

**Enrico Iredi**

**Rekonstruktion des typischen Zeitreihenverlaufs  
monatlicher Abflüsse für talsperrenbeeinflusste  
Messstationen in Zentraleuropa - Verifizierung mit  
Hilfe eines global verfügbaren Datensatzes**

**Greifswald 2005**

# Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

## Geographisches Institut

### Diplomarbeit

**Thema:** Rekonstruktion des typischen Zeitreihenverlaufs monatlicher Abflüsse für talsperrenbeeinflusste Messstationen in Zentraleuropa  
- Verifizierung mit Hilfe eines global verfügbaren Datensatzes

Erstgutachter: Prof. Dr. Aurada

Zweitgutachter: Dr. Rödel

Greifswald, den 21.02.2005

Enrico Iredi

## **Inhaltsverzeichnis**

1.	Einleitung	1
2.	Ermittlung der Gewässereinzugsgebiete	2
2.1.	Datengrundlage	2
2.2.	Datenbearbeitung	3
2.3.	Darstellung der Ergebnisse	6
3.	Ermittlung von Speicherausbaugraden und unbeeinflussten Zeitreihen	8
3.1.	Georeferenzierung von Talsperren	8
3.2.	Kumulatives Talsperrenvolumen	9
3.3.	Speicherausbaugrad und unbeeinflusste Zeitreihensegmente	11
4.	Klassifizierung von Abflussregimes	14
4.1.	Methodenübersicht bisheriger Regimetypologien	14
4.2.	Datenanforderungen bisheriger Regimetypologien	15
4.3.	Ausweis von Repräsentativjahren	17
4.4.	Clusteranalyse zum Ausweis von Regimetypen	19
4.5.	Darstellung der Regimetypen	27
5.	Variabilität der Abflussregimetypen	42
5.1.	Methodik der Stabilitätsanalyse	42
5.2.	Ergebnisdarstellung und Stabilitätsbeurteilung	46
6.	Schätzung der Regimetypen für talsperrenbeeinflusste Einzugsgebiete	59
6.1.	Datengrundlage u. Datenüberblick – Gebietskenngrößen	59
6.2.	Zusammenhang zwischen Raum- und Regimetypen	61
6.3.	Mathematisches Modell zur Vorhersage von Regimetypen	64
6.4.	Klassifikation von talsperrenbeeinflussten Einzugsgebieten	70
7.	Übertragung hydrologischer Kennwerte aus Repräsentativgebieten	73
8.	Verifizierung der Ergebnisse	76
9.	Zusammenfassung	81
	Literaturverzeichnis	84
	Abbildungsverzeichnis	88
	Anlagenverzeichnis, Formelverzeichnis	90
	Tabellenverzeichnis	91
	Anhang mit Anlagen	93

## **1. Einleitung**

Der in den 50er und 70er Jahren einsetzende intensive Talsperrenbau hat den natürlichen Abfluss stark verändert. Dadurch können die natürlichen Abflussregimes, an Stellen mit anthropogen beeinflusstem Wasserhaushalt, heute nicht mehr aus Direktmessungen des Abflusses bestimmt werden.

Zielstellung dieser Arbeit ist die Rekonstruktion von natürlichen Abflussregimes für talsperrenbeeinflusste Messstationen. Dies soll, mit Hilfe von global verfügbaren Daten, für den Untersuchungsraum Zentraleuropa umgesetzt werden.

Hierzu wurde ein auf JANTON (1980) zurückgehender, von ASCHWANDEN und WEINGARTNER (1985, M.6) sowie ASCHWANDEN (1985, S. 117ff) vorgeschlagener und von WEINGARTNER (1999, S. 70ff) angewandter Ansatz genutzt. Ausgehend von einer Abflussregimeklassifikation, welche das Kerngerüst des Abschätzverfahrens bildet, haben diese für ungemessene Einzugsgebiete jeweils den wahrscheinlichsten Regimetyp bestimmt, ein typenspezifisches Repräsentativgebiet ausgewählt und von diesem die monatlichen Abflusskoeffizienten übertragen.

Allerdings wurde dieses Schema nur im grundsätzlichen Aufbau übernommen. Die Umsetzung der einzelnen Arbeitsschritte erfolgte mit situationsspezifisch ausgewählten Methoden, die sich zum größten Teil erheblich von den von Aschwanden und Weingartner angeführten Untersuchungsmethoden unterscheiden. Abflussregimes werden hier nicht als der mittlere Jahresgang des Abflusses, sondern als das charakteristische Abflussverhalten eines Jahres verstanden. Deshalb wurde zusätzlich auch die Variabilität der Abflussregimetyten ermittelt. Da die vorliegende Arbeit aus einer Vielzahl von Teilanalysen besteht, wurden der allgemeine Forschungsstand und die eigene methodische Vorgehensweise den einzelnen Kapiteln vorangestellt bzw. in diese integriert.

An dieser Stelle möchte ich, den Mitarbeitern der AG Geosystem-Modellierung, Prof. Dr. Klaus D. Aurada, Dr. Raimund Rödel und Tim Hoffmann für die Idee zu diesem Thema und die Unterstützung bedanken.

Eine digitale Version dieser Arbeit und wichtige Datendateien befinden sich auf der beigefügten CD-ROM.

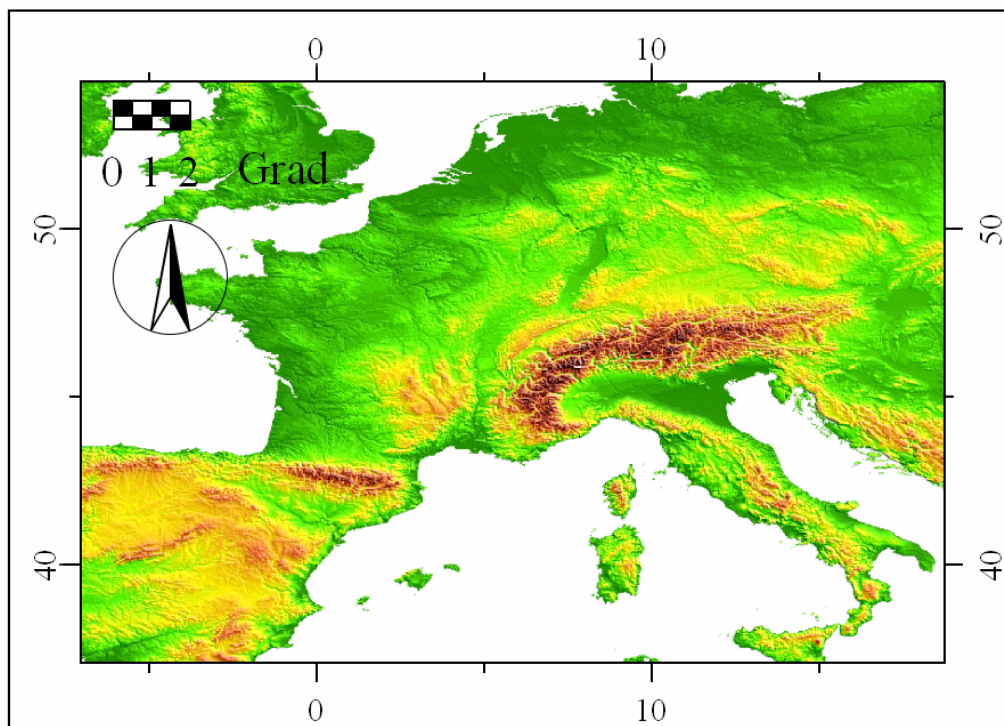
## 2. Ermittlung der Gewässereinzugsgebiete

Die Berechnung der Gewässereinzugsgebiete erfolgte mit der von HOFFMANN (2005) erstellten Software GloDiN-GIS. Der Untersuchungsraum beschränkte sich dabei auf Zentraleuropa, bestehend aus Portugal, Spanien, Frankreich, Italien, Schweiz, Österreich, Deutschland, Dänemark, Belgien, Niederlande und Polen. Grundlage für die Einzugsgebietsermittlung waren global verfügbare Datenquellen.

### 2.1. Datengrundlage

Als globales Höhenmodell wurde das SRTM30 (2003) verwendet, welches aus der Aufnahme der Erdoberfläche mittels aktiven Radarsystems (Synthetic Aperture Radar), im Zuge der „Shuttle Radar Topography Mission“, berechnet wurde. Ein Ausschnitt dieses Höhenmodell-Layers ist in Abbildung 1 dargestellt.

**Abb. 1** Ausschnitt Höhenmodell-Layer

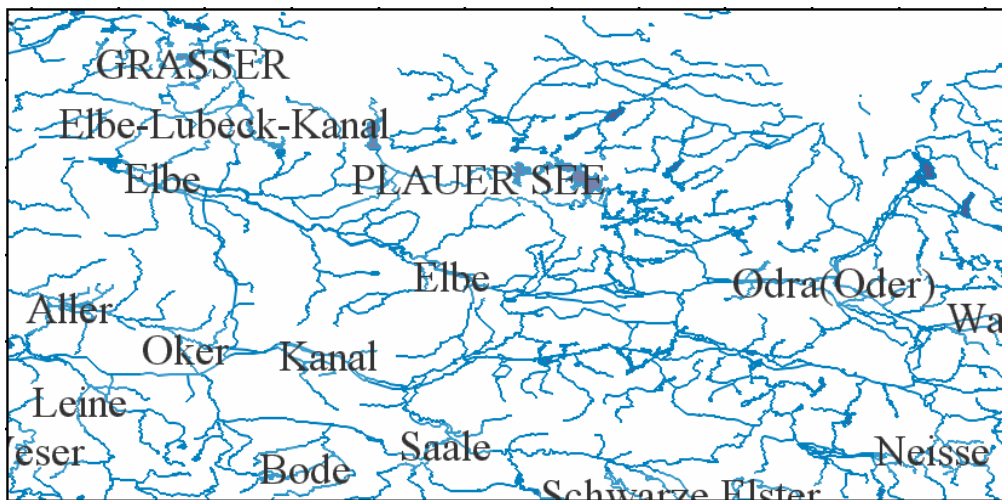


Quelle: dargestellt in GloDiN-GIS

Auf die Ebene des Höhenmodells wurde als nächstes ein Gewässernetz-Layer gelegt. Hierbei handelt es sich um den Hydrographischen Layer des Vektordatensatzes „Digital Charts of the World“ (DCW 1992) von ESRI (Environmental Systems Research Institut Inc.), welcher auf Daten der US Defence Mapping Agency (DMA) basiert. Der Vorteil

dieses Datenbestandes liegt darin, dass er für die gesamte Erdoberfläche kostenlos zur Verfügung steht. Die Informationen in diesem Layer setzen sich aus drei verschiedenen Objekttypen zusammen (HOFFMANN 2004, S.3): Punkte (für Quellen und Senken), Linien (für kleinere und mittlere Fließgewässer) und Polygonflächen (für große Fließgewässer und Standgewässer). In Abbildung 2 ist ein Ausschnitt des Gewässer-Layers abgebildet.

**Abb. 2** Ausschnitt Gewässernetz-Layer



Quelle: dargestellt in GloDiN-GIS

In einem dritten Layer sind die Abflussmessstationen enthalten, welche aus den Archiven des Global Runoff Data Centre, Koblenz (GRDC 2004) und des National Center for Atmospheric Research (NCAR 2004) zusammengestellt wurden.

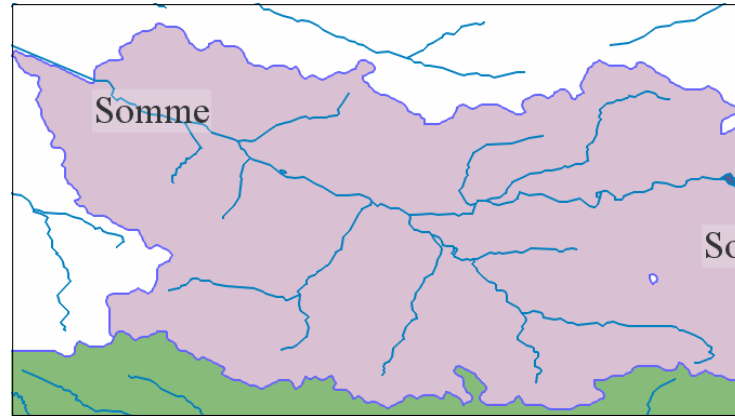
## 2.2. Datenbearbeitung

Das so vorliegende Gewässernetz eignet sich jedoch noch nicht für eine Einzugsgebietsberechnung. Es muss zunächst einem automatischen Korrekturverfahren und einer anschließenden manuellen Kontrolle unterzogen werden. Zielstellung ist eine vollständige, hierarchische und zyklenfreie Gewässerstruktur, wie sie beispielhaft in Abb. 3 dargestellt ist. Diese Struktur wird auch als Graph bezeichnet.

Die wesentlichen Probleme und die sich daraus ergebenden Bearbeitungsschritte sollen hier kurz dargestellt werden. Bei den erforderlichen Arbeitsschritten handelt es sich um die Berechnung von Mündungspunkten, den Anschluss von Binnengewässern, die Überführung von Polygonflächen in Linienäquivalente sowie die Berechnung der

Bifurkationen. Für eine intensivere Auseinandersetzung mit dieser Thematik wird auf HOFFMANN (2004) verwiesen.

**Abb. 3** Gewässergraph eines Einzugsgebietes



Quelle: dargestellt in GloDiN-GIS

#### Berechnung von Mündungspunkten

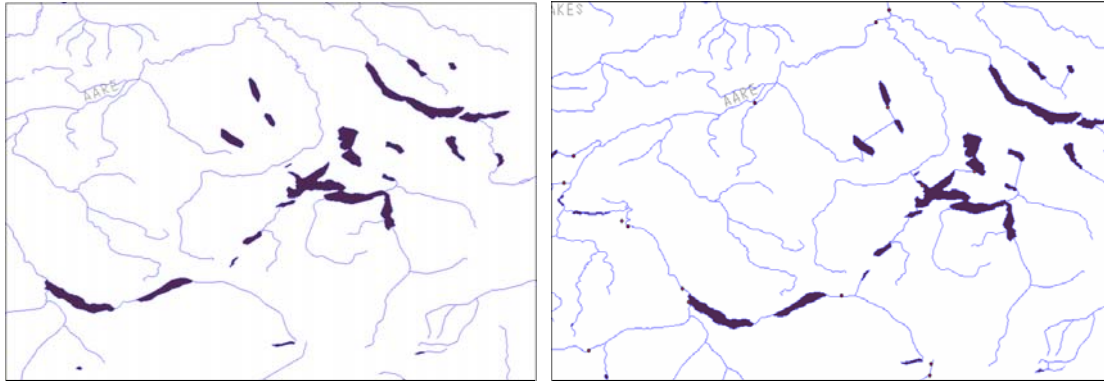
Der erste Schritt ist die Berechnung von Mündungspunkten. Durch eine Analysefunktion, werden an den Einmündungen von Fließgewässern in angrenzende Meere, automatisch Punkte gesetzt und in einem eigenen Layer abgespeichert. Diese Mündungspunkte zum Meer stellen die Senkepunkte in der Gewässerstruktur dar. Eine Senke ist somit der Endpunkt eines Flusssystems, welchem das gesamte oberhalb liegende Einzugsgebiet und der kumulierte Abfluss zugeordnet werden.

#### Anschluss von Binnengewässern

Im Gewässernetz fehlen aufgrund von Digitalisierungsfehlern Flussabschnitte oder durch die Generalisierung sind Zu- und Abflüsse von kleineren Standgewässern nicht vorhanden. Diese anschlusslosen Gewässerstücke müssen durch eine Analysefunktion gefunden und angeschlossen werden, um einen vollständigen Gewässergraphen zu erhalten (vgl. Abb. 4). Die erforderlichen Berechnungen werden auf Grundlage des Höhenmodells vorgenommen (HOFFMANN 2004, S.3). Allerdings kann es hierbei zu Problemen kommen und zwar dann, wenn anschlusslose Gewässerstücke mit dem falschen Gewässergraphen verbunden werden. Beispielsweise bestand in der Digitalisierung eine Lücke zwischen dem Ober- und Unterlauf der Inn. Der Inn-Oberlauf wurde nun aber der Po zugeordnet. Oder die Rhone, vom Rhone-Gletscher bis zum Genfer See, wurde der Aare zugeschlagen, weil im digitalen Gewässernetz der

Anschluss der Rhone zum Genfer See fehlte. Oder der Oberlauf der Notec wurde mit der Wisla verknüpft. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit einer manuellen Kontrolle, ggf. müssen Lücken im digitalen Gewässernetz durch manuelle Nachdigitalisierung beseitigt werden.

**Abb. 4**      Ausschnitte Gewässernetz: links ohne, rechts mit Anschluss



Quelle: dargestellt in GloDiN-GIS

#### Überführung von Polygonflächen in Linienäquivalente

Im Gewässernetz-Layer treten Polygonflächen zur Abbildung von Standgewässern und größeren Fließgewässern auf. Diese Polygone müssen mittels Analysefunktion in den Objekttyp „Linie“ überführt werden, um sie in den Gewässergraphen integrieren zu können.

#### Bifurkationen berechnen

Um einen hierarchischen Graphen zu erhalten, müssen alle Bifurkationen (Zyklen) in der Gewässerstruktur gefunden und durchtrennt werden. Derartige Zyklen können natürlich bedingt sein, sie können aber auch durch anthropogene Eingriffe (z.B. Kanäle) entstanden sein. Außerdem können im digitalen Gewässernetz scheinbare Bifurkationen auftreten, die durch eine Digitalisierung gering aufgelöster Karten, bei eng zusammen liegenden Gewässern, zu erklären sind (HOFFMANN 2004, S.4). Unter Berücksichtigung des Höhenmodells und der Mündungspunkte werden diese Verbindungen mit Hilfe einer Analysefunktion automatisch durchtrennt. Allerdings kann es auch hierbei zu Fehlern kommen, d.h. eine Gewässerstruktur wird an einer falschen Stelle zerschnitten. Beispielsweise wurde zwischen dem Fluss Warta und dem Poludniowy Kanal eine Bifurkation so gesetzt, dass die Warta an dieser Stelle von ihrem Unterlauf abgetrennt wurde und durch den Kanal direkt in die Oder mündete.



Deshalb ist auch hier eine Kontrolle erforderlich. Fehler müssen durch manuelle Korrektur beseitigt werden.

Nach Abschluss dieses Bearbeitungsverfahrens liegt ein zufrieden stellender Gewässernetz-Layer vor. Weiterhin werden noch die Messstationen aus den GRDC- und NCAR-Beständen benötigt, welche über ihre Koordinaten in einen eigenen Layer gespeichert werden. Für den Untersuchungsraum Zentraleuropa betrug die Anzahl der Stationen, in diesem Stadium, 395 Stück. Damit liegen alle erforderlichen Informationen in Form von Datenebenen vor, um mit dem Programm GloDiN-GIS die Berechnung der Einzugsgebiete durchzuführen. Die ermittelten Gewässereinzugsgebiete werden in einem neuen Layer abgelegt und als Polygonflächen dargestellt.

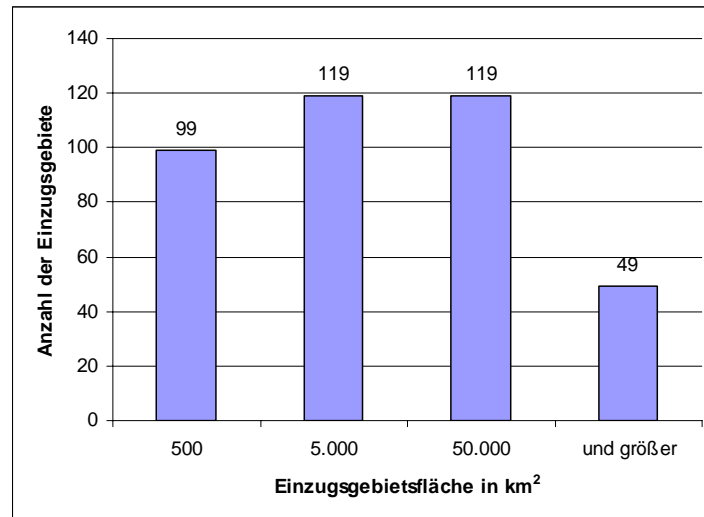
Auch dieses Ergebnis musste im Anschluss einem halbautomatisch unterstütztem Korrekturverfahren unterzogen werden. Dazu wurden mit einer Analysefunktion die berechneten Gebietsflächen, mit den in den GRDC- und NCAR-Datenbanken angegebenen Flächen verglichen. Alle Abweichungen größer 20 Prozent wurden einer manuellen Überprüfung und Berichtigung unterzogen. Folgende Fehlerquellen konnten dabei identifiziert werden. Erstens lagen Messstationen falsch auf dem korrekten Fließgewässer bzw. sie lagen auf einem vollständig verkehrten Gewässergraphen. Zweitens waren Messstationen doppelt vorhanden (je einmal aus GRDC- und NCAR-Archiven). Drittens wurden fehlerhafte Bifurkationen und viertens, aufgrund von Digitalisierungsfehlern, an falsche Einzugsgebiete angeschlossene Binnengewässer festgestellt. Dabei lag der Fehlerschwerpunkt bei Ursache Nummer eins. Anschließend erfolgte die endgültige Berechnung der Gewässereinzugsgebiete.

### 2.3. Darstellung der Ergebnisse

Der Einzugsgebietsberechnung in GloDiN-GIS (HOFFMANN 2005) liegt folgendes Konzept zugrunde. Ausgangspunkt sind die Abflussstationen. Jede dieser Stationen bildet einen Einzugsgebietsausgang. Dabei wird jeder Station die gesamte oberhalb liegende Entwässerungsfläche zugeordnet. D.h. jedes Einzugsgebiet enthält auch die Flächen der oberhalb liegenden Stationen. Damit kumuliert sich die Fläche genauso wie der Abfluss von der Quelle zur Mündung.

In Anlage 1 ist eine Karte mit den berechneten Einzugsgebieten abgebildet. Für den Untersuchungsraum Zentraleuropa wurden insgesamt 386 Gewässereinzugsgebiete mit einer Bandbreite von 6 bis 190.000 km<sup>2</sup> ausgewiesen. Hiervon entfallen 218 Gebiete auf die Größenklasse bis 5.000 km<sup>2</sup> und 168 Gebiete auf die Klasse größer 5.000 km<sup>2</sup> (vgl. Abb. 5).

**Abb. 5**    Häufigkeiten von Gebietsgrößenklassen



Quelle: eigene Darstellung

Nach GRIMM (1968, 2:56) handelt es sich bei Gebietsgrößen zwischen 50 und 5.000 km<sup>2</sup>, bei größeren Maßstäben zwischen 50 und 500 km<sup>2</sup>, um autochthone Einzugsgebiete. Bei ihnen kann das Abflussverhalten der Flüsse als Produkt der umgebenden Landschaft verstanden werden. Bei größeren Einheiten kommt es im Abflussverhalten dagegen zu einer Überlagerung mehrerer autochthoner und ggf. sogar mehrerer allochthoner Einzugsgebiete (ASCHWANDEN / WEINGARTNER 1985, A2.1., M2.1.3.). Auf diese Problematik soll jedoch erst in späteren Kapiteln genauer eingegangen werden.

### **3. Ermittlung von Speicherausbaugraden u. unbeeinflussten Zeitreihen**

Die Ermittlung von Speicherausbaugraden erfolgt ebenfalls mit dem Programm GloDiN-GIS (HOFFMANN 2005). Hierzu sind jedoch neben dem Gewässerlayer und dem Messstationslayer noch weitere Daten erforderlich. Zunächst müssen die Abflussstationen im entsprechenden Layer mit den jeweiligen Abflusszeitreihen aus den GRDC- und NCAR-Beständen (vgl. Kap. 2.1.) verknüpft werden. Anschließend muss ein Talsperrenlayer erzeugt werden.

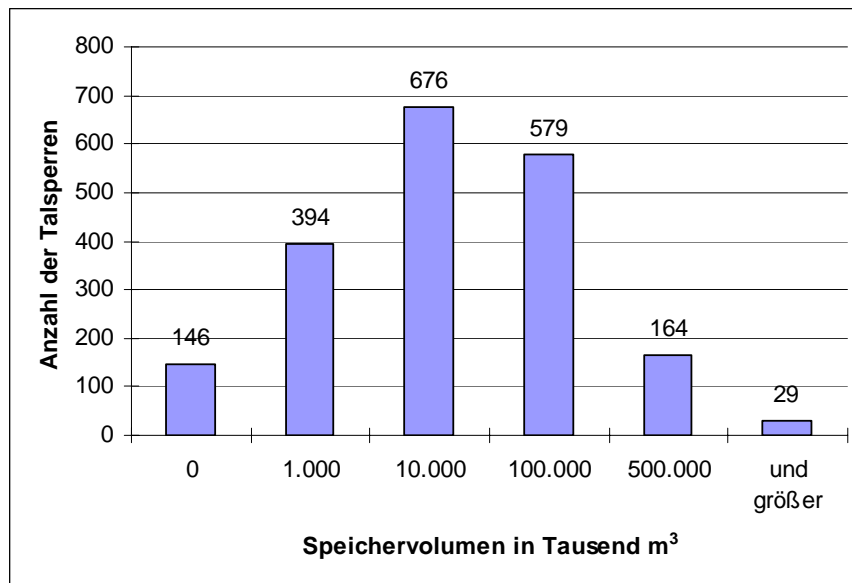
#### **3.1. Georeferenzierung von Talsperren**

Die Datengrundlage für den Talsperrenlayer bildete das World Register of Dams der International Commission on Large Dams (ICOLD 1998). Dieses enthält im globalen Maßstab alle Talsperren ab einer Stauhöhe von größer als 15 m. Zum Vergleich, in Deutschland gilt gem. DIN 19700 ein Absperrbauwerk dann als Talsperre, wenn es eine Höhe von 5 m überschreitet und / oder der Stauinhalt mehr als 100.000 m<sup>3</sup> beträgt (HEITFELD 1991, S. 2f). Im ICOLD-Verzeichnis sind umfangreiche Informationen zu den Talsperren, wie Baujahr, Speichervolumen, Dammhöhe, Dammlänge, Fläche, Fluss und Bauwerksart enthalten. Allerdings gibt es keine Angaben zu den Standortkoordinaten. Deshalb muss zunächst eine Georeferenzierung der Talsperren im Untersuchungsraum erfolgen. D.h. für jede Talsperre muss der konkrete Standort manuell lokalisiert und anschließend manuell digitalisiert werden. Diese aufwendige Sucharbeit wurde von wissenschaftlichen Mitarbeitern, von studentischen Hilfskräften und im Rahmen zahlreicher studentischer Projektarbeiten durchgeführt. Als Hilfsmittel haben sich dabei Talsperrenkarten, z.B. des Schweizerischen Talsperrenkomitees (SWISSDAMS 2003) oder von Kraftwerksbetreibern (AHP 2003), und Onlinekarten (AUSTRIANMAP 2003, MULTIMAP 2004) bewährt. Gewisse Ungenauigkeiten und das Auftreten von Fehlern sind bei dieser Vorgehensweise nicht zu vermeiden. Letztendlich kommt es auch nur darauf an, dass die Talsperren hinter der richtigen Abflussstation liegen. Damit dürfte die Fehlerquote mit steigender Einzugsgebietsgröße abnehmen. Der Talsperrenlayer stellt somit eine starke Generalisierung dar, kann für unsere Zwecke aber als akzeptabler Kompromiss angesehen werden.

Für den Untersuchungsraum Zentraleuropa lag ein Layer mit insgesamt 1988 Talsperren zugrunde. Eine Übersicht dazu bietet die Talsperrenkarte in der Anlage 2. In Abb. 6 ist

die Klassifizierung der Talsperren nach ihrem Speichervolumen dargestellt. Danach ergeben sich folgende Klassengrößen: 1.070 Bauwerke mit einem Volumen bis 10 Mio. m<sup>3</sup>, 579 Bauwerke mit einem Volumen größer 10 Mio. m<sup>3</sup> und kleiner/gleich 100 Mio. m<sup>3</sup> sowie 193 Bauten mit einem Volumen größer 100 Mio. m<sup>3</sup>. Für 146 Talsperren lagen keine Volumenangaben vor.

**Abb. 6** Talsperrenhäufigkeiten nach Volumenklassen



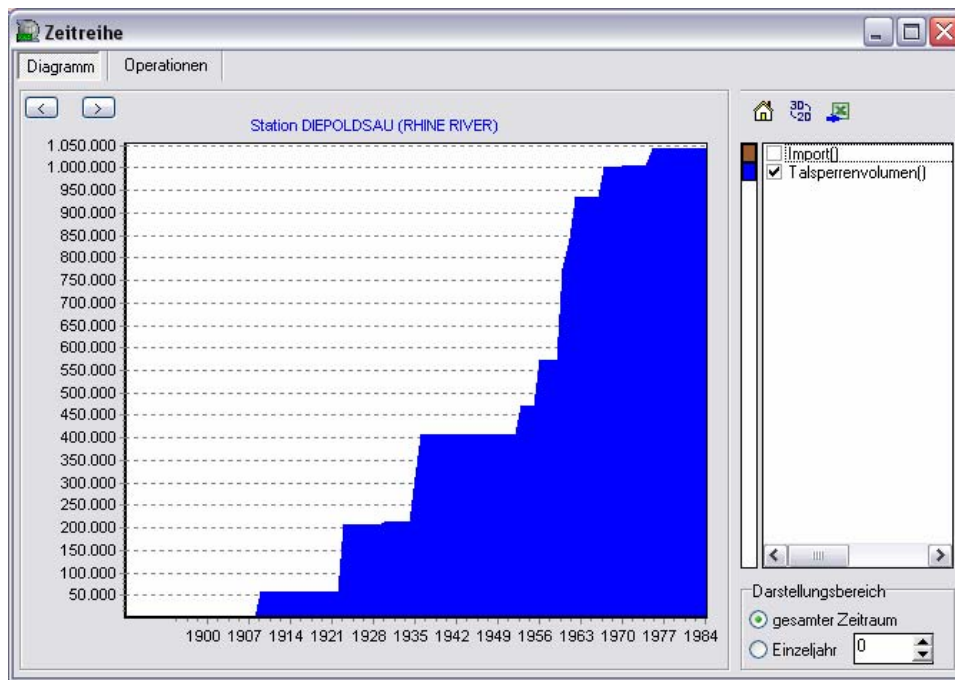
Quelle: eigene Darstellung

### 3.2. Kumulatives Talsperrenvolumen

Um das kumulative Talsperrenvolumen zu ermitteln, ist es zunächst erforderlich, in GloDiN-GIS die Messstationen miteinander zu verknüpfen. Dadurch werden jeder Station alle oberhalb liegenden Stationen mit ihren Einzugsgebieten zugeordnet. Im Anschluss sind die Talsperren mit den Messstationen zu verknüpfen. D.h. jeder Abflussstation werden alle oberhalb liegenden Talsperren zugewiesen. GloDiN-GIS bietet nun die Möglichkeit, sich für jede Abflussstation neben den Abflusszeitreihen auch das kumulative Talsperrenvolumen anzeigen zu lassen. Dabei wird auf einer Zeitachse die Entwicklung des Speichervolumens dargestellt (vgl. Abb. 7). Hieraus lassen sich bereits erste Aussagen zum Beginn der Regulierungswirkung ableiten. So ist in Abb. 7 ein Anstieg des Speichervolumens um 150 Mio. m<sup>3</sup> (1922), um 200 Mio. m<sup>3</sup> (1936) und um 360 Mio. m<sup>3</sup> (1960) festzustellen.

Für den Untersuchungsraum Zentraleuropa beläuft sich das kumulative Talsperrenvolumen, für die 1.842 Speicherräume mit Volumenangaben, auf insgesamt 86.300 Mio. m<sup>3</sup>. Die kumulative Entwicklung von Bauwerken und Speicherkapazitäten ist der Tabelle 1 zu entnehmen. Danach wurden 60% der gesamten Speicherkapazität im Zeitraum von 1951 bis 1970 geschaffen.

**Abb. 7** Kumulatives Talsperrenvolumen für die Station Rhein-Diepoldsau



Quelle: dargestellt in GloDiN-GIS

**Tabelle 1** Entwicklung der Talsperren in Zentraleuropa

Jahr	Anzahl	Volumen Mio. m <sup>3</sup>	Anzahl kum.	Volumen Mio. m <sup>3</sup> kum.
bis 1800	22	33	22	33
1801-1850	9	36	31	69
1851-1900	41	136	72	205
1901-1910	47	334	119	539
1911-1920	53	2.445	172	2.983
1921-1930	131	1.832	303	4.816
1931-1940	125	4.971	428	9.787
1941-1950	134	4.622	562	14.409
1951-1960	347	23.224	909	37.633
1961-1970	341	28.179	1.250	65.812
1971-1980	259	8.877	1.509	74.689
1981-1990	212	6.272	1.721	80.961
nach 1990	109	4.549	1.830	85.511
ohne Angabe	12	785	1.842	86.296
<b>Summe</b>	<b>1.842</b>	<b>86.296</b>		

Quelle: eigene Aufstellung

### 3.3. Speicherausbaugrad und unbeeinflusste Zeitreihensegmente

Bis Anfang der 50er Jahre existierten nur wenige Talsperren mit geringem Speicherraum. Der in den 50er bis 70er Jahren einsetzende intensive Talsperrenbau (vgl. Tab. 1) hat den natürlichen Abfluss stark verändert. Es kam zu einer deutlichen Änderung der innerjährlichen Abflussverteilung, d.h. zu einer Umverteilung der Monatsabflüsse. Beispielsweise wurden oberhalb der Messstation Rhein-Felsberg (Domat/Ems) während des Sommers, beim Aufstau der Schmelzwasserabflüsse, 360 Mio. m<sup>3</sup> Wasser in den Saisonspeichern zurückgehalten (Stauseenutzinhalt 548 Mio. m<sup>3</sup>) und in den Winter umgelagert (EHRLER 1998, 2.3.). In diesem Fall tritt im Winter somit ein erhöhter Abfluss auf, der den natürlichen Abfluss um ein Vielfaches übersteigt. Im Sommer dagegen ist eine dämpfende Wirkung auf den Abfluss festzustellen. Im Ergebnis führt eine Talsperrenbewirtschaftung also zu relativ gleichmäßigen Abflüssen.

Als Maß für die Beeinflussung eines Gewässereinzugsgebietes dient der Speicherausbaugrad. Dieser spiegelt den Anteil des Talsperrenvolumens am jährlichen Gesamtabfluss wieder. Er gibt also den Grad der Abflussverzögerung an (RÖDEL 2001, 2.1.). Für das oben angeführte Beispiel Rhein-Felsberg ergibt sich, bei einem gemessenen mittleren Jahresabfluss (1962-1989) von 3.700 Mio. m<sup>3</sup> und einem Stauseevolumen von 548 Mio. m<sup>3</sup>, ein Speicherausbaugrad in Höhe von 0,15. D.h. es kommt zu einer Abflussverzögerung von 15 Prozent des Jahresabflusses.

Der Speicherausbaugrad wurde mit dem Programm GloDiN-GIS für die 386 Abflussstationen ermittelt und zwar jeweils für alle Jahre der entsprechenden Abflusszeitreihen. Dabei wurde für jede Station das kumulative Talsperrenvolumen eines Jahres ins Verhältnis zum mittleren Jahresabfluss der gesamten Zeitreihe gesetzt.

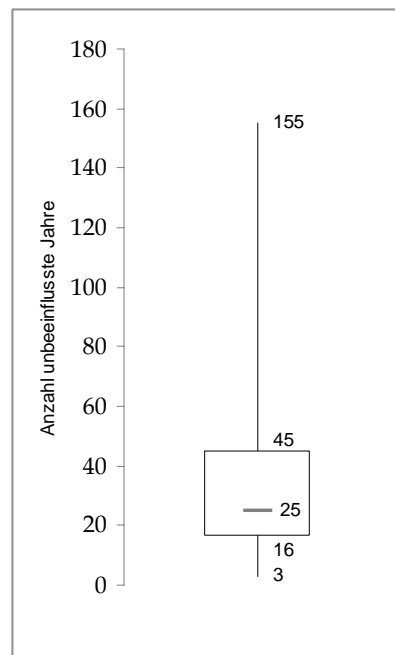
Als Grundlage für die Regimeklassifikation in Kapitel 4 müssen Inhomogenitäten in den Messreihen aufgedeckt werden. Diese entstehen durch Naturereignisse, durch allmähliche Klimaveränderungen und insbesondere durch anthropogene Eingriffe wie dem Talsperrenbau. Inhomogenitäten in Messreihen werden dadurch beseitigt, dass man die Abflusszeitreihen in einen unbeeinflussten und einen beeinflussten Zeitabschnitt unterteilt und nur noch die unbeeinflusste Teilreihe verwendet (ASCHWANDEN / WEINGARTNER 1985, A.3.1.1.).

ASCHWANDEN und WEINGARTNER (1985, A.3.1.1.) haben dazu eine Homogenitätsprüfung mit dem Signifikanztest des Regressionskoeffizienten nach RIEDWYL (1980) durchgeführt.

RÖDEL (2001, 2.3.) hat für Skandinavien den Zeitpunkt der beginnenden Regulierung nach folgender Methode festgestellt. Ausgehend von der Annahme erhöhter Winterabflüsse bei zunehmenden Talsperrenvolumen, wurden die Winterabflüsse einer Zeitreihe mittels einer Clusteranalyse (quadrierte euklidische Distanz als Abstandsmaß, Ward-Methode zur Agglomeration der Gruppen) ausgewertet. Hierbei wurden ähnliche Winterabflüsse gleichen Gruppen zugewiesen. Ein Vergleich des Verlaufs der Cluster innerhalb einer Zeitreihe mit dem Anstieg des kumulativen Talsperrenvolumens, ermöglichte eine Aussage zum Beginn der Regulierungswirkung.

In dieser Arbeit sollen Inhomogenitäten in Zeitreihen mit Hilfe des Speicherausbaugrades identifiziert werden. Als Grenzwert für unbeeinflusste Zeitreihensegmente wurde ein Speicherausbaugrad von kleiner 0,01 festgelegt. D.h. alle Jahre mit einer Abflussverzögerung von weniger als einem 1 Prozent des Jahresabflusses gelten als nicht von Talsperren beeinflusst. In Anlage 3 und 4 sind dazu Karten mit den Speicherausbaugraden für die Jahre 1950 sowie 1970 dargestellt.

