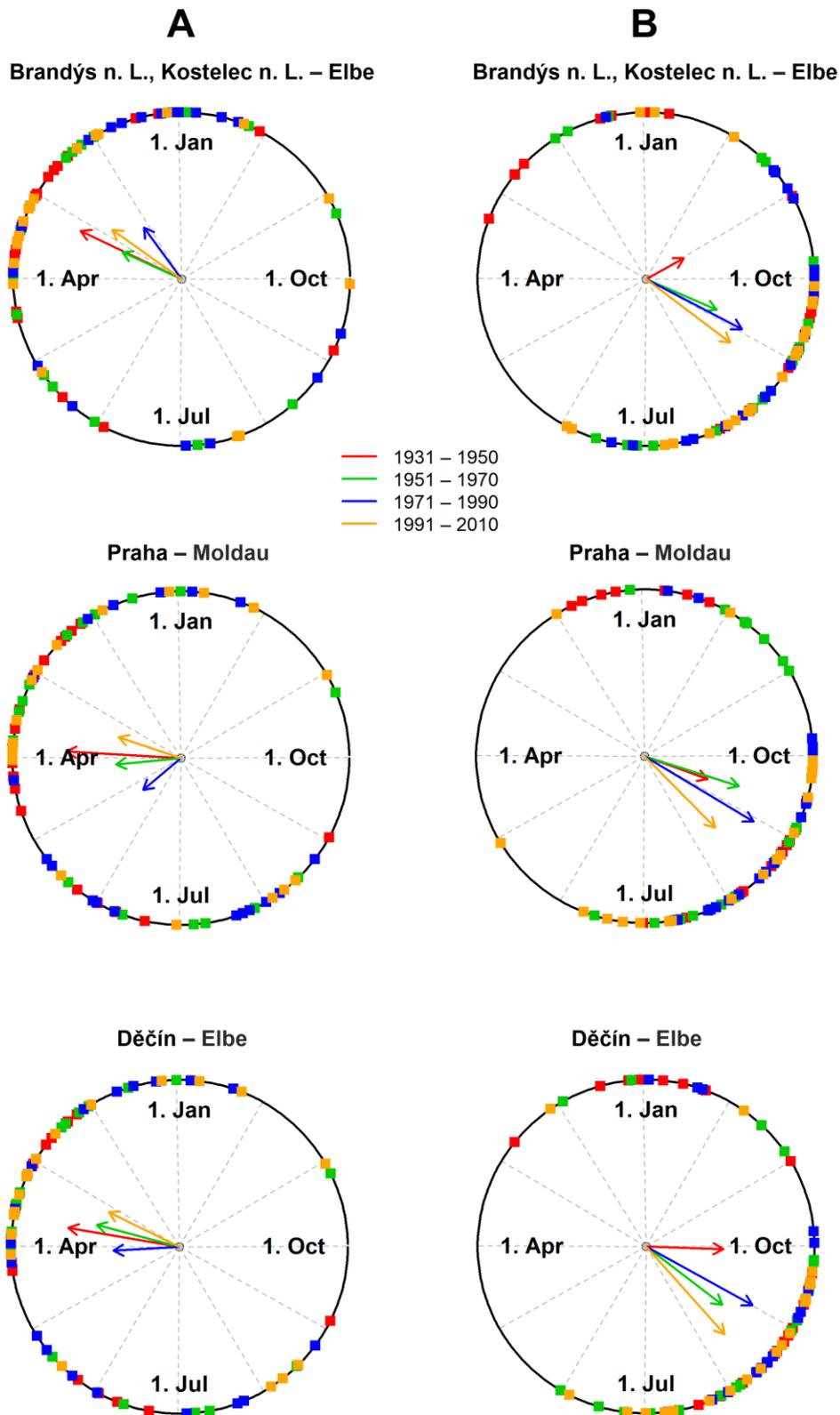


Abbildung 4:

Analyse der Saisonalität der Abflüsse an den Pegeln Brandýs n. L. bzw. Kostelec n. L., Prag und Děčín nach BURN (Quelle: ČHMÚ)

