

Zeitreihen- und Trendanalyse der Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes Österreichs



Impressum

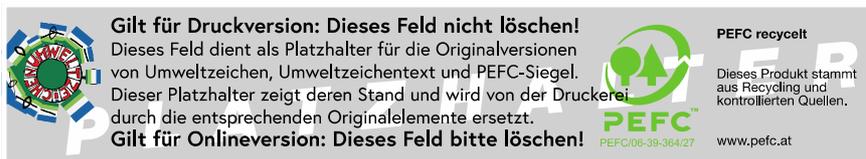
Medieninhaber und Herausgeber:

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft,
Stubenring 1, 1010 Wien

Autorinnen und Autoren: Magdalena Seelig, Simon Seelig, Matevž Vremec, Matthias Hausleber, Maria Obwegs, Thomas Wagner, Heike Brielmann, Barbara Stromberger, Jutta Eybl, Gerfried Winkler

Gesamtumsetzung:

Fotonachweis: Gollinger Wasserfall/Magdalena Seelig (Cover), BML/Paul Gruber (S. 3)



Wien, 2024. Stand: 6. Mai 2024

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft und der Autorin / des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin / des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an wasserhaushalt@bml.gv.at.

Vorwort



Mag. Norbert Totschnig, MSc

Österreich ist ein wasserreiches Land, doch gilt es die wertvolle Ressource Wasser in Zeiten des fortschreitenden Klimawandels zu schützen und bestmöglich zu erhalten. Quellwässer stellen eine unverzichtbare Ressource für die Wasserversorgung in Österreichs dar. So stammen circa 45 % des Trinkwassers aus Quellen. In alpinen Regionen sind Mensch und Tier oft zur Gänze auf Quellen angewiesen. Bisher wurden Veränderungen der Quellschüttungen im Zuge des Klimawandels noch nicht umfassend bewertet.

Die über Jahrzehnte vorliegenden Beobachtungen an den Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes in Österreich sind in ihrer Qualität und aufgrund der vorhandenen langjährigen Zeitreihen außergewöhnlich. Im Projekt „Zeitreihen- und Trendanalyse der Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes Österreich“ (Quellen-Austria) wurden nun Untersuchungen an den Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes sowie ihrer Einzugsgebiete durchgeführt und eine systematische Charakterisierung der Quellwässer und ihrer Einzugsgebiete begonnen. Untersucht wurden unter anderem Änderungen in der Quellschüttung, der Wassertemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit.

Die Ergebnisse des Projekts sind für zukünftige wasserwirtschaftliche Maßnahmen zum Erhalt der Wasserressourcen in Österreich von hoher Bedeutung und stellen eine wichtige Ergänzung zur Studie „Wasserschatz Österreichs“ (BMLRT, 2021a) dar, die aktuelle und zukünftige Wassernutzungen sowie die nachhaltig verfügbaren Wasserressourcen zum Thema hatte.

Mein herzlicher Dank gilt allen, die an diesem wegweisenden Projekt mitgewirkt haben.

Norbert Totschnig
Bundesminister

Inhalt

| | |
|--|------------|
| Impressum..... | 2 |
| Vorwort..... | 3 |
| Inhalt..... | 4 |
| 1 Einleitung..... | 6 |
| 2 Methodik..... | 9 |
| 2.1 Datengrundlage und -aufbereitung..... | 10 |
| 2.2 Trendanalyse..... | 15 |
| 2.3 Quellschüttungsdynamik..... | 18 |
| 2.3.1 Saisonalität..... | 20 |
| 2.3.2 Autokorrelation..... | 24 |
| 2.4 Clusteranalyse..... | 30 |
| 3 Ergebnisse und Interpretation..... | 32 |
| 3.1 Trendanalyse..... | 32 |
| 3.1.1 Quellschüttung..... | 32 |
| 3.1.2 Wassertemperatur..... | 37 |
| 3.1.3 Elektrische Leitfähigkeit..... | 40 |
| 3.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 43 |
| 3.2 Quellschüttungsdynamik..... | 45 |
| 3.2.1 Quellcharakterisierung..... | 45 |
| 3.2.2 Regionale Auswertung..... | 54 |
| 3.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 62 |
| 3.3 Räumliche / Zeitliche Klassen..... | 64 |
| 3.3.1 Pardé-Cluster..... | 64 |
| 3.3.2 Autokorrelation Cluster..... | 74 |
| 3.3.3 Quellgruppen..... | 80 |
| 3.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse..... | 102 |
| 4 Schlussfolgerungen..... | 104 |
| Tabellenverzeichnis..... | 108 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 109 |
| Literaturverzeichnis..... | 113 |
| Abkürzungen..... | 119 |
| Anhang 1: Legende zur Geologischen Karte..... | 120 |