**Abb. 8** Boxplot der unbeeinflussten Zeitreihensegmente



Quelle: eigene Darstellung

Von den 386 Messstationen lagen für 274 Stationen unbeeinflusste Zeitreihensegmente und für 112 Stationen ausschließlich beeinflusste Zeitreihen vor. Die unbeeinflussten Zeitabschnitte erstrecken sich dabei über eine Dauer von 3 bis 155 Jahren, bei einem Mittelwert von 34 Jahren (vgl. Abb. 8).



#### **4. Klassifizierung von Abflussregimes**

Abflussregimes sind, in Anlehnung an die klassische Begriffsbestimmung, definiert als die langjährigen mittleren saisonalen Schwankungen des Abflusses eines Fließgewässers (WEINGARTNER/SPREAFICO 1992, 5.2.). Diese statische Betrachtung basiert also auf Mittelwerten langer Zeitreihen. Dadurch bleibt die Variabilität, d.h. die Schwankung des saisonalen Abflussganges innerhalb einer Zeitreihe unberücksichtigt.

In dieser Arbeit soll deshalb unter einem Abflussregime nicht der mittlere Jahresgang des Abflusses verstanden werden, sondern vielmehr das charakteristische Abflussverhalten eines Jahres. Dieses lässt sich nach der Systemtheorie auch als Systemzustand definieren. Da ein System einer fortwährenden Dynamik unterliegt (KLUG/LANG 1983, 2.2.), das Abflussverhalten eines Flusses also von Jahr zu Jahr wechselt, ergeben sich innerhalb einer Zeitreihe somit verschiedene, wechselnde Systemzustände (=Abflussregimes).

Die Regimeklassifikation in diesem Kapitel soll auf Repräsentativjahren basieren. D.h. für jede Messstation wird das eine Jahr (=Systemzustand / =Regime) ausgewählt, welches für die betrachtete Zeitreihe am typischsten ist. Die so ermittelten Repräsentativregimes werden dann einer Klassifizierung zum Ausweis von Regimetypen unterzogen.

##### **4.1. Methodenübersicht bisheriger Regimetypologien**

Zur Abflussregimetypisierung stehen zwei verschiedene Verfahren zur Verfügung, die konventionellen und die Distanzgruppierungsverfahren. Zur klassischen Methode zählen die Arbeiten von PARDE (1947), GRIMM (1968), ASCHWANDEN u. WEINGARTNER (1985), STEIDL (1991) und MADER, STEIDL, WIMMER (1996). Hierbei werden eine Variablenhierarchie definiert und die Beobachtungen mit Hilfe von Schwellenwerten klassiert (RASE 1975, S. 47f). Dieser Ansatz soll jedoch in den folgenden Analysen nicht aufgegriffen werden, weshalb auf eine genauere Darstellung verzichtet werden kann.

Den Einsatz von Distanzgruppierungsverfahren zur Regimetypisierung alpiner Fließgewässer haben ASCHWANDEN und WEINGARTNER (1985, A.3.2.) untersucht. Dabei sollte der mittlere Jahresgang des Abflusses, dargestellt durch 12

Monatskoeffizienten, so gruppiert werden, dass die Unterschiede in den Gruppen möglichst klein, zwischen den Gruppen aber möglichst groß ausfallen. Dazu wurde eine Clusteranalyse mit der euklidischen Distanz als Abstandsmaß durchgeführt. Als Methode zur Agglomeration der Gruppen wurden das nearest neighbour-Verfahren als auch das Zentroidverfahren getestet. Beide Verfahren lieferten ähnliche Ergebnisse und führten nicht zu einer sinnvollen Gruppenbildung. Deshalb wurde auf konventionelle Typisierungsverfahren zurückgegriffen.

RÖDEL (2001, 3.2.1.) dagegen gelang eine Klassifizierung von Abflussregimes mittels hierarchischer Clusteranalyse. Allerdings ging es in dieser Arbeit nicht um den Ausweis regionaler Regimetypen, sondern um Regimetypen innerhalb jährlicher Zeitreihen. D.h. für die einzelnen Messstationen wurde der Abflussgang (=Systemzustand) jeden Jahres zu Typen zusammengefasst. Dazu wurde die hierarchische Clusteranalyse mit dem Verfahren des Linkage innerhalb der Gruppen und dem Kosinus als Ähnlichkeitsmaß gewählt. Diese für jede Station unterschiedlich ausgeschiedenen Regimetypen wurden anschließend auf die regionalen Regimetypen des Untersuchungsraumes reduziert. Dazu wurden alle Regimetypen der Einzelflüsse mit den regionalen Typen klassifiziert (Kosinus und Within-Group-Linkage), bis sie in jeweils einem dieser Cluster gefunden wurden.

#### 4.2. Datenanforderungen bisheriger Regimetypologien

Für eine Abflussregimetypisierung ist eine Reihe von Anforderungen an die Daten zu stellen. Als Orientierungsrahmen für die eigene Arbeit, sollen an dieser Stelle deshalb die Anforderungen bisheriger Typologien kurz angeführt werden.

##### Konsistenz und Homogenität

Messdaten werden als konsistent eingestuft, soweit sie nicht durch Fehler bei der Messung (z.B. Ablesefehler, Stationsverlegung, Gerätewechsel) verfälscht wurden (DYCK 1980, 1:47). Sie sind homogen, soweit keine Sprünge in den Zeitreihen, verursacht durch Naturereignisse oder anthropogene Eingriffe, auftreten. Auf die Beseitigung von Inhomogenitäten wurde bereits in Kapitel 3.3. eingegangen.

Sowohl ASCHWANDEN und WEINGARTNER (1985, A.3.1.1.), als auch STEIDL (1991) und MADER, STEIDL, WIMMER (1996, S. 52) setzen Konsistenz und Homogenität der Abflussmessreihen sowie eine nicht vorhandene anthropogene

Beeinflussung des Abflusses als zwingend voraus. Auch darf das Abflussregime nicht durch größere Seen im Einzugsgebiet modifiziert werden, womit also Stationen am Unterlauf von Seen nicht berücksichtigt werden.

#### Beobachtungsdauer

STEIDL (1991) und MADER, STEIDL, WIMMER (1996, S. 52) haben eine mindestens 10-jährige Beobachtungszeit als Voraussetzung festgelegt. ASCHWANDEN und WEINGARTNER (1985, A.3.1.2.) ermittelten die Beobachtungsdauer für die Messreihen statistisch über eine Schätzung des Stichprobenumfangs normalverteilter Zufallsvariablen. Die empirisch notwendige Beobachtungsdauer für den nordalpinen Raum lag danach bei 8 bis 35 Jahren, für das Mittelland bei mindestens 15 Jahren und für die Südalpen bei mindestens 10 Jahren. Die Frage der Beobachtungszeit bezieht sich dabei auf eine ausreichende Genauigkeit bei der Schätzung der mittleren Regimekoeffizienten.

#### Autochthone Einzugsgebiete

Wie bereits in Kapitel 2.3. angeschnitten, schließt „eine Typisierung als Ausdruck des Zusammenwirkens der Geofaktoren die großen Flüsse aus und betrachtet nur die Abflussregimes autochthoner Flüsse“ (GRIMM 1968, 1:19). Um autochthone Einzugsgebiete handelt es sich bei Gebietsgrößen zwischen 50 und 5.000 km<sup>2</sup>, bei größeren Maßstäben zwischen 50 und 500 km<sup>2</sup> (GRIMM 1968, 2:56).

ASCHWANDEN und WEINGARTNER (1985, A.2.1.) haben aufgrund dieser Überlegungen für ihre mittelmaßstäbliche Untersuchung nur autochthone Einzugsgebiete von 10 bis 500 km<sup>2</sup> verwendet. Die untere Begrenzung von 10 km<sup>2</sup> wurde eingeführt, um eine allzu große Beeinflussung durch lokale Besonderheiten auszuschließen.

MADER, STEIDL, WIMMER (1996, S. 52) folgen diesem Ansatz nicht und setzen lediglich eine Untergrenze von 10 km<sup>2</sup> voraus. Damit handelt es sich bei ihrer Arbeit, mit den Worten von GRIMM (1968, 1:19) ausgedrückt, nur um eine Typisierung des Abflussverhaltens einzelner Flüsse, nicht aber um eine Typisierung des Abflussverhaltens der Flüsse als Produkt der umgebenden Landschaft.

### Wahl der Standardperiode

Für die Untersuchung klimatologischer und hydrologischer Erscheinungen hat die Weltorganisation für Meteorologie (WMO 1977) die Benutzung von Standardperioden empfohlen, bsp. des Zeitabschnitts 1931-1960.

ASCHWANDEN und WEINGARTNER (1985, A.3.1.3.) verzichten auf die Einhaltung dieser Empfehlung und verwenden alle Messreihen ab 1917. Als Begründung führen sie u.a. auf, dass für eine Regimetypisierung eine möglichst große Anzahl von Messreihen benötigt wird, da ansonsten Probleme bei der Raumgliederung auftreten.

### 4.3. Ausweis von Repräsentativjahren

Wie bereits am Anfang des Kapitels 4 einleitend erwähnt wurde, soll die Regimeklassifikation auf Repräsentativjahren basieren. Wie diese ermittelt wurden wird nachfolgend dargestellt.

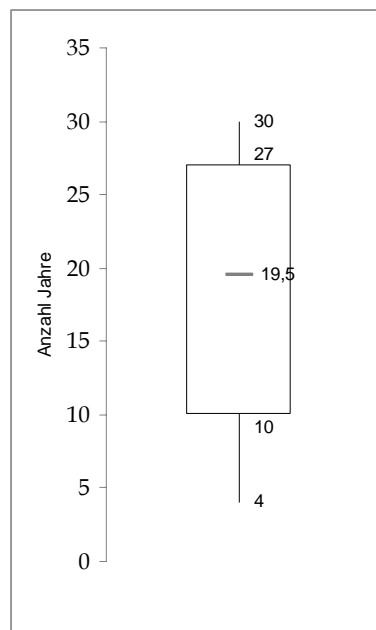
Ausgangspunkt waren die für 274 Stationen vorliegenden unbeeinflussten Zeitreihensegmente (vgl. Kap. 3.3.). Als Untersuchungsperiode wurde der Zeitraum 1931-1960 festgelegt. Dies weniger aufgrund der Empfehlung der WMO (1977), sondern aufgrund der Tatsache, dass in späteren Analysen neben invarianten Gebietskenngrößen auch variante Kenngrößen, welche die klimatischen und witterungsbedingten Verhältnisse in einem Einzugsgebiet beschreiben (WEINGARTNER 1999, S. 19), der Standardperiode 1931-1960 zur Modellierung der räumlichen Variabilität verwendet werden sollen. Für den Zeitraum 1931-1960 waren damit noch für insgesamt 135 Messstationen unbeeinflusste Zeitreihensegmente vorhanden.

Als nächstes war eine Entscheidung zur Beobachtungsdauer zu treffen, die erforderlich ist, um überhaupt unter einer Vielzahl von Jahren pro Station ein Repräsentativjahr zu bestimmen. Um die verbliebenen Daten nicht noch weiter zu reduzieren, wurde eine Mindestdauer von 4 Jahren zugrunde gelegt. Damit beträgt die Anzahl der Messreihen, die für eine Abflussregimeklassifikation zur Verfügung stehen, gleich 128. Diese Teilreihen erstrecken sich dabei über eine Dauer von 4 bis 30 Jahren, bei einem Mittelwert von 19 Jahren (vgl. Abb. 9).

Von diesen 128 Stationsreihen beziehen sich 69 auf autochthone Einzugsgebiete bis zu 5.000 km<sup>2</sup> und 59 auf allochthone Gebiete größer 5.000 km<sup>2</sup>. Trotz der bekannten Problematik soll im nächsten Kapitel eine Klassifikation unter Einschluss aller

Gebietsgrößen durchgeführt werden. Dabei ist allerdings zu überlegen, ob zuvor eine Grobgliederung in autochthone und allochthone Einzugsgebiete vorgenommen werden sollte. Denn aufgrund der großen Flussgebiete ist zu erwarten, dass später mit einer Diskriminanzanalyse eine Trennung der Regimetypen über Gebietskenngrößen, wie bsp. die mittlere Höhenlage, nicht mehr optimal erfolgen kann. D.h. die Regimetypen werden wahrscheinlich allochthone Einzugsgebiete mit invarianten und varianten Parametern verschiedenster Größenordnung enthalten.

**Abb. 9** Boxplot der zur Klassifikation vorhandenen Teilreihen



Quelle: eigene Darstellung

Für die 128 Stationen mit unbeeinflussten Zeitreihensegmenten der Periode 1931-1960 musste nun jeweils ein Repräsentativjahr ermittelt werden. Da der Median recht gut dazu geeignet ist den typischen Jahresgang einer Zeitreihe zu beschreiben, wurde für jede Station das repräsentative Jahr über die Summe der quadrierten Abstände der Monatsabflüsse  $x_i$  zum Median  $y_i$  berechnet (vgl. Formel 1). Das Jahr innerhalb einer Zeitreihe mit der geringsten Summe der quadrierten Abstände wurde als Referenzjahr ausgewiesen.

$$D = \sum_{i=1}^{12} (x_i - y_i)^2 \quad (\text{Formel 1})$$

Aus der Häufigkeitsverteilung der Repräsentativjahre waren bei dieser kleinmaßstäblichen Betrachtung und der geringen Stationsdichte erwartungsgemäß

keine Aussagen abzuleiten. Das Jahr 1951 dominierte mit einer Häufigkeit von 20 Jahren.

#### 4.4. Clusteranalyse zum Ausweis von Regimetypen

Die 128 Repräsentativjahre oder Repräsentativregimes wurden nun einer Clusteranalyse zum Ausweis von Abflussregimetypen unterzogen. Das Ziel einer Clusteranalyse ist die Zusammenfassung von Objekten zu Gruppen. Dabei werden Objekte mit ähnlichen Variablenwerten gleichen Clustern zugeordnet, so dass die Unterschiede in den Gruppen möglichst gering, zwischen den Gruppen aber möglichst groß ausfallen. Dazu werden hierarchische und agglomerative Verfahren benutzt, die die Objekte schrittweise zu immer größeren Clustern zusammenfassen. Bei jedem Schritt werden jeweils die beiden Cluster zu einem neuen Cluster zusammengefasst, welche die größte Ähnlichkeit bzw. die geringste Distanz zueinander aufweisen (STOYAN/STOYAN/JANSEN 1997, S.126ff).

Vor Beginn der eigentlichen Analysephase waren noch einige Vorüberlegungen zu treffen. Zunächst mussten die Monatsabflüsse ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) der Messstationen, welche sich grundsätzlich durch verschiedene Größenordnungen unterscheiden, standardisiert werden. Dazu wurden sie jeweils durch die Jahressumme des Abflusses dividiert. Die so ermittelten Monatskoeffizienten spiegeln also den Anteil eines Monats am gesamten Abfluss des Jahres wieder.

Als nächstes war die Realisierbarkeit der in Kapitel 4.3. in Erwägung gezogenen Grobgliederung von 128 Repräsentativregimes in autochthone und allochthone Regimes abzuwägen. Da die Clusteranalyse in beiden Gruppen zu recht ähnlichen Regimetypen führte, musste dieser Ansatz für eine sinnvolle Klassifikation als nicht geeignet abgelehnt werden. Unabhängig von der weiteren Abflussregimetypisierung in diesem Kapitel, wird dieser Ansatz aber im Kapitel 6 zum Vergleich herangezogen werden.

Abschließend war zu überlegen, ob Ausreißer aus der Objektmenge herausgenommen werden sollten. Ausreißer weisen im Vergleich zu den übrigen Objekten völlig andere Merkmalsausprägungen auf. Nach BACKHAUS u.a. (2000, S. 380f) führen sie dazu, dass der Fusionierungsprozess stark beeinflusst und verzerrt wird. Mit dem Clusteranalyse-Verfahren Single-Linkage und der quadrierten Euklidischen Distanz wurden drei starke und zwei schwache Ausreißer identifiziert:

- > Monte Des Pacheos (9825), Passofonduto (33160), Bodega (80272)
- > Moinho Da Gamitinha (9834), Vent (6243110)

Der folgende Methodentest wurde jeweils mit und ohne Ausreißer durchgeführt. Dabei waren die Unterschiede in der Klassenbildung relativ gering. Einige Verfahren führten ohne Ausschluss zu einer höheren plausiblen Clusteranzahl, andere Verfahren mit Ausschluss.

#### Methodentest: Optimaler Fusionsalgorithmus

Um den optimalen Fusionsalgorithmus zur Regimeklassifikation zu ermitteln, wurden verschiedene Verfahren und Proximitätsmaße getestet. Hierbei führten zwei Ansätze zu befriedigenden Lösungen. Erstens das Linkage innerhalb der Gruppen, auch als Average-Linkage-Within-Groups bezeichnet, mit dem Kosinus als Ähnlichkeitsmaß und zweitens das Complete-Linkage-Verfahren mit der quadrierten Euklidischen Distanz als Abstandsmaß. Die erste Methode erbrachte 10 echte Klassen und 2 nicht verwendbare Gruppen mit den beiden stärksten Ausreißern (9825, 33160). Beim Complete-Linkage-Ansatz wurden die Ausreißer zuvor entfernt. Danach ergaben sich bei der Analyse 10 echte Cluster.

Die Vorteile des Average-Linkage-Algorithmus wurden bei einem anschließenden Vergleich deutlich. Die Cluster waren gegenüber dem Complete-Linkage-Ansatz relativ gleichmäßig besetzt, sie waren in sich homogener und führten räumlich zu deutlichen Konzentrationen. Eine Beurteilung der Homogenität innerhalb der Klassen erfolgte dabei über die Berechnungsformel 2 (quadrierter Abstand Monatsrang Abflusskoeffizient  $x_i$  zu Monatsrang Median  $y_i$  des Clusters  $z$ ; mit  $k$  = Stationen).

$$D = \sum_{k=1}^{128} \sum_{i=1}^{12} (x_i - y_i)^2 \quad (\text{Formel 2})$$

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde analog zu RÖDEL (2001, S. 59) und HAINES, FINLAYSON, MCMAHON (1988) das Verfahren des Linkage innerhalb der Gruppen mit dem Ähnlichkeitsmaß Kosinus als optimale Variante für eine Klassifikation von Regimetypen festgelegt.

#### Grundgliederung von Regimes nach der Variationsbreite

Als Mangel aller Fusionsverfahren erwies sich, dass diese nicht in der Lage waren, richtige mehrgipfelige Regimetypen auszugliedern. Lediglich mit dem Linkage innerhalb der Gruppen und dem Pearson-Korrelationskoeffizienten als Ähnlichkeitsmaß

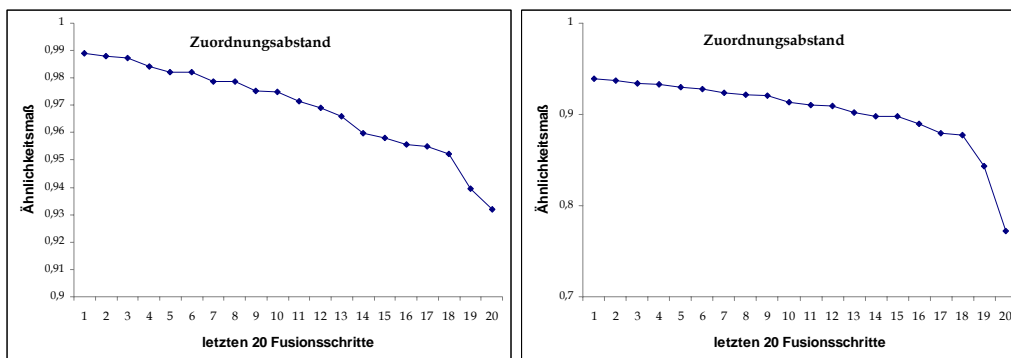
konnten zwei gering besetzte mehrgipfelige Regimetypen klassifiziert werden. Da dieser Weg aber ansonsten zu weniger überzeugenden Ergebnissen führte und für den Untersuchungsraum Mitteleuropa das Fehlen von mehrgipfeligen Regimeklassen nicht akzeptiert werden konnte, musste vor der Clusteranalyse eine Grundgliederung in ein- und mehrgipfelige Regimes erfolgen.

Als Unterscheidungskriterium wurde dazu die Variationsbreite (Differenz zwischen maximalem und minimalem Abflusskoeffizienten) gewählt. Dies lässt sich damit begründen, dass eingipfelige Regimes einen sehr ausgeprägten, mehrgipfelige hingegen einen eher ausgeglichenen Jahresgang aufweisen (ASCHWANDEN/ WEINGARTNER 1985, M.3.2.). Der Schwellenwert für die Zuordnung zu einer der beiden Gruppen wurde dabei auf 0,09 festgelegt. D.h. alle Regimes mit einer Variationsbreite von kleiner als 9 Prozent des Jahresabflusses wurden als mehrgipfelige Jahresgänge ausgegliedert.

#### Clusteranalyse der beiden Grundgruppen

Nun wurden die beiden Grundgruppen (mehrgipfelige Gruppe A mit 29 Stationen, eingipfelige Gruppe B mit 99 Stationen) jeweils einer hierarchischen Clusteranalyse (Average-Linkage-Within-Groups u. Kosinus) unterzogen. Die Anzahl der sinnvoll zu unterscheidenden Regimetypen ergab sich aus den entsprechenden Zuordnungsübersichten und Dendogrammen (vgl. Abb. 10-12). Entscheidend ist dabei jene Stelle, an welcher im Vergleich zu den vorhergehenden Fusionierungsschritten ein starker Heterogenitätszuwachs auftritt. Dieses sog. Elbow-Kriterium (BACKHAUS u.a. 2000, S. 375f) lässt sich in der graphischen Darstellung in Abb. 10 besonders deutlich erkennen.

**Abb. 10** Zuordnungsübersichten (links: Gruppe A, rechts: Gruppe B)

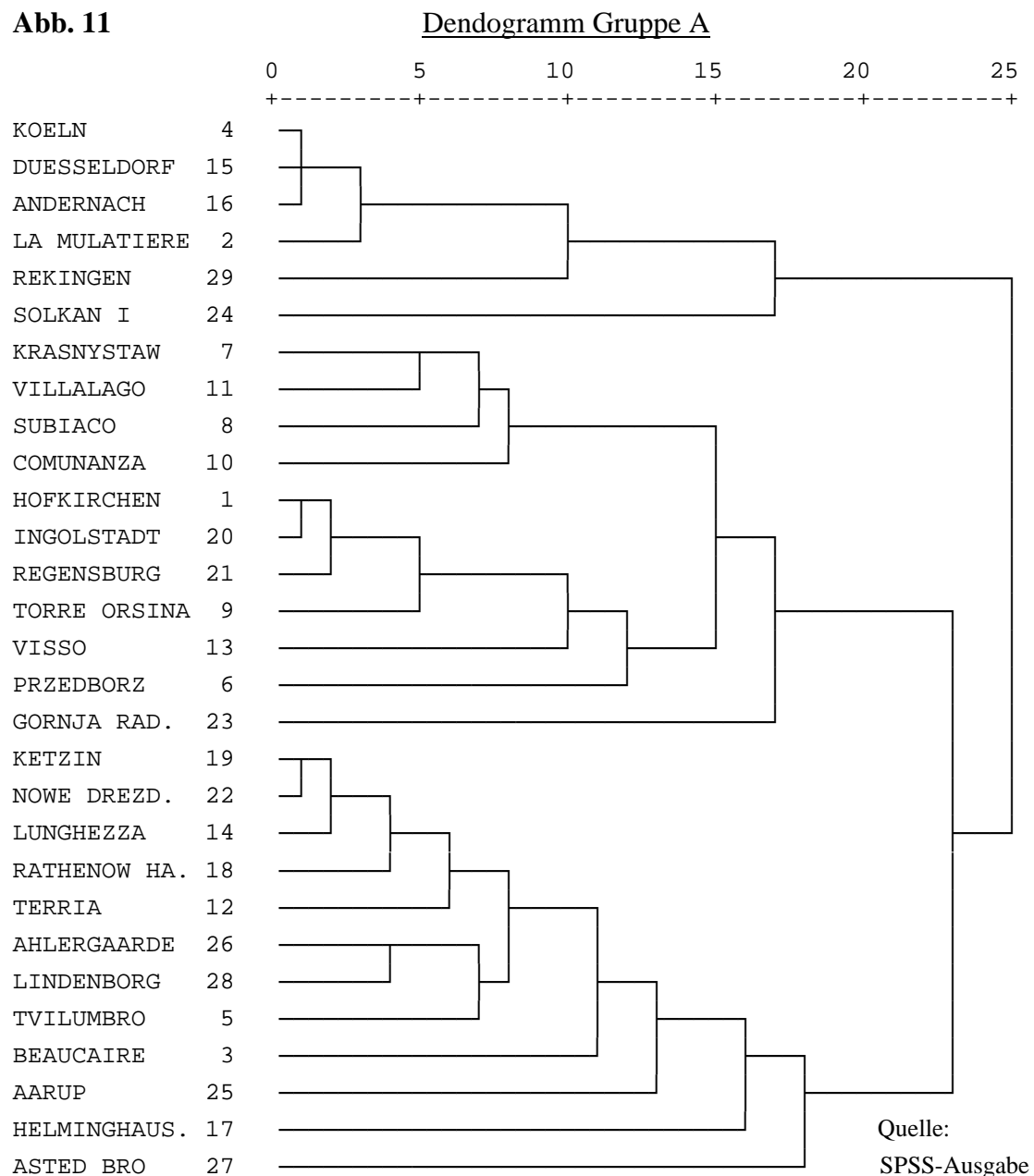


Quelle: Eigene Darstellung



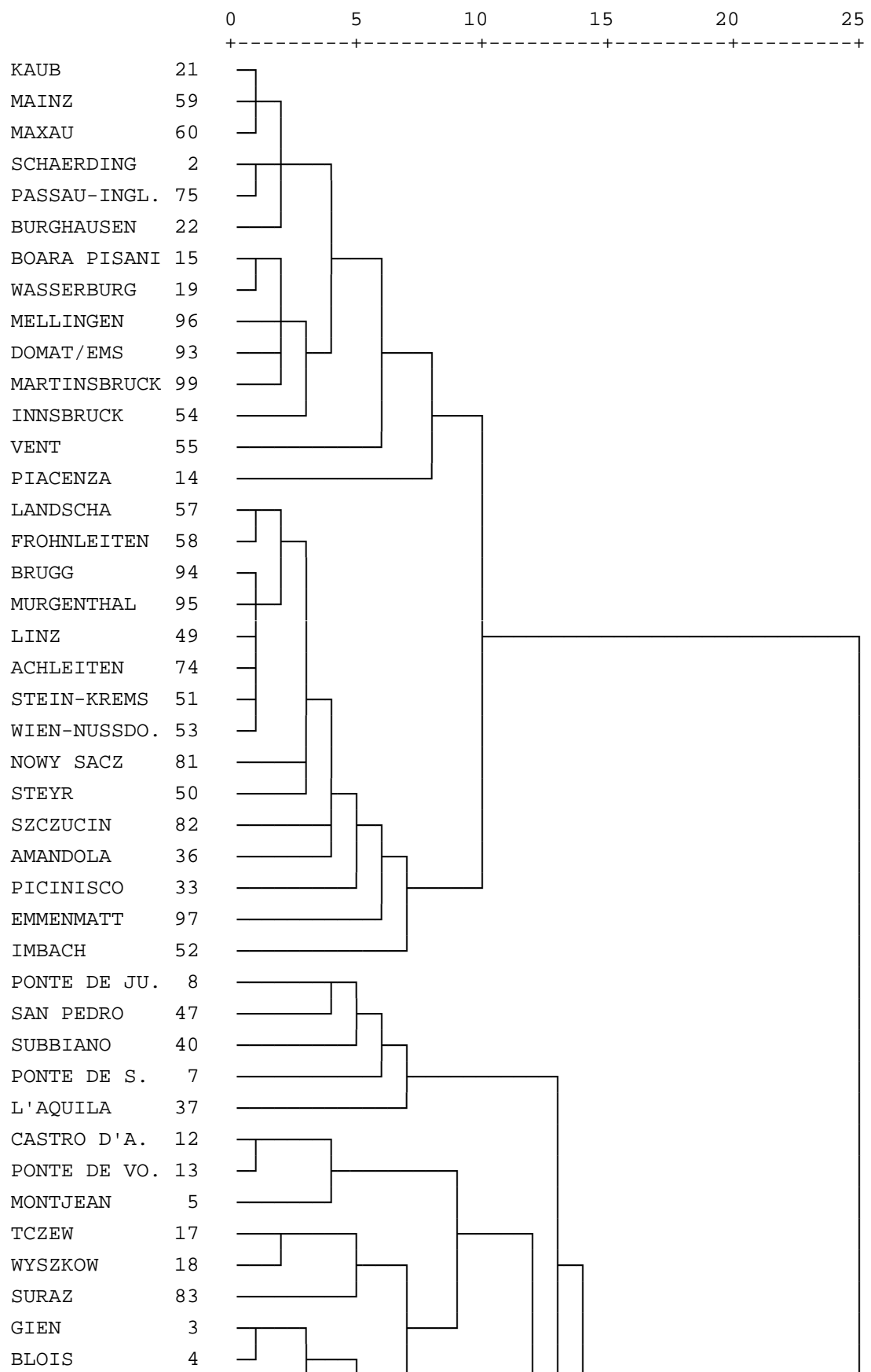
In der Gruppe A, mit einer Variationsbreite kleiner 0,09, ist aufgrund der geringen Gruppenstärke nur eine 3-Cluster-Lösung sinnvoll, was durch das Dendrogramm (vgl. Abb. 11) auch verdeutlicht wird. Für die Gruppe B ist sowohl beim Übergang vom 12. zum 11., als auch beim Übergang vom 9. zum 8. Cluster ein Heterogenitätssprung festzustellen. Bei Bildung von 9 Klassen wäre der Informationsverlust zu hoch gewesen, d.h. wir hätten nur 7 echte Cluster erhalten und außerdem wäre die glazionivale Klasse in der nivalen Klasse untergegangen. Deshalb wurde die 12-Cluster-Lösung favorisiert. Hieraus ergaben sich 9 echte Regimetypen und 3 Klassen mit jeweils einem Ausreißer (Klasse: 4, 9, 11), die keine weitere Berücksichtigung fanden. Eine Übersicht über die Klassenstärken ist der Tabelle 2 zu entnehmen.

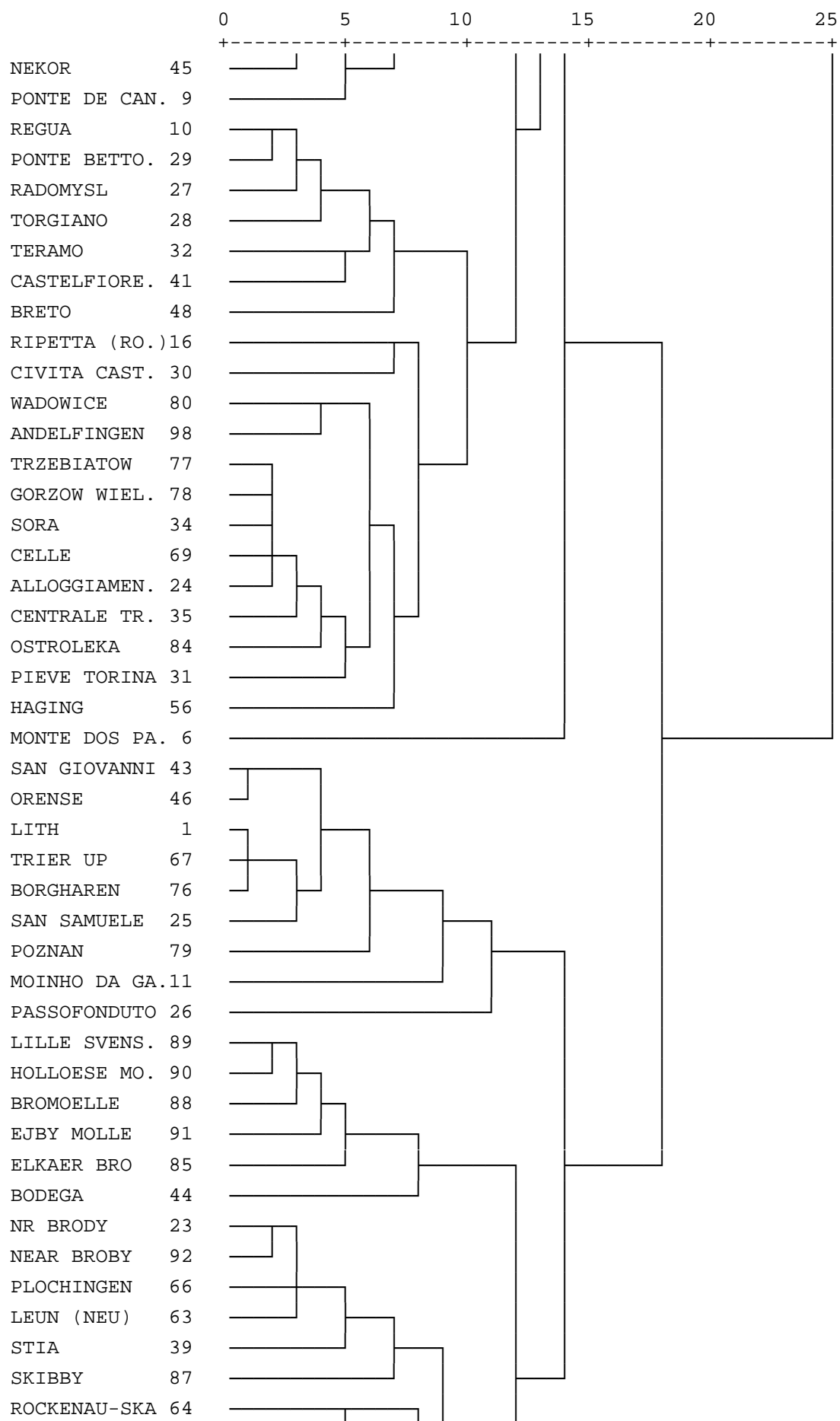
**Abb. 11**

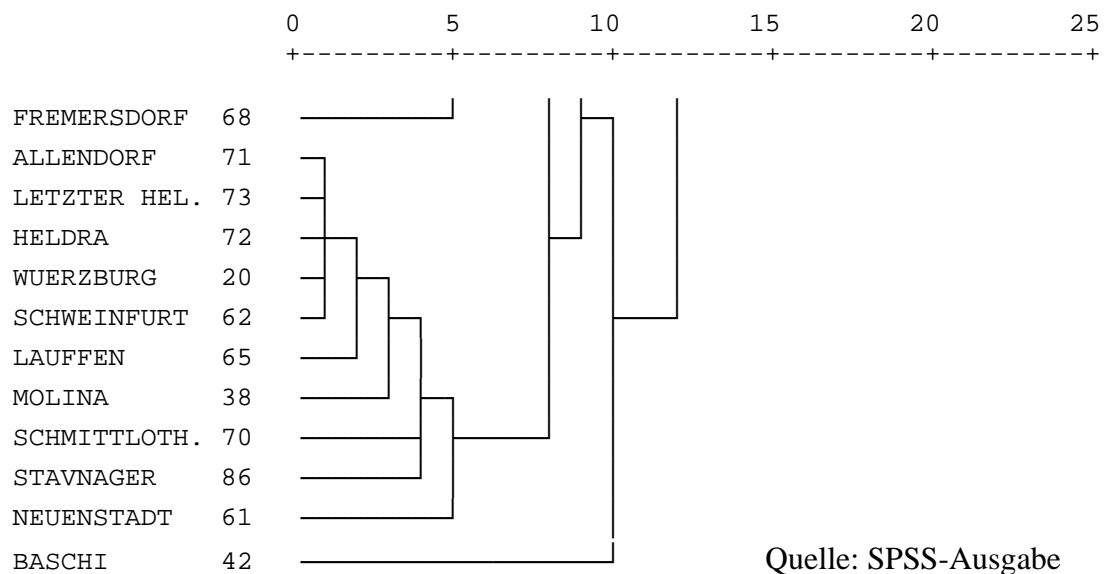


**Abb. 12**

Dendogramm Gruppe B







**Tabelle 2** Klassenstärken der Regimetypen (nach Clusteranalyse)

Cluster-Nr.	Gruppe A			Gruppe B									Ausreißer		
	1	2	3	1	2	3	5	6	7	8	10	12	4	9	11
Anzahl Stationen	11	6	12	8	14	10	5	7	13	18	15	6	1	1	1

Quelle: Eigene Aufstellung

### Korrektur der hierarchischen Clusteranalyse

Zur Korrektur der Clusteranalysen wurden nachfolgend für die Gruppen A und B Diskriminanzanalysen mit den gleichen Variablen, den 12 Monatskoeffizienten, durchgeführt. Hiermit sollte die Eignung der Variablen für die Clusterbildung überprüft werden, d.h. es sollte festgestellt werden, welche Variablen signifikant zur Trennung der bestehenden Gruppen beitragen. Dazu wurde die iterative Vorgehensweise mit dem Gütemaß Wilks Lambda gewählt, bei der die Variablen einzeln nacheinander in die Diskriminanzfunktionen einbezogen werden. Dabei wird in jedem Schritt jeweils diejenige Variable ausgewählt, die das Gütekriterium Wilks Lambda minimiert. Das iterative Verfahren kommt zum Abbruch, wenn ein für die Aufnahme einer Variablen gefordertes Signifikanzniveau von keiner der noch nicht einbezogenen Variablen erreicht wird (BAHRENBURG/GIESE/NIPPER 1992, S.347). In diesem Fall wurde als Signifikanzniveau eine F-Wahrscheinlichkeit von 0,05 festgelegt. D.h. eine Variable wird nur dann aufgenommen, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit für den F-Wert unter 5 Prozent liegt, sie also signifikant zur Verbesserung der Diskriminanz beiträgt.

In der Gruppe A wurden die Monate Juni, Mai, Dezember und November in die Diskriminanzfunktionen aufgenommen. Zur Trennung der Gruppen trugen also nur 4

Variablen signifikant bei. Die Klassifikation erfolgte dabei mit der maximalen Anzahl von 2 Diskriminanzfunktionen. Das Ergebnis entsprach zu 93,1 Prozent der ursprünglichen Gruppenbildung durch die Clusteranalyse. Es wurden 2 Stationen umgruppiert.