A) Linke Seite: Analyse der Saisonalität der Hochwasserabflüsse

B) Rechte Seite: Analyse der Saisonalität der 7-tägigen Niedrigwasserabflüsse

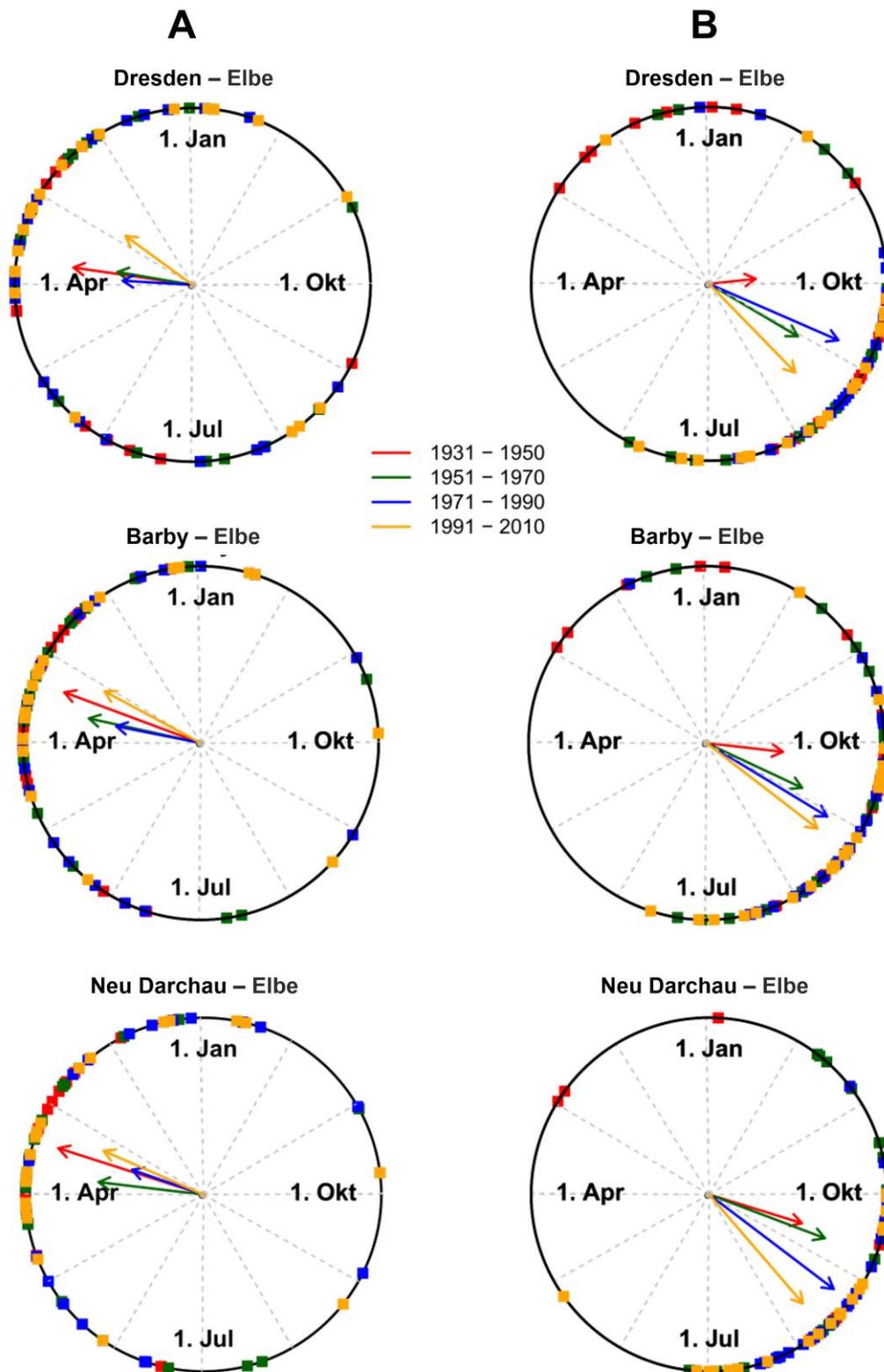


Abbildung 4 (Fortsetzung):

Analyse der Saisonalität der Abflüsse an den Pegeln Dresden, Barby und Neu-Darchau nach BURN (Quelle: BfG)

A) Linke Seite: Analyse der Saisonalität der Hochwasserabflüsse

B) Rechte Seite: Analyse der Saisonalität der 7-tägigen Niedrigwasserabflüsse

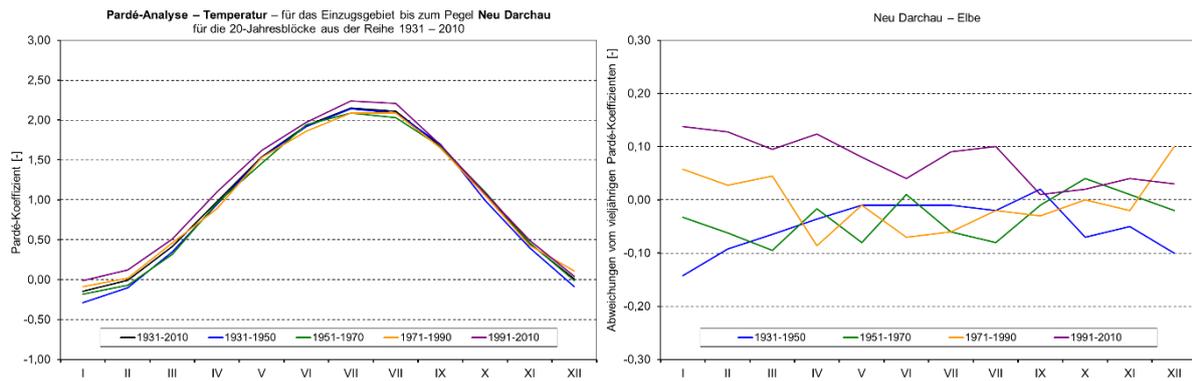


Abbildung 5:

- A) Linke Seite: Mittlere Monatstemperatur der Luft im Einzugsgebiet bis zum Pegel Neu Darchau an der Elbe zwischen den Jahren 1931 bis 2010, abgebildet als Pardé-Koeffizienten (Quelle: BfG, Daten: DWD)**
- B) Rechte Seite: Abweichungen der Pardé-Koeffizienten von den vieljährigen Mittelwerten für die mittleren Monatstemperaturen der Luft im Einzugsgebiet bis zum Pegel Neu Darchau an der Elbe (Quelle: BfG, Daten: DWD)**

Literatur:

BURN, D. H. (1994): Hydrological effects of climatic change in west-central Canada. In: Journal of Hydrology 160, S. 53 – 70.

PARDÉ, M. (1947/1964): Fleuves et Rivières. Colin, Paris, 224. S.