Anhang 2: Stammdatenblätter 123

1 Einleitung

Die jüngst veröffentlichte Studie „Wasserschatz Österreichs – Grundlagen für nachhaltige Nutzungen des Grundwassers“ (BMLRT, 2021a) ergab, dass 1232 Mio m³ pro Jahr, also 40 % des gesamten Wasserbedarfs in Österreich, welcher die Sektoren Wasserversorgung, Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe sowie ausgewählte Dienstleistungen umfasst, aus Grundwasser stammen. Auf Basis der Berechnungen wird der Wasserbedarf künftig generell steigen, die Grundwasserressourcen werden jedoch aufgrund des Klimawandels voraussichtlich bis 2050 um 23 % zurückgehen (BMLRT, 2021a). Die Wasserversorgung in der Größenordnung von 234 l pro Hauptwohnsitz und Tag (österreichweit 753 Mio m³ pro Jahr) erfolgt zur Gänze aus Grundwasser, wobei bundesweit gesehen im Durchschnitt 45 % durch Quellwässer gedeckt sind. Regionsspezifisch ist dieser Wert sehr variabel, so wird vor allem in alpinen Regionen Österreichs die Wasserversorgung überwiegend durch Quellen abgedeckt (BMLRT, 2021a). Der Wasserbedarf für den Sektor Wasserversorgung, welche die Wassernutzung privater Haushalte und den aus der öffentlichen Versorgung mitversorgten öffentlichen Einrichtungen, Gewerbe-, Industrie- und Landwirtschaftsbetrieben sowie der Eigenversorgung von Haushalten umfasst, wird bis 2050 um 11 %-15 % steigen. Zusätzlich wird auch der Wasserbedarf des Sektors Landwirtschaft, im Speziellen der Viehwirtschaft, bundesweit zur Hälfte durch Quellwässer abgedeckt (27 Mio m³ pro Jahr). In alpinen Regionen ist dies flächendeckend zu 100 % der Fall. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass aus dem Wasserbedarfssektor ausgewählte Dienstleistungen wie beispielsweise die Beschneidung zwar zu 90 % über Oberflächenwässer versorgt werden, jedoch in trockenen Zeitperioden das Wasser der Oberflächengewässer in alpinen Regionen zu einem großen Teil von Quellen stammt, die an alpine Grundwasserspeicher gebunden sind.

Die Studie „Wasserschatz Österreichs“ zeigt somit, dass Quellwässer eine unverzichtbare Ressource für die Wasserversorgung Österreichs im Speziellen im alpinen Raum sind. Österreich ist basierend auf dem Wasserrechtsgesetz (WRG) und der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) verpflichtet, Grundwasser und im Speziellen auch Quellwasservorkommen sowohl quantitativ als auch qualitativ zu überwachen. Dies erfolgt im Wesentlichen über das Messnetz des Hydrographischen Dienstes laut Wasserkreislaufferhebungsverordnung (WKEV) und das Messnetz gemäß Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV).

Im Zuge der Studie „Wasserschatz Österreichs“ konnten Zusammenhänge zwischen Quellschüttung und Niederschlag in räumlicher Nähe gezeigt werden (BMLRT, 2021a), jedoch lagen für eine flächendeckende Abschätzung die nötigen Daten und Grundkenntnisse noch nicht vor. Bei der Bilanzierung der Wasserherkunft konnte daher eine mögliche Veränderung der Quellschüttung im Zuge des Klimawandels noch nicht berücksichtigt werden (BMLRT, 2021b).

Parallel zur Großstudie „Wasserschatz Österreichs“ wurden in den letzten Jahren ergänzende Untersuchungen an den Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes laut WKEV und ihrer Einzugsgebiete durchgeführt und somit eine systematische Charakterisierung der Quellwässer und ihrer Einzugsgebiete begonnen. Eine erste Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse der potenziellen Einzugsgebiete der Quellen in Form von Stammdatenblättern basierend auf Literaturstudien und 2018/2019 erhobenen Isotopendaten ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) wurde 2020 umgesetzt (BMLRT, 2021c).

Die über Jahrzehnte vorliegende Datengrundlage der Messwerte der Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes in Österreich ist in ihrer Qualität einzigartig und ermöglicht aufgrund der langjährigen Aufzeichnungen, Trends der Quellparameter Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit zu ermitteln und zu quantifizieren. Somit können erste Informationen erarbeitet werden, ob und wie sich die klimatischen Änderungen der letzten Jahrzehnte auf die Quellwässer ausgewirkt haben. Aus dieser Motivation heraus wurde das gegenständliche Projekt „Zeitreihen- und Trendanalyse der Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes Österreich (Quellen-Austria)“ entwickelt und umgesetzt.