Für die Gruppe B konnten mit Hilfe der schrittweisen Diskriminanzanalyse 7 erklärende Variablen selektiert und die ersten 7 Diskriminanzfunktionen berücksichtigt werden. Folgende Monate trugen zu einer optimalen Trennung der bestehenden 12 Gruppen bei: Januar, Februar, Dezember, April, Mai und Juni. Die Gruppenbildung der Clusteranalyse wurde dabei zu 94,9 Prozent bestätigt. 5 Stationen wurden in andere Klassen verlegt. Ein Überblick über die verfahrensmäßigen Umgruppierungen ist in der Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3** Klassenumbildungen durch die Diskriminanzanalyse

Nr.	Gruppe	Station	Stations-ID	Cluster-Nr. ALT	Cluster-Nr. NEU
1	A	VISSO	34122	1	3
2		SOLKAN I	6549100	2	1
3	B	TCZEW	9871	3	7
4		PIEVE TORI.	34107	7	6
5		AMANDOLA	34113	10	6
6		MOLINA	34116	8	7
7		EMMENMATT	6935320	10	7

Quelle: Eigene Aufstellung

**Tabelle 4** Klassenstärken nach Abschluss des Korrekturverfahrens

Cluster-Nr.	Gruppe A			Gruppe B									Ausreißer		
	1	2	3	1	2	3	5	6	7	8	10	12	4	9	11
Anzahl Stationen	11	5	13	8	14	9	5	9	14	17	14	6	1	1	1

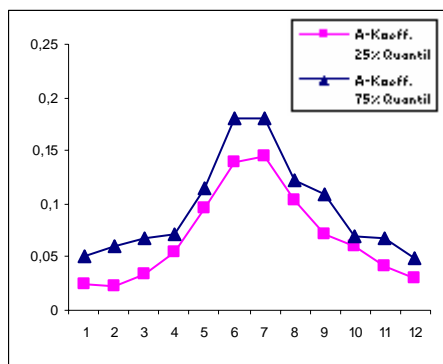
Quelle: Eigene Aufstellung

Diese Umgruppierungen wurden anschließend anhand der Regimekurven und der geographischen Lage auf Plausibilität überprüft. Für 6 Stationen konnten die erfolgten Verlegungen bestätigt werden, nicht aber für die Station Emme-Emmenmatt, welche aus Cluster 10 (Nival) in die Klasse 7 (Pluvial) versetzt wurde. Für Emmenmatt erfolgte deshalb eine manuelle Korrektur zurück in den nivalen Regimetyp. Zum Vergleich, ASCHWANDEN und WEINGARTNER (1985) haben Emme-Emmenmatt als repräsentative Station für den Regimetyp Nivo-Pluvial Prealpin des Mittellandes ausgewiesen. Abschließend sind in Tabelle 4 die endgültigen Clusterstärken aufgeführt.

## 4.5. Darstellung der Regimetypen

In diesem Kapitel erfolgt eine Charakterisierung der 12 gebildeten Abflussregimetypen anhand ihrer klassenspezifischen hydrologischen Kennwerte. Dabei werden in den Diagrammen jeweils die Schwankungsbereiche der Abflusskoeffizienten zwischen dem 25 und 75 Prozent Quantil abgebildet. Zusätzlich werden für jede Klasse die Repräsentativstationen angegeben sowie für ausgewählte Stationen die Regimekurven dargestellt. Abschließend sind in der Anlage 5 und 6 Karten mit ausgewählten Abflussregimetypen beigelegt.

### Regime Glazio-Nival (Gruppe B, Klasse 2)



**Abb. 13** Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten (Eigene Darstellung)

Monat	A-Koeff. 25% Quantil	A-Koeff. 75% Quantil	A-Koeff. Median	Rang Median
1	0,025	0,050	0,041	1
2	0,023	0,059	0,044	3
3	0,033	0,069	0,050	4
4	0,054	0,071	0,065	6
5	0,096	0,115	0,106	9
6	0,139	0,181	0,159	12
7	0,145	0,181	0,155	11
8	0,103	0,123	0,116	10
9	0,072	0,109	0,093	8
10	0,060	0,069	0,065	7
11	0,041	0,068	0,055	5
12	0,030	0,049	0,042	2

**Tabelle 5**

### Repräsentative Stationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	Fläche km <sup>2</sup>	Var.-Breite <sup>*1</sup>	Jahr <sup>*2</sup>	Abstand <sup>*3</sup>
1	6343900	PASSAU-INGLING	INN	25.896	0,116	1936	10
2	33053	WASSERBURG	INN	12.008	0,148	1940	12
3	6243030	INNSBRUCK	INN	5.185	0,219	1954	14
4	6935145	DOMAT/EMS	RHINE RIVER	3.484	0,195	1946	14
5	9850	BOARA PISANI	ADIGE (ETSCH)	14.610	0,146	1946	15
6	9794	SCHAERDING	INN	25.790	0,104	1936	18
7	6943100	MARTINSBRUCK	INN	1.937	0,192	1952	21
8	6335200	MAXAU	RHINE RIVER	52.952	0,111	1933	22
9	33068	BURGHAUSEN	SALZACH	5.774	0,103	1942	38
10	6243110	VENT	VENTER ACHE	176	0,321	1959	39
11	6935310	MELLINGEN	REUSS	3.461	0,158	1946	50
12	33064	KAUB	RHINE	107.443	0,090	1933	68
13	6335150	MAINZ	RHINE RIVER	102.453	0,094	1933	68
14	9849	PIACENZA	PO	42.031	0,109	1931	190

\*1: Variationsbreite (Differenz maximaler u. minimaler Abflusskoeffizient)

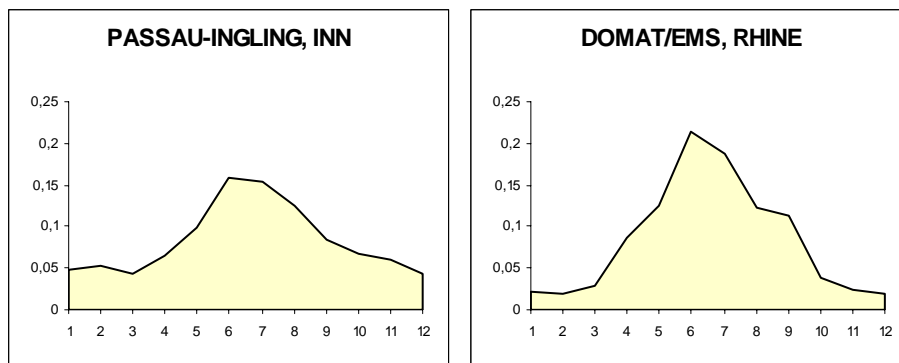
Quelle: Eigene Aufstell.

\*2: Repräsentativjahr des unbeeinflussten Zeitreihenabschnittes der Standardperiode 1931-1960

\*3: Summe der quadrierten Abstände der Monatsränge von den Monatsrängen des Cluster-Median

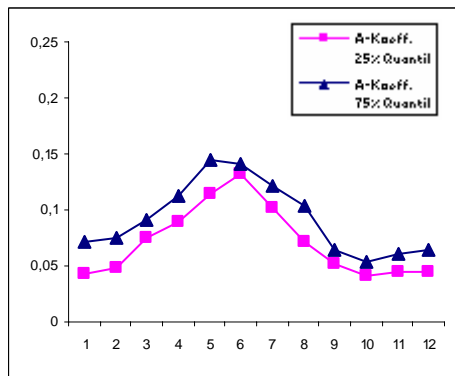
Das Regime Glazio-Nival ist durch die Monatsrangfolge Juni > Juli > Aug. > Mai gekennzeichnet. Auf diese vier abflussreichsten Monate entfallen ca. 54 Prozent des Jahresabflusses. Der maximale Abflusskoeffizient schwankt dabei von 0,14 bis 0,18 (25 u. 75% Quantil). Die minimalen Abflüsse liegen in den Monaten Dezember bis März, welche sich kaum voneinander unterscheiden, mit ca. 13 Prozent der jährlichen Abflussmenge. Die mittlere Variationsbreite beträgt 0,15. Geographisch konzentrieren sich die repräsentativen Stationen auf die Alpen und das Alpenvorland.

**Abb. 14** Ausgewählte repräsentative Stationen



Quelle: Eigene Darstellung

#### Regime Nival (Gruppe B, Klasse 10)



**Abb. 15** Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten (Eigene Darstellung)

Monat	A-Koeff. 25% Quantil	A-Koeff. 75% Quantil	A-Koeff. Median	Rang Median
1	0,042	0,071	0,067	5
2	0,049	0,076	0,069	6
3	0,076	0,091	0,083	7
4	0,090	0,112	0,102	9
5	0,115	0,144	0,131	11
6	0,132	0,142	0,139	12
7	0,102	0,122	0,108	10
8	0,071	0,103	0,094	8
9	0,052	0,065	0,060	4
10	0,041	0,053	0,043	1
11	0,045	0,062	0,049	2
12	0,045	0,065	0,056	3

Charakteristisch für das Regime Nival ist folgende Rangfolge der Monatskoeffizienten: Juni > Mai > Juli > April. 48 Prozent des Jahresabflusses fallen auf diese Monate. Der maximale Abflusskoeffizient schwankt von 0,13 bis 0,14 (25 u. 75% Quantil). Die minimalen Abflüsse liegen in den Monaten September bis Dezember mit ca. 21 Prozent

der jährlichen Abflussmenge. Die mittlere Variationsbreite beträgt 0,11. Fast alle repräsentativen Stationen befinden sich im Alpenvorland.

**Tabelle 6** Repräsentative Stationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	Fläche km <sup>2</sup>	Var.-Breite <sup>*1</sup>	Jahr <sup>*2</sup>	Abstand <sup>*3</sup>
1	6242400	STEIN-KREMS	DANUBE	95.923	0,096	1951	2
2	6242500	WIEN-NUSSDORF	DANUBE	101.542	0,100	1951	2
3	6242100	LINZ	DANUBE	79.510	0,098	1951	4
4	6342900	ACHLEITEN	DANUBE RIVER	76.754	0,101	1951	6
5	6935302	MURGENTHAL	AARE	10.217	0,105	1941	9
6	6935301	BRUGG	AARE	11.044	0,098	1941	14
7	6242250	STEYR	ENNS	6.216	0,153	1951	37
8	6246610	FROHNLEITEN	MUR	6.548	0,106	1957	44
9	6246601	LANDSCHA	MUR	8.318	0,101	1957	46
10	6458406	NOWY SACZ	DUNAJEC	4.339	0,109	1954	69
11	6458450	SZCZUCIN	WISLA	24.874	0,093	1935	104
12	6935320	EMMENMATT	EMME	474	0,115	1934	183
13	34110	PICINISCO	MELFA	57	0,111	1950	222
14	6242420	IMBACH	KREMS	325	0,150	1954	268

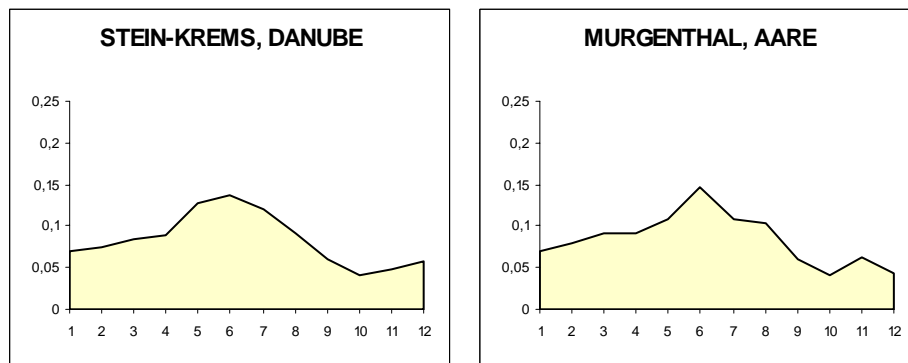
\*1: Variationsbreite (Differenz maximaler u. minimaler Abflusskoeffizient)

Quelle: Eigene Aufstell.

\*2: Repräsentativjahr des unbeeinflussten Zeitreihenabschnittes der Standardperiode 1931-1960

\*3: Summe der quadrierten Abstände der Monatsränge von den Monatsrängen des Cluster-Median

**Abb. 16** Ausgewählte repräsentative Stationen



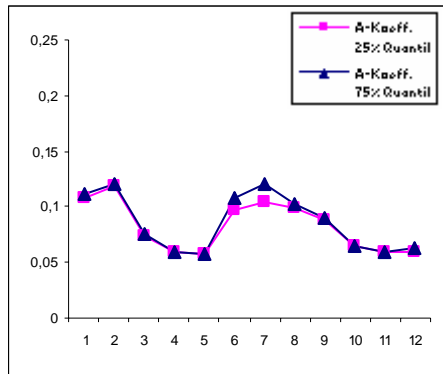
Quelle: Eigene Darstellung

### Regime Nivo-Pluvial I (Gruppe A, Klasse 2)

Es handelt sich hierbei um ein komplexes Abflussregime mit zwei Gipfeln. Das erste Maximum befindet sich in den Monaten Februar > Januar mit ca. 23 Prozent des Jahresabflusses. Der maximale Abflusskoeffizient schwankt zwischen 0,11 und 0,12 (25 u. 75% Quantil). In der Reihenfolge Juli > Juni > August bildet sich ein zweites starkes Maximum mit einem Anteil von 31 Prozent des Jahresabflusses heraus. Die Abflussminima befinden sich im April bis Mai mit 12 Prozent sowie im Oktober bis



Dezember mit 19 Prozent der Jahresabflussmenge. Die mittlere Variationsbreite beträgt 0,07. Ein räumlicher Schwerpunkt der repräsentativen Stationen ist am Rhein im Übergangsbereich von der Zentraleuropäischen Mittelgebirgsschwelle zum Norddeutschen Tiefland zu verzeichnen.



**Abb. 17** Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten (Eigene Darstellung)

Monat	A-Koeff. 25% Quantil	A-Koeff. 75% Quantil	A-Koeff. Median	Rang Median
1	0,108	0,112	0,110	11
2	0,118	0,121	0,119	12
3	0,074	0,075	0,075	6
4	0,059	0,060	0,059	2
5	0,057	0,058	0,058	1
6	0,097	0,107	0,100	9
7	0,105	0,121	0,108	10
8	0,099	0,102	0,099	8
9	0,089	0,090	0,089	7
10	0,064	0,066	0,065	5
11	0,059	0,059	0,059	3
12	0,059	0,063	0,062	4

**Tabelle 7** Repräsentative Stationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	Fläche km <sup>2</sup>	Var.-Breite <sup>*1</sup>	Jahr <sup>*2</sup>	Abstand <sup>*3</sup>
1	33065	KOELN	RHINE	148.261	0,062	1938	2
2	6335050	DUESSELDORF	RHINE RIVER	149.849	0,064	1938	4
3	6335070	ANDERNACH	RHINE RIVER	142.446	0,061	1938	8
4	9800	LA MULATIERE	RHONE	46.908	0,087	1938	16
5	6935054	REKINGEN	RHINE RIVER	14.653	0,075	1941	250

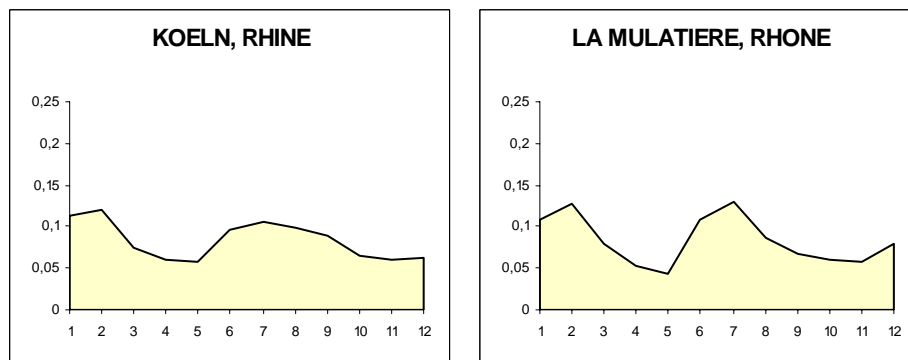
\*1: Variationsbreite (Differenz maximaler u. minimaler Abflusskoeffizient)

Quelle: Eigene Aufstell.

\*2: Repräsentativjahr des unbeeinflussten Zeitreihenabschnittes der Standardperiode 1931-1960

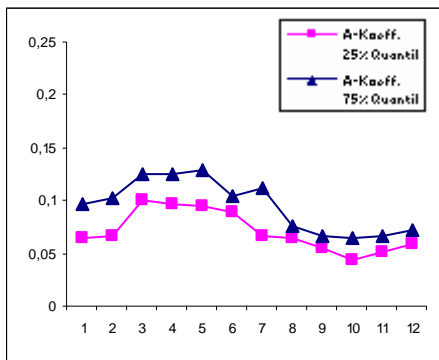
\*3: Summe der quadrierten Abstände der Monatsränge von den Monatsrängen des Cluster-Median

**Abb. 18** Ausgewählte repräsentative Stationen



Quelle: Eigene Darstellung

## Regime Nivo-Pluvial II (Gruppe A, Klasse 1)



**Abb. 19** Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten (Eigene Darstellung)

Monat	A-Koeff. 25% Quantil	A-Koeff. 75% Quantil	A-Koeff. Median	Rang Median
1	0,064	0,097	0,085	6
2	0,066	0,102	0,087	7
3	0,100	0,126	0,107	11
4	0,097	0,125	0,101	9
5	0,095	0,128	0,111	12
6	0,089	0,105	0,097	8
7	0,066	0,111	0,103	10
8	0,064	0,077	0,071	5
9	0,055	0,066	0,061	2
10	0,044	0,064	0,058	1
11	0,052	0,067	0,061	3
12	0,058	0,072	0,065	4

Das mehrgipfelige Regime Nivo-Pluvial II zeichnet sich durch ein Hauptmaximum im Mai > März > April mit 32 Prozent des Jahresabflusses aus. Der maximale Abflusskoeffizient schwankt dabei zwischen 0,10 und 0,13 (25 u. 75% Quantil). Das zweite, schwächere Maximum fällt auf den Juli mit ca. 10 Prozent der Jahresabflussmenge. Mit einem Anteil von 25 Prozent vom Jahresabfluss bilden die Monate September bis Dezember das Abflussminimum. Die mittlere Variationsbreite beträgt 0,07. Zu einer räumlichen Konzentration der Repräsentativstationen kommt es im Alpenvorland sowie in den Apenninen in der Region Mittelitalien (Abruzzen, Umbrien).

**Tabelle 8** Repräsentative Stationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	Fläche km <sup>2</sup>	Var.-Breite <sup>*1</sup>	Jahr <sup>*2</sup>	Abstand <sup>*3</sup>
1	34105	TORRE ORSINA	NERA	1.461	0,044	1942	20
2	6342500	INGOLSTADT	DANUBE	20.141	0,072	1951	58
3	9784	HOFKIRCHEN	DANUBE	47.608	0,066	1951	68
4	34104	SUBIACO	ANIENE	226	0,087	1956	73
5	6342600	REGENSBURG	DANUBE	36.151	0,076	1951	88
6	6546610	GORNJA RADGONA	MURA	10.299	0,084	1957	106
7	33189	KRASNYSTAW	WIEPRZ	3.060	0,073	1951	145
8	34114	COMUNANZA	ASO	127	0,061	1936	153
9	6549100	SOLKAN I	SOCA	1.533	0,083	1957	210
10	33186	PRZEDBORZ	PILICA	2.368	0,065	1955	223
11	34117	VILLALAGO	SAGITTARIO	94	0,067	1951	227

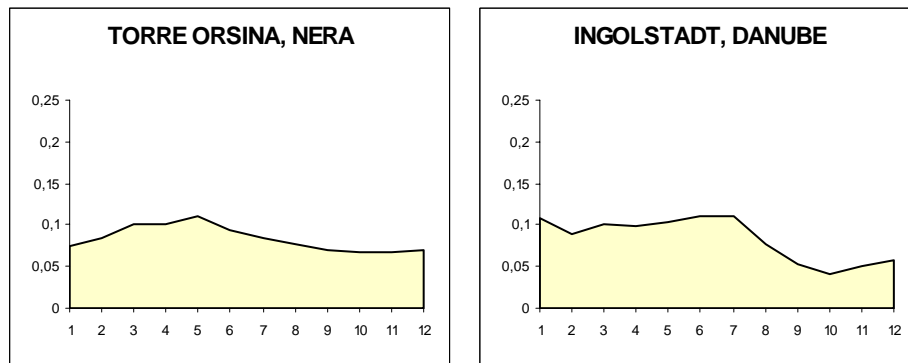
\*1: Variationsbreite (Differenz maximaler u. minimaler Abflusskoeffizient)

Quelle: Eigene Aufstell.

\*2: Repräsentativjahr des unbeeinflussten Zeitreihenabschnittes der Standardperiode 1931-1960

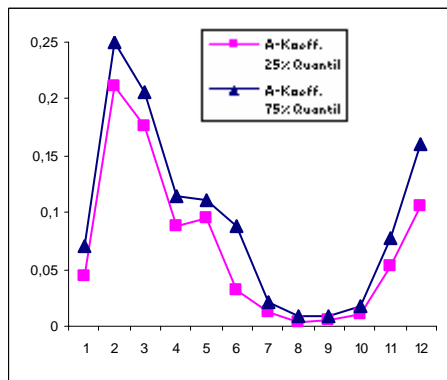
\*3: Summe der quadrierten Abstände der Monatsränge von den Monatsrängen des Cluster-Median

**Abb. 20** Ausgewählte repräsentative Stationen



Quelle: Eigene Darstellung

Regime Pluvio-Nival-Sommertrocken I (Gruppe B, Klasse 5)



Monat	A-Koeff. 25% Quantil	A-Koeff. 75% Quantil	A-Koeff. Median	Rang Median
1	0,045	0,070	0,058	6
2	0,211	0,250	0,212	12
3	0,175	0,205	0,205	11
4	0,088	0,114	0,088	8
5	0,095	0,110	0,103	9
6	0,031	0,089	0,044	5
7	0,013	0,021	0,018	4
8	0,004	0,009	0,006	1
9	0,006	0,009	0,006	1
10	0,011	0,018	0,013	3
11	0,053	0,077	0,063	7
12	0,105	0,161	0,156	10

**Abb. 21** Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten (Eigene Darstellung)

**Tabelle 9** Repräsentative Stationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	Fläche km <sup>2</sup>	Var.-Breite <sup>*1</sup>	Jahr <sup>*2</sup>	Abstand <sup>*3</sup>
1	34119	SUBBIANO	ARNO	728	0,205	1942	3
2	6211500	SAN PEDRO	SIL	8.103	0,193	1950	12
3	9827	PONTE DE S. CLARA	MONDEGO	4.954	0,309	1957	16
4	9828	PONTE DE JUNCAIS	MONDEGO	761	0,211	1950	24
5	34115	L'AQUILA	ATERNO	534	0,219	1955	120

\*1: Variationsbreite (Differenz maximaler u. minimaler Abflusskoeffizient)

Quelle: Eigene Aufstell.

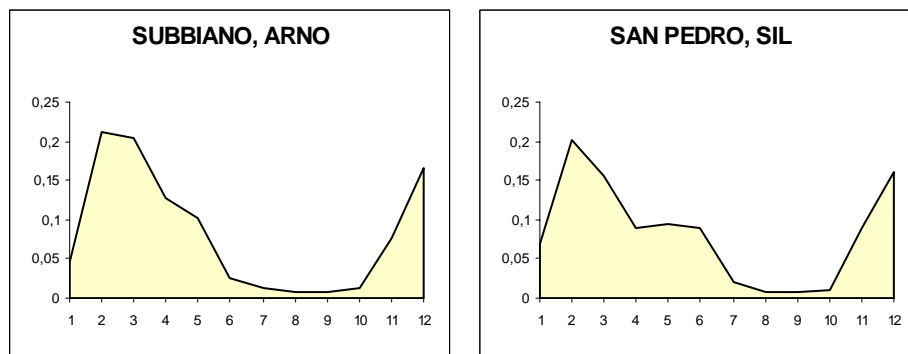
\*2: Repräsentativjahr des unbeeinflussten Zeitreihenabschnittes der Standardperiode 1931-1960

\*3: Summe der quadrierten Abstände der Monatsränge von den Monatsrängen des Cluster-Median

Dieses Regime wird durch ein Hauptmaximum in den Monaten Februar > März mit ca. 42 Prozent des Jahresabflusses charakterisiert. Der maximale Abflusskoeffizient bewegt sich von 0,21 bis 0,25 (25 u. 75% Quantil). Eine zweite Abflussspitze befindet sich im Dezember mit 16 Prozent der Jahresabflussmenge. Das Abflussminimum liegt in den

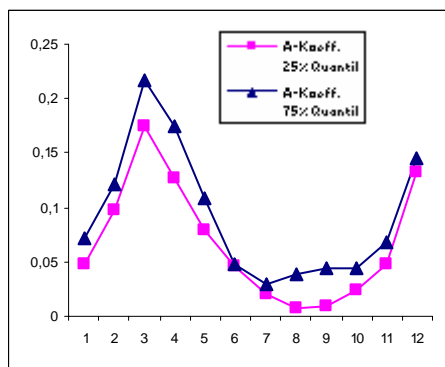
Monaten Juli bis Oktober mit nur 4 Prozent vom Jahresabfluss. Dabei sind die Monate August und September fasst abflusslos. Die mittlere Variationsbreite beträgt 0,23. Die repräsentativen Stationen sind im Gebirgsvorland von Italien (Abruzzen, Toskana), Spanien (Kantabrisches Gebirge) und Portugal (Serra da Estrela) zu finden.

**Abb. 22** Ausgewählte repräsentative Stationen



Quelle: Eigene Darstellung

### Regime Pluvio-Nival-Sommertrocken II (Gruppe B, Klasse 3)



**Abb. 23** Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten (Eigene Darstellung)

Monat	A-Koeff. 25% Quantil	A-Koeff. 75% Quantil	A-Koeff. Median	Rang Median
1	0,049	0,072	0,068	7
2	0,097	0,122	0,114	9
3	0,176	0,218	0,193	12
4	0,126	0,174	0,154	11
5	0,079	0,109	0,084	8
6	0,045	0,049	0,047	5
7	0,019	0,030	0,025	3
8	0,008	0,038	0,023	2
9	0,010	0,043	0,019	1
10	0,024	0,044	0,039	4
11	0,049	0,068	0,064	6
12	0,132	0,146	0,141	10

Das Hauptmaximum wird durch die Monate März > April mit einem Jahresabflussanteil von ca. 35 Prozent gebildet, bei einem maximalen Abflusskoeffizienten zwischen 0,18 und 0,22 (25 u. 75% Quantil). Der zweite Gipfel wird mit 14 Prozent des Jahresabflusses durch den Dezember herausgebildet. Das Abflussminimum liegt in den Monaten Juli bis Oktober mit 11 Prozent des Jahresabflusses, wobei die Monate August und September am schwächsten ausgeprägt sind. Die mittlere Variationsbreite beträgt

0,21. Repräsentative Stationen sind im Tieflandsbereich von Frankreich, an der Loire, von Nord-Portugal und Ost-Polen zu finden.

**Tabelle 10** Repräsentative Stationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	Fläche km <sup>2</sup>	Var.-Breite <sup>*1</sup>	Jahr <sup>*2</sup>	Abstand <sup>*3</sup>
1	9836	CASTRO D'AIRES	PAIVA	295	0,295	1954	17
2	9829	PONTE DE CANAVEZES	TAMEGA	3.181	0,225	1958	23
3	9799	MONTJEAN	LOIRE	110.191	0,198	1934	26
4	9839	PONTE DE VOUZELA	VOUGA	636	0,311	1954	26
5	9797	GIEN	LOIRE	36.010	0,149	1954	32
6	9798	BLOIS	LOIRE	38.842	0,149	1954	34
7	9872	WYSZKOW	BUG	36.482	0,156	1944	61
8	6140700	NEKOR	DIVOKA ORLICE	184	0,217	1934	65
9	6458805	SURAZ	NAREW	4.121	0,165	1954	129

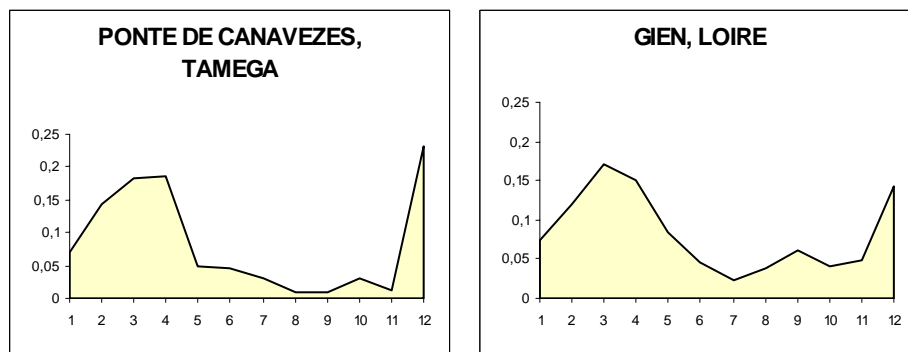
\*1: Variationsbreite (Differenz maximaler u. minimaler Abflusskoeffizient)

Quelle: Eigene Aufstell.

\*2: Repräsentativjahr des unbeeinflussten Zeitreihenabschnittes der Standardperiode 1931-1960

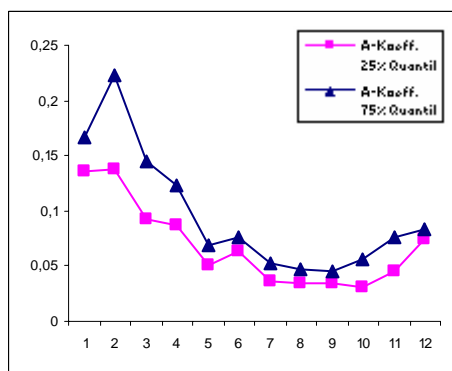
\*3: Summe der quadrierten Abstände der Monatsränge von den Monatsrängen des Cluster-Median

**Abb. 24** Ausgewählte repräsentative Stationen



Quelle: Eigene Darstellung

### Regime Pluvial I (Gruppe B, Klasse 8)



Monat	A-Koeff. 25% Quantil	A-Koeff. 75% Quantil	A-Koeff. Median	Rang Median
1	0,137	0,167	0,148	11
2	0,137	0,222	0,162	12
3	0,093	0,145	0,122	10
4	0,087	0,124	0,111	9
5	0,051	0,069	0,060	6
6	0,064	0,077	0,071	7
7	0,037	0,053	0,052	5
8	0,034	0,047	0,037	2
9	0,035	0,046	0,041	3
10	0,031	0,056	0,037	1
11	0,045	0,076	0,050	4
12	0,074	0,083	0,081	8

**Abb. 25** Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten (Eigene Darstellung)

Beim Regime Pluvial I liegt die Abflussspitze im Februar, gefolgt von den Monaten Januar > März. Auf diese drei Monate entfallen 43 Prozent des Jahresabflusses. Der Schwankungsbereich des maximalen Abflusskoeffizienten bewegt sich dabei zwischen 0,14 und 0,22 (25 u. 75% Quantil). Das Abflussminimum ist in den Monaten Juli bis Oktober mit 17 Prozent der Jahresabflussmenge zu finden. Die mittlere Variationsbreite beträgt 0,16. Eine klare räumliche Konzentration der repräsentativen Stationen ist im Bereich der Zentraleuropäischen Mittelgebirgsschwelle und des Süddeutschen Dreiecks festzustellen.

**Tabelle 11** Repräsentative Stationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	Fläche km <sup>2</sup>	Var.-Breite <sup>*1</sup>	Jahr <sup>*2</sup>	Abstand <sup>*3</sup>
1	6337512	HELDRA	WERRA	4.354	0,141	1951	8
2	6337511	ALLENDORF	WERRA	5.157	0,135	1951	10
3	6337513	LETZTER HELLER	WERRA	5.472	0,143	1951	10
4	33059	WUERZBURG	MAIN	13.755	0,141	1951	11
5	6335301	SCHWEINFURT	MAIN	12.475	0,157	1951	13
6	6335602	PLOCHINGEN	NECKAR	4.253	0,162	1943	16
7	6337504	SCHMITTLOTHEIM	EDER	1.209	0,140	1955	27
8	6335601	LAUFFEN	NECKAR	8.028	0,168	1951	41
9	6335350	LEUN (NEU)	LAHN	3.629	0,192	1943	48
10	6335600	ROCKENAU-SKA	NECKAR	12.819	0,189	1957	67
11	33079	NR BRODY	ODENSE	313	0,172	1953	71
12	6336900	FREMERSDORF	SAAR RIVER	6.992	0,226	1953	89
13	6934750	NEAR BROBY	ODENSE A	307	0,185	1953	95
14	34118	STIA	ARNO	58	0,167	1953	101
15	6934350	STAVNAGER	RIBE A	789	0,114	1956	137
16	6934400	SKIBBY	ARHUS A	176	0,222	1952	161
17	6335300	NEUENSTADT	KOCHER	99	0,120	1938	202

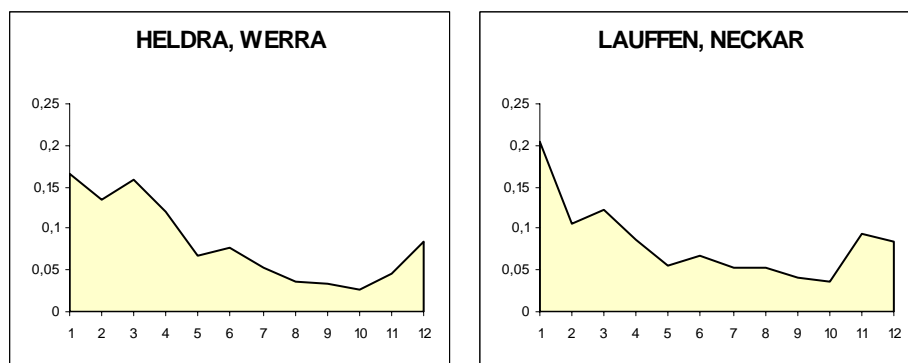
\*1: Variationsbreite (Differenz maximaler u. minimaler Abflusskoeffizient)

Quelle: Eigene Aufstell.

\*2: Repräsentativjahr des unbeeinflussten Zeitreihenabschnittes der Standardperiode 1931-1960

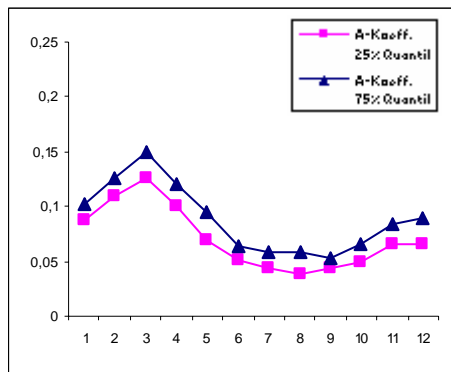
\*3: Summe der quadrierten Abstände der Monatsränge von den Monatsrängen des Cluster-Median

**Abb. 26** Ausgewählte repräsentative Stationen



Quelle: Eigene Darstellung

## Regime Pluvial II (Gruppe B, Klasse 7)



**Abb. 27** Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten (Eigene Darstellung)

Monat	A-Koeff. 25% Quantil	A-Koeff. 75% Quantil	A-Koeff. Median	Rang Median
1	0,088	0,103	0,095	9
2	0,110	0,127	0,117	11
3	0,125	0,150	0,141	12
4	0,100	0,120	0,109	10
5	0,069	0,094	0,084	8
6	0,051	0,063	0,056	4
7	0,043	0,058	0,049	1
8	0,038	0,059	0,050	2
9	0,043	0,053	0,051	3
10	0,049	0,065	0,057	5
11	0,065	0,084	0,080	6
12	0,066	0,089	0,084	7

Das Abflussmaximum des Regimes Pluvial II liegt im März, gefolgt von den Monaten Februar > April. Der Anteil am Jahresabfluss beträgt für diese drei Monate 37 Prozent. Der maximale Abflusskoeffizient schwankt dabei zwischen 0,13 und 0,15 (25 u. 75% Quantil). In den Monaten Juni bis September ist das Abflussminimum mit 21 Prozent der Jahresabflussmenge zu finden. Die mittlere Variationsbreite beträgt 0,12. Räumliche Schwerpunkte der Repräsentativstationen befinden sich in den Tieflandsbereichen von Polen und Deutschland sowie in Italien (Latium, Abruzzen).

**Tabelle 12**

### Repräsentative Stationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	Fläche km <sup>2</sup>	Var.-Breite <sup>*1</sup>	Jahr <sup>*2</sup>	Abstand <sup>*3</sup>
1	6457800	GORZOW WIELKOPOLSKI	WARTA	48.003	0,119	1950	6
2	33157	ALLOGGIAMENTO IDRAU.	ATERNO SAGI.	2.042	0,091	1957	13
3	34116	MOLINA	ATERNO	1.274	0,200	1932	15
4	6337502	CELLE	ALLER	4.217	0,121	1936	15
5	34111	SORA	LIRI	1.359	0,109	1931	22
6	6441107	TRZEBIATOW	REGA	2.811	0,090	1951	29
7	34112	CENTRALE TRAPONZO	MARTA	858	0,119	1955	53
8	34103	CIVITA CASTELLANA	TREIA	307	0,167	1931	57
9	6458810	OSTROLEKA	NAREW	21.747	0,145	1959	64
10	9851	RIPETTA (ROMA)	TIBER (TEVERE)	16.658	0,109	1934	78
11	9871	TCZEW	VISTULA (WISLA)	189.805	0,130	1944	82
12	6935400	ANDELFINGEN	THUR	1.845	0,100	1951	114
13	6458203	WADOWICE	SKAWA	819	0,110	1953	146
14	6243800	HAGING	ANTIESEN	182	0,121	1960	284

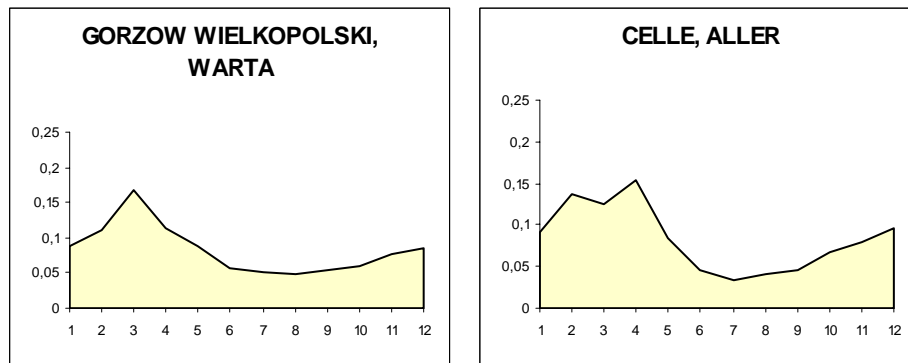
\*1: Variationsbreite (Differenz maximaler u. minimaler Abflusskoeffizient)

Quelle: Eigene Aufstell.