Im Zuge des Projekts wurde versucht, nachstehende Forschungsfragen zu beantworten:

- Weisen die Quellparameter Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit Trends in den letzten Jahrzehnten auf?
- Ändert sich das „Trendverhalten“ beispielsweise bei 10-Jahrestrends über die Zeit?
- Können Quellen anhand ihrer jahreszeitlichen Schüttungsdynamik und ihres Speicherungsverhaltens in Gruppen zusammengefasst werden?
- Können Quellen mit charakteristischen Quellschüttungsverhalten geologischen Großeinheiten zugeordnet werden?

Das Ziel des Projekts ist somit, Langzeittrends (10- und 20-Jahrestrends) der Quellparameter Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit und Quellschüttung der vom Hydrographi-

schen Dienst beobachteten Quellen es anhand der vorliegenden Datenreihen zu identifizieren und zu quantifizieren. Die Quellen sollen in weiterer Folge in Bezug auf ihr Quellschütungs- und Speicherverhalten untersucht werden. Quellen sind räumlich begrenzte, natürliche Austrittsstellen von Grundwasser (ÖNORM B 2400), deren Parameter und die jahreszeitliche Änderung derselben eine hydrogeologische Charakterisierung des dahinterliegenden Einzugsgebietes sowie des entwässerten Grundwasserleiters ermöglichen. Diese Kenntnisse sind vor allem für wasserwirtschaftliche Herausforderungen auf lokaler Ebene (z. B. Quelfassungen für Trinkwasserversorgungen, Schutz der Wasserressourcen, etc.) von hoher Bedeutung, um künftig weiterhin eine qualitativ hochwertige Versorgung ermöglichen zu können. Übergeordnet dienen die Ergebnisse zudem der Charakterisierung der alpinen Grundwasserkörper (BMLFUW, 2015), die ein abgegrenztes Grundwasservolumen innerhalb eines oder mehrerer Grundwasserleiter darstellen und denen die Quellen überregional zugeordnet werden können.

2 Methodik

Quellen spiegeln die Summe aller hydrogeologischen Prozesse wider, die auf den dahinterliegenden Grundwasserkörper einwirken. Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit des Quellwassers unterliegen natürlichen Schwankungen, die von Niederschlagsgang, Infiltrationsvermögen und Grundwasserströmungsverhältnissen im Einzugsgebiet abhängen. Die Anreicherung von Wasser im Grundwasservorrat, z. B. durch Infiltration aus dem Niederschlag oder der Schneeschmelze, wird als Grundwasserneubildung bezeichnet (ÖNORM B 2400). Für die Schüttungsdynamik von Quellen ist die Grundwasserneubildung im gesamten Einzugsgebiet der Quelle maßgeblich – dieses Wasser tritt zeitlich verzögert schließlich an der Quelle wieder aus. Aus der Reaktion der Quellschüttung auf Grundwasserneubildungsereignisse im Einzugsgebiet können daher Rückschlüsse auf den Grundwasserneubildungsprozess gezogen werden. In ähnlicher Weise kann die Reaktion der Wassertemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit des Quellwassers auf Grundwasserneubildungsereignisse zur Charakterisierung herangezogen werden. Verändern sich die Neubildungsereignisse im Laufe der Zeit, verändert sich im Regelfall auch die Quellreaktion entsprechend.

Im Zuge des Projekts wurden 96 Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes anhand der vorliegenden Langzeitdaten hydrogeologisch charakterisiert. Die Art der dominanten Prozesse und möglicher Veränderungen im Laufe der Zeit wurde durch eine einheitliche Auswertung der Ganglinien der Quellschüttung, der Wassertemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt. Aufbauend auf dieser Auswertung wurden Quellen mit ähnlichem Schüttungsverhalten in vier Gruppen (I-IV) zusammengefasst. Diese Klassifikation zeigt – räumlich und zeitlich differenziert – die maßgeblichen meteorologischen Einflussfaktoren sowie die hydrogeologischen Eigenschaften der Quelleinzugsgebiete an und identifiziert die wichtigsten Quelltypen direkt anhand ihrer Schüttungsdynamik.