\*2: Repräsentativjahr des unbeeinflussten Zeitreihenabschnittes der Standardperiode 1931-1960

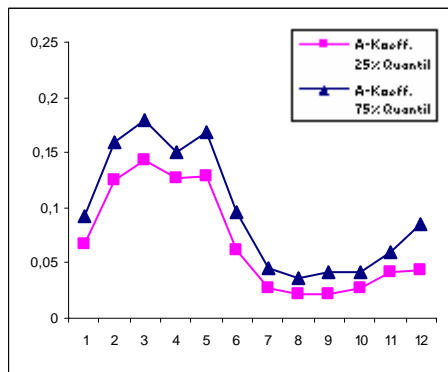
\*3: Summe der quadrierten Abstände der Monatsränge von den Monatsrängen des Cluster-Median

**Abb. 28** Ausgewählte repräsentative Stationen



Quelle: Eigene Darstellung

### Regime Pluvial III (Gruppe B, Klasse 6)



Monat	A-Koeff. 25% Quantil	A-Koeff. 75% Quantil	A-Koeff. Median	Rang Median
1	0,068	0,092	0,083	8
2	0,125	0,159	0,133	9
3	0,143	0,179	0,164	12
4	0,127	0,151	0,143	10
5	0,128	0,168	0,155	11
6	0,062	0,095	0,069	7
7	0,027	0,046	0,042	4
8	0,021	0,036	0,027	1
9	0,022	0,042	0,036	2
10	0,027	0,042	0,036	3
11	0,042	0,061	0,048	5
12	0,044	0,085	0,053	6

**Abb. 29** Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten (Eigene Darstellung)

**Tabelle 13** Repräsentative Stationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	Fläche km <sup>2</sup>	Var.-Breite <sup>*1</sup>	Jahr <sup>*2</sup>	Abstand <sup>*3</sup>
1	33188	RADOMYSŁ	SAN	16.676	0,182	1951	12
2	34101	TORGIANO	CHIASCIO	2.254	0,155	1956	18
3	6212510	BRETO	ESLA	14.224	0,191	1950	20
4	9830	REGUA	DOURO (DUERO)	91.511	0,152	1954	25
5	34120	CASTELFIORENTINO	ELSA	766	0,136	1957	28
6	34102	PONTE BETTONA	TOPINO	1.161	0,158	1942	37
7	34108	TERAMO	TORDINO	164	0,208	1950	46
8	34113	AMANDOLA	TENNA	28	0,107	1957	73
9	34107	PIEVE TORINA	CHIANTI	124	0,143	1957	127

\*1: Variationsbreite (Differenz maximaler u. minimaler Abflusskoeffizient)

Quelle: Eigene Aufstell.

\*2: Repräsentativjahr des unbeeinflussten Zeitreihenabschnittes der Standardperiode 1931-1960

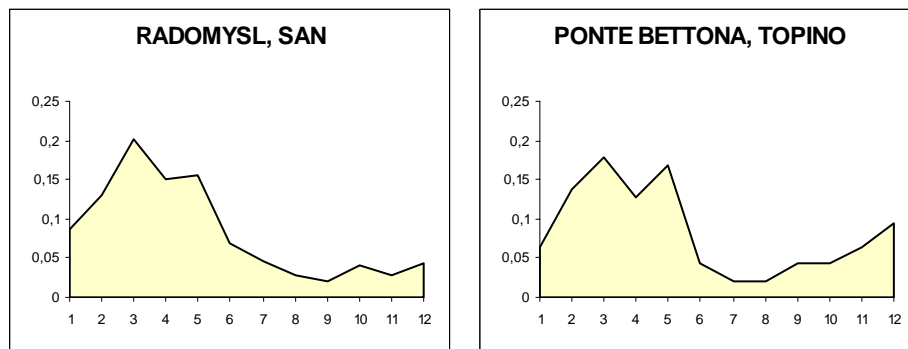
\*3: Summe der quadrierten Abstände der Monatsränge von den Monatsrängen des Cluster-Median

Das Abflussmaximum, mit 46 Prozent des Jahresabflusses, bildet sich in der Monatsrangfolge März > Mai > April heraus. Dabei bewegt sich der maximale



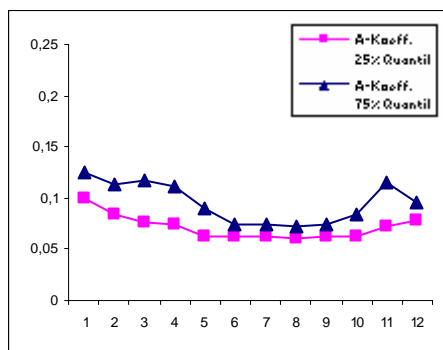
Abflusskoeffizient zwischen 0,14 und 0,18 (25 u. 75% Quantil). Von Juli bis September ist das Abflussminimum mit 14 Prozent der Jahresabflussmenge ausgebildet. Die mittlere Variationsbreite beträgt 0,16. Räumlich finden sich die repräsentativen Messstationen im Gebirgsvorland von Italien (Abruzzen, Toskana), Spanien (Tierra de Campos) und Portugal wieder.

**Abb. 30** Ausgewählte repräsentative Stationen



Quelle: Eigene Darstellung

### Regime Pluvial-Ausgeglichen (Gruppe A, Klasse 3)



**Abb. 31** Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten (Eigene Darstellung)

Monat	A-Koeff. 25% Quantil	A-Koeff. 75% Quantil	A-Koeff. Median	Rang Median
1	0,100	0,125	0,107	11
2	0,083	0,112	0,103	10
3	0,076	0,118	0,111	12
4	0,074	0,111	0,089	9
5	0,063	0,090	0,081	6
6	0,063	0,074	0,066	4
7	0,062	0,074	0,063	1
8	0,061	0,073	0,063	1
9	0,062	0,074	0,063	1
10	0,062	0,083	0,067	5
11	0,073	0,116	0,086	7
12	0,078	0,095	0,086	7

Der Jahresgang dieses Regimes ist mit einer mittleren Variationsbreite von 0,06 sehr stark ausgeglichen. Die Abflussspitze ist in den Monaten März > Januar > Februar mit 32 Prozent vom Jahresabfluss ausgebildet. Dabei schwankt der maximale Abflusskoeffizient zwischen 0,08 und 0,12 (25 u. 75% Quantil). Das Abflussminimum erstreckt sich vom Juni bis zum Oktober mit einem Jahresabflussanteil in Höhe von 32 Prozent. Die repräsentativen Stationen befinden sich in Dänemark, im Tiefland von Deutschland und Polen sowie in Mittelitalien (Abruzzen, Umbrien).

**Tabelle 14****Repräsentative Stationen**

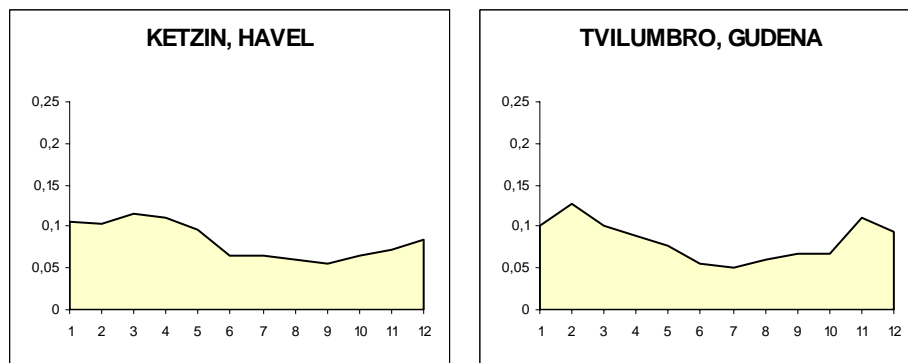
Nr.	Station-ID	Name	Fluss	Fläche km <sup>2</sup>	Var.-Breite <sup>*1</sup>	Jahr <sup>*2</sup>	Abstand <sup>*3</sup>
1	6340510	KETZIN	HAVEL	16.247	0,060	1936	17
2	6457200	NOWE DREZDENKO	NOTEC	14.268	0,062	1951	39
3	6340501	RATHENOW HAUPTSCHL.	HAVEL	20.275	0,085	1959	42
4	33078	TVILUMBRO	GUDENA	1.404	0,078	1957	56
5	34121	TERRIA	VELINO	2.174	0,055	1934	60
6	34124	LUNGHEZZA	ANIENE	1.158	0,067	1931	69
7	6934100	AHLERGAARDE	SKJERN A	1.277	0,071	1956	105
8	6934460	LINDENBORG BRO	LINDENBORG A	240	0,037	1957	191
9	6337503	HELMINGHAUSEN	DIEMEL	86	0,083	1942	239
10	6934050	AARUP	ARUP A	132	0,063	1943	248
11	9802	BEAUCAIRE	RHONE	93.091	0,064	1940	292
12	6934300	ASTED BRO	UGGERBY A	100	0,063	1932	328
13	34122	VISSO	NERA	112	0,029	1932	393

\*1: Variationsbreite (Differenz maximaler u. minimaler Abflusskoeffizient)

Quelle: Eigene Aufstell.

\*2: Repräsentativjahr des unbeeinflussten Zeitreihenabschnittes der Standardperiode 1931-1960

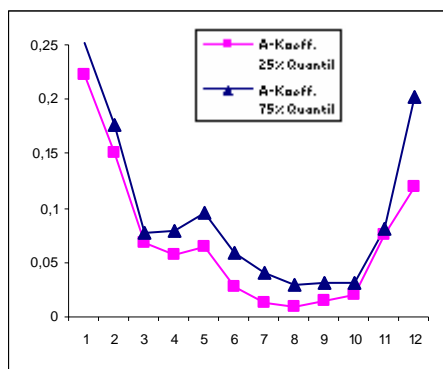
\*3: Summe der quadrierten Abstände der Monatsränge von den Monatsrängen des Cluster-Median

**Abb. 32****Ausgewählte repräsentative Stationen**

Quelle: Eigene Darstellung

**Regime Pluvial-Sommertrocken I (Gruppe B, Klasse 1)**

Ein recht deutliches Abflussmaximum bilden die Monate Januar > Februar > Dezember mit 54 Prozent des Gesamtabflusses eines Jahres. Der Schwankungsbereich des maximalen Abflusskoeffizienten liegt dabei zwischen 0,22 und 0,25 (25 u. 75% Quantil). Mit 14 Prozent des Jahresabflusses deutet sich in den Monaten Mai > April ein zweites, sehr schwaches Maximum an. Das Abflussminimum befindet sich in den Monaten Juli bis Oktober mit ca. 10 Prozent der Jahresabflussmenge. Die mittlere Variationsbreite beträgt 0,22. Die repräsentativen Stationen finden sich überwiegend im Tieflandsbereich wieder, allerdings sind sie regional relativ stark gestreut (Niederlande, Deutschland, Polen, Italien, Portugal, Spanien).



**Abb. 33** Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten (Eigene Darstellung)

Monat	A-Koeff. 25% Quantil	A-Koeff. 75% Quantil	A-Koeff. Median	Rang Median
1	0,222	0,252	0,237	12
2	0,151	0,176	0,166	11
3	0,068	0,077	0,072	8
4	0,057	0,079	0,070	7
5	0,065	0,096	0,069	6
6	0,028	0,058	0,036	5
7	0,014	0,040	0,031	4
8	0,009	0,030	0,016	1
9	0,015	0,031	0,023	2
10	0,021	0,031	0,030	3
11	0,075	0,081	0,078	9
12	0,119	0,202	0,138	10

**Tabelle 15**

### Repräsentative Stationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	Fläche km <sup>2</sup>	Var.-Breite <sup>*1</sup>	Jahr <sup>*2</sup>	Abstand <sup>*3</sup>
1	9793	LITH	MAAS (MEUSE)	28.884	0,186	1943	6
2	6211100	ORENSE	MINO	13.041	0,214	1945	7
3	6421500	BORGHAREN	MAAS	20.811	0,242	1943	12
4	6336500	TRIER UP	MOSELLE RIVER	23.858	0,193	1943	14
5	80268	SAN GIOVANNI ALLA V.	ARNO	8.725	0,240	1943	24
6	33159	SAN SAMUELE DI CAFI.	OFANTO	2.755	0,240	1948	47
7	9834	MOINHO DA GAMITINHA	SADO	2.754	0,267	1938	120
8	6457820	POZNAN	WARTA	26.394	0,150	1950	122

\*1: Variationsbreite (Differenz maximaler u. minimaler Abflusskoeffizient)

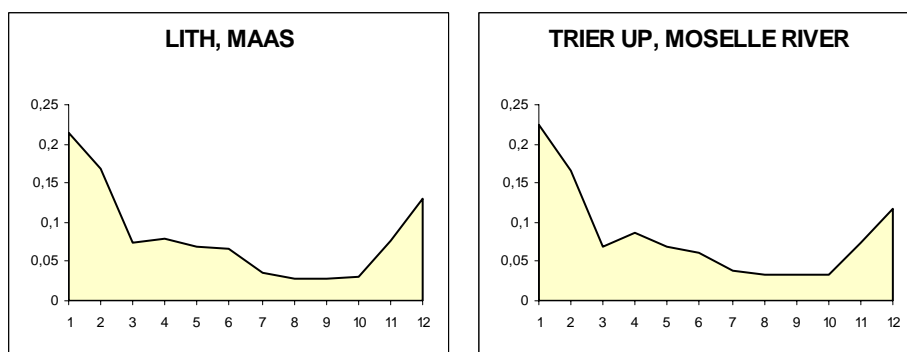
\*2: Repräsentativjahr des unbeeinflussten Zeitreihenabschnittes der Standardperiode 1931-1960

\*3: Summe der quadrierten Abstände der Monatsränge von den Monatsrängen des Cluster-Median

Quelle: Eigene Aufstell.

**Abb. 34**

### Ausgewählte repräsentative Stationen

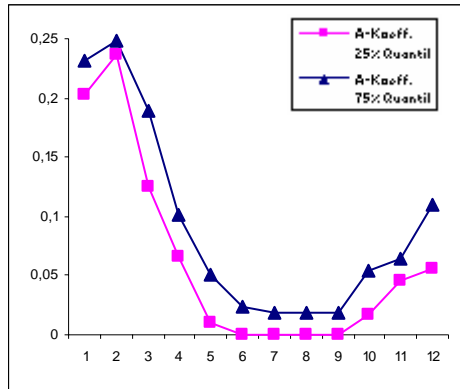


Quelle: Eigene Darstellung

### Regime Pluvial-Sommertrocken II (Gruppe B, Klasse 12)

Das Abflussmaximum bildet sich in der Monatsrangfolge Februar > Januar > März mit insgesamt 63 Prozent des Jahresabflusses heraus. Der maximale Abflusskoeffizient schwankt dabei zwischen 0,24 und 0,25 (25 u. 75% Quantil). Von Juni bis September

erstreckt sich das fast abflussfreie Minimum mit ca. 3 der Jahresabflussmenge. Die mittlere Variationsbreite beträgt 0,24. Fünf der sechs Repräsentativstationen befinden sich in Dänemark.



**Abb. 35** Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten (Eigene Darstellung)

Monat	A-Koeff. 25% Quantil	A-Koeff. 75% Quantil	A-Koeff. Median	Rang Median
1	0,202	0,232	0,215	11
2	0,236	0,248	0,239	12
3	0,125	0,190	0,172	10
4	0,067	0,101	0,091	9
5	0,010	0,051	0,043	6
6	0,000	0,024	0,007	1
7	0,000	0,019	0,007	1
8	0,000	0,019	0,007	1
9	0,000	0,019	0,007	1
10	0,016	0,054	0,030	5
11	0,046	0,065	0,059	7
12	0,056	0,109	0,083	8

**Tabelle 16**

### Repräsentative Stationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	Fläche km <sup>2</sup>	Var.-Breite <sup>*1</sup>	Jahr <sup>*2</sup>	Abstand <sup>*3</sup>
1	6934700	EJBY MOLLE	ODENSE A	527	0,213	1948	17
2	6934570	LILLE SVENSTRUP	RINGSTED A	200	0,224	1952	19
3	6934530	BROMOELLE	AMOSE A	289	0,235	1952	23
4	6934571	HOLLOESE MOELLE	SUSA	758	0,229	1953	37
5	6934310	ELKAER BRO	LINDHOLM A	125	0,222	1952	57
6	80272	BODEGA	ALPORTEL	114	0,333	1954	195

\*1: Variationsbreite (Differenz maximaler u. minimaler Abflusskoeffizient)

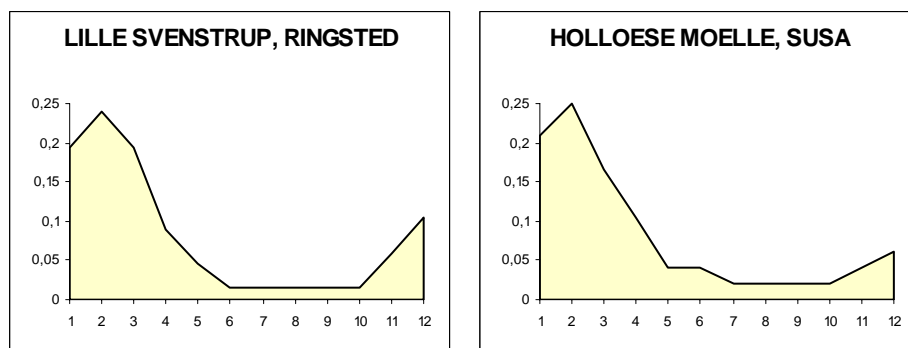
Quelle: Eigene Aufstell.

\*2: Repräsentativjahr des unbeeinflussten Zeitreihenabschnittes der Standardperiode 1931-1960

\*3: Summe der quadrierten Abstände der Monatsränge von den Monatsrängen des Cluster-Median

**Abb. 36**

### Ausgewählte repräsentative Stationen



Quelle: Eigene Darstellung

## **5. Variabilität der Abflussregimetyphen**

Unter Variabilität versteht man, dass das charakteristische Abflussverhalten eines Flusses innerhalb einer mehrjährigen Abflussmessreihe wechselt. Es kann für jedes Jahr einem bestimmten Abflussregimetyphen zugeordnet werden. D.h. innerhalb einer Zeitreihe können mehrere, wechselnde Regimetyphen auftreten. Nicht jedes Jahr muss also demselben Regimetyphen entsprechen.

Ziel dieses Kapitels ist die Darstellung der Variabilität oder Stabilität der 12 ausgewiesenen Abflussregimetyphen (vgl. Kap. 4.5.). Dazu muss für jeden Regimetyphen die Stabilität der entsprechenden repräsentativen Messstationen berechnet werden. Der sich hieraus ergebende Mittelwert eignet sich für eine Beurteilung der Stabilität der einzelnen Regimetyphen.

### **5.1. Methodik der Stabilitätsanalyse**

Als Datengrundlage für die Stabilitätsanalyse standen insgesamt 125 Repräsentativstationen (vgl. Kap. 4.5.) mit an der Jahresabflusssumme normierten unbeeinflussten Zeitreihenabschnitten zur Verfügung. Dabei wurde zunächst jeweils die gesamte unbeeinflusste Messperiode zugrunde gelegt, welche später der Standardperiode 1931-1960 gegenübergestellt werden konnte.

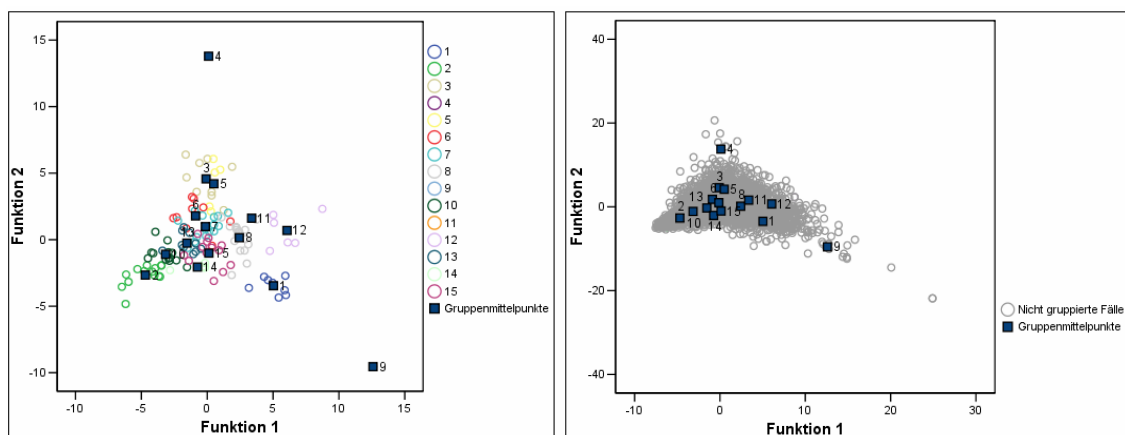
#### **Zuordnung der Einzeljahre zu den Regimetyphen**

Für eine Zuordnung der einzelnen Abflussjahre, der 125 Messstationen, zu den 12 Regimetyphen standen zwei alternative Methoden zur Auswahl. Die erste Alternative hätte darin bestehen können, für jede Station mittels einer Clusteranalyse Typen zu klassifizieren (RÖDEL 2001, S. 58ff und Kap. 4.1.). Der Vorteil dieser Variante besteht in der Möglichkeit, die vollständigen Abflussmessreihen, einschließlich der regulierten Abschnitte, zu typisieren. Damit lässt sich eine anthropogen verursachte Verschiebung von Regimevariabilität hin zu Regimestabilität nachweisen (RÖDEL 2001), da sich räumlich verteilte Speicherräume in einer erhöhten Wiederkehrwahrscheinlichkeit ein und desselben regulierten Abflussganges äußern (AURADA 1998). Nachteilig sind das Fehlen eines objektiven, gleichwertigen Entscheidungskriteriums bei der Festlegung der Cluster-Anzahl pro Abflussstation sowie die Notwendigkeit, die für jede Station unterschiedlich ausgeschiedenen Typen des jährlichen Abflussganges, auf die 12 Regimetyphen des Untersuchungsraumes zu reduzieren.

Für die Zielstellung dieses Kapitels erschien die zweite Alternative, der Einsatz einer Diskriminanzanalyse, effektiver. Mit Hilfe einer Diskriminanzanalyse lassen sich nämlich auch Objekte mit unbekannter Gruppenzugehörigkeit vorhandenen Gruppen zuordnen (BACKHAUS u.a. 2000, S. 180ff). In diesem Fall sollte eine Gruppierung von 5.852 unbeeinflussten Abflussjahren, der 125 Repräsentativstationen, zu jeweils einem der 12 Regimetypen erfolgen. Dazu wurden diese ungruppierten Fälle zunächst in den Datensatz aufgenommen, welcher die 125 gruppierten Fälle aus der Gruppe A und B (vgl. Kap. 4.4.) umfasste.

Aus verfahrenstechnischen Gründen wurden in die Diskriminanzanalyse auch die drei Ausreißer-Klassen (4, 9, 11) mit einbezogen. Diese Ausreißerfänger sollten vermeiden, dass vollkommen untypische Jahresgänge in die 12 Klassen eingeordnet werden und damit das Ergebnis verzerren. Der Klasse 4 wurden bei der Klassifikation 25 und der Klasse 9 insgesamt 32 Abflussjahre zugewiesen, welche bei der Stabilitätsberechnung nicht berücksichtigt wurden. Etwas anders verhielt es sich bei der Klasse 11, welcher 290 Jahresgänge zugeordnet wurden. Diese Klasse wurde in Kapitel 4.5. korrekterweise nicht berücksichtigt, da ihr nur eine Station (Baschi-Tiber) angehörte.

**Abb. 37** Diskriminanzwerte der ersten beiden Diskriminanzfunktionen

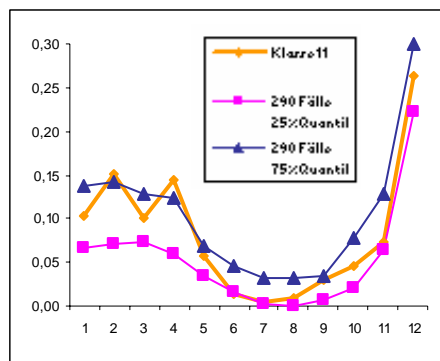


Quelle: SPSS-Ausgabe

(links: 125 gruppierte Fälle, rechts: 5.852 ungruppierte Fälle)

Wie aber aus der Abbildung 37 deutlich zu ersehen ist, handelt es sich bei der entsprechenden Klasse um keinen echten Ausreißer, im Gegensatz zu den Klassen 4 und 9 deren Klassenmittelpunkte sehr weit von denen der übrigen Klassen entfernt liegen. Deshalb musste die Klasse 11 bei der Stabilitätsanalyse als zusätzliche Gruppe integriert werden. Sie wurde nachfolgend als Regime Pluvio-Nival-Sommertrocken III eingestuft

(vgl. Abb. 38), welches sich durch einen besonders hohen Dezember-Abfluss hervorhebt.



**Abb. 38** Abflusskoeffizienten der Station Baschi, welche als einzige Messstation die Ausreißer-Klasse 11 repräsentiert sowie das 25 u. 75% Quantil der 290 zugeordneten Jahresgänge (Quelle: Eigene Darstellung)

Bei der Ermittlung der Diskriminanzfunktionen wurde wiederum die iterative Vorgehensweise mit dem Gütemaß Wilks Lambda (Multivariates) und einer F-Wahrscheinlichkeit von 0,05 für die Aufnahme einer Variablen gewählt (vgl. Kap. 4.4.). Die ungruppierten Fälle werden hierbei nicht berücksichtigt, da die Diskriminanzfunktionen nur bestehende Gruppen voneinander trennen. In dieser Analyse wurden von maximal 11 möglichen Diskriminanzfunktionen nur die ersten 7, die signifikant zur Trennung der Gruppen beitrugen, sowie die Monate: Januar, März, Februar, Dezember, April, Mai und Juni berücksichtigt. In der anschließenden Klassifizierungsphase werden dann neben den gruppierten auch die ungruppierten Fälle einbezogen. Die 125 gruppierten Repräsentativjahre wurden dabei zu 92,2 Prozent den ursprünglichen Klassen, welche sich für Gruppe A und B aus zwei getrennten Clusteranalysen mit anschließender diskriminanzanalytischer Korrektur ergaben (vgl. Kap. 4.4.), zugeordnet. Es wurden 10 Fälle umgruppiert, schwerpunktmäßig zwischen den beiden Gruppen A und B. Diese in der Klassifikationsmatrix angegebene Trefferquote kann nach BACKHAUS u.a. (2000, S. 170f) als Gütemaß für die Klassifikationsfähigkeit der Diskriminanzfunktionen verstanden werden. Als Ursache für die „geringe“ aber dennoch zufrieden stellende Trefferquote ist die Zusammenfassung der beiden Gruppen A und B zu nennen. Dadurch kommt es, vereinfacht ausgedrückt, dazu, dass jetzt beispielsweise Fälle aus der Gruppe A eine geringere Distanz zum Zentroid einer der Klassen in Gruppe B aufweisen, als zu ihrem bisherigen Gruppenmittel in der Gruppe A. D.h. die A-posteriori-Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit zu einer Klasse in der Gruppe B wird maximal und damit erfolgt eine

Umgruppierung. Würde man eine getrennte Analyse vornehmen, so ergäbe sich für die Gruppe B beispielsweise eine Trefferquote von 99 Prozent.

Abschließend ist in Tabelle 17 eine Übersicht über die Zuordnung der 5.852 ungruppierten Fälle zu den Regimetypen abgebildet.

**Tabelle 17** Zuordnungsergebnis der ungruppierten Abflussjahre

Cluster-Nr.	Gruppe A			Gruppe B										Ausreißer		
	1	2	3	1	2	3	5	6	7	8	10	12	11	4	9	
Anzahl Jahre	544	237	1.043	341	588	431	193	281	580	583	459	225	290	25	32	

Quelle: Eigene Aufstellung

### Ermittlung der Stabilität

Im nächsten Schritt lassen sich nun für jede der Repräsentativstationen die relativen Häufigkeiten der einzelnen Regimetypen ermitteln, welche hier als Eintrittswahrscheinlichkeiten aufgefasst werden sollen. D.h. die relative Häufigkeit gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein bestimmter Abflussregimetyp in einem Jahr auftritt.

Unter Heranziehung dieser Wahrscheinlichkeiten wurden dann in Anlehnung an OPPLIGER (1997, S. 59ff) und KRASOVSKAIA (1995, S. 592) für alle Repräsentativstationen Instabilitätsindizes nach Formel 3 berechnet.

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad \text{mit} \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (\text{Formel 3})$$

Der Instabilitätsindex H ist eine Kenngröße für die Ungewissheit über den Eintritt eines Regimetyps. Die Unsicherheit wird gleich Null, wenn die relative Häufigkeit eines Regimetyps eins beträgt, also nur ein Typ innerhalb der Zeitreihe auftritt. Das Maximum an Entropie wird erreicht, wenn alle Regimetypen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit eintreffen (OPPLIGER 1997, S. 60). Bei 13 Klassen beträgt der maximale Instabilitätsindex:

$$H_{\max} = - \sum_{i=1}^{13} \frac{1}{13} \ln\left(\frac{1}{13}\right) = 2,5649 \quad (\text{Formel 4})$$

Als nächstes wurden dann für alle repräsentativen Messstationen die Instabilitätsindizes ins Verhältnis zum maximalen Instabilitätsindex gesetzt (vgl. Formel 5).

$$H_{\text{rel}}(\%) = \frac{H}{H_{\max}} \times 100 \quad (\text{Formel 5})$$



Dieser relative Instabilitätsindex gibt also an, wie viel Prozent der maximalen Unsicherheit erreicht werden. Zur Beurteilung der Stabilität mussten nun noch Schwellenwerte festgelegt werden. In dieser Arbeit wurden Messstationen mit einem relativen Instabilitätsindex von 0 bis 30 Prozent als sehr stabil, von 30 bis 50 Prozent als stabil, von 50 bis 70 Prozent als instabil und von 70 bis 100 Prozent als sehr instabil eingestuft (vgl. OPPLIGER 1997, S. 68). Um nun neben der Stabilität der Einzelstationen auch die Stabilität der Regimetypen einordnen zu können, wurden für alle 12 Regimegruppen (vgl. Kap. 4.5.) die arithmetischen Mittel der relativen Instabilitätsindizes über die entsprechenden Repräsentativstationen gebildet.

## 5.2. Ergebnisdarstellung und Stabilitätsbeurteilung

In diesem Kapitel wurden die Ergebnisse der Analyse zusammengefasst und eine Stabilitätsbeurteilung der Abflussregimetypen vorgenommen. Dazu sind jeweils beispielhaft für eine repräsentative Station ein Histogramm mit den relativen Häufigkeiten sowie eine graphische Darstellung der Regimetypen auf einer Zeitachse abgebildet. Zusätzlich wurden Tabellen mit den entsprechenden Repräsentativstationen aufgeführt, in denen die relativen Stabilitätsindizes und eine Stabilitätseinstufung enthalten sind. Außerdem wurden in den Tabellen die jeweils dominierenden Abflussregimetypen, mit der höchsten relativen Häufigkeit innerhalb der gesamten unbeeinflussten Messperiode, einer Station angegeben. Da der nach dem Repräsentativjahr zugewiesene Regimetyp nicht mit dem am häufigsten auftretenden übereinstimmen muss, eignet sich diese Information für eine Überprüfung der Klassifikationsgüte. Streng genommen muss dabei allerdings der Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit während der Standardperiode 1931-1960 herangezogen werden, weil die Klassifikation in Kapitel 4.5. auf diesem Zeitabschnitt beruht. Auf eine entsprechende Darstellung musste hier jedoch verzichtet werden. Führt man diesen Ansatz gedanklich weiter, eröffnet sich eine weitaus effizientere Methode, welche die Regimeklassifikation und die Variabilitätsermittlung quasi in einem Schritt bewältigt, als in dieser Arbeit zur Anwendung kam. D.h. es müssten für alle Abflussstationen sämtliche unbeeinflussten Jahre der gewählten Standardperiode einer Clusteranalyse mit anschließendem diskriminanzanalytischen Korrekturverfahren unterzogen werden. Daraus ergeben sich dann zum einen die Abflussregimetypen und zum anderen die relativen Häufigkeiten der verschiedenen Regimetypen pro Messstation. Die

Repräsentativstationen werden nun jeweils anhand des Regimetyps mit der höchsten relativen Häufigkeit zugewiesen. Darüber hinaus ergibt sich bei einer Clusteranalyse mit einem derart großen Datenbestand ggf. auch eine größere Anzahl von Abflussregimetypen. Gerade bei einer kleinmaßstäblichen Untersuchung ist damit eine etwas differenziertere Betrachtung möglich.

Eine zusammenfassende Stabilitätsbeurteilung aller Regimetypen ist der Tabelle 18 zu entnehmen. Danach fallen in der gesamten unbeeinflussten Messperiode nur die Regimes Glazio-Nival und Pluvial-Ausgeglichen in die Kategorie sehr stabil bzw. stabil. Alle anderen Typen wurden als unstabil bzw. sehr unstabil charakterisiert. In der Standardperiode 1931-1960, in welcher mit Ausnahme des Typs Nivo-Pluvial I alle Regimetypen eine verminderte Variabilität aufwiesen, wurde zusätzlich auch das Regime Nival als stabil eingeschätzt. Ein zeitlicher Vergleich über die Stabilitätsentwicklung ist durch die Gegenüberstellung der beiden Perioden jedoch nicht möglich. Vielmehr wird hier die Hypothese vertreten, dass mit wachsender Zeitreihenlänge die Wahrscheinlichkeit dafür steigt, dass eine höhere Anzahl von Regimetypen auftritt, die Variabilität also zunimmt.

**Tabelle 18** Stabilitätsbeurteilung der Regimetypen

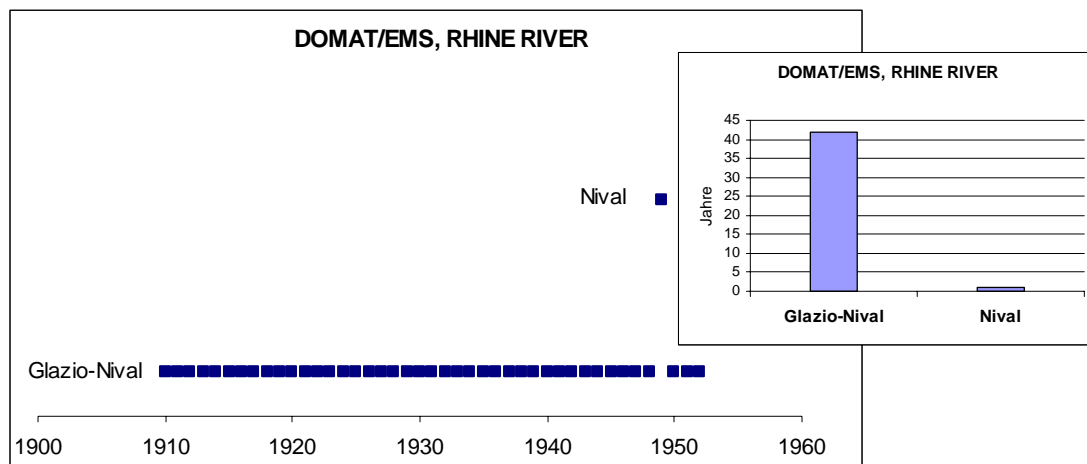
Regimetyp	Gesamte unbeeinflusste Messperiode		Periode 1931-1960	
	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität
Glazio-Nival (Gruppe B, Klasse 2)	26,62	sehr stabil	25,38	sehr stabil
Nival (Gruppe B, Klasse 10)	50,55	unstabil	47,21	stabil
Nivo-Pluvial I (Gruppe A, Klasse 2)	54,87	unstabil	55,42	unstabil
Nivo-Pluvial II (Gruppe A, Klasse 1)	59,40	unstabil	57,42	unstabil
Pluvio-Nival-Sommertrocken I (Gruppe B, Klasse 5)	72,75	sehr unstabil	65,59	unstabil
Pluvio-Nival-Sommertrocken II (Gruppe B, Klasse 3)	76,97	sehr unstabil	70,67	sehr unstabil
Pluvial I (Gruppe B, Klasse 8)	81,68	sehr unstabil	74,31	sehr unstabil
Pluvial II (Gruppe B, Klasse 7)	66,30	unstabil	54,49	unstabil
Pluvial III (Gruppe B, Klasse 6)	74,00	sehr unstabil	70,12	sehr unstabil
Pluvial-Ausgeglichen (Gruppe A, Klasse 3)	46,28	stabil	43,82	stabil
Pluvial-Sommertrocken I (Gruppe B, Klasse 1)	70,04	sehr unstabil	67,85	unstabil
Pluvial-Sommertrocken II (Gruppe B, Klasse 12)	69,74	unstabil	59,26	unstabil

Quelle: Eigene Aufstellung

Eine entsprechende Aussage lässt sich damit nur durch einen Vergleich gleich langer Standardperioden ableiten. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Länge der unbeeinflussten Zeitreihensegmente würde sich dabei allerdings die Anzahl der

berücksichtigungsfähigen Repräsentativstationen, die in zwei Standardperioden über je eine dreißigjährige Zeitreihe verfügen, sehr stark reduzieren. Eine repräsentative Aussage erscheint hiermit nicht mehr möglich, weshalb auf eine entsprechende Darstellung verzichtet wurde.

#### Regime Glazio-Nival (Gruppe B, Klasse 2)



**Abb. 39** Häufigkeiten der Regimetypen, Station Domat/Ems (Eigene Darstellung)

Die Station Domat/Ems der Klasse Glazio-Nival weist mit einem relativen Stabilitätsindex von 4,3 Prozent eine sehr hohe Stabilität auf. In der 43jährigen unbeeinflussten Zeitreihe tritt nur in einem Jahr ein anderer Regimetyp auf.

**Tabelle 19** Stabilität der Repräsentativstationen

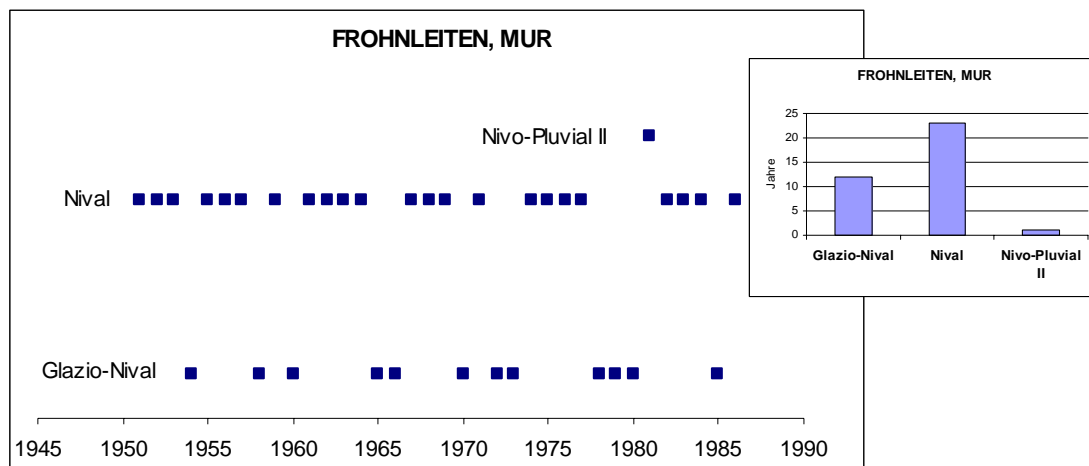
Nr.	Station-ID	Name	Fluss	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität	Haupttyp <sup>*1</sup>
1	6343900	PASSAU-INGLING	INN	49,31	stabil	glazio-nival
2	33053	WASSERBURG	INN	0,00	sehr stabil	glazio-nival
3	6243030	INNSBRUCK	INN	0,00	sehr stabil	glazio-nival
4	6935145	DOMAT/EMS	RHINE RIVER	4,31	sehr stabil	glazio-nival
5	9850	BOARA PISANI	ADIGE (ETSCH)	16,35	sehr stabil	glazio-nival
6	9794	SCHAERDING	INN	24,82	sehr stabil	glazio-nival
7	6943100	MARTINSBRUCK	INN	0,00	sehr stabil	glazio-nival
8	6335200	MAXAU	RHINE RIVER	55,86	unstabil	nivo-pluvial II
9	33068	BURGHAUSEN	SALZACH	31,62	stabil	glazio-nival
10	6243110	VENT	VENTER ACHE	0,00	sehr stabil	glazio-nival
11	6935310	MELLINGEN	REUSS	18,31	sehr stabil	glazio-nival
12	33064	KAUB	RHINE	62,65	unstabil	nivo-pluvial II
13	6335150	MAINZ	RHINE RIVER	51,94	unstabil	nivo-pluvial II
14	9849	PIACENZA	PO	57,52	unstabil	nival
Mittelwert Regimetyp				26,62	sehr stabil	

\*1: Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit in der gesamten unbeeinflussten Messreihe einer Station

Quelle: Eigene Aufstellung

71 Prozent der repräsentativen Stationen wurden als sehr stabil bzw. stabil eingestuft. Bei diesen Messstationen dominiert der Regimetyp Glazio-Nival, während bei den vier unstabilen Abflussstationen die höchsten relativen Häufigkeiten auf andere Regimeklassen entfallen.

#### Regime Nival (Gruppe B, Klasse 10)



**Abb. 40** Häufigkeiten der Regimetypen, Station Frohnleiten (Eigene Darstellung)

Die für das Regime Nival repräsentative Station Frohnleiten wurde mit einem relativen Stabilitätsindex von 29 Prozent als sehr stabil bewertet. 23 Jahre der 36jährigen unbeeinflussten Messperiode entfallen auf diese Klasse.

**Tabelle 20** Stabilität der Repräsentativstationen

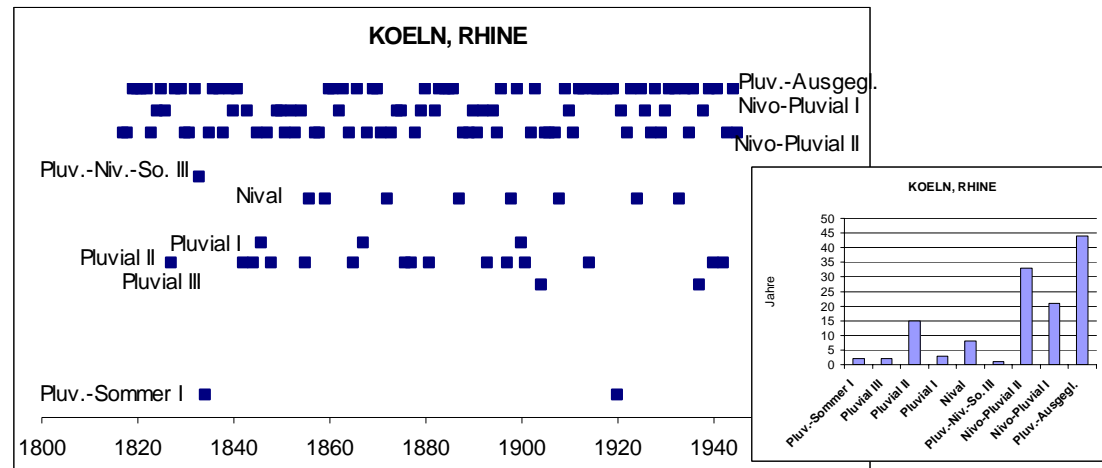
Nr.	Station-ID	Name	Fluss	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität	Haupttyp <sup>*1</sup>
1	6242400	STEIN-KREMS	DANUBE	44,11	stabil	nivo-pluvial II
2	6242500	WIEN-NUSSDORF	DANUBE	43,02	stabil	nival
3	6242100	LINZ	DANUBE	44,11	stabil	nival
4	6342900	ACHLEITEN	DANUBE RIVER	53,08	unstabil	nivo-pluvial I
5	6935302	MURGENTHAL	AARE	53,74	unstabil	nival
6	6935301	BRUGG	AARE	55,80	unstabil	nival
7	6242250	STEYR	ENNS	20,20	sehr stabil	nival
8	6246610	FROHNLEITEN	MUR	29,32	sehr stabil	nival
9	6246601	LANDSCHA	MUR	28,99	sehr stabil	nival
10	6458406	NOWY SACZ	DUNAJEC	68,63	unstabil	nival
11	6458450	SZCZUCIN	WISLA	64,99	unstabil	nival
12	6935320	EMMENMATT	EMME	68,97	unstabil	nivo-pluvial II
13	34110	PICINISCO	MELFA	53,80	unstabil	nival
14	6242420	IMBACH	KREMS	78,92	sehr unstabil	pluvial II
Mittelwert Regimetyp				50,55	unstabil	

\*1: Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit in der gesamten unbeeinflussten Messreihe einer Station

Quelle: Eigene Aufstellung

Der insgesamt als unstabil einzuschätzende Regimetyp liegt sehr nahe an der Grenze zur stabilen Kategorie. Wird die Standardperiode 1931-1960 zugrunde gelegt, kann bei einem relativen Stabilitätsindex von ca. 47 Prozent von Stabilität ausgegangen werden. Der Regimetyp Nival ist bei 71 Prozent (79% in der Periode 1931-1960) der Repräsentativstation der am häufigsten auftretende.

#### Regime Nivo-Pluvial I (Gruppe A, Klasse 2)



**Abb. 41** Häufigkeiten der Regimetypen, Station Köln (Eigene Darstellung)

Vier der repräsentativen Stationen lassen sich als unstabil charakterisieren, bei einer Dominanz der Regimes Pluvial-Ausgeglichen. Die Station Rhein-Rekingen passt weder von der Stabilität, noch vom Haupttyp in die Klasse Nivo-Pluvial I.

**Tabelle 21** Stabilität der Repräsentativstationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität	Haupttyp <sup>*1</sup>
1	33065	KOELN	RHINE	65,81	unstabil	pluv.-ausgegl.
2	6335050	DUESSELDORF	RHINE RIVER	58,01	unstabil	pluv.-ausgegl.
3	6335070	ANDERNACH	RHINE RIVER	58,01	unstabil	pluv.-ausgegl.
4	9800	LA MULATIERE	RHONE	68,39	unstabil	pluv.-ausgegl.
5	6935054	REKINGEN	RHINE RIVER	24,13	sehr stabil	glazio-nival
Mittelwert Regimetyp				54,87	unstabil	

\*1: Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit in der gesamten unbeeinflussten Messreihe einer Station

Quelle: Eigene Aufstellung

#### Regime Nivo-Pluvial II (Gruppe A, Klasse 1)

Die Klasse Nivo-Pluvial II ist mit einem relativen Instabilitätsindex von 59,4 Prozent als unstabil einzustufen. 64 Prozent der repräsentativen Stationen fallen in den

unstabilen bis sehr unstabilen Bereich. In sieben von elf Fällen handelt es sich beim Haupttyp um das Klassenregime.

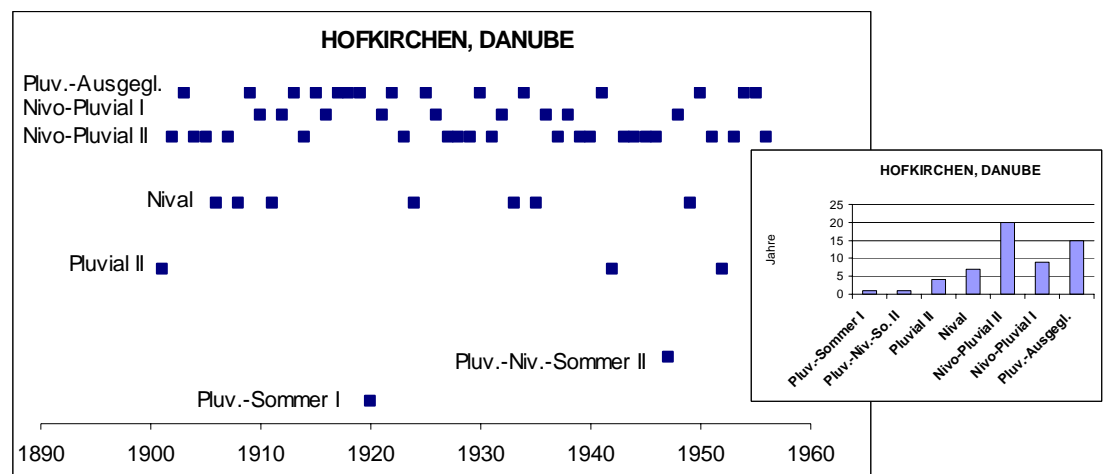


Abb. 42 Häufigkeiten der Regimetypen, Station Hofkirchen (Eigene Darstellung)

Tabelle 22 Stabilität der Repräsentativstationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität	Haupttyp <sup>*1</sup>
1	34105	TORRE ORSINA	NERA	38,73	stabil	nivo-pluvial II
2	6342500	INGOLSTADT	DANUBE	59,41	unstabil	nivo-pluvial II
3	9784	HOFKIRCHEN	DANUBE	62,23	unstabil	nivo-pluvial II
4	34104	SUBIACO	ANIENE	73,86	sehr unstabil	nivo-pluvial II
5	6342600	REGENSBURG	DANUBE	74,51	sehr unstabil	nivo-pluvial II
6	6546610	GORNJA RADGONA	MURA	49,42	stabil	nival
7	33189	KRASNYSTAW	WIEPRZ	49,15	stabil	pluvial II
8	34114	COMUNANZA	ASO	56,53	unstabil	nivo-pluvial II
9	6549100	SOLKAN I	SOCA	71,39	sehr unstabil	nivo-pluvial II
10	33186	PRZEDBORZ	PILICA	73,51	sehr unstabil	pluvial II
11	34117	VILLALAGO	SAGITTARIO	44,68	stabil	pluv.-ausgegl.
Mittelwert Regimetyp				59,40	unstabil	

\*1: Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit in der gesamten unbeeinflussten Messreihe einer Station

Quelle: Eigene Aufstellung

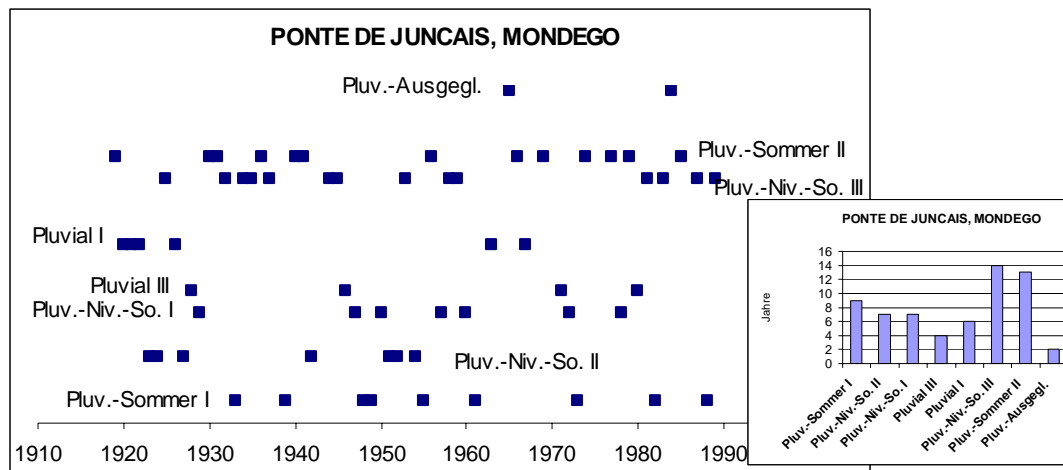
Regime Pluvio-Nival-Sommertrocken I (Gruppe B, Klasse 5)

Tabelle 23 Stabilität der Repräsentativstationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität	Haupttyp <sup>*1</sup>
1	34119	SUBBIANO	ARNO	82,12	sehr unstabil	pluv.-sommer I
2	6211500	SAN PEDRO	SIL	58,25	unstabil	pluv.-sommer I
3	9827	PONTE DE S. CLARA	MONDEGO	73,53	sehr unstabil	pluv.-sommer II
4	9828	PONTE DE JUNCAIS	MONDEGO	76,02	sehr unstabil	pluv.-niv.-so. III
5	34115	L'AQUILA	ATERNO	73,81	sehr unstabil	pluv.-niv.-so. I
Mittelwert Regimetyp				72,75	sehr unstabil	

\*1: Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit in der gesamten unbeeinflussten Messreihe einer Station

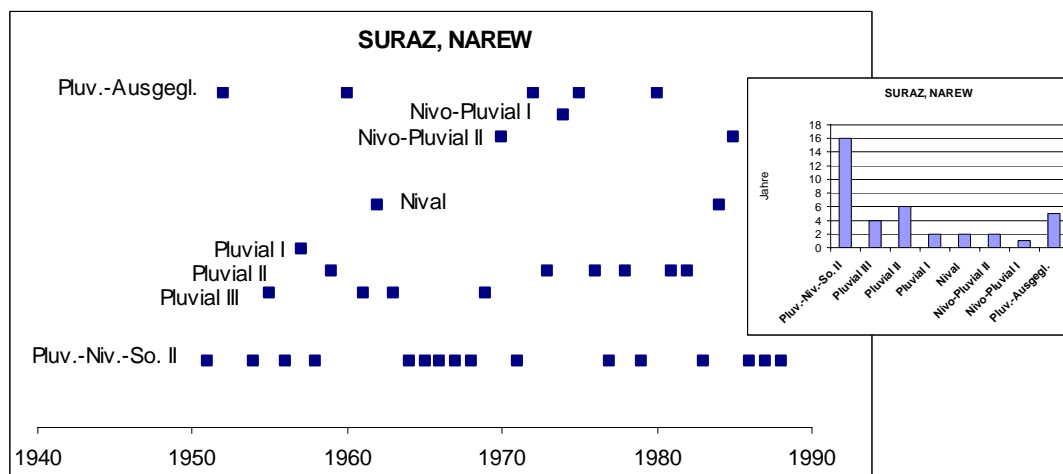
Quelle: Eigene Aufstellung



**Abb. 43** Häufigkeiten der Regimetypen, Station Ponte Juncais (Eigene Darstellung)

Das Regime Pluvio-Nival-Sommertrocken I ist mit einem relativen Stabilitätsindex von 73 Prozent als sehr instabil zu bewerten. In der Messperiode 1931-1960 vermindert sich die Variabilität ( $H_{rel} = 66\%$ ), der Regimetyp rutscht in die instabile Kategorie. Nur bei einer der fünf repräsentativen Stationen dominiert auch das Klassenregime.

#### Regime Pluvio-Nival-Sommertrocken II (Gruppe B, Klasse 3)



**Abb. 44** Häufigkeiten der Regimetypen, Station Suraz (Eigene Darstellung)

Ein relativer Stabilitätsindex von 77 Prozent deutet auf einen sehr instabilen Regimetyp hin. Die Spannweite erstreckt sich dabei in der gesamten unbeeinflussten Messreihe von 60 bis 89 Prozent. Während in dieser gesamten Peiode nur in 22 Prozent der Fälle auch das Regime Pluvio-Nival-Sommertrocken II die höchsten relativen Häufigkeiten aufweist, ist es im Zeitabschnitt 1931-1960 bei 78 Prozent aller Repräsentativstationen dominierend.

**Tabelle 24** Stabilität der Repräsentativstationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität	Haupttyp <sup>*1</sup>
1	9836	CASTRO D'AIRE	PAIVA	78,44	sehr unstabil	pluv.-sommer II
2	9829	PONTE DE CANAVE.	TAMEGA	77,07	sehr unstabil	pluv.-sommer II
3	9799	MONTJEAN	LOIRE	83,68	sehr unstabil	pluvial I
4	9839	PONTE DE VOUZELA	VOUGA	70,94	sehr unstabil	pluv.-niv.-so. III
5	9797	GIENT	LOIRE	89,09	sehr unstabil	pluvial I
6	9798	BLOIS	LOIRE	88,49	sehr unstabil	pluvial I
7	9872	WYSZKOW	BUG	60,25	unstabil	pluvial II
8	6140700	NEKOR	DIVOKA ORLICE	77,72	sehr unstabil	pluv.-niv.-so. II
9	6458805	SURAZ	NAREW	67,06	unstabil	pluv.-niv.-so. II
Mittelwert Regimetyp				76,97	sehr unstabil	

\*1: Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit in der gesamten unbeeinflussten Messreihe einer Station

Quelle: Eigene Aufstellung

### Regime Pluvial I (Gruppe B, Klasse 8)

**Tabelle 25** Stabilität der Repräsentativstationen

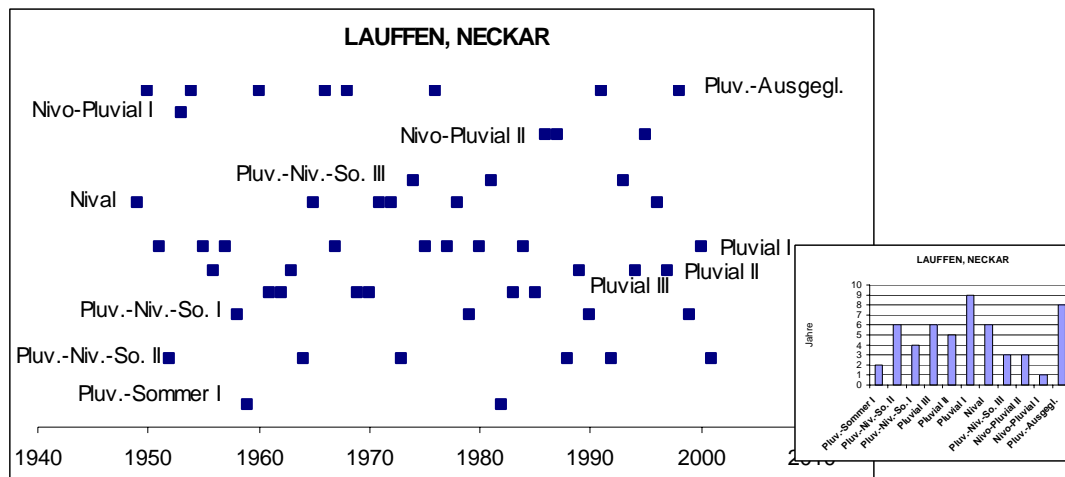
Nr.	Station-ID	Name	Fluss	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität	Haupttyp <sup>*1</sup>
1	6337512	HELDRA	WERRA	75,51	sehr unstabil	pluvial I
2	6337511	ALLENDORF	WERRA	84,30	sehr unstabil	pluvial I
3	6337513	LETZTER HELLER	WERRA	84,30	sehr unstabil	pluvial I
4	33059	WUERZBURG	MAIN	84,45	sehr unstabil	pluv.-ausgegl.
5	6335301	SCHWEINFURT	MAIN	84,96	sehr unstabil	pluvial I
6	6335602	PLOCHINGEN	NECKAR	93,61	sehr unstabil	pluv.-ausgegl.
7	6337504	SCHMITTLOTHEIM	EDER	80,88	sehr unstabil	pluvial I
8	6335601	LAUFFEN	NECKAR	88,41	sehr unstabil	pluvial I
9	6335350	LEUN (NEU)	LAHN	77,94	sehr unstabil	pluvial I
10	6335600	ROCKENAU-SKA	NECKAR	89,31	sehr unstabil	pluvial I
11	33079	NR BRODY	ODENSE	77,73	sehr unstabil	pluvial I
12	6336900	FREMERSDORF	SAAR RIVER	78,62	sehr unstabil	pluvial I
13	6934750	NEAR BROBY	ODENSE A	78,81	sehr unstabil	pluvial I
14	34118	STIA	ARNO	85,90	sehr unstabil	pluv.-niv.-so. III
15	6934350	STAVNAGER	RIBE A	53,44	unstabil	pluv.-ausgegl.
16	6934400	SKIBBY	ARHUS A	84,40	sehr unstabil	pluv.-ausgegl.
17	6335300	NEUENSTADT	KOCHER	85,91	sehr unstabil	pluv.-ausgegl.
Mittelwert Regimetyp				81,68	sehr unstabil	

\*1: Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit in der gesamten unbeeinflussten Messreihe einer Station

Quelle: Eigene Aufstellung

Beim Regime Pluvial I handelt es sich um den Regimetyp mit der höchsten Variabilität. Der durchschnittliche relative Instabilitätsindex über alle gruppenangehörigen Stationen beträgt 82 Prozent und ist damit als sehr unstabil einzustufen. Die Spannweite verläuft dabei von 53 bis 94 Prozent. Diese hohe Variabilität ist auch aus der Abbildung 45, für das Beispiel Lauffen mit einem H<sub>rel</sub> von 88 Prozent, deutlich zu erkennen. In 65 Prozent aller Fälle dominiert das Regime Pluvial I.





**Abb. 45** Häufigkeiten der Regimetypen, Station Lauffen (Eigene Darstellung)

### Regime Pluvial II (Gruppe B, Klasse 7)

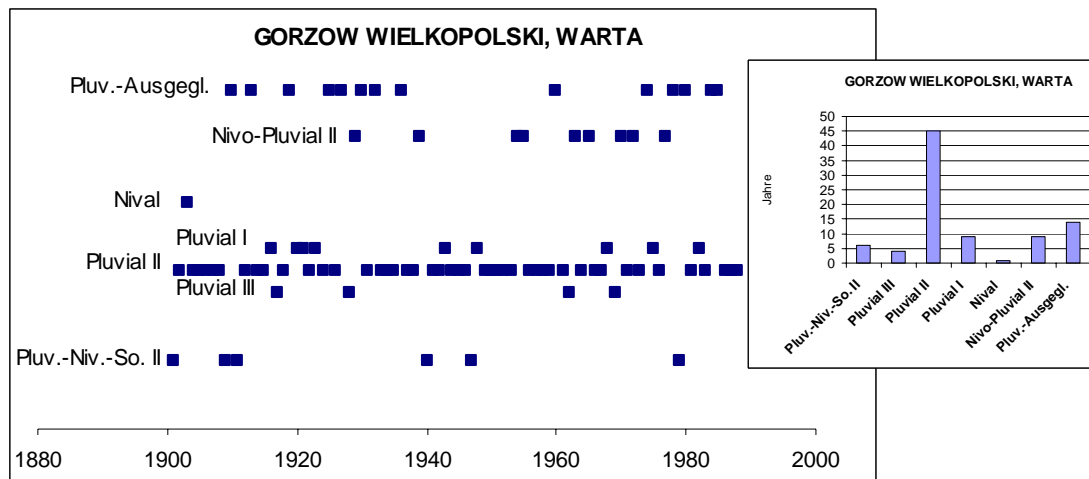
**Tabelle 26** Stabilität der Repräsentativstationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität	Haupttyp <sup>*1</sup>
1	6457800	GORZOW WIELKOP.	WARTA	57,56	unstabil	pluvial II
2	33157	ALLOGGIAMENTO ID.	ATERNO SAGITT.	43,02	stabil	pluvial II
3	34116	MOLINA	ATERNO	74,39	sehr unstabil	pluvial I
4	6337502	CELLE	ALLER	76,13	sehr unstabil	pluvial I
5	34111	SORA	LIRI	81,14	sehr unstabil	pluvial II
6	6441107	TRZEBIATOW	REGA	49,14	stabil	pluv.-ausgegl.
7	34112	CENTRALE TRAPON.	MARTA	67,99	unstabil	pluv.-ausgegl.
8	34103	CIVITA CASTELLANA	TREIA	64,18	unstabil	pluv.-ausgegl.
9	6458810	OSTROLEKA	NAREW	63,83	unstabil	pluvial II
10	9851	RIPETTA (ROMA)	TIBER (TEVERE)	58,91	unstabil	pluvial II
11	9871	TCZEW	VISTULA (WISLA)	54,92	unstabil	pluvial II
12	6935400	ANDELFINGEN	THUR	72,16	sehr unstabil	nivo-pluvial II
13	6458203	WADOWICE	SKAWA	83,53	sehr unstabil	nivo-pluvial II
14	6243800	HAGING	ANTIESEN	81,33	sehr unstabil	pluv.-ausgegl.
Mittelwert Regimetyp				66,30	unstabil	

\*1: Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit in der gesamten unbeeinflussten Messreihe einer Station

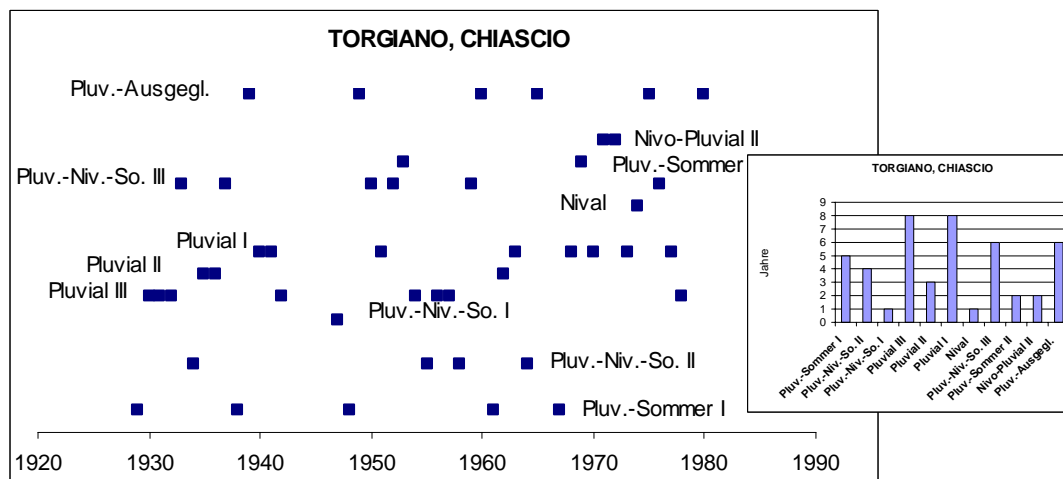
Quelle: Eigene Aufstellung

Das Abflussregime Pluvial II lässt sich mit einem relativen Instabilitätsindex von 66 Prozent als unstabil charakterisieren. Je 43 Prozent aller repräsentativen Messstationen fallen dabei in die unstabile und die sehr unstabile Kategorie. Die Bandbreite der relativen Instabilitätsindizes bewegt sich von 43 bis 83 Prozent. In sechs von vierzehn Fällen tritt das Klassenregime am häufigsten auf. In der Standardperiode 1931-1960 steigt der Anteil des Haupttyps geringfügig auf sieben von vierzehn Fällen an. Die Repräsentativstation Gorzow Wielkopolski (Warta) ist durch einen H<sub>rel</sub> in Höhe von 58 Prozent gekennzeichnet (vgl. Abb. 46) und wurde damit als unstabil bewertet. In der 44jährigen Zeitreihe dominiert hier das Regime Pluvial II.



**Abb. 46** Häufigkeiten der Regimetypen, Station Gorzow Wielk. (Eigene Darstellung)

### Regime Pluvial III (Gruppe B, Klasse 6)



**Abb. 47** Häufigkeiten der Regimetypen, Station Torgiano (Eigene Darstellung)

**Tabelle 27** Stabilität der Repräsentativstationen

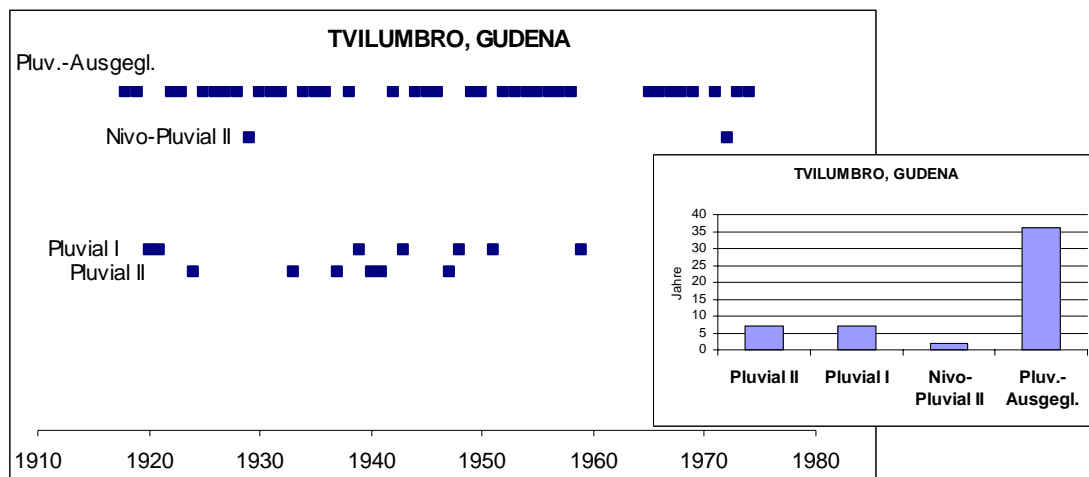
Nr.	Station-ID	Name	Fluss	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität	Haupttyp <sup>*1</sup>
1	33188	RADOMYSŁ	SAN	65,84	unstabil	pluv.-niv.-so. II
2	34101	TORGIANO	CHIASCIO	86,18	sehr unstabil	pluvial III
3	6212510	BRETO	ESLA	58,25	unstabil	pluv.-niv.-so. II
4	9830	REGUA	DOURO (DUERO)	76,32	sehr unstabil	pluv.-niv.-so. II
5	34120	CASTELFIORENTINO	ELSA	69,80	unstabil	pluv.-ausgegl.
6	34102	PONTE BETTONA	TOPINO	86,24	sehr unstabil	pluvial I
7	34108	TERAMO	TORDINO	75,32	sehr unstabil	pluvial III
8	34113	AMANDOLA	TENNA	65,34	unstabil	nivo-pluvial II
9	34107	PIEVE TORINA	CHIENTI	82,71	sehr unstabil	pluvial I
Mittelwert Regimetyp				74,00	sehr unstabil	

\*1: Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit in der gesamten unbeeinflussten Messreihe einer Station

Quelle: Eigene Aufstellung

Das Regime Pluvial III ist mit einem durchschnittlichen Instabilitätsindex von 74 Prozent als sehr instabil einzuordnen. Unter den neun repräsentativen Messstationen dominiert nur bei zwei Fällen das Klassenregime Pluvial III. In der Peiode 1931 bis 1960 ist es viermal anzutreffen.

#### Regime Pluvial-Ausgeglichen (Gruppe A, Klasse 3)



**Abb. 48** Häufigkeiten der Regimetypen, Station Tvilumbro (Eigene Darstellung)

**Tabelle 28** Stabilität der Repräsentativstationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität	Haupttyp <sup>*1</sup>
1	6340510	KETZIN	HAVEL	45,15	stabil	pluv.-ausgegl.
2	6457200	NOWE DREZDENKO	NOTEC	56,82	unstabil	pluv.-ausgegl.
3	6340501	RATHENOW HAUPT.	HAVEL	49,56	stabil	pluv.-ausgegl.
4	33078	TVILUMBRO	GUDENA	35,86	stabil	pluv.-ausgegl.
5	34121	TERRIA	VELINO	33,53	stabil	pluv.-ausgegl.
6	34124	LUNGHEZZA	ANIENE	55,32	unstabil	pluv.-ausgegl.
7	6934100	AHLERGAARDE	SKJERN A	18,31	sehr stabil	pluv.-ausgegl.
8	6934460	LINDENBORG BRO	LINDENBORG A	23,02	sehr stabil	pluv.-ausgegl.
9	6337503	HELMINGHAUSEN	DIEMEL	59,28	unstabil	pluv.-ausgegl.
10	6934050	AARUP	ARUP A	59,46	unstabil	pluv.-ausgegl.
11	9802	BEUCAIRE	RHONE	66,92	unstabil	pluv.-ausgegl.
12	6934300	ASTED BRO	UGGERBY A	64,01	unstabil	pluv.-ausgegl.
13	34122	VISSO	NERA	34,40	stabil	nivo-pluvial II
Mittelwert Regimetyp				46,28	stabil	

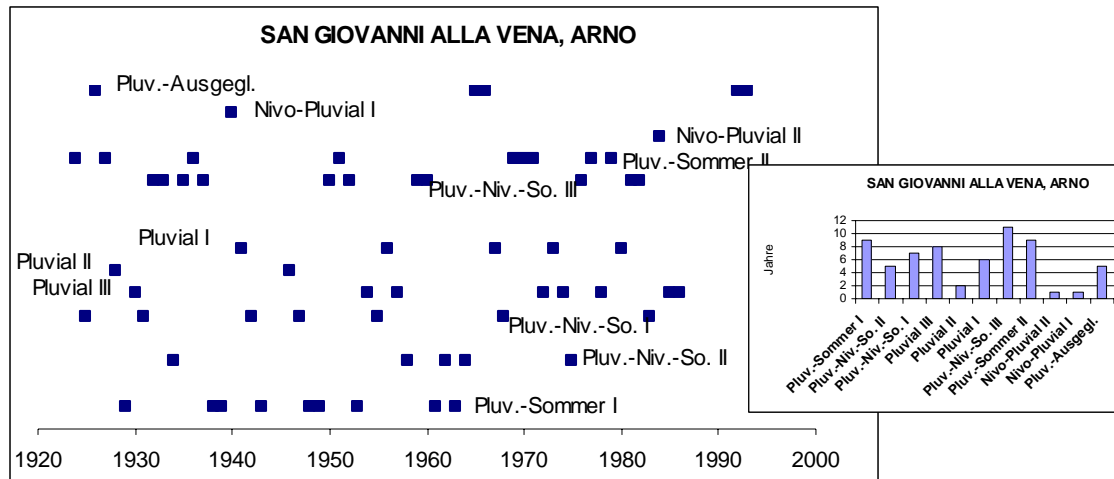
\*1: Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit in der gesamten unbeeinflussten Messreihe einer Station

Quelle: Eigene Aufstellung

Das stabile Abflussregime Pluvial-Ausgeglichen weist einen mittleren Instabilitätsindex von 46 Prozent, bei einer Spannweite von 18 bis 67 Prozent auf. Für die repräsentative Station Tvilumbro (vgl. Abb. 48) beträgt H<sub>rel</sub> 36 Prozent bei einer relativen Häufigkeit

des Klassenregimes von 69 Prozent. Zwölf der dreizehn gruppenangehörigen Messstationen weisen den Regimetyp Pluvial-Ausgeglichen am häufigsten auf.

#### Regime Pluvial-Sommertrocken I (Gruppe B, Klasse 1)



**Abb. 49** Häufigkeiten der Regimetypen, Station San Giovanni (Eigene Darstellung)

Der Regimetyp Pluvial-Sommertrocken I ist mit einem relativen Stabilitätsindex von 70 Prozent bereits als sehr instabil einzuschätzen. In der Standardperiode 1931-1960 fällt er allerdings mit einem  $H_{rel}$  von 68 Prozent in die instabile Kategorie. Das Klassenregime tritt nur bei einer Repräsentativstation mit der höchsten relativen Häufigkeit auf.

**Tabelle 29** Stabilität der Repräsentativstationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	$H_{rel}$ (%)	Stabilität	Haupttyp <sup>*1</sup>
1	9793	LITH	MAAS (MEUSE)	70,92	sehr instabil	pluvial I
2	6211100	ORENSE	MINO	58,25	instabil	pluv.-sommer I
3	6421500	BORGHAREN	MAAS	80,85	sehr instabil	pluvial I
4	6336500	TRIER UP	MOSELLE RIVER	81,04	sehr instabil	pluvial I
5	80268	SAN GIOVANNI ALL.	ARNO	86,35	sehr instabil	pluv.-niv.-so. III
6	33159	SAN SAMUELE DI C.	OFANTO	71,87	sehr instabil	pluv.-sommer II
7	9834	MOINHO DA GAMITIN.	SADO	50,14	instabil	pluv.-sommer II
8	6457820	POZNAN	WARTA	60,90	instabil	pluv.-ausgegl.
Mittelwert Regimetyp				70,04	sehr instabil	

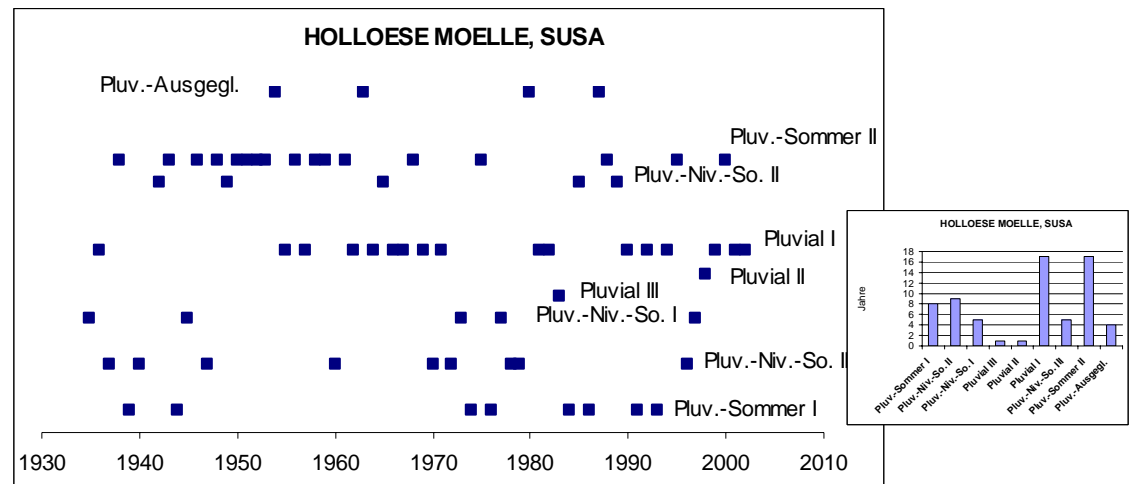
<sup>\*1</sup>: Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit in der gesamten unbeeinflussten Messreihe einer Station

Quelle: Eigene Aufstellung

#### Regime Pluvial-Sommertrocken II (Gruppe B, Klasse 12)

Das Regime Pluvial-Sommertrocken II ist mit einem Instabilitätsindex von 69,7 Prozent gerade noch als instabil einzustufen. In der Messperiode 1931-1960 verringert sich der

Stabilitätsindex auf 59 Prozent. Es dominiert hier in vier von sechs Fällen (1931-1960 fünf von sechs Fällen) das Klassenregime.