Die Verknüpfung von Quellschüttungsdynamik und meteorologischen Einflussfaktoren ermöglicht eine erste Einschätzung der Entwicklung der Dynamik unter veränderten klimatischen Rahmenbedingungen. Mit fortschreitendem Klimawandel werden sich die meteorologischen Einflussfaktoren und Eigenschaften verändern, wie rasch und in welcher Art unterscheidet sich jedoch stark. Besonders rasche Veränderungen werden etwa für Umfang und Dauer der Schneedecke erwartet (IPCC, 2021), in der je nach Höhenlage und Ausrichtung des Einzugsgebietes erhebliche Anteile des Jahresniederschlags mehrere Monate lang

gespeichert werden. Ob veränderte meteorologische Bedingungen sich unmittelbar in der Quellreaktion widerspiegeln, oder gepuffert an die Quelle weitergegeben werden, wird im Wesentlichen von Durchlässigkeit und Speicherkapazität der Grundwasserleiter im Quellinzugsgebiet bestimmt.

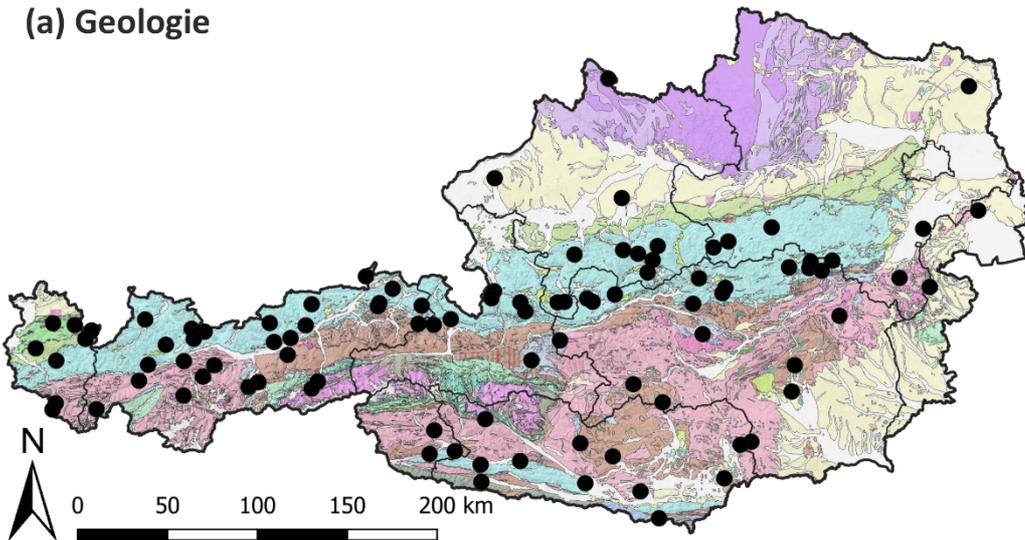
Vor diesem Hintergrund bildet die hier vorgestellte Auswertung und Charakterisierung aller 96 -Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes eine einheitliche Grundlage für bundesweite Vergleiche der bisherigen sowie der erwarteten zukünftigen Entwicklung von Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrischer Leitfähigkeit des Quellwassers. Konsistente Berechnungsverfahren gewährleisten die Vergleichbarkeit der Ergebnisse und bilden damit die Grundlage für regionale Schlussfolgerungen. Die langen Beobachtungszeiträume und die große Bandbreite an meteorologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten zeichnen ein möglichst repräsentatives Lagebild der Quellsituation in Österreich. Das folgende Kapitel stellt diese einheitlichen Berechnungsverfahren knapp vor.

2.1 Datengrundlage und -aufbereitung

Die Grundlage der vorgenommenen Analysen bilden langjährige, vom Hydrographischen Dienst an 96 Quellen aufgezeichnete Zeitreihen der Parameter Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit (Abbildung 1). Analysiert wurden Quellen aus allen Bundesländern Österreichs. Die Quellen entwässern verschiedenste geologische Einheiten (Abbildung 1a) und weisen alle vom BMLFUW (2005) klassifizierten Quelltypen auf (Karstquelle, Kluftquelle, Porengrundwasserquelle, Hangschuttquelle; Abbildung 1b). Sie treten in unterschiedlicher Seehöhe aus (Abbildung 2a) und unterscheiden sich stark hinsichtlich ihrer mittleren Schüttung (Abbildung 2b).

Abbildung 1: Die Lage aller 96 analysierten Quellen in Bezug auf die Bundesländer Österreichs. (a) Verteilung der Quellen auf die wichtigsten geologischen Einheiten Österreichs. Als Referenz ist die geologische Karte Österreichs hinterlegt (KM500-GE, Geologische Bundesanstalt 2022; www.geologie.ac.at; CC BY-NC-ND 4.0). (b) Räumliche Verteilung der Quelltypen nach BMLFUW (2005). Kartengrundlage: Geoland Basemap Gelände (www.basemap.at; CC-BY 4.0), Legende der geologischen Einheiten siehe Anhang 1.

(a) Geologie



(b) Quelltyp

Klassifikation nach BMLFUW (2005)

- Karstquelle
- verdeckte Karstquelle
- Kluftquelle
- Hangschuttquelle
- Porengrundwasserquelle

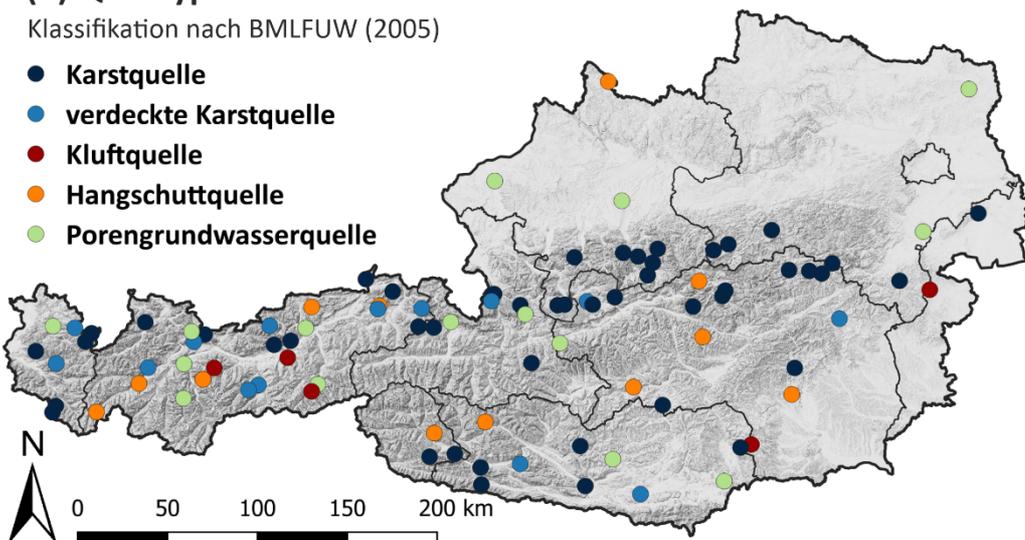
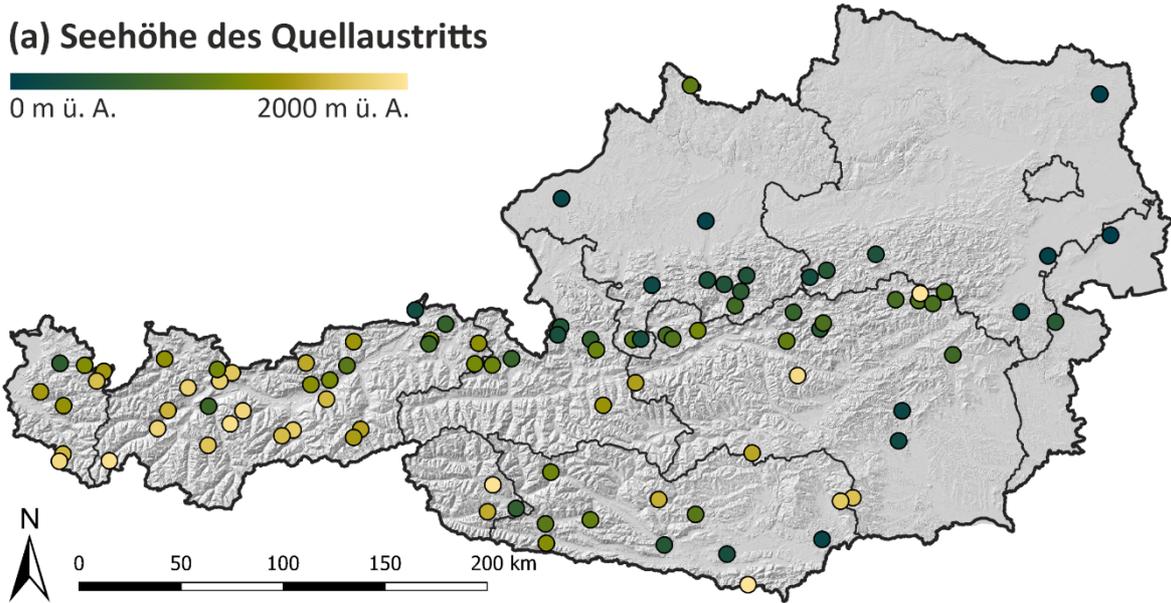


Abbildung 2: (a) Die Seehöhe [m ü. A.] aller Quellaustritte. Die Verteilung folgt im Wesentlichen der großräumigen Topographie Österreichs. (b) Die mittlere Schüttung [l/s] aller Quellen im Beobachtungszeitraum bis 31.12.2020. Die schüttungsstarken Karstquellen in den Nördlichen Kalkalpen treten deutlich hervor. Kartengrundlage: Geoland Basemap Gelände (www.basemap.at; CC-BY 4.0).