**Abb. 50** Häufigkeiten der Regimetypen, Station Holloese Moe. (Eigene Darstellung)

**Tabelle 30** Stabilität der Repräsentativstationen

Nr.	Station-ID	Name	Fluss	H <sub>rel</sub> (%)	Stabilität	Haupttyp <sup>*1</sup>
1	6934700	EJBY MOLLE	ODENSE A	74,29	sehr unstabil	pluvial I
2	6934570	LILLE SVENSTRUP	RINGSTED A	54,59	unstabil	pluv.-sommer II
3	6934530	BROMOELLE	AMOSE A	81,23	sehr unstabil	pluvial I
4	6934571	HOLLOESE MOELLE	SUSA	74,10	sehr unstabil	pluv.-sommer II
5	6934310	ELKAER BRO	LINDHOLM A	78,98	sehr unstabil	pluv.-sommer II
6	80272	BODEGA	ALPORTEL	55,24	unstabil	pluv.-sommer II
Mittelwert Regimetyp				69,74	unstabil	

\*1: Regimetyp mit der höchsten relativen Häufigkeit in der gesamten unbeeinflussten Messreihe einer Station

Quelle: Eigene Aufstellung

## **6. Schätzung der Regimetypen für talsperrenbeeinflusste Flussgebiete**

In Kapitel 4 erfolgte eine Klassifizierung von unbeeinflussten Abflussregimes zu 12 Regimetypen. Mit Hilfe von Gebietskenngrößen sollen nun für alle talsperrenbeeinflussten Einzugsgebiete die entsprechenden Regimetypen vorhergesagt werden, d.h. sie sollen jeweils einem der 12 Typen zugeordnet werden.

### **6.1. Datengrundlage und Datenüberblick – Gebietskenngrößen**

Die, zur Modellierung der räumlichen Variabilität hydrologischer Kennwerte, eingesetzten Gebietskenngrößen sollten die Eigenschaften eines Einzugsgebietes vollständig beschreiben (WEINGARTNER 1999, S. 19-21) sowie hydrologisch relevant und repräsentativ für den mittleren Zustand eines Einzugsgebietes sein (STREIT 1979). Dabei unterscheidet man zwischen invarianten und varianten Gebietsparametern. Bei den invarianten Merkmalen handelt es sich um geomorphologische Gegebenheiten, wie Größe des Einzugsgebietes, topographische Höhe und Gefällsverhältnisse. Die varianten Kenngrößen beschreiben die klimatischen und witterungsbedingten Verhältnisse in einem Einzugsgebiet. Hierzu zählen insbesondere die Faktoren Niederschlag und Temperatur. Das Abflussregime eines Fließgewässers wird durch die Gesamtheit dieser Steuerungsfaktoren geprägt, wobei der Niederschlag der am stärksten beeinflussende Faktor ist. Die Höhe, Dauer, Intensität, der Typ und die jahreszeitliche, flächenhafte und zeitliche Verteilung des Niederschlags bestimmen jedes Abflussereignis (BAUMGARTNER / LIEBSCHER 1990).

**Tabelle 31**                      Mit GloDiN-GIS berechnete Gebietskenngrößen

Gebietskenngrößen		Legende
Invariante (19)	Gebietsfläche (km <sup>2</sup> ) Umfang (km) Formparameter ( $U^2/A$ )/4 $\pi$ Höhe (m): Max, 25%- , 50%- u. 75%-Quantil Häufigkeit der Exposition in Richtung: N, NE, E, SE, S, SW, W, NW Hangneigung (Grad): Max, 25%- , 50%- u. 75%-Quantil	F U K H <sub>max</sub> , H <sub>25</sub> , H <sub>50</sub> , H <sub>75</sub> Exp <sub>0N</sub> bis Exp <sub>0NW</sub> Ng <sub>max</sub> , Ng <sub>25</sub> , Ng <sub>50</sub> , Ng <sub>75</sub>
Variante (96)	Nasstage (Monat Jan.-Dez.): 25%- u. 75%-Quantil Frosttage (Monat Jan.-Dez.): 25%- u. 75%-Quantil Mitteltemperatur (Monat Jan.-Dez.): 25%- u. 75%-Quantil Mittlerer Niederschlag mm (Monat Jan.-Dez.): 25%- u. 75%-Quantil	Wt <sub>125</sub> bis Wt <sub>1275</sub> Fr <sub>125</sub> bis Fr <sub>1275</sub> T <sub>125</sub> bis T <sub>1275</sub> N <sub>125</sub> bis N <sub>1275</sub>

Quelle: Eigene Aufstellung

Mit dem Programm GloDiN-GIS wurden für 386 Gewässereinzugsgebiete insgesamt 96 variante Kenngrößen, aus IPCC-Rasterdaten (IPCC 2004), sowie 19 invariante

Gebietskenngrößen, auf Basis einer Analyse des SRTM30 (2003), berechnet (vgl. HOFFMANN 2005). Ein Überblick hierzu ist der Tabelle 31 zu entnehmen.

#### Charakterisierung der Einzugsgebietstypen

Um einen Überblick über die 386 Flusseinzugsgebiete zu bekommen, wurden diese mittels einer Clusteranalyse klassifiziert. Dazu mussten zunächst alle Werte  $x_i$  einer Variablen  $x$  am maximalen Wert der Variablen  $x$  standardisiert werden (vgl. Formel 6).

$$z_i = \frac{x_i}{\text{Max}(x)} \quad (\text{Formel 6})$$

Eine Normierung nach Formel 6 erfolgte für alle Variablen, mit Ausnahme der acht Expositionsmerkmale, welche als Anteilswerte bereits in einem transformierten Bereich zwischen 0 und 1 vorlagen.

Während bei der Durchführung einer Clusteranalyse mit ausschließlich invarianten Gebietskenngrößen das Ward-Verfahren mit der quadrierten Euklidischen Distanz zu den besten Ergebnissen führt, konnten bei Einbeziehung der varianten Merkmale hiermit keine brauchbaren Resultate erzielt werden. Es ergab sich eine starke Kettenbildung. Auch hier erwies sich wiederum das Linkage innerhalb der Gruppen mit dem Kosinus als Ähnlichkeitsmaß (vgl. Kap. 4.4.) als plausibler Ansatz und führte zu 8 Raumtypen.

Im Anschluss wurde eine schrittweise Diskriminanzanalyse mit dem Gütekriterium Wilks Lambda und einem F-Wert von 3,84 für die Aufnahme und 2,71 für den Ausschluss einer Variablen durchgeführt. Dabei wird in jedem Schritt die Variable in das Modell aufgenommen, die Wilks Lambda minimiert, solange bis der F-Wert von 3,84 von keiner der noch nicht einbezogenen Variablen erreicht wird. Durch Aufnahme einer neuen Variablen kann sich der F-Wert der bereits in den Diskriminanzfunktionen enthaltenen Variablen verändern. Verringert sich der F-Wert einer Variablen, nimmt die Signifikanz für deren Trennungskraft ab. Sinkt der F-Wert unter 2,71 wird die Variable wieder aus dem Modell ausgeschlossen (BROSIUS 1998, S. 624ff). Zur Trennung der Gruppen trugen dabei nur 42 der 115 Merkmale signifikant bei, welche in die 7 gebildeten Diskriminanzfunktionen integriert wurden. Die Trefferquote, die sich aus der hiermit erfolgten Klassifikation der Fälle ergab, betrug 98,7 Prozent.

Interessant hierbei ist die Erkenntnis, welche der Merkmale am meisten zur Trennung der Gruppen beitragen. Einen Überblick über 12 in den Diskriminanzfunktionen enthaltenen Variablen, mit den größten F-Werten (bzw. kleinstem Wilks Lambda) ist

der Tabelle 32 zu entnehmen. Bei den angegebenen Gruppenwerten handelt es sich jeweils um den entsprechenden Clustermedian. Es wird deutlich, dass die Klimaparameter dominieren. Unter den 42 signifikant trennenden Variablen befinden sich nur vier invariante Merkmale (Ng<sub>25</sub>, Ng<sub>50</sub>, Ng<sub>75</sub>, Expo<sub>s</sub>). Abschließend wurden in Tabelle 33 die 8 Raumtypen anhand ihrer klassenspezifischen Merkmale charakterisiert.

**Tabelle 32** Gruppenmedian wichtiger Klassifikationsparameter<sup>\*1</sup>

Klasse	Fr10 <sub>75</sub>	Fr3 <sub>25</sub>	T5 <sub>25</sub>	Fr5 <sub>75</sub>	Wt6 <sub>75</sub>	N2 <sub>25</sub>	Ng <sub>25</sub>	Fr4 <sub>25</sub>	N11 <sub>25</sub>	T7 <sub>25</sub>	Wt11 <sub>25</sub>	N6 <sub>25</sub>
1	8	18	11,9	3	15	1,3	0,3	9	1,4	17,1	14	2,2
2	5	12	12,3	2	14	1,7	0,2	6	1,9	17,5	15	2,1
3	11	18	7,4	7	19	2,3	1,4	9	2,7	12,7	13	4,6
4	3	10	12,4	2	13	1,8	1,7	5	3,3	19,4	14	2,1
5	1	5	15,9	1	6	1,7	0,7	2	1,7	24,0	11	0,5
6	6	10	11,4	6	12	1,2	0,6	6	1,5	19,2	10	1,3
7	1	6	14,4	1	10	2,1	1,1	3	3,1	21,0	13	1,5
8	17	23	2,8	16	20	4,5	7,4	17	4,3	8,2	14	6,2

\*1: Legende vgl. Tab. 31, S. 59

Quelle: Eigene Aufstellung

**Tabelle 33** Raumtypen in Zentraleuropa

Klasse	Klassenbezeichnung	Anzahl
1	Tiefland bis Mittelgebirge (Atlantischer Einfluss)	153
2	Tiefland (Atlantischer Einfluss)	68
3	Gebirgsvorland Hochgebirge	37
4	Mittelgebirge (Mediterraner Einfluss, hohe Niederschläge)	38
5	Tiefland (Mediterraner Einfluss, geringe Niederschläge)	17
6	Mittelgebirge (Mediterraner Einfluss, geringe Niederschläge)	26
7	Tiefland (Mediterraner Einfluss, hohe Niederschläge)	26
8	Hochgebirge	11

Quelle: Eigene Aufstellung

## 6.2. Zusammenhang zwischen Raum- und Regimetypen

Bevor im nächsten Kapitel eine mathematische Trennung der Regimetypen über Gebietskenngrößen durchgeführt wird, darf jedoch eine inhaltliche Betrachtung nicht vergessen werden. Da Abflussregimes ein Abbild der klimatischen und morphometrischen Einflussfaktoren sind, lässt sich die Hypothese aufstellen, dass ähnliche Flusseinzugsgebiete auch ähnliche Abflussregimes hervorbringen. Mit den beiden vorliegenden nominalskalierten Variablen Raum- und Regimetyp ist es möglich, diesen Zusammenhang auch statistisch zu prüfen. Dazu wurde ein Chi-Quadrat-Test, mit der statistischen Nullhypothese „Variable x und y sind voneinander unabhängig“, durchgeführt. Der berechnete  $\chi^2$ -Wert in Höhe von 203,4 führte, unter Berücksichtigung von 88 Freiheitsgraden, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 Prozent zur



Ablehnung der Hypothese, d.h. es kann angenommen werden dass die Variablen abhängig sind. Als Indikatoren für die Stärke des Zusammenhanges können der Phi-Koeffizient (=1,275), Cramers V (=0,482) und der Kontingenzkoeffizient (=0,787) herangezogen werden. Nach BACKHAUS u.a. (2000, S. 238ff) kann man unterstellen, dass der Zusammenhang bei einem Wert größer 0,3 von Bedeutung ist. Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass die Voraussetzungen für einen Chi-Quadrat-Test streng genommen nicht erfüllt sind. So darf der Anteil der Zellen mit erwarteten Häufigkeiten, die kleiner als fünf sind, 20 Prozent nicht überschreiten. Außerdem darf keiner der Erwartungswerte kleiner als eins sein (BACKHAUS u.a. 2000, S. 248). Beide Anforderungen wurden im vorliegenden Fall nicht erfüllt.

Diese relativ allgemeine Aussage gibt jedoch keine Antwort auf die Frage, wie gut sich die einzelnen Abflussregimetypen (A u. B) durch Raumtypen (G) abgrenzen lassen. Deshalb wurden zunächst zwei Kreuztabellen, zum einen mit den relativen Häufigkeiten der Regimetypen pro Raumtyp (vgl. Tab. 34) und zum anderen mit den relativen Häufigkeiten der Raumtypen je Regimetyyp (vgl. Tab. 35), aufgestellt.

**Tabelle 34** Relative Häufigkeiten der Regimetypen pro Raumtyp<sup>\*1, 2</sup>

Typ	B2	B10	A2	A1	B5	B3	B8	B7	B6	A3	B1	B12	
G1	0,064	0,149	0,085	0,106	0	0,064	0,234	0,149	0,021	0,106	0,021	0	1,00
G2	0	0	0	0	0,042	0,167	0,208	0	0	0,208	0,167	0,208	1,00
G3	0,412	0,353	0,059	0,118	0	0	0	0,059	0	0	0	0	1,00
G4	0	0	0	0,118	0,118	0	0,059	0,235	0,294	0,118	0,059	0	1,00
G5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,667	0,333	1,00
G6	0	0	0	0	0	0	0	0	1,000	0	0	0	1,00
G7	0	0,091	0	0,182	0,182	0,182	0	0,182	0,091	0,091	0	0	1,00
G8	1,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00

\*1: vgl. Kap. 4.5., S. 27ff; \*2: vgl. Tab. 33, S. 61

Quelle: Eigene Aufstellung

**Tabelle 35** Relative Häufigkeiten der Raumtypen pro Regimetyyp<sup>\*2, 1</sup>

Typ	B2	B10	A2	A1	B5	B3	B8	B7	B6	A3	B1	B12
G1	0,214	0,500	0,800	0,455	0	0,333	0,647	0,500	0,111	0,385	0,125	0
G2	0	0	0	0	0,200	0,444	0,294	0	0	0,385	0,500	0,833
G3	0,500	0,429	0,200	0,182	0	0	0	0,071	0	0	0	0
G4	0	0	0	0,182	0,400	0	0,059	0,286	0,556	0,154	0,125	0
G5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,250	0,167
G6	0	0	0	0	0	0	0	0	0,222	0	0	0
G7	0	0,071	0	0,182	0,400	0,222	0	0,143	0,111	0,077	0	0
G8	0,286	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

\*1: vgl. Kap. 4.5., S. 27ff; \*2: vgl. Tab. 33, S. 61

Quelle: Eigene Aufstellung

Auf Basis dieser Häufigkeiten konnten dann für beide Richtungen Instabilitätsindizes ( $H$ ) nach dem Entropiekonzept (vgl. Kap. 5.1. Formeln 3-5) berechnet werden. Die maximale Instabilität ( $H_{\max}$ ) stellt sich ein, wenn jeweils alle Typen mit der gleichen relativen Häufigkeit auftreten, was einer rein zufälligen Verteilung entsprechen würde. Durch den relativen Instabilitätsindex ( $H_{\text{rel}}$ ) wird damit also angegeben, wie viel Prozent einer Zufallsverteilung durch die tatsächliche Verteilung erreicht werden. Die entsprechenden Werte wurden in der Tabelle 36 aufgeführt.

**Tabelle 36** Instabilitätsindizes Regime- u. Raumtypen

Regimety <sup>*1</sup>	H	H <sub>rel</sub> (%)	Raumtyp <sup>*2</sup>	H	H <sub>rel</sub> (%)
B2	1,035	49,8	G1	2,109	84,9
B10	0,898	43,2	G2	1,710	68,8
A2	0,500	24,1	G3	1,318	53,0
A1	1,288	62,0	G4	1,789	72,0
B5	1,055	50,7	G5	0,637	25,6
B3	1,061	51,0	G6	0,000	0,0
B8	0,808	38,9	G7	1,894	76,2
B7	1,171	56,3	G8	0,000	0,0
B6	1,149	55,3			
A3	1,220	58,7			
B1	1,213	58,3			
B12	0,451	21,7			
<b>Mittelwert:</b>		<b>47,5</b>	<b>Mittelwert:</b>		<b>47,6</b>

\*1: vgl. Kap. 4.5., S. 27ff; \*2: vgl. Tab. 33, S. 61

Quelle: Eigene Aufstellung

Wie aus den Tabellen deutlich zu entnehmen ist, wird kein Regimety eindeutig durch einen Raumtyp abgegrenzt. Nur bei den beiden gering besetzten Regimes Pluvial-Sommertrocken II (B12) und Nivo-Pluvial I (A2) dominiert jeweils ein Raumtyp mit  $\geq 80\%$  ( $H_{\text{rel}}$  22 bzw. 24%). Die Regimes Pluvial I (B8) und III (B6) sind mit einer Wahrscheinlichkeit von 65 bzw. 56% auf Einzugsgebiete, die einem Raumtyp angehören, zurückzuführen. Für die restlichen acht Regimegruppen beträgt die maximale relative Häufigkeit einer Einzugsgebietsklasse  $\leq 50\%$ . D.h. alle Regimeklassen enthalten mehr oder weniger viele Flusseinzugsgebiete, die sich in Bezug auf ihre varianten und invarianten Merkmale deutlich voneinander unterscheiden und damit verschiedenen Raumtypen angehören.

In Kapitel 4.3. wurde die Vermutung zum Ausdruck gebracht, dass dies auf die allochthonen Flussgebiete ( $>5.000 \text{ km}^2$ ) zurückzuführen ist, bei denen das Abflussverhalten nicht mehr als Produkt der umgebenden Landschaft verstanden werden kann. Betrachtet man nun von den 125 repräsentativen Stationen nur die 67 autochthonen Messstationen ( $\leq 5.000 \text{ km}^2$ ), stabilisiert sich die Situation zwar etwas (Mittelwert  $H_{\text{rel}}$  über alle Regimetyen sinkt von 48 auf 41%), hiermit lässt sich jedoch

die Vermutung in keinsten Weise bestätigen. Damit kann an dieser Stelle keine Aussage dazu getroffen werden, ob sich autochthone Einzugsgebiete besser zur Trennung von Regimetypen mittels Gebietskenngrößen eignen. In diesem Zusammenhang sei noch auf ASCHWANDEN und WEINGARTNER (1985, M.5.4.) verwiesen, die bei ihrer Untersuchung nur autochthone Gebiete zwischen 10 und 500 km<sup>2</sup> berücksichtigt haben. Auch ihnen gelang nur für den nordalpinen Raum (>1.550 m) eine räumliche Festlegung der Regimetypen mit den invarianten Parametern Vergletscherung und mittlere Einzugsgebietshöhe. Die mittelländischen und jurassischen Regimes ließen sich mit invarianten Gebietskenngrößen bereits nicht mehr optimal trennen.

Aufgrund der unbefriedigenden Trennung der Regimetypen durch Raumtypen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Beziehung Raum – Regime zu komplex ist, um mit einfachen Einzugsgebietsparametern erklärt zu werden. Eine zuverlässige Modellvorhersage von Abflussregimetypen mit Hilfe von Gebietskenngrößen scheint somit fraglich zu sein. Damit muss das im nächsten Kapitel aufzustellende mathematische Modell mit Vorsicht betrachtet werden. Es ist, wie jedes Modell, stark vereinfachend und kann die komplexen natürlichen Vorgänge niemals vollständig widerspiegeln.

### 6.3. Mathematisches Modell zur Vorhersage von Regimetypen

Zielstellung dieses Kapitels ist die Aufstellung eines mathematischen Modells zur Schätzung von Regimetypen für talsperrenbeeinflusste Einzugsgebiete. Dazu wurden auf Basis der aus 125 Repräsentativstationen (vgl. Kap. 4.5.) bestehenden Stichprobe, unter Verwendung normierter Gebietskenngrößen (vgl. Kap. 6.1.), Diskriminanzfunktionen zur Trennung der 12 Regimetypen geschätzt. Im vorliegenden 12-Gruppen-Fall lassen sich maximal 11 Diskriminanzfunktionen bilden, welche jeweils durch Maximierung des Diskriminanzkriteriums

$$\Gamma = \frac{\text{Streuung zwischen den Gruppen (erklärte)}}{\text{Streuung in den Gruppen (nicht erklärte)}} = \frac{SS_b}{SS_w}$$

ermittelt werden (BACKHAUS u.a. 2000, S. 155). Der Maximalwert des Kriteriums wird auch als Eigenwert bezeichnet. Dieser Eigenwert und damit der Erklärungsanteil sind für die erste Diskriminanzfunktion am höchsten. Alle weiteren Funktionen werden so ermittelt, dass sie jeweils einen maximalen Anteil derjenigen Streuung erklären, die

nach Aufstellung der vorhergehenden Funktionen als Rest verbleibt (BACKHAUS u.a. 2000, S. 168).

Das mathematische Modell sollte dabei so einfach wie möglich konzipiert sein, d.h. mit einer möglichst geringen Anzahl von Diskriminanzfunktionen und Merkmalsvariablen einen hohen Erklärungsgehalt liefern. Dadurch werden zufällige, aus der Stichprobenbetrachtung resultierende, Einflüsse minimiert. Der Übergang von einem einfachen zu einem komplexen Modell lässt sich nur dann rechtfertigen, wenn der Erklärungsanteil dadurch deutlich verbessert werden kann (BROSIUS 1998, S. 615).

Aber selbst wenn es mit dem Modell gelingt, die 125 Stichprobenfälle mit einer hohen Genauigkeit den ursprünglichen Gruppen zuzuordnen, muss dies nicht bedeuten, dass es auch für eine Vorhersage von Regimetypen außerhalb der Stichprobe geeignet ist. Dies wird nur dann zutreffen, wenn die Stichprobe die Grundgesamtheit sehr gut repräsentiert (BROSIUS 1998, S. 599f).

### Modelloptimierung

Der erste Optimierungsschritt bestand in der Reduktion von Merkmalsvariablen, d.h. eine als notwendig erachtete Trefferquote (korrekt klassifizierte Fälle in %) sollte mit einer möglichst geringen Anzahl von Variablen erreicht werden. In diesem Fall wurde eine sachlich notwendige Trefferquote von mindestens 90% unterstellt. Ausgehend von einem hohen F-Wert (3,84 u. 2,71), bei dem nur sechs Variablen ( $Ng_{max}$ ,  $Fr_{875}$ ,  $Wt_{925}$ ,  $Wt_{525}$ ,  $Wt_{625}$ ,  $Wt_{1075}$ ) signifikant zur Trennung der Regimetypen beitrugen, wurde der für die Aufnahme in das Modell geforderte F-Wert schrittweise reduziert. Die Ergebnisse können der Tabelle 37 entnommen werden.

**Tabelle 37** Entwicklung der Trefferquoten bei Variation der F-Werte

Schritt	F-Wert	Trefferquote* <sup>1</sup> (%)	Anzahl Variablen
	unabhängige Variablen* <sup>2</sup>	96,0	55
9	0,001/0,000	94,4	45
<b>8</b>	<b>0,50/0,40</b>	<b>94,4</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>1,40/1,30</b>	<b>93,6</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>1,70/1,40</b>	<b>92,8</b>	<b>40</b>
5	2,00/1,90	84,0	26
4	2,20/1,50	78,4	21
3	2,60/1,50	60,8	11
2	2,90/1,50	55,2	8
1	3,84/2,71	52,0	6

\*1: bei maximaler Anzahl von 11 Funktionen, Gütemaß Wilks Lambda

Quelle: Eigene Aufstellung

\*2: alle Variablen die die Toleranzkriterien erfüllen wurden gleichzeitig aufgenommen

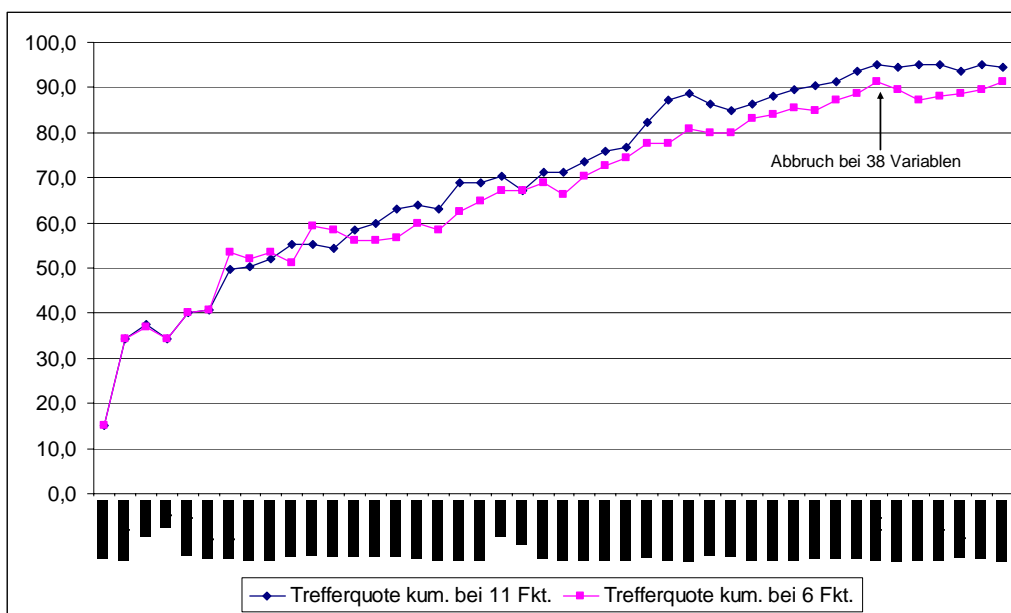
Es lässt sich folgender grundsätzlicher Zusammenhang hieraus ableiten: je geringer der F-Wert, desto mehr (unwichtige) Variablen werden in die Diskriminanzfunktionen aufgenommen und desto höher fällt die Trefferquote aus. Bei einer geforderten Mindesttrefferquote von 90% kamen nur drei Lösungen (Schritt 6, 7, 8) in die engere Wahl. Da die Anzahl der Variablen bei diesen drei Ansätzen nur geringfügig variierte, wurde als Optimum ein F-Wert von 0,50 für die Aufnahme und 0,40 für den Ausschluss, bei Integration von 44 Variablen und einer maximalen Trefferquote von 94,4%, festgelegt. Als nachteilig erwies sich hierbei, dass der F-Wert sehr stark gesenkt werden musste und damit Variablen mit geringer Trennungskraft in das Modell aufgenommen wurden. Zum Vergleich, bei einem F-Wert von 0,50 ergibt sich eine Irrtumswahrscheinlichkeit für den F-Wert von etwa 0,88 (bei F-Wert 1,7 ca. 0,15).

Aufbauend auf die im ersten Schritt abgeleitete, aus 44 Variablen bestehende Teilmenge, wurde in Anlehnung an KÖPPEN (1985, S. 57ff) ein zweiter Schritt zur Reduktion der verbliebenen Merkmale durchgeführt. Der Grundgedanke dieses Ansatzes liegt darin, aus  $\binom{N}{m}$  Merkmalskombinationen diejenige zu berechnen, welche die höchste Trefferquote erzielt (KÖPPEN 1985, S. 22ff). Um die optimale Merkmalskombination zu ermitteln, müssten bei einer 44-elementigen Menge insgesamt  $2^{44} = 1,759 \times 10^{13}$  Teilmengen durchgerechnet werden. Zur Reduzierung des Rechenaufwandes hat KÖPPEN (1985) eine Heuristik entwickelt, die hier in stark vereinfachter und abgewandelter Form zur Anwendung gelangte und dadurch auch ohne Einsatz einer speziellen Softwarelösung eine weitere Optimierung des Modells ermöglichte.

Dazu wurde ausgehend von den 44 Variablen jeweils ein Merkmal aus der Analyse herausgenommen und aus dem Restbestand die Trefferquote (mit F-Werten 0,50/0,40) berechnet. Anschließend wurde das entsprechende Merkmal wieder zugelassen und das nächste Merkmal abgearbeitet. Die nach diesem Schema ermittelten 44 Trefferquoten wurden dann aufsteigend sortiert. Damit erfolgte also ein Ranking der Merkmale, hinsichtlich ihrer Trennungseigenschaften, anhand von Trefferquoten. Den ersten Rang nimmt dabei die Variable ein, nach deren Elimination sich die Trefferquote am stärksten verschlechterte. Beginnend mit dieser Variable erfolgt nun der Rangfolge nach ein Merkmalsaufbau, d.h. es wird nacheinander jeweils eine weitere Variable in das Modell aufgenommen und die Trefferquote berechnet, solange bis alle 44 Variablen integriert sind.

Die sich nach dieser Methode ergebenden kumulierten Trefferquoten sind in der Abbildung 51 graphisch dargestellt. In diesem Fall wurde bereits mit 38 Variablen eine Trefferquote von 95,2% erreicht. Im Vergleich zu der mit dem Programm SPSS optimierten Lösung, konnte also nochmals eine Reduzierung um sechs Variablen bei einem Anstieg der Trefferquote um 0,8% verwirklicht werden. Ob diese relativ geringfügige Verbesserung den Aufwand rechtfertigt, sei einmal dahin gestellt.

**Abb. 51** Kumulierte Trefferquoten beim Merkmalsaufbau



Quelle: Eigene Darstellung

Nachdem die Möglichkeiten zur Optimierung der Merkmalsmenge und der Trefferquote ausgeschöpft wurden, war in einem dritten Schritt zu entscheiden, wie viele Diskriminanzfunktionen in dem Modell Berücksichtigung finden sollten. Die Tabelle 38 gibt über die Entwicklung der Eigenwerte aller Diskriminanzfunktionen sowie über die entsprechenden kumulierten Trefferquoten Auskunft. Während die Spalten 2, 3 und 5 jeweils den Erklärungsgehalt der einzelnen Funktionen widerspiegeln, beziehen sich die Spalten 4 und 6 auf die kumulierten Werte der in das Modell eingeflossenen Diskriminanzfunktionen. In diesem Fall wurde eine Verwendung der ersten sechs Funktionen als optimal angesehen, da die Funktionen sieben bis elf nur noch einen geringen Beitrag zur Unterscheidung der Gruppen beisteuern. Auch wird durch diese sechs Funktionen mit 91,2% die Mindesttrefferquote erreicht, welche bei Aufnahme weiterer Funktionen nur noch geringfügig steigt.

**Tabelle 38** Eigenwerte und kumulierte Trefferquoten der Diskriminanzfunktionen<sup>\*1</sup>

Funktion	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation	Trefferquote kum. %
1	17,398	53,3	53,3	0,972	39,2
2	3,982	12,2	65,5	0,894	57,6
3	2,871	8,8	74,3	0,861	73,6
4	2,384	7,3	81,6	0,839	84,0
5	1,658	5,1	86,7	0,790	86,4
<b>6</b>	<b>1,411</b>	<b>4,3</b>	<b>91,0</b>	<b>0,765</b>	<b>91,2</b>
7	0,884	2,7	93,7	0,685	92,0
8	0,748	2,3	96,0	0,654	92,0
9	0,655	2,0	98,0	0,629	92,8
10	0,378	1,2	99,2	0,524	94,4
11	0,275	0,8	100,0	0,464	95,2

\*1: Analyse mit 38 Variablen, Wilks Lambda, F-Wert 0,50/0,40

Quelle: eigene Aufstellung

Zur Vereinfachung des mathematischen Modells wurde also ein gewisser Abschlag von der maximal möglichen Trefferquote in Kauf genommen. Dies wird insbesondere bei einem Vergleich der Trefferquoten für die 12 Regimegruppen deutlich, welcher in Tabelle 39 für die 6- und 11-Funktions-Lösung abgebildet wurde. Während durch den Reduktionsschritt, von elf auf sechs Funktionen, die Gesamttrefferquote nur um 4% vermindert wird, verringert sich die Trefferquote für 5 Einzelgruppen um 8 bis 20%. Für die restlichen 7 Regimetypen ändert sie sich dagegen überhaupt nicht.

**Tabelle 39** Trefferquoten der Regimetypen bei 6 und 11 Funktionen<sup>\*1</sup>

Regimetyp <sup>*2</sup>	B1	B2	B3	B5	B6	B7	B8	B10	B12	A1	A2	A3
6 Funktionen	87,5	100,0	88,9	60,0	88,9	100,0	94,1	100,0	83,3	81,8	100,0	84,6
11 Funktionen	87,5	100,0	100,0	80,0	100,0	100,0	94,1	100,0	83,3	90,9	100,0	92,3
Differenz	0,0	0,0	11,1	20,0	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	9,1	0,0	7,7

\*1: Analyse mit 38 Variablen, Wilks Lambda, F-Wert 0,50/0,40

Quelle: Eigene Aufstellung

\*2: vgl. Kap. 4.5., S. 27ff

### Schätzung der endgültigen Diskriminanzfunktionen

Zur Schätzung der für die anschließende Klassifikationsphase benötigten Diskriminanzfunktionen, wurde eine Diskriminanzanalyse mit 38 Variablen, einer schrittweisen Methode mit dem Gütekriterium Wilks Lambda sowie einer F-Wert-Vorgabe von 0,50 und 0,40 durchgeführt. Die Anzahl der zu bildenden Diskriminanzfunktionen wurde dabei auf die ersten sechs begrenzt.

Die allgemeine Gleichung der sechs gebildeten Diskriminanzfunktionen lautet:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_{38} X_{38} \quad (\text{Formel 7})$$

In Tabelle 40 sind die entsprechenden Konstanten  $b_0$  sowie die Diskriminanzkoeffizienten  $b_j$  der Variablen  $X_j$  ( $j=1,2,...,38$ ) für alle Funktionen aufgeführt.

**Tabelle 40** Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten

Variable $X_j$	Funktion					
	1	2	3	4	5	6
Expos	0,660	-8,765	-8,972	4,887	1,422	-7,806
Ng <sub>25</sub>	-6,359	9,135	-7,476	7,875	-0,019	-2,802
Ng <sub>75</sub>	5,111	-12,717	6,038	2,229	4,174	7,860
Ng <sub>max</sub>	6,945	2,315	-3,278	2,112	-3,568	-3,091
Wt1 <sub>25</sub>	28,150	-8,000	3,886	-1,726	-13,636	-0,990
Wt1 <sub>75</sub>	-20,429	-21,556	9,348	9,672	1,587	11,356
Wt2 <sub>25</sub>	-31,307	19,048	-17,586	-4,712	19,573	-9,262
Wt2 <sub>75</sub>	21,904	2,970	7,200	-8,624	-18,423	17,126
Wt4 <sub>25</sub>	-1,725	-24,786	-12,293	-0,623	-43,012	8,408
Wt4 <sub>75</sub>	12,674	2,411	-10,905	-16,655	31,626	-36,057
Wt6 <sub>25</sub>	57,604	8,174	2,248	-0,510	19,253	1,133
Wt6 <sub>75</sub>	-61,939	35,935	10,000	21,575	-17,164	10,783
Wt7 <sub>25</sub>	-7,739	-26,287	8,376	11,455	16,810	1,256
Wt9 <sub>25</sub>	31,942	14,434	1,222	-15,184	-7,571	-11,427
Wt10 <sub>25</sub>	-17,377	-7,048	-5,565	8,249	20,183	8,783
Fr3 <sub>75</sub>	8,683	10,901	29,245	18,948	-28,225	5,255
Fr4 <sub>25</sub>	-18,405	-0,656	-12,270	-4,615	-8,964	16,484
Fr5 <sub>25</sub>	29,313	4,696	17,901	5,489	9,057	-10,235
Fr5 <sub>75</sub>	-11,133	22,624	14,753	16,235	-3,067	6,431
Fr8 <sub>75</sub>	20,608	-9,391	4,985	-17,765	-8,067	-6,785
Fr9 <sub>25</sub>	-5,935	-3,272	-6,991	3,661	3,855	2,254
Fr11 <sub>75</sub>	5,569	-9,610	-10,790	-21,711	33,206	-12,168
T3 <sub>25</sub>	4,388	14,369	21,841	9,503	-5,434	-3,047
T8 <sub>75</sub>	2,742	59,255	10,012	54,063	-17,059	-33,678
T9 <sub>75</sub>	-4,976	-85,140	13,667	-38,673	10,220	79,850
T11 <sub>75</sub>	18,983	49,560	-68,706	-7,613	0,350	-46,993
T12 <sub>25</sub>	-5,286	1,936	7,707	0,368	1,251	3,910
T12 <sub>75</sub>	1,251	-17,187	38,314	6,178	7,513	11,287
N3 <sub>75</sub>	-3,182	4,676	1,037	18,527	8,451	3,465
N6 <sub>75</sub>	-14,268	-16,541	-0,519	18,340	-13,702	24,007
N7 <sub>25</sub>	8,062	20,375	10,380	-13,975	-5,341	-17,627
N7 <sub>75</sub>	31,782	6,837	-9,443	-4,114	-4,995	-25,758
N8 <sub>75</sub>	-4,977	0,588	3,264	-11,450	26,110	18,482
N9 <sub>25</sub>	-39,465	-5,233	-12,722	27,240	-15,752	4,423
N10 <sub>75</sub>	29,718	13,547	8,148	-20,744	4,704	-5,550
N11 <sub>25</sub>	33,558	6,211	21,817	-8,594	28,469	-10,926
N11 <sub>75</sub>	-27,366	-12,623	-6,032	0,074	-17,436	0,193
N12 <sub>25</sub>	-13,298	-7,692	-10,653	-5,036	-14,314	13,316
(Konstant)	-17,277	-5,806	-12,154	-19,260	6,510	-18,244

Quelle: SPSS-Ausgabe



Abschließend lässt sich, u.a. aus den in Tabelle 39 aufgeführten Trefferquoten, eine Beurteilung des mathematischen Modells ableiten. Die Regimes Glazio-Nival (B2), Nival (B10) und Nivo-Pluvial I (A2) konnten in der Stichprobe fehlerfrei abgegrenzt werden. Geringfügige Umgruppierungen ( $\Sigma$  Zu- u. Abgänge  $\leq 3$ ), bei Trefferquoten von 81,8 bis 100%, waren bei den Gruppen B1, B3, B6, B7, B8, B12, A1 und A3 festzustellen. Das Regime Pluvio-Nival-Sommertrocken I (B5) ließ sich mit einer Trefferquote von 60%, bei 5 Umgruppierungen, nicht mehr optimal trennen. Mit dem aufgestellten Diskriminanzmodell gelingt also, mit Hilfe von Gebietskenngrößen, für 92% aller Regimetypen eine hinreichend genaue Trennung. Dies muss jedoch nicht bedeuten, dass es auch für eine Vorhersage von Regimetypen außerhalb der Stichprobe geeignet ist.