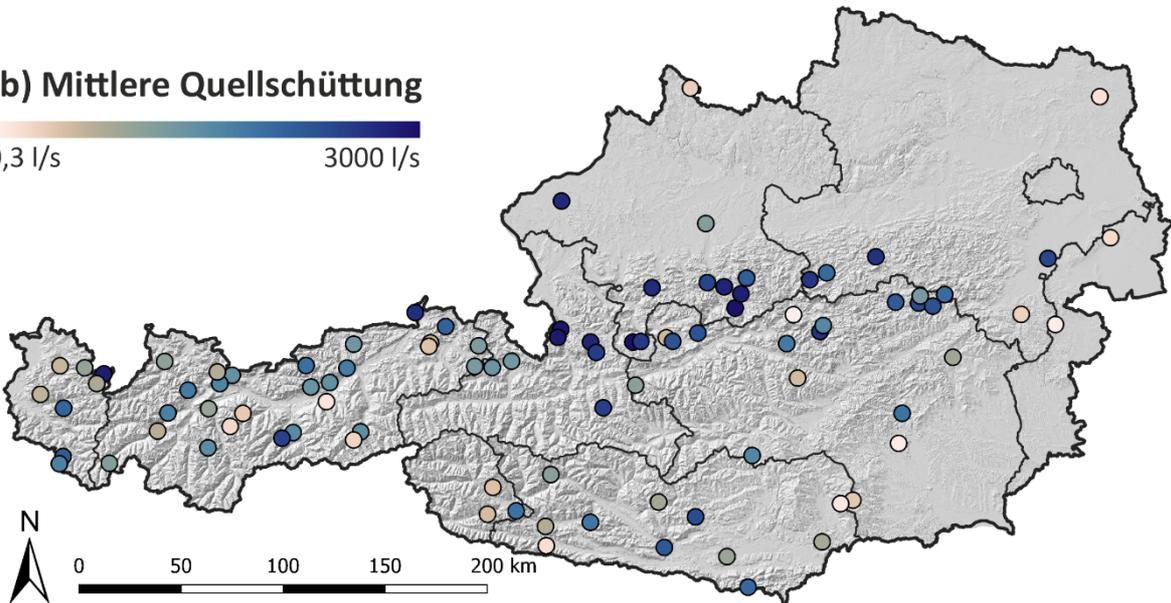
(a) Seehöhe des Quellaustritts

0 m ü. A. 2000 m ü. A.



(b) Mittlere Quellschüttung

0,3 l/s 3000 l/s



In einem ersten Bearbeitungsschritt erfolgte zunächst die Aufbereitung der vorliegenden Datenreihen, um eine optimierte und konsistente, an die Anforderungen der Quellcharakterisierung angepasste Datengrundlage zu schaffen. Die Beobachtungszeiträume variieren von Quelle zu Quelle sowie zwischen den Parametern einer Quelle und erreichen bis zu 43 Jahre. Einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Daten, einschließlich auftretender Datenlücken, gibt Abbildung 3. Um möglichst lange, einheitliche Zeitreihen zu gewährleisten, wurden alle Daten auf Tagesbasis gemittelt, wobei ausschließlich Tage berücksichtigt wurden, die zumindest 80 % der täglichen Messungen abdecken. Anschließend wurden alle Zeitreihen einer visuellen Plausibilitäts- und Homogenitätskontrolle unterzogen und abweichende Datenintervalle entfernt. Das betrifft unplausible Sprünge der Messwerte in den jeweiligen Parametern oder Intervalle mit einer abweichenden Auflösung (Abbildung 4a). Zusätzlich wurden alle Intervalle von der Analyse ausgeschlossen, in welchen die Quellschüttung 0 l/s beträgt. Zum einen, weil in diesen Perioden des Öfteren Messwerte für elektrische Leitfähigkeit und Wassertemperatur vorliegen (Abbildung 4b), was auf einen Ausfall der Drucksonde hinweisen könnte. Zum anderen, um ein Trockenfallen der Messsonde nicht fälschlicherweise als Trockenfallen der Quelle zu interpretieren.