#### 6.4. Klassifikation von talsperrenbeeinflussten Einzugsgebieten

Mit dem im vorherigen Kapitel optimierten Diskriminanzmodell, werden nun alle talsperrenbeeinflussten Einzugsgebiete einem der 12 Regimetypen zugeordnet. Die Klassifikation dieser ungruppierten Fälle erfolgt nach dem Wahrscheinlichkeitskonzept. Dabei werden für jedes Einzugsgebiet, jeweils für alle 12 Regimetypen, A-posteriori-Wahrscheinlichkeiten berechnet. Ein Gebiet wird dann derjenigen Gruppe  $g$  zugeordnet, für die die Klassifizierungswahrscheinlichkeit  $P(g|Y_i)$  maximal ist. Diese Wahrscheinlichkeit wird unter Anwendung des Bayes-Theorems wie folgt berechnet (BACKHAUS u.a. 2000, S. 185):

$$P(g|Y_i) = \frac{P(Y_i|g) P_i(g)}{\sum_{g=1}^G P(Y_i|g) P_i(g)} \quad (\text{Formel 8})$$

mit:	$g = 1, \dots, G$	Gruppe
	$Y_i$	Diskriminanzwert für Element $i = 1, \dots, n$
	$P(g Y_i)$	A-posteriori-Wahrscheinlichkeit
	$P(Y_i g)$	Bedingte Wahrscheinlichkeit
	$P_i(g)$	A-priori-Wahrscheinlichkeit

Die A-priori-Wahrscheinlichkeit  $P_i(g)$  der Gruppen ist unbekannt und muss deshalb geschätzt werden. Da dies besonders schwierig ist, behilft man sich mit Formel 9 (KÖPPEN 1985, S. 24), wobei  $m_g$  die Anzahl der Elemente in der Gruppe  $g$  angibt. In

der hier durchgeführten Analyse wurde für alle 12 Regimetypen die gleiche A-priori-Wahrscheinlichkeit (=0,083) angenommen.

$$P_i(g) = \frac{1}{G} \quad \text{oder} \quad P_i(g) = \frac{m_g}{\sum_{g=1}^G m_g} \quad (\text{Formel 9})$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(Y_i|g)$  lässt sich durch Transformation der Distanz  $D_{ig}^2$  ermitteln, welche nach Formel 10 berechnet wird (WEINGARTNER 1999, S. 107).

$$D_{ig}^2 = \sum_{k=1}^K (Y_{ik} - \bar{Y}_{gk})^2 \quad (\text{Formel 10})$$

mit:  $D_{ig}^2$  Quadrierte Euklidische Distanz zwischen Element i und Zentroid der Klasse g  
 $Y_{ik}$  Diskriminanzwert von Element i bei Diskriminanzfunktion k  
 $\bar{Y}_{gk}$  Zentroid der Klasse g bei Diskriminanzfunktion k

Somit ergibt sich abschließend folgende Formel zur Berechnung der A-posteriori-Wahrscheinlichkeit (BACKHAUS u.a. 2000, S. 187):

$$P(g|Y_i) = \frac{\exp(-D_{ig}^2 / 2) P_i(g)}{\sum_{g=1}^G \exp(-D_{ig}^2 / 2) P_i(g)} \quad (\text{Formel 11})$$

Dieses Konzept soll nun beispielhaft für das Einzugsgebiet der Station Treia (Treene) durchgerechnet werden. Im ersten Schritt werden dazu für alle sechs Diskriminanzfunktionen, nach Formel 7 unter Verwendung der Diskriminanzkoeffizienten in Tabelle 40, die Diskriminanzwerte  $Y_k$  berechnet:

$$Y_1 = -3,881, \quad Y_2 = -0,092, \quad Y_3 = -0,620, \quad Y_4 = -0,350, \quad Y_5 = 0,562, \quad Y_6 = -1,521$$

Anschließend lassen sich hiermit, gemäß Formel 10, die quadrierten Distanzen zwischen dem Einzugsgebiet Treia (Treene) und den Gruppenmittelwerten der 12 Regimetypen ermitteln, welche der Tabelle 41 entnommen werden können. Hieraus ergeben sich folgende Werte:

$$D_1^2 = 10,73, \quad D_2^2 = 195,37, \quad D_3^2 = 15,51, \quad D_4^2 = 15,01, \quad D_5^2 = 40,32, \quad D_6^2 = 18,54, \\ D_7^2 = 15,36, \quad D_8^2 = 37,76, \quad D_9^2 = 14,92, \quad D_{10}^2 = 28,79, \quad D_{11}^2 = 82,31, \quad D_{12}^2 = 28,27$$

**Tabelle 41****Gruppen-Zentroide der Regimetypen bei den 6 Funktionen**

Regimtyp <sup>*1</sup>	Funktion					
	1	2	3	4	5	6
1 (B1)	-1,844	1,363	-0,859	-2,199	-0,303	-1,036
2 (B2)	9,882	-0,906	0,192	-1,351	0,523	0,381
3 (B3)	-4,523	0,102	-2,514	-2,188	1,546	1,150
4 (B5)	-3,491	-0,792	-1,315	-1,294	-0,213	1,999
5 (B6)	-0,905	3,698	3,060	-0,193	1,409	0,155
6 (B7)	-1,170	1,702	-0,068	-0,476	-1,995	-0,471
7 (B8)	-2,827	-2,868	0,777	1,106	1,075	-0,035
8 (B10)	0,830	0,924	-2,358	2,307	-0,362	0,375
9 (B12)	-1,563	-1,784	-0,350	-0,875	0,475	-4,037
10 (A1)	0,101	1,891	0,946	1,682	0,999	-0,027
11 (A2)	4,693	-0,444	-1,695	1,929	-0,781	-0,807
12 (A3)	-1,512	-1,873	2,059	-0,226	-1,972	0,901

\*1: vgl. Kap. 4.5., S. 27ff

Quelle: SPSS-Ausgabe

Bei einer für alle Gruppen unterstellten A-priori-Wahrscheinlichkeit in Höhe von 0,083, lassen sich im letzten Schritt, mit Formel 11, die Klassifizierungswahrscheinlichkeiten bestimmen. Die Wahrscheinlichkeit für die Zugehörigkeit des Einzugsgebietes Treia (Treene) zu jedem der 12 Regimetypen beträgt somit:

$$\begin{aligned}
 P(1|Y_i) &= 0,68949, & P(2|Y_i) &= 0,00000, & P(3|Y_i) &= 0,06295, & P(4|Y_i) &= 0,08088, \\
 P(5|Y_i) &= 0,00000, & P(6|Y_i) &= 0,01390, & P(7|Y_i) &= 0,06795, & P(8|Y_i) &= 0,00000, \\
 P(9|Y_i) &= 0,08465, & P(10|Y_i) &= 0,00008, & P(11|Y_i) &= 0,00000, & P(12|Y_i) &= 0,00011
 \end{aligned}$$

Die Klassifizierungswahrscheinlichkeit ist für das Regime Pluvial-Sommertrocken I (B1) am größten. Deshalb wurde das Flusseinzugsgebiet Treia (Treene) mit einer Wahrscheinlichkeit von 69 Prozent diesem Regimtyp zugeordnet.

Abschließend ist in der Tabelle 42 eine Übersicht über die Klassifikation der 251 talsperrenbeeinflussten Einzugsgebiete abgebildet.

**Tabelle 42****Zuordnungsergebnis der talsperrenbeeinflussten Einzugsgebiete**

Regimtyp <sup>*1</sup>	B1	B2	B3	B5	B6	B7	B8	B10	B12	A1	A2	A3
Anzahl Gebiete	28	16	17	17	35	29	28	7	19	35	9	11

\*1: vgl. Kap. 4.5., S. 27ff

Quelle: Eigene Aufstellung

## **7. Übertragung hydrologischer Kennwerte aus Repräsentativgebieten**

Nachdem im sechsten Kapitel für alle talsperrenbeeinflussten Einzugsgebiete die Regimetypen geschätzt wurden, sollen nun für jedes dieser Flussgebiete, die hydrologischen Kennwerte eines typenspezifischen Repräsentativgebietes übernommen werden. Da je Abflussregimetyp verschiedene Repräsentativgebiete zur Verfügung stehen, wird jeweils jenes gewählt, welches in Hinblick auf seine varianten und invarianten Gebietskenngrößen dem beeinflussten Gebiet am ähnlichsten ist.

### **Identifikation ähnlicher Einzugsgebiete**

Im ersten Schritt muss also innerhalb des entsprechenden Regimetyps das jeweils ähnlichste Repräsentativgebiet gefunden werden. WEINGARTNER (1999, S. 70ff) hat dazu Andrews-Kurven berechnet. Hiermit lassen sich zum einen mehrdimensionale Daten visualisieren und zum anderen können Distanzen zwischen den Andrews-Kurven berechnet werden. Dieser Ansatz soll hier jedoch nicht weiter verfolgt werden.

Aus dem im vorherigen Kapitel aufgestellten Diskriminanzmodell ergibt sich nämlich ein viel einfacherer Lösungsweg. Und zwar wurden hiermit für jedes Einzugsgebiet sechs Diskriminanzwerte  $Y_{ik}$  berechnet, welche geometrisch gesehen einen Punkt in einem mehrdimensionalen Raum bilden. Mit diesen konnten anschließend die quadrierten Distanzen  $D_{ig}^2$  zwischen einem Gebiet  $i$  und den Zentroiden der Regimegruppen  $g$  (vgl. Kap. 6.4. Formel 10) ermittelt werden. Genau dieser Ansatz wird jetzt wieder aufgegriffen, mit dem Unterschied, dass jetzt die quadrierten Distanzen  $D_{ir}^2$  zwischen jeweils einem beeinflussten Gebiet  $i$ , das einer Gruppe  $g$  zugeordnet wurde, und allen Repräsentativgebieten  $r$  dieser Gruppe  $g$  berechnet werden. Die Methode lässt sich mit Formel 11 vollenden. D.h. für jedes Einzugsgebiet  $i$  wird die Wahrscheinlichkeit errechnet, mit der es jedem der gruppenangehörigen Repräsentativgebiete  $r$  am ähnlichsten ist. Oder anders ausgedrückt, mit der sein Punkt im mehrdimensionalen Raum, dem Punkt jeder der Repräsentativgebiete am nächsten liegt. Das Repräsentativgebiet mit der höchsten A-posteriori-Wahrscheinlichkeit wird dann für die Übertragung der hydrologischen Kennwerte ausgewählt. Die A-priori-Wahrscheinlichkeit für jedes repräsentative Gebiet  $r$  einer Gruppe  $g$  ergibt sich dabei aus der Anzahl der repräsentativen Gebiete dieser Gruppe (vgl. Formel 9).

Diese Methodik ist in den Tabellen 43 und 44 für das Einzugsgebiet Treia (Treene), welches dem Regimetyp Pluvial-Sommertrocken I zugeordnet wurde (vgl. Kap. 6.4.), durchgerechnet worden. Die höchste Klassifizierungswahrscheinlichkeit fällt danach mit 57% auf das repräsentative Gebiet Trier (Moselle), dessen hydrologische Kennwerte somit auf das Einzugsgebiet Treia (Treene) übertragen werden.

Die auf der beigelegten CD-ROM zu findende Datei „Zuordnungsübersicht-Übertragung“ enthält für alle talsperrenbeeinflussten Einzugsgebiete zum einen die Zuordnungswahrscheinlichkeiten zu jedem Regimetyp und zum anderen die Klassifizierungswahrscheinlichkeiten zu jeder Repräsentativstation im geschätzten Regimetyp. Abschließend ist in Tabelle 45 eine Übersicht zur Identifikation der ähnlichsten Repräsentativgebiete abgebildet. Die in Spalte eins angegebenen Gebietsnummern entsprechen dabei den laufenden Nummern der Tabellen in Kap. 4.5. und 5.2. Den weiteren Spalten ist dann jeweils die Anzahl der jedem Repräsentativgebiet zugeordneten talsperrenbeeinflussten Gebiete zu entnehmen.

**Tabelle 43** Diskriminanzwerte Treia und Repräsentativgebiete

Station	Diskriminanzwerte					
	Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3	Funktion 4	Funktion 5	Funktion 6
TREIA	-3,881	-0,092	-0,620	-0,350	0,562	-1,521
LITH	-0,745	1,686	-0,076	-1,931	0,671	-1,952
MOINHO DA GAMITIN.	-3,050	1,262	-0,390	-3,879	-0,775	-2,477
SAN SAMUELE DI CA.	-0,852	2,207	-2,084	-2,174	-1,160	-1,710
SAN GIOVANNI AL.	-2,482	1,433	-0,155	-2,458	0,678	0,594
ORENSE	-1,721	1,656	-0,745	-2,964	0,701	1,402
TRIER UP	-1,977	-1,521	-1,392	-1,672	-0,499	-1,179
BORGHAREN	-2,620	1,660	-1,930	-1,940	-0,553	-1,043
POZNAN	-1,307	2,524	-0,096	-0,573	-1,487	-1,924

Quelle: SPSS-Ausgabe

**Tabelle 44** Berechnete Distanzen und Klassifizierungswahrscheinlichkeiten

lfd. Nr.	Repräsentativgebiet	TREIA		
		A-priori-Wahrs.	Quad. Distanz	A-posteriori-Wahrs.
1	LITH	0,125	15,990	0,020
2	MOINHO DA GAMITIN.	0,125	17,731	0,008
3	SAN SAMUELE DI CA.	0,125	22,935	0,001
4	SAN GIOVANNI AL.	0,125	13,433	0,071
5	ORENSE	0,125	23,133	0,001
<b>6</b>	<b>TRIER UP</b>	<b>0,125</b>	<b>9,257</b>	<b>0,569</b>
7	BORGHAREN	0,125	10,378	0,325
8	POZNAN	0,125	18,158	0,007

Quelle: Eigene Aufstellung

### Übertragung der unbeeinflussten Abflusskoeffizienten

Nachdem nun für jedes talsperrenbeeinflusste Flusseinzugsgebiet das ähnlichste Repräsentativgebiet ermittelt wurde, können die entsprechenden unbeeinflussten Abflusskoeffizienten übernommen werden. Dabei wird jedoch nicht nur das für jede repräsentative Station ausgewiesene Referenzjahr (vgl. Kap. 4.3. u. Tabellen Kap. 4.5.) übertragen, sondern vielmehr alle normierten, unbeeinflussten Jahresgänge des Abflusses der Standardperiode 1931-1960. D.h. es werden also alle Systemzustände und damit auch die Variabilität der entsprechenden repräsentativen Messstationen übertragen. Die Beschränkung auf den Zeitabschnitt 1931-1960 ist aufgrund der Tatsache notwendig, dass bei der Modellierung der räumlichen Variabilität auf Klimaparameter dieser Periode zurückgegriffen wurde. Unterstellt man vereinfachend, dass zwei in dieser Standardperiode recht ähnliche Einzugsgebiete sich auch in den übrigen Zeitabschnitten nicht wesentlich unterscheiden, können auch die gesamten unbeeinflussten Zeitreihensegmente übernommen werden.

**Tabelle 45**      Übersicht zur Identifikation ähnlicher Einzugsgebiete

Repräsentativ- gebiet Nr.*1	Regimetyyp											
	B1	B2	B3	B5	B6	B7	B8	B10	B12	A1	A2	A3
1	12	0	1	9	1	4	1	1	5	4	4	1
2	1	0	2	0	4	4	0	0	1	4	0	3
3	4	0	4	4	1	0	0	0	4	0	0	2
4	2	3	2	4	3	0	4	0	7	1	4	1
5	5	2	0	0	0	1	3	0	2	3	1	0
6	3	0	0	-	1	5	4	0	0	2	-	0
7	1	0	4	-	13	5	1	0	-	5	-	1
8	0	1	0	-	7	3	1	1	-	4	-	1
9	-	0	4	-	5	0	3	0	-	4	-	0
10	-	3	-	-	-	6	1	3	-	3	-	0
11	-	2	-	-	-	0	5	1	-	5	-	0
12	-	4	-	-	-	0	1	1	-	-	-	0
13	-	1	-	-	-	0	1	0	-	-	-	2
14	-	0	-	-	-	1	1	0	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Summe:	28	16	17	17	35	29	28	7	19	35	9	11

\*1: entsprechen den lfd. Nr. der Tabellen in Kap. 4.5. u. 5.2.

Quelle: Eigene Aufstellung

## **8. Verifizierung der Ergebnisse**

Zur Verifizierung der Ergebnisse dieser Arbeit standen insgesamt 148 Abflussstationen zur Verfügung, für welche es unbeeinflusste Zeitreihenabschnitte nur außerhalb der Standardperiode 1931-1960 gab und die deshalb nicht bei der Abflussregimeklassifikation berücksichtigt wurden (vgl. Kap. 4.3.). Für diese 148 Messstationen lagen somit jeweils ein gemessener und ein übertragener unbeeinflusster Zeitreihenabschnitt vor, wobei hier die gesamten unbeeinflussten und normierten Teilreihen von den Repräsentativstationen übernommen wurden.

### **Vorgehensweise**

In diesem Kapitel wurden zwei verschiedene Verifizierungsmethoden eingesetzt, ein vereinfachter und ein komplexer Ansatz. Für die vereinfachte Vorgehensweise mussten zum Zwecke des Vergleichs, zunächst die entsprechenden Median-Werte über alle 296 Teilreihen berechnet werden. Hiermit konnten im Anschluss die Ähnlichkeiten zwischen gemessenen und übertragenen Abflussregimes ermittelt werden. Aufgrund der Erfahrungen beim Methodentest in Kap. 4.4., wurde hierzu der Kosinus (vgl. Formel 12) verwendet.

$$\text{Kosinus}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^{12} (x_i y_i)}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^{12} x_i^2 \right) \left( \sum_{i=1}^{12} y_i^2 \right)}} \quad (\text{Formel 12})$$

Bei der komplexen Vorgehensweise wurden für jede Station die Jahre herausgefiltert, die sowohl in der beobachteten, wie auch in der übertragenen Zeitreihe auftraten. Damit konnten für die Verifizierung aus 95 Stationen 1.255 Jahrespaare zur Hilfe genommen werden. Innerhalb dieser Jahrespaare, z.B. zwischen dem gemessenen Abflussregime von 1930 und dem übertragenen Abflussregime von 1930, wurden nun wiederum mit dem Kosinus die Ähnlichkeiten bestimmt.

Um die Güte des zum Einsatz gelangten Modellansatzes beurteilen zu können, mussten nun noch Schwellenwerte festgelegt werden. Hierzu wurde in abgewandelter Form, auf das Bewertungsschema für modellierte Hochwasserabflüsse nach NAEF (1983) zurückgegriffen. Bei einem Kosinus >0,99 soll von einer exakten Schätzung ausgegangen werden. Die übertragenen Abflusskoeffizienten schwanken hierbei annähernd in einer Bandbreite von +/- 10% um die gemessenen Vergleichswerte. Eine

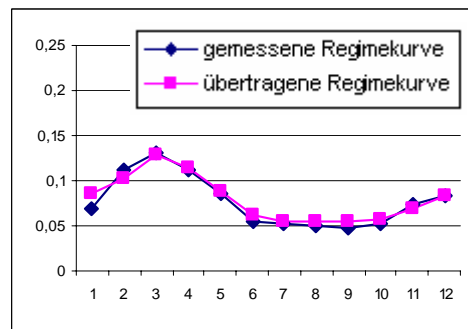
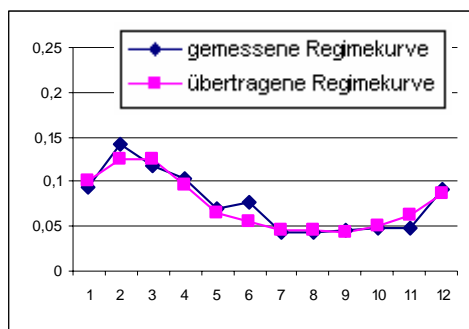
Übersicht über alle Güteklassen ist der Tabelle 46 zu entnehmen. Entsprechende Beispiele wurden in den Abbildungen 52 bis 55 graphisch dargestellt.

**Tabelle 46** Bewertungsschema

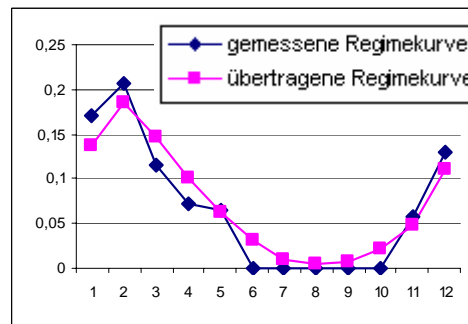
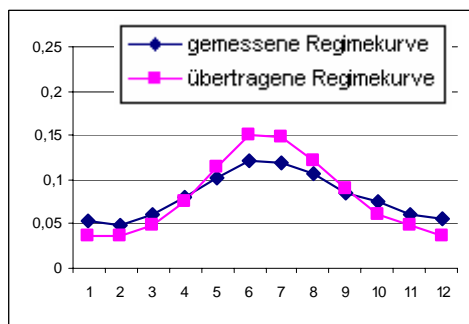
Güteklasse	Kosinus	Bandbreite (+/-) <sup>*1</sup>	Beispiel
exakt	>0,99	10%	Abb. 52
genügend	<0,99 u. >0,94	30%	Abb. 53
ungenau	<0,94 u. >0,91	50%	Abb. 54
unbrauchbar	<0,91	>50%	Abb. 55

\*1: Kosinus entspricht annähernd einer Bandbreite von +/- % um die Vergleichswerte

Quelle: Eigene Aufstellung

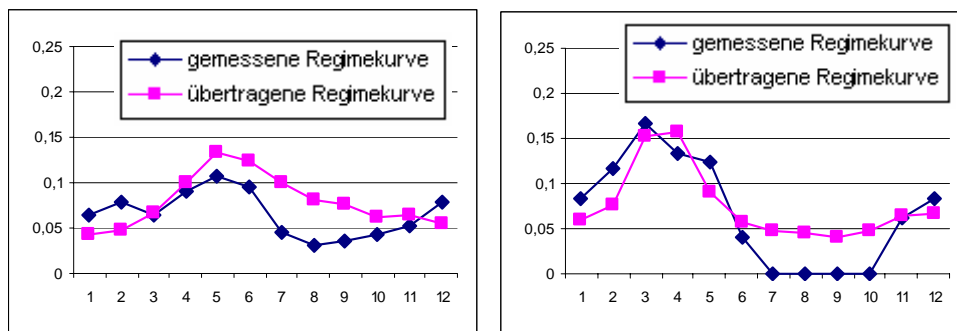


**Abb. 52** Güteklasse „Abschätzung exakt“: Vergleich von gemessenen und übertragenen Abflussregimes (Median der unbeeinflussten Zeitreihenabschnitte), links: Station KLEINHEUBACH (MAIN) mit Kosinus=0,994, rechts: Station NOWA WIES PODGORNA (WARTA) mit Kosinus=0,996 (Quelle: Eigene Darstellung)

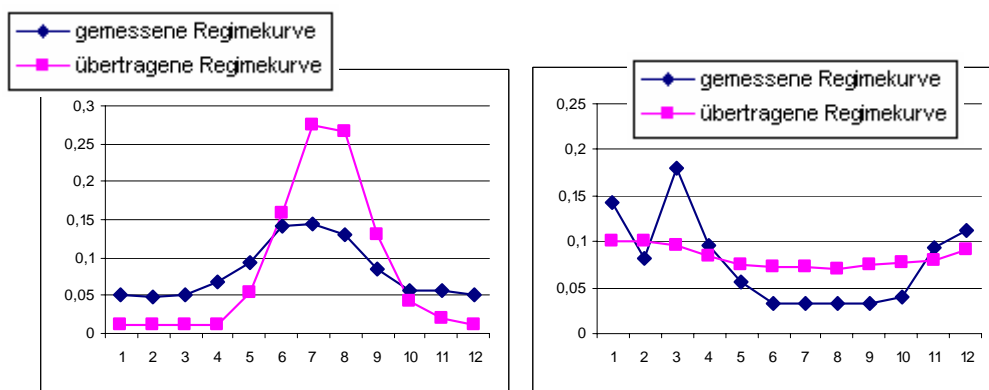


**Abb. 53** Güteklasse „Abschätzung genügend“: Vergleich von gemessenen und übertragenen Abflussregimes (Median der unbeeinflussten Zeitreihenabschnitte), links: Station BASEL-SCHIFFLAENDE (RHINE RIVER) mit Kosinus=0,984, rechts: Station VANDENESSE (LA DRAGNE) mit Kosinus=0,976 (Quelle: Eigene Darstellung)





**Abb. 54** Güteklasse „Abschätzung ungenau“: Vergleich von gemessenen und übertragenen Abflussregimes (Median der unbeeinflussten Zeitreihenabschnitte), links: Station SAINT PAUL SUR TECH (TECH) mit Kosinus=0,937, rechts: Station PONT DE NOCETA (VECCHIO) mit Kosinus=0,924 (Quelle: Eigene Darstellung)



**Abb. 55** Güteklasse „Abschätzung unbrauchbar“: Vergleich von gemessenen und übertragenen Abflussregimes (Median der unbeeinflussten Zeitreihenabschnitte), links: Station CHANCY (RHONE) mit Kosinus=0,879, rechts: Station ASTEDBRO (GUDENA) mit Kosinus=0,905 (Quelle: Eigene Darstellung)

### Ergebnisse der Verifizierung

Die Ergebnisse der vereinfachten Verifizierungsmethode sind den Tabellen 47 und 48 zu entnehmen. Danach konnten in 12,2% der Fälle die natürlichen Abflussregimes exakt und in 44,6% der Fälle ausreichend rekonstruiert werden. 43,2% der Übertragungen sind als ungenau bzw. unbrauchbar einzustufen. Sieht man sich die Klassifizierung der Ergebnisse getrennt nach Regimetypen an, ist festzustellen, dass für sechs Typen eine überdurchschnittliche Summenhäufigkeit von exakten und genügenen Abschätzungen erreicht wurde. Hierbei handelt es sich um die Regimes: Pluvial-Sommertrocken I (B1: 66,7%), Pluvial II (B7: 70,0%), Pluvial I (B8: 83,3%), Nival (B10: 75,0%), Nivo-Pluvial II (A1: 58,3%) und Pluvial-Ausgeglichen (A3: 70,0%).

**Tabelle 47** Beurteilung vereinfachter Ansatz

Gütekategorie	rel. Häufigkeit (%)	Summenhäufigkeit (%)
exakt	12,2	12,2
genügend	44,6	56,8
ungenau	13,5	70,3
unbrauchbar	29,7	100,0

Quelle: Eigene Aufstellung

**Tabelle 48** Beurteilung vereinfachter Ansatz (nach Regimetypen)

Gütekategorie	relative Häufigkeit (%) je Regimetyp <sup>*1</sup>											
	B1	B2	B3	B5	B6	B7	B8	B10	B12	A1	A2	A3
exakt	4,2	0,0	7,1	0,0	0,0	35,0	22,2	25,0	0,0	8,3	0,0	30,0
genügend	62,5	50,0	28,6	35,7	30,8	35,0	61,1	50,0	45,5	50,0	0,0	40,0
ungenau	4,2	16,7	21,4	28,6	23,1	5,0	0,0	0,0	18,2	33,4	0,0	10,0
unbrauchbar	29,1	33,3	42,9	35,7	46,1	25,0	16,7	25,0	36,3	8,3	100,0	20,0

\*1: vgl. Kap. 4.5., S. 27ff

Quelle: Eigene Aufstellung

Mit dem komplexen Verifizierungsansatz, der auch die zeitliche Variabilität berücksichtigt, fielen die Ergebnisse sehr viel schlechter aus (vgl. Tabellen 49 u. 50). Nur in 31,5% der Verifizierungsstichprobe konnten demnach exakte bis ausreichende Übertragungen erzielt werden. Ca. 10% aller Fälle mussten als ungenau und 59% als unbrauchbar eingestuft werden. Bei den einzelnen Regimetypen wurden akzeptable exakte bis genügende Trefferquoten nur durch die Regimes Glazio-Nival (B2: 77,6%), Pluvial II (B7: 58,2%) und Pluvial-Ausgeglichen (A3: 82,1%) erreicht.

**Tabelle 49** Beurteilung komplexer Ansatz

Gütekategorie	rel. Häufigkeit (%)	Summenhäufigkeit (%)
exakt	9,2	9,2
genügend	22,3	31,5
ungenau	9,7	41,2
unbrauchbar	58,8	100,0

Quelle: Eigene Aufstellung

**Tabelle 50** Beurteilung komplexer Ansatz (nach Regimetypen)

Gütekategorie	relative Häufigkeit (%) je Regimetyp <sup>*1</sup>											
	B1	B2	B3	B5	B6	B7	B8	B10	B12	A1	A2	A3
exakt	6,0	3,5	7,5	0,0	0,0	17,4	10,5	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0
genügend	5,3	74,1	3,7	2,5	5,9	40,8	37,7	27,8	5,0	2,0	0,0	32,1
ungenau	8,7	19,0	2,1	3,7	0,0	15,9	12,7	19,4	7,9	4,1	0,0	7,1
unbrauchbar	80,0	3,4	86,7	93,8	94,1	25,9	39,1	52,8	87,1	93,9	100,0	10,8

\*1: vgl. Kap. 4.5., S. 27ff

Quelle: Eigene Aufstellung

### Schlussfolgerungen

Für den Untersuchungsraum Zentraleuropa konnten, mit Hilfe von global verfügbaren Daten, die natürlichen Abflussregimes somit nur zu 32% bzw. 57% zufrieden stellend geschätzt werden. Damit ist eine zuverlässige Rekonstruktion nicht gelungen.

Mögliche Fehlerquellen können in der Identifikation von unbeeinflussten Zeitreihenabschnitten mittels des Speicherausbaugrades, in der Abflussregimeklassifikation, im Diskriminanzmodell zur Schätzung des jeweiligen Regimetyps und in der Auswahl einer falschen Repräsentativstation innerhalb eines Regimetyps bedingt sein. Die Resultate werden insbesondere auch stark durch die zur Verfügung stehende Stichprobe beeinflusst.

Während die vereinfachte Methode Abflussregimes statisch betrachtet, wird bei der komplexen Vorgehensweise die zeitliche Variabilität der Abflussregimes berücksichtigt. Es wurde festgestellt, dass der vereinfachte Ansatz zu einem viel höheren Anteil von exakten und genügenden Schätzungen führte. Dies bedeutet, dass die Übertragung eines statischen Zustandes (z.B. Median) weit aus zuverlässiger ist, als die Übernahme aller Systemzustände (=Abflussjahresgänge) einer Repräsentativstation. Allerdings gehen dann eben die Informationen zur zeitlichen Variabilität der Abflussregimes verloren.

## **9. Zusammenfassung**

Zielstellung dieser Arbeit war die Rekonstruktion von natürlichen Abflussregimes für talsperrenbeeinflusste Messstationen. Dies sollte, mit Hilfe von global verfügbaren Daten, für den Untersuchungsraum Zentraleuropa realisiert werden.

Die Grundlage des Vorhersagemodells wird durch eine Abflussregimeklassifikation geschaffen. Unter einem Abflussregime wird hier jedoch nicht der mittlere Jahresgang des Abflusses, sondern das charakteristische Abflussverhalten eines Jahres verstanden. Ausgehend von 128 Messstationen mit unbeeinflussten Zeitreihensegmenten in der Standardperiode 1931-1960, welche über den mit GloDiN-GIS modellierten Speicherausbaugrad selektiert wurden, erfolgte mit dem für jede Station typischsten Jahr (Repräsentativjahr) eine Klassifizierung von Abflussregimes. Nach einer über die Variationsbreite vollzogenen Grundgliederung in ein- und mehrgipfelige Regimes, wurde dazu eine hierarchische Clusteranalyse mit anschließendem diskriminanzanalytischen Korrekturverfahren durchgeführt. Als Ergebnis konnten für den Untersuchungsraum zwölf Abflussregimetypen mit 125 Repräsentativstationen ausgewiesen werden.

Um die Stabilität dieser Regimetypen zu ermitteln, mussten nun alle unbeeinflussten Abflussjahre, der entsprechenden Repräsentativstationen, mittels Diskriminanzanalyse einer der zwölf Gruppen zugeordnet werden. Auf Basis der so gewonnenen relativen Häufigkeiten, wurden mit dem Entropiekonzept die Instabilitätsindizes für alle zwölf Regimetypen berechnet. Danach fallen in der gesamten unbeeinflussten Messperiode nur die Regimes Glazio-Nival und Pluvial-Ausgeglichen in die Kategorie sehr stabil bzw. stabil. Alle anderen Typen wurden als unstabil bzw. sehr unstabil charakterisiert.

Im nächsten Schritt ging es um die Aufstellung und Optimierung eines Diskriminanzmodells, zur Vorhersage von Regimetypen für talsperrenbeeinflusste Einzugsgebiete. Dazu wurden auf Basis der aus 125 Repräsentativstationen bestehenden Stichprobe, unter Verwendung von mit GloDiN-GIS berechneten varianten und invarianten Gebietskenngrößen, Diskriminanzfunktionen zur Trennung der zwölf Regimetypen geschätzt. Hiermit konnten dann alle talsperrenbeeinflussten Flussgebiete einem der zwölf Regimetypen zugeordnet werden. Die Klassifikation dieser ungruppierten Fälle erfolgte dabei nach dem Wahrscheinlichkeitskonzept. Zur Güte des Modells lässt sich folgendes aussagen. Elf der zwölf Regimetypen konnten in der Stichprobe hinreichend genau abgegrenzt werden. Dies muss jedoch nicht bedeuten, dass

das Modell auch für eine Vorhersage von Regimetypen außerhalb der Stichprobe geeignet ist. Dies wird nur dann der Fall sein, wenn die Stichprobe die Grundgesamtheit sehr gut repräsentiert.

Nachdem für alle talsperrenbeeinflussten Einzugsgebiete die entsprechenden Regimetypen geschätzt wurden, sollten nun für jedes dieser Flussgebiete, die hydrologischen Kennwerte eines typenspezifischen Repräsentativgebietes übernommen werden. Da je Abflussregimetyyp verschiedene Repräsentativgebiete zur Verfügung standen, wurde jeweils jenes gewählt, welches in Hinblick auf seine varianten und invarianten Gebietskenngrößen dem regulierten Gebiet am ähnlichsten war. Die dazu notwendigen Berechnungen erfolgten ebenfalls, auf Grundlage des optimierten Diskriminanzmodells, nach dem Wahrscheinlichkeitskonzept. Abschließend wurden für alle regulierten Einzugsgebiete die unbeeinflussten Abflusskoeffizienten des jeweils ähnlichsten Repräsentativgebietes übernommen.

Die Verifizierung der Ergebnisse konnte mit Hilfe von 148 Abflussstationen erfolgen. Dabei wurden zwei verschiedene Verifizierungsansätze verfolgt. Bei der vereinfachten Methode, welche Abflussregimes statisch betrachtet, konnten in 57% der Stichprobe exakte bis ausreichende Schätzungen nachgewiesen werden. Der komplexe Ansatz berücksichtigt die zeitliche Variabilität der Abflussregimes. Hier fiel der Anteil der exakten bis ausreichenden Abschätzungen mit 32% deutlich geringer aus. Dies bedeutet, dass die Übertragung eines statischen Zustandes weitaus zuverlässiger ist, als die Übernahme aller Systemzustände einer Repräsentativstation. Zusammenfassend muss jedoch festgestellt werden, dass egal ob die Median-Werte oder alle Abflussjahresgänge einer Zeitreihe übertragen werden, eine zuverlässige Rekonstruktion von natürlichen Abflussregimes in dieser Arbeit nicht gelungen ist.

Damit hat sich genau das bestätigt, was bereits nach einer Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Raum- und Regimetypen vermutet wurde. Hierbei wurde festgestellt, dass alle Regimetypen mehr oder weniger viele Flusseinzugsgebiete enthalten, die sich in Bezug auf ihre varianten und invarianten Gebietskenngrößen deutlich voneinander unterscheiden. Daraus wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass die Beziehung Raum – Regime zu komplex ist, um mit einfachen Einzugsgebietsparametern zuverlässig modelliert werden zu können.

Die Güte des Abschätzverfahrens lässt sich möglicherweise bereits durch die, im Zuge der Stabilitätsanalyse, vorgeschlagene Methodik verbessern, welche bei der Abflussregimeklassifikation ansetzt. Danach müssten für alle Abflussstationen

sämtliche unbeeinflussten Jahre der gewählten Standardperiode einer Clusteranalyse mit anschließendem diskriminanzanalytischen Korrekturverfahren unterzogen werden. Daraus ergeben sich dann zum einen die Abflussregimetyphen und zum anderen die relativen Häufigkeiten der verschiedenen Regimetyphen pro Messstation. Die Repräsentativstationen werden nun jeweils anhand des Regimetyps mit der höchsten relativen Häufigkeit zugewiesen.

## Literaturverzeichnis

AHP (2003): Die Kraftwerke der AHP, [www.verbund.at/at/extra/kraftwerke/Kraftwerke/Wasserkraftwerke/AHP.pdf](http://www.verbund.at/at/extra/kraftwerke/Kraftwerke/Wasserkraftwerke/AHP.pdf), April 2003

ASCHWANDEN, H. (1985): Zur Abschätzung der Abflüsse in ungemessenen Schweizerischen Einzugsgebieten = Teilstudie zum NF-Programm: Grundlegende Probleme des Schweizerischen Wasserhaushaltes, Bern

ASCHWANDEN, H. / WEINGARTNER, R. (1985): Die Abflussregimes der Schweiz, Publikation Gewässerkunde Nr. 65, Bern

AURADA, K.D. (1998): Komplementäres Geosystem Ostseeraum, in: AURADA, K.D. / BILLWITZ, K. / LAMPE, R.: Abbildung von Prozessen und Strukturen in Geosystemen, Zeitschrift f. Geomorphologie, N.F., Suppl.-Bd. 112, S. 1-27

AUSTRIANMAP (2003): Austrian Map Online, [www.austrianmap.at](http://www.austrianmap.at), April 2003

BACKHAUS, K. u.a. (2000): Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung, 9. Aufl., Berlin

BAHRENBERG, G. / GIESE, F. / NIPPER, J. (1992): Statistische Methoden in der Geographie, Band 2: Multivariate Statistik, 2. Aufl., Stuttgart

BAUMGARTNER, A. / LIEBSCHER, H.-J. (1990): Lehrbuch der Hydrologie, Band 1: Allgemeine Hydrologie, Berlin

BROSIUS, F. (1998): SPSS 8, Bonn

DYCK, S. (1980): Angewandte Hydrologie, Teil I: Berechnung u. Regelung des Durchflusses der Flüsse, Berlin

EHRLER, C. (1998): Klimaänderung und alpine Schneedecke: Auswirkungen auf das Abflussregime am Bsp. Rhein-Felsberg = Schlussbericht NFP 31, Zürich

GRIMM, F. (1968): Das Abflussverhalten in Europa – Typen und regionale Gliederung, in: Wiss. Veröff. d. Inst. f. Länderk., N.F. 25/26, Leipzig

HAINES, A.T. / FINLAYSON, B.L. / MCMAHON, T.A. (1988): A global classification of river regimes, in: Appl. Geogr. 8, S. 255-272

HEITFELD, K.-H. (1991): Talsperren – Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 5, Berlin

HOFFMANN, T. (2004): Automatenbasierte Korrektur und Bearbeitung digitaler Gewässernetzgraphen, nicht veröffentlicht, Greifswald

HOFFMANN, T. (2005): Softwareentwicklung zur Zeitreihenanalyse und –modellierung auf globalen hydrologischen Zeitreihen, Dissertation am Geogr. und Geolog. Inst. der Univ. Greifswald, im Druck, Greifswald

JANTON, J.-F. (1980): Determination des écoulements annuels et mensuels moyens dun bassin versant, EPFL Publication No. 190, Lausanne

KLUG, H. / LANG, R. (1983): Einführung in die Geosystemlehre, Darmstadt

KÖPPEN, L. (1985): Trefferquoten und Merkmalsreduktion in der linearen Diskriminanzanalyse, Krefeld

KRASOVSKAIA, I. (1995): Quantification of the stability of river flow regimes, in: Hydrological Sciences Bulletin 40, Jg. Heft 5, Wallingford UK, Institut of Hydrology

MADER, H. / STEIDL, T. / WIMMER, R. (1996): Abflussregime österreichischer Fließgewässer – Beitrag zu einer bundesweiten Fließgewässertypologie = Monographien Umweltbundesamt, Bd. 82, Wien



MULTIMAP (2004): Multimap.com – Online Maps to Everywhere, [www.multimap.com](http://www.multimap.com)

NAEF, F. (1983): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen = 1. Zwischenbericht zum NF-Projekt: Abschätzung der Abflüsse in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessung, Zürich

OPPLIGER, M. (1997): Die zeitliche Variabilität schweizerischer Abflussregimes, Publikation Gewässerkunde Nr. 192, Diplomarbeit an der Universität Bern, Bern

PARDE, M. (1947): Fleuves et Rivières, 3. Aufl., Paris

RASE, W.-D. (1975): Clusteranalyse für räumliche Typisierungen, in: Giessener Geographische Schriften, Vol. 32, S. 47-56

RIEDWYL, H. (1980): Regressionsgerade und Verwandtes, UTB Nr. 923, Bern

RÖDEL, R. (2001): Die Auswirkungen des historischen Talsperrenbaus auf die Zuflussverhältnisse der Ostsee = Greifswalder Geographische Arbeiten, Bd. 18, Greifswald

STEIDL, T. (1991): Typologie u. Abflussverhalten österreichischer Fliessgewässer – Hydrologisch-hydrographische Einteilung u. regionale Gliederung, Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur

STOYAN, D. / STOYAN, H. / JANSEN, U. (1997): Umweltstatistik: statistische Verarbeitung und Analyse von Umweltdaten, Stuttgart

STREIT, U. (1979): Raumvariante Erweiterung von Zeitreihenmodellen = Giessener Geographische Schriften Nr. 46, Giessen

SWISSDAMS (2003): Schweizerisches Talsperrenkomitee – Karte der Talsperren in der Schweiz, [http://www.swissdams.ch/swisscod/Dams/damMap/default\\_d.asp](http://www.swissdams.ch/swisscod/Dams/damMap/default_d.asp), April 2003

WEINGARTNER, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendung = Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 37, Bern

WEINGARTNER, R. / SPREAFICO, M. (1992): Hydrologischer Atlas der Schweiz, Bern

WMO (1977): Hydrological maps – a contribution to the International Hydrological Decade, Paris

### **Datenquellen**

DCW (1992): Digital Charts of the world, Server: <http://www.maproom.psu.edu/dcw>

GRDC (2004): GRDC Stations, Koblenz

ICOLD (1998): World Register of Dams, Paris

IPCC (2004): IPCC-Daten, [http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru\\_data/](http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru_data/)

NCAR (2004): Datenquellen der zur NCAR zusammengefassten Kompilation, Server: <http://dss.ucar.edu/catalogs/hydrolists/streamflow.html>

SRTM30 (2003): Shuttle Radar Topography Mission, Server: <ftp://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/SRTM30/>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Ausschnitt Höhenmodell-Layer	2
Abb. 2	Ausschnitt Gewässernetz-Layer	3
Abb. 3	Gewässergraph eines Einzugsgebietes	4
Abb. 4	Ausschnitte Gewässernetz: links ohne, rechts mit Anschluss	5
Abb. 5	Häufigkeiten von Gebietsgrößenklassen	7
Abb. 6	Talsperrenhäufigkeiten nach Volumenklassen	9
Abb. 7	Kumulatives Talsperrenvolumen für die Station Rhein-Diepoldsau	10
Abb. 8	Boxplot der unbeeinflussten Zeitreihensegmente	12
Abb. 9	Boxplot der zur Klassifikation vorhandenen Teilreihen	18
Abb. 10	Zuordnungsübersichten Gruppe A und B	21
Abb. 11	Dendogramm Gruppe A	22
Abb. 12	Dendogramm Gruppe B	23
Abb. 13	Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten: Glazio-Nival	27
Abb. 14	Ausgewählte repräsentative Stationen: Glazio-Nival	28
Abb. 15	Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten: Nival	28
Abb. 16	Ausgewählte repräsentative Stationen: Nival	29
Abb. 17	Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten: Nivo-Pluvial I	30
Abb. 18	Ausgewählte repräsentative Stationen: Nivo-Pluvial I	30
Abb. 19	Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten: Nivo-Pluvial II	31
Abb. 20	Ausgewählte repräsentative Stationen: Nivo-Pluvial II	32
Abb. 21	Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten: Pluvio-Nival-Sommertrocken I	32
Abb. 22	Ausgewählte repräsentative Stationen: Pluvio-Nival-Sommertr. I	33
Abb. 23	Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten: Pluvio-Nival-Sommertrocken II	33
Abb. 24	Ausgewählte repräsentative Stationen: Pluvio-Nival-Sommertr. II	34
Abb. 25	Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten: Pluvial I	34
Abb. 26	Ausgewählte repräsentative Stationen: Pluvial I	35

Abb. 27	Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten: Pluvial II	36
Abb. 28	Ausgewählte repräsentative Stationen: Pluvial II	37
Abb. 29	Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten: Pluvial III	37
Abb. 30	Ausgewählte repräsentative Stationen: Pluvial III	38
Abb. 31	Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten: Pluvial-Ausgeglichen	38
Abb. 32	Ausgewählte repräsentative Stationen: Pluvial-Ausgeglichen	39
Abb. 33	Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten: Pluvial-Sommertrocken I	40
Abb. 34	Ausgewählte repräsentative Stationen: Pluvial-Sommertr. I	40
Abb. 35	Diagramm und Tabelle mit klassenspezifischen hydrologischen Kennwerten: Pluvial-Sommertrocken II	41
Abb. 36	Ausgewählte repräsentative Stationen: Pluvial-Sommertr. II	41
Abb. 37	Diskriminanzwerte der ersten beiden Diskriminanzfunktionen	43
Abb. 38	Abflusskoeffizienten der Station Baschi	44
Abb. 39	Häufigkeiten der Regimetypen, Station Domat/Ems	48
Abb. 40	Häufigkeiten der Regimetypen, Station Frohnleiten	49
Abb. 41	Häufigkeiten der Regimetypen, Station Köln	50
Abb. 42	Häufigkeiten der Regimetypen, Station Hofkirchen	51
Abb. 43	Häufigkeiten der Regimetypen, Station Ponte de Juncais	52
Abb. 44	Häufigkeiten der Regimetypen, Station Suraz	52
Abb. 45	Häufigkeiten der Regimetypen, Station Lauffen	54
Abb. 46	Häufigkeiten der Regimetypen, Station Gorzow Wielkopolski	55
Abb. 47	Häufigkeiten der Regimetypen, Station Torgiano	55
Abb. 48	Häufigkeiten der Regimetypen, Station Tvilumbro	56
Abb. 49	Häufigkeiten der Regimetypen, Station San Giovanni	57
Abb. 50	Häufigkeiten der Regimetypen, Station Holloese Moelle	58
Abb. 51	Kumulierte Trefferquoten beim Merkmalsaufbau	67
Abb. 52	Güteklasse „Abschätzung exakt“	77
Abb. 53	Güteklasse „Abschätzung genügend“	77
Abb. 54	Güteklasse „Abschätzung ungenau“	78
Abb. 55	Güteklasse „Abschätzung unbrauchbar“	78

## **Anlagenverzeichnis**

Anlage 1	Karte der berechneten Gewässereinzugsgebiete	94
Anlage 2	Talsperrenkarte Zentraleuropa	95
Anlage 3	Karte mit Speicherausbaugraden von 1950	96
Anlage 4	Karte mit Speicherausbaugraden von 1970	97
Anlage 5	Karte mit ausgewählten Regimetypen (I)	98
Anlage 6	Karte mit ausgewählten Regimetypen (II)	99

## **Formelverzeichnis**

Formel 1	Distanzmaß 1	18
Formel 2	Distanzmaß 2	20
Formel 3	Instabilitätsindex	45
Formel 4	Maximaler Instabilitätsindex	45
Formel 5	Relativer Instabilitätsindex	45
Formel 6	Standardisierung am Maximum	60
Formel 7	Allg. Gleichung der gebildeten Diskriminanzfunktionen	68
Formel 8	A-posteriori-Wahrscheinlichkeit	70
Formel 9	A-priori-Wahrscheinlichkeit	71
Formel 10	Quadrierte Distanz zwischen Element i und Zentroid der Klasse g	71
Formel 11	A-posteriori-Wahrscheinlichkeit nach Transformation der Distanz	71
Formel 12	Kosinus	76

## **Tabellenverzeichnis**

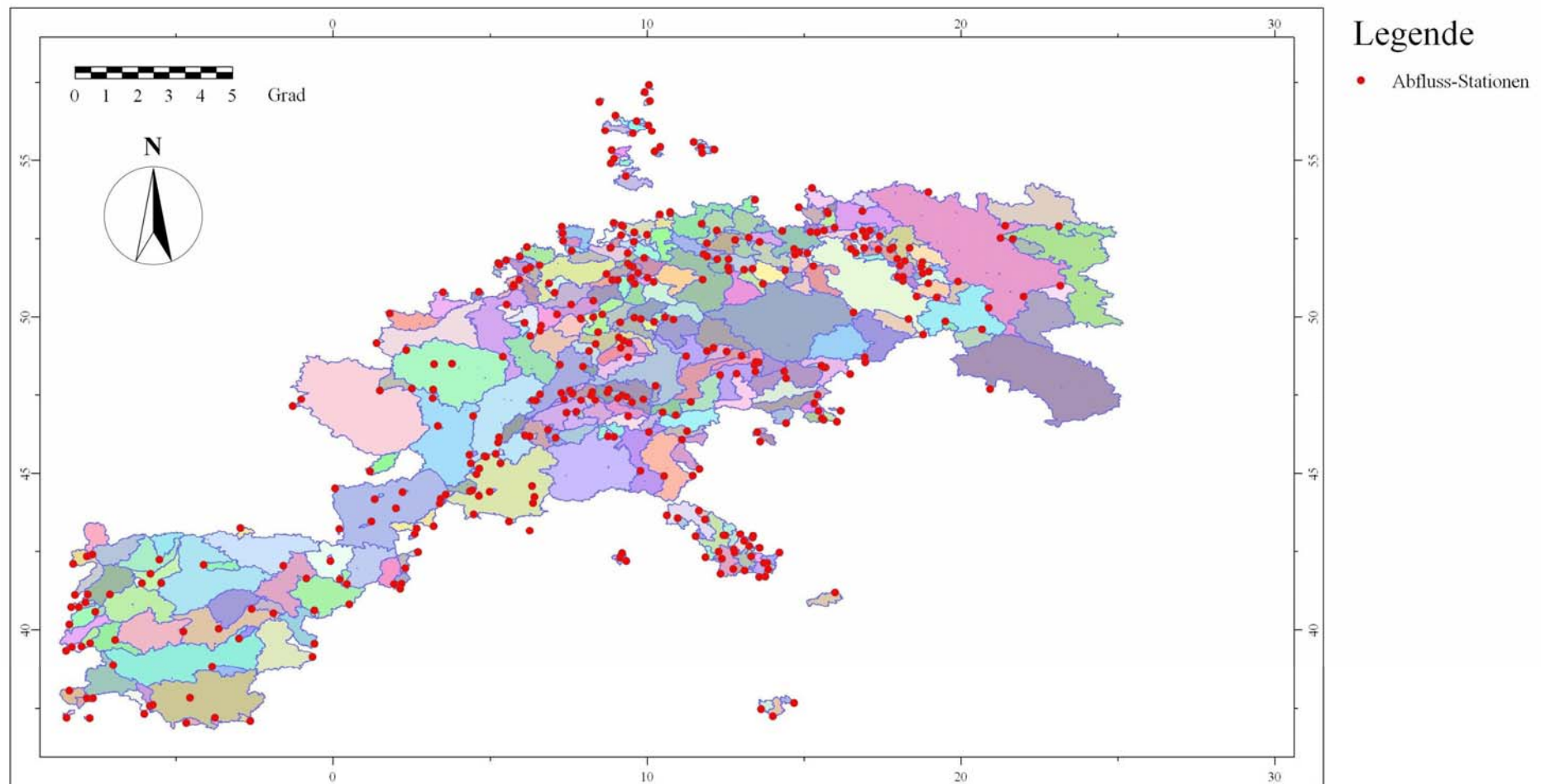
Tabelle 1	Entwicklung der Talsperren in Zentraleuropa	10
Tabelle 2	Klassenstärken der Regimetypen (nach Clusteranalyse)	25
Tabelle 3	Klassenumbildungen durch die Diskriminanzanalyse	26
Tabelle 4	Klassenstärken nach Abschluss des Korrekturverfahrens	26
Tabelle 5	Repräsentative Stationen: Glazio-Nival	27
Tabelle 6	Repräsentative Stationen: Nival	29
Tabelle 7	Repräsentative Stationen: Nivo-Pluvial I	30
Tabelle 8	Repräsentative Stationen: Nivo-Pluvial II	31
Tabelle 9	Repräsentative Stationen: Pluvio-Nival-Sommertrocken I	32
Tabelle 10	Repräsentative Stationen: Pluvio-Nival-Sommertrocken II	34
Tabelle 11	Repräsentative Stationen: Pluvial I	35
Tabelle 12	Repräsentative Stationen: Pluvial II	36
Tabelle 13	Repräsentative Stationen: Pluvial III	37
Tabelle 14	Repräsentative Stationen: Pluvial-Ausgeglichen	39
Tabelle 15	Repräsentative Stationen: Pluvial-Sommertrocken I	40
Tabelle 16	Repräsentative Stationen: Pluvial-Sommertrocken II	41
Tabelle 17	Zuordnungsergebnis der ungruppierten Abflussjahre	45
Tabelle 18	Stabilitätsbeurteilung der Regimetypen	47
Tabelle 19	Stabilität der Repräsentativstationen, Glazio-Nival	48
Tabelle 20	Stabilität der Repräsentativstationen, Nival	49
Tabelle 21	Stabilität der Repräsentativstationen, Nivo-Pluvial I	50
Tabelle 22	Stabilität der Repräsentativstationen, Nivo-Pluvial II	51
Tabelle 23	Stabilität der Repräsentativstationen, Regime Pluv.-Niv.-So. I	51
Tabelle 24	Stabilität der Repräsentativstationen, Regime Pluv.-Niv.-So. II	53
Tabelle 25	Stabilität der Repräsentativstationen, Regime Pluvial I	53
Tabelle 26	Stabilität der Repräsentativstationen, Regime Pluvial II	54
Tabelle 27	Stabilität der Repräsentativstationen, Regime Pluvial III	55
Tabelle 28	Stabilität der Repräsentativstationen, Regime Pluvial-Ausgegl.	56
Tabelle 29	Stabilität der Repräsentativstationen, Regime Pluvial-Sommertr. I	57
Tabelle 30	Stabilität der Repräsentativstationen, Regime Pluvial-Sommertr. II	58
Tabelle 31	Mit GloDiN-GIS berechnete Gebietskenngrößen	59

Tabelle 32	Gruppenmedian wichtiger Klassifikationsparameter	61
Tabelle 33	Raumtypen in Zentraleuropa	61
Tabelle 34	Relative Häufigkeiten der Regimetypen pro Raumtyp	62
Tabelle 35	Relative Häufigkeiten der Raumtypen pro Regimetyp	62
Tabelle 36	Instabilitätsindizes Regime- und Raumtypen	63
Tabelle 37	Entwicklung der Trefferquoten bei Variation der F-Werte	65
Tabelle 38	Eigenwerte und kumulierte Trefferquoten der Funktionen	68
Tabelle 39	Trefferquoten der Regimetypen bei 6 und 11 Funktionen	68
Tabelle 40	Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten	69
Tabelle 41	Gruppen-Zentroide der Regimetypen bei den 6 Funktionen	72
Tabelle 42	Zuordnungsergebnis der talsperrenbeeinflussten Einzugsgebiete	72
Tabelle 43	Diskriminanzwerte Treia und Repräsentativgebiete	74
Tabelle 44	Berechnete Distanzen und Klassifizierungswahrscheinlichkeiten	74
Tabelle 45	Übersicht zur Identifikation ähnlicher Einzugsgebiete	75
Tabelle 46	Bewertungsschema	77
Tabelle 47	Beurteilung vereinfachter Ansatz	79
Tabelle 48	Beurteilung vereinfachter Ansatz (nach Regimetypen)	79
Tabelle 49	Beurteilung komplexer Ansatz	79
Tabelle 50	Beurteilung komplexer Ansatz (nach Regimetypen)	79

## **Anhang mit Anlagen**



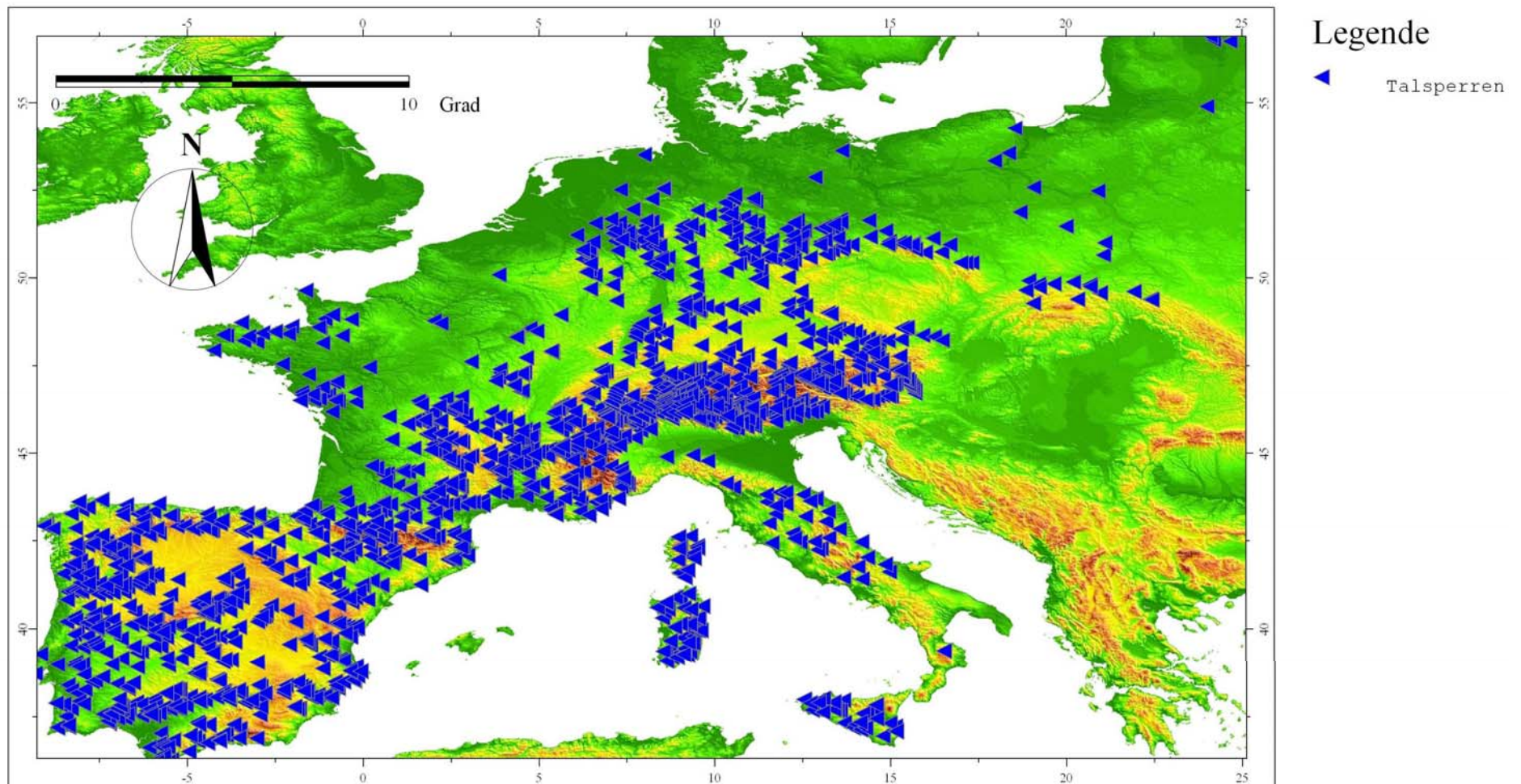
## Anlage 1 Karte der berechneten Gewässereinzugsgebiete in Zentraleuropa



Quelle: dargestellt in GloDiN-GIS (Projektion: Lat/Long Geodetic)

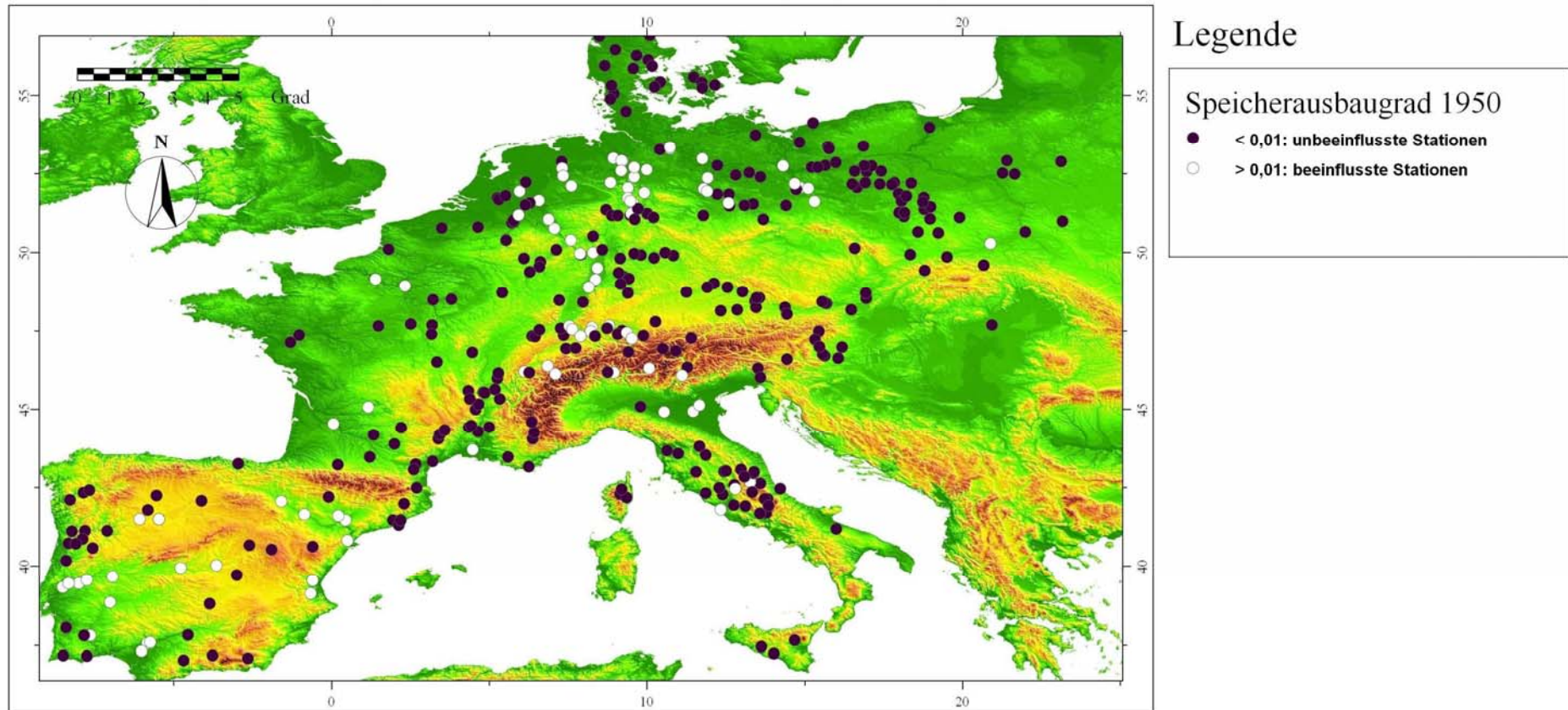
## Anlage 2

## Karte der Talsperren in Zentraleuropa



Quelle: dargestellt in GloDiN-GIS (Projektion: Lat/Long Geodetic)

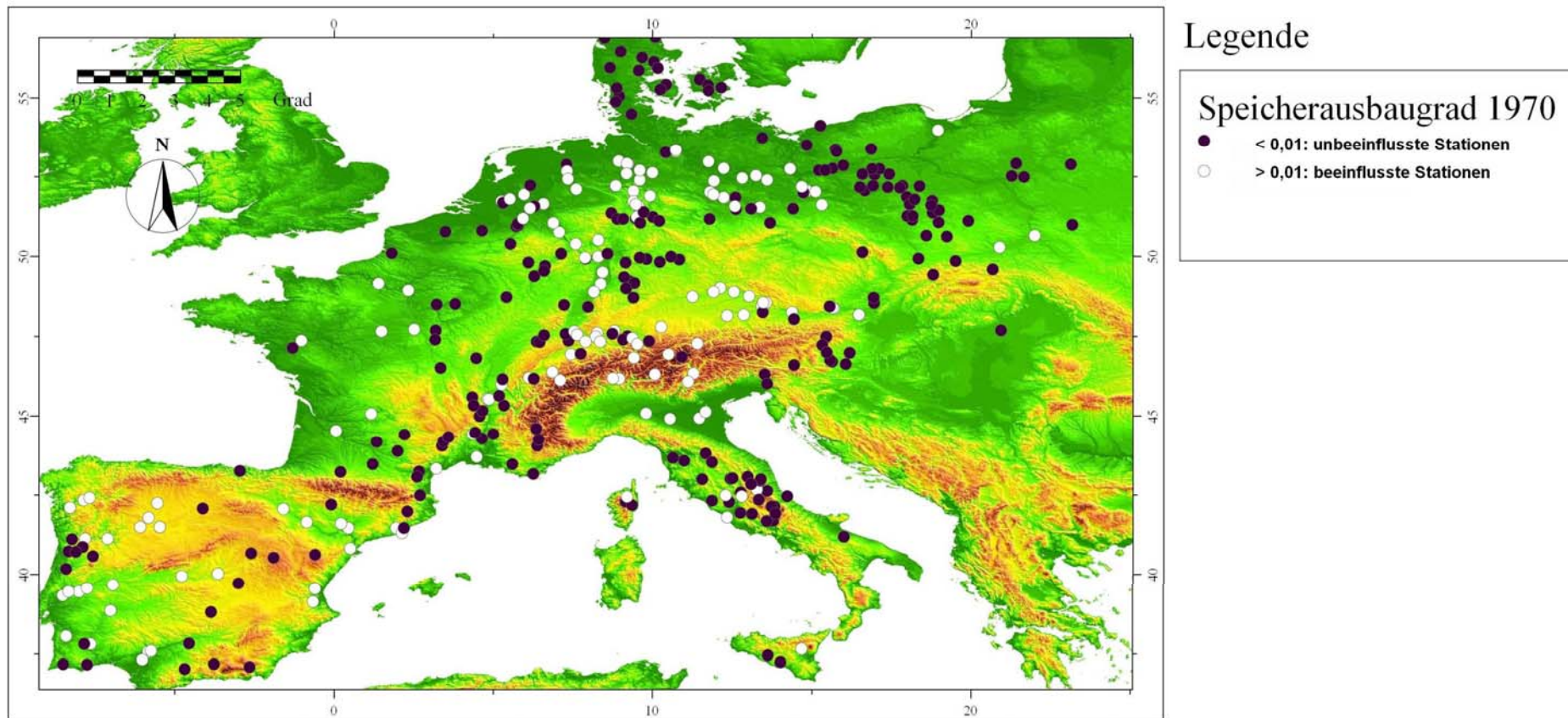
### Anlage 3      Karte mit Speicherausbaugraden von 1950



Quelle: dargestellt in GloDiN-GIS (Projektion: Lat/Long Geodetic)



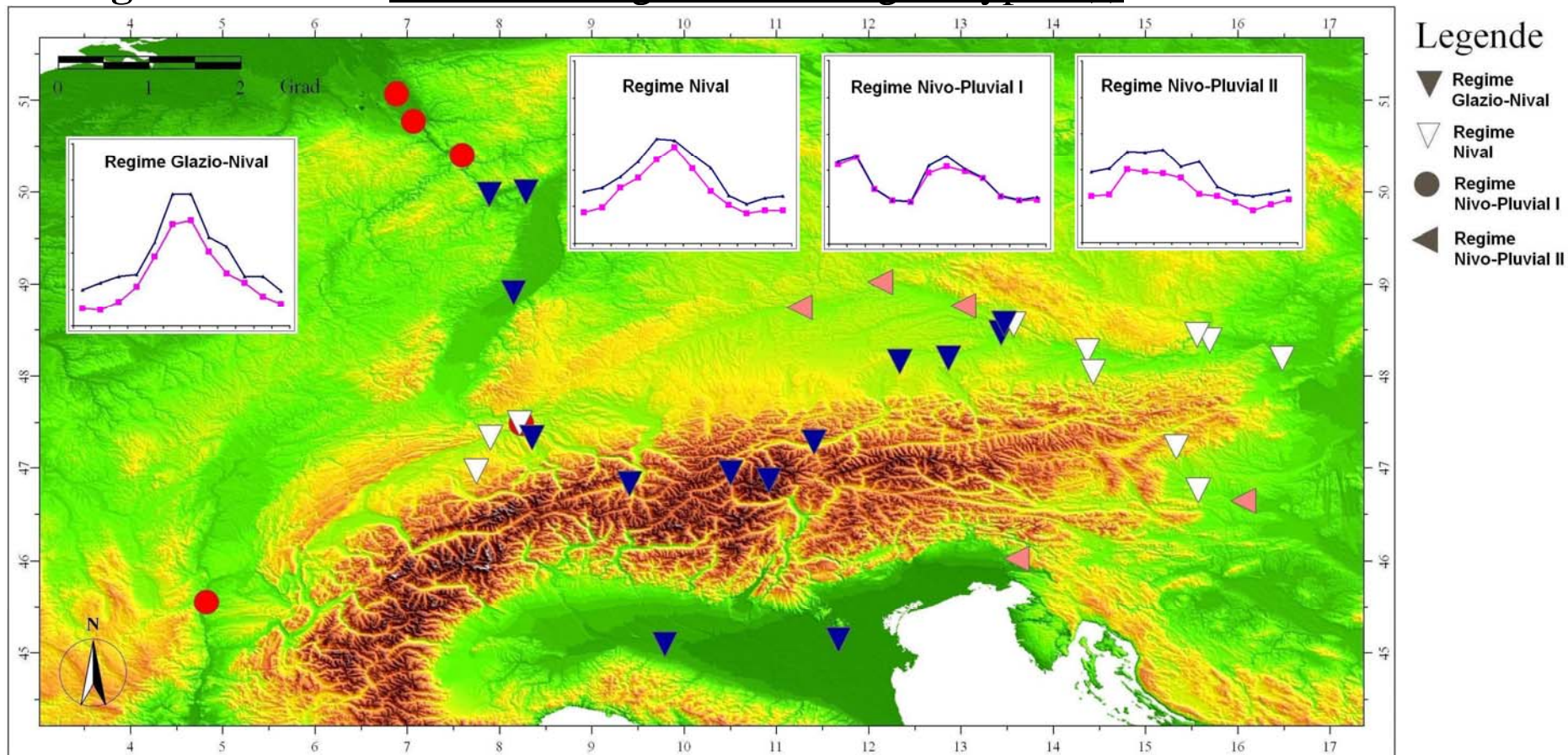
## Anlage 4 Karte mit Speicherausbaugraden von 1970



Quelle: dargestellt in GloDiN-GIS (Projektion: Lat/Long Geodetic)

## Anlage 5

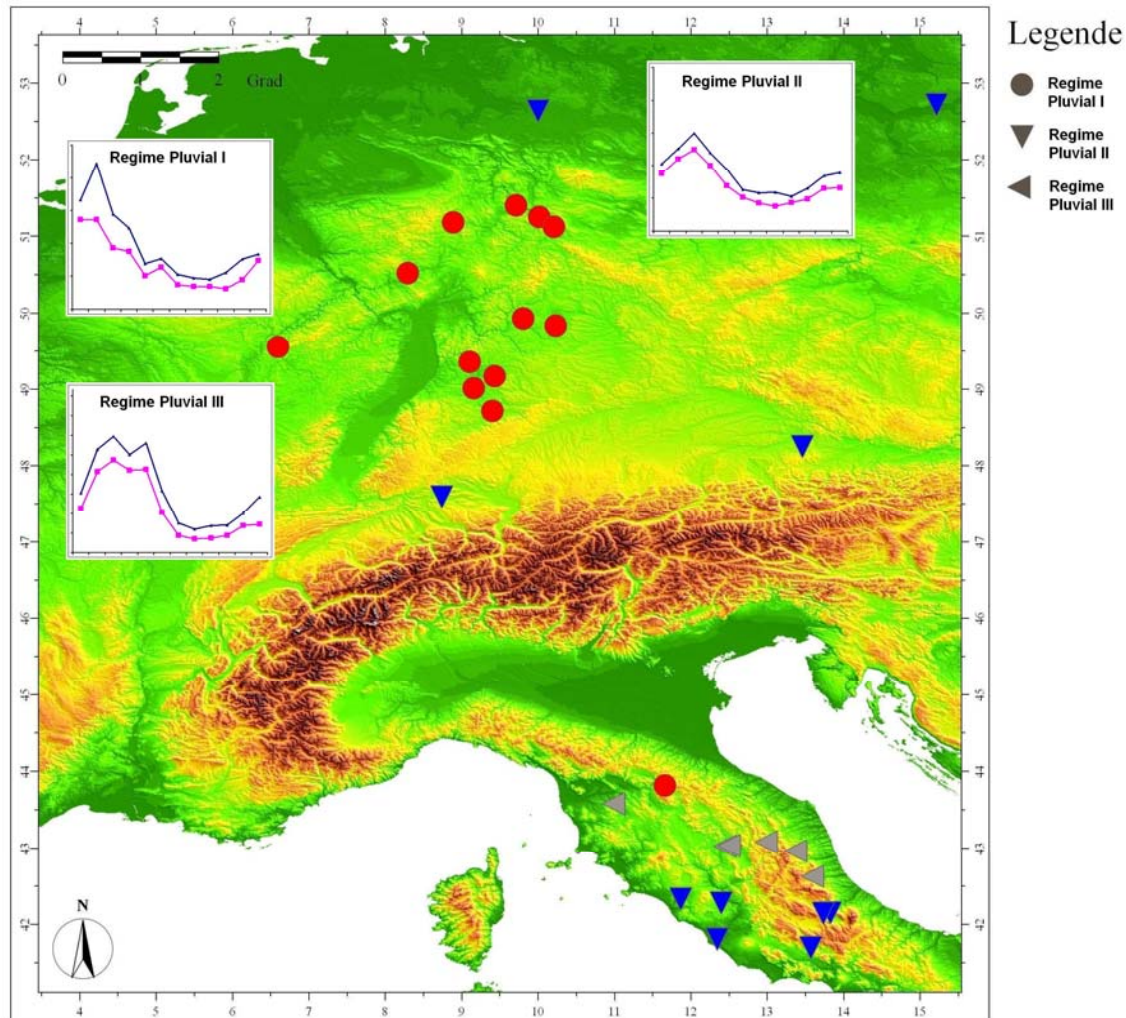
## Karte mit ausgewählten Regimetypen (I)



Quelle: dargestellt in GloDiN-GIS (Projektion: Lat/Long Geodetic)



## Anlage 6 Karte mit ausgewählten Regimetypen (II)



Quelle: dargestellt in GloDiN-GIS (Projektion: Lat/Long Geodetic)