Abbildung 3 Datenverfügbarkeit der 96 analysierten Quellen auf Tagesbasis im Zeitraum 1.1.1976-31.12.2020 für die Parameter Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit. In rot ist der Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020 begrenzt, der für die Trendanalysen verwendet wird.

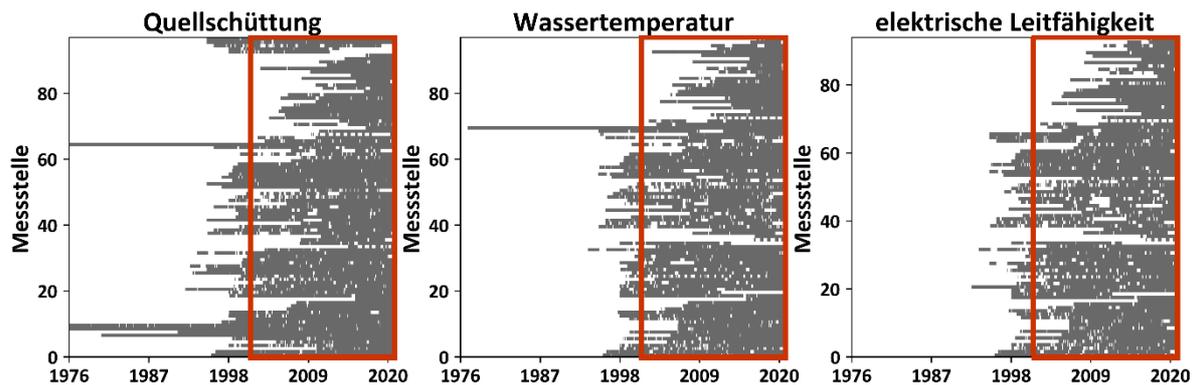
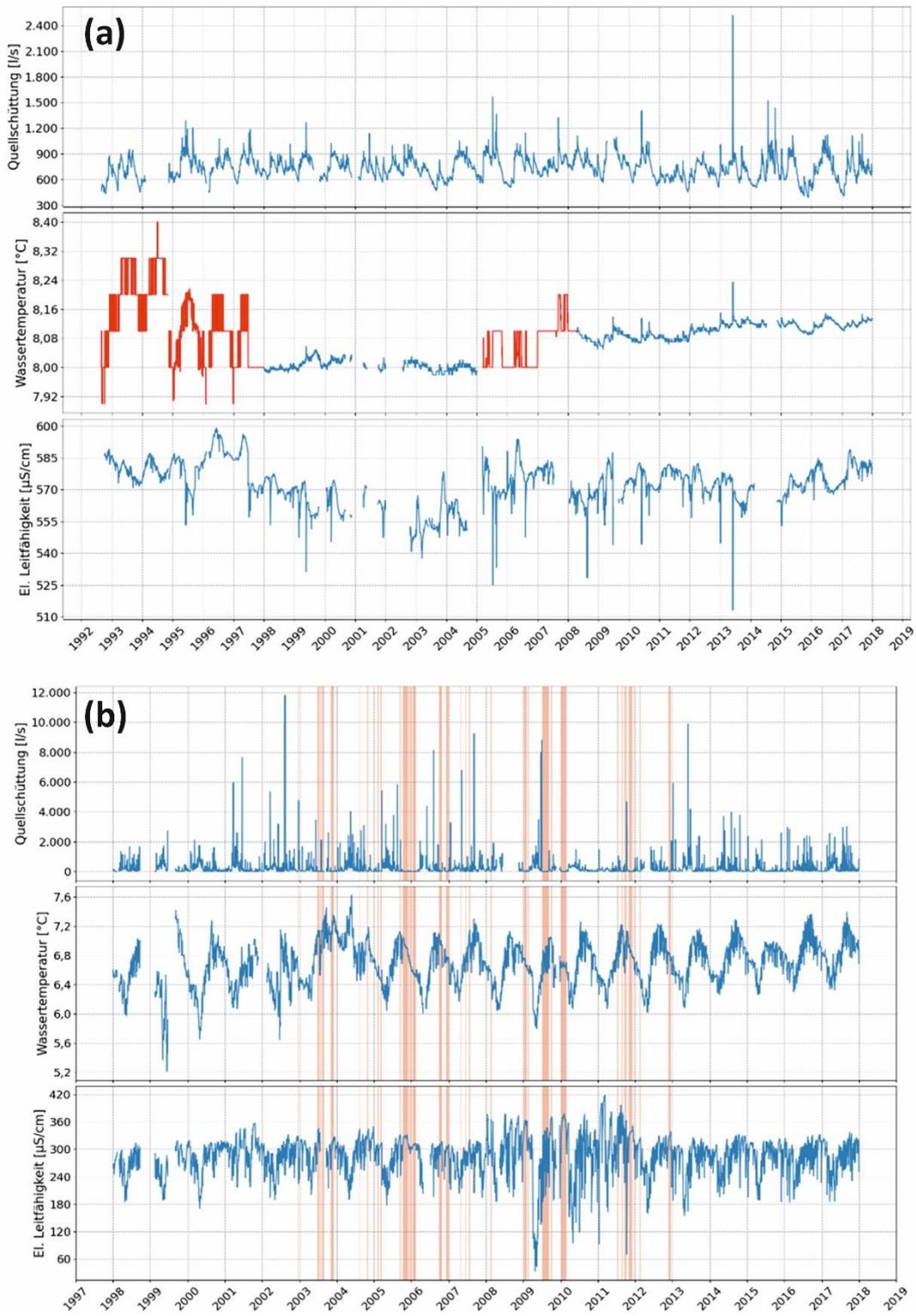


Abbildung 4 Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit der Blauen Quelle HZB-Nr. 395434 (a) und der Steyrnquelle HZB-Nr. 395079 (b). Die blauen Linien stellen die für die Analyse verwendeten Daten dar. In rot sind die Perioden dargestellt, die von den Analysen ausgeschlossen wurden. Diese Datenabschnitte weisen abweichende Auflösung der Messwerte, große Datenlücken oder Quellschüttungen von 0 l/s auf.



2.2 Trendanalyse

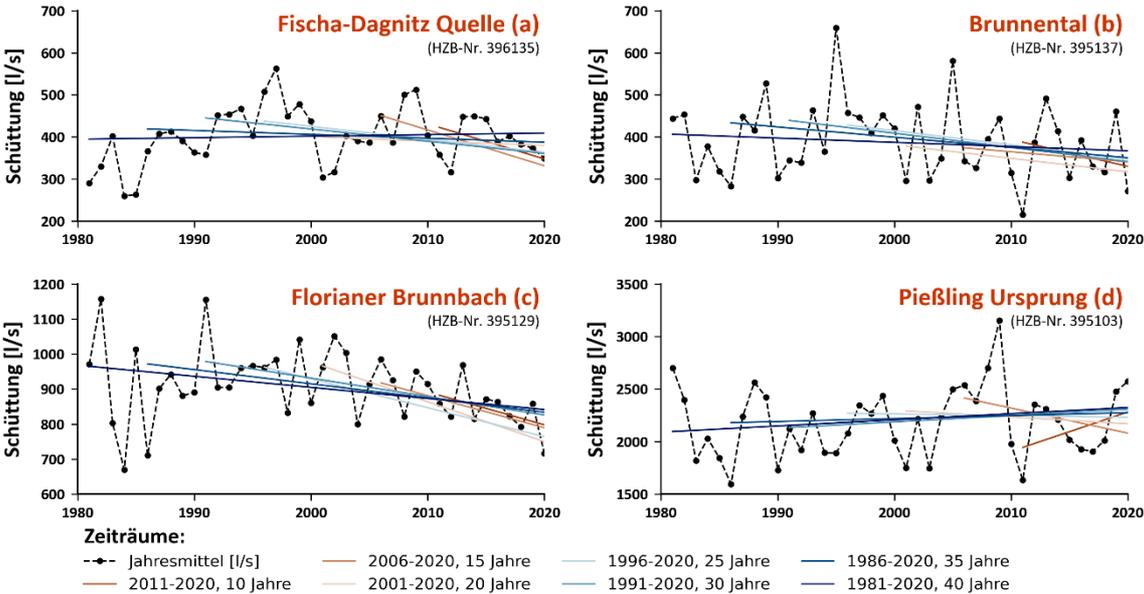
Die langfristige Entwicklung von Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrischer Leitfähigkeit jeder Quelle wurde mittels Trendanalyse statistisch bewertet. Signifikante Änderungen wurden zunächst anhand des saisonalen Mann-Kendall-Tests (Helsel et al., 2020) erfasst. Die Ergebnisse wurden in zwei Gruppen zusammengefasst: positiver Trend (Zunahme), negativer Trend (Abnahme). Für jede Berechnung wurde das zugehörige Signifikanzniveau ausgewiesen (p-Wert nach Fisher, 1973). Um unterschiedliche Entwicklungen während der vier Jahreszeiten festzustellen, wurden Trends separat für diese berechnet. Hintergründe zur verwendeten Methodik sind in der Infobox „Trendanalyse“ zusammengefasst.

Um die Ergebnisse der Trendanalyse der einzelnen Quellen untereinander zu vergleichen, müssen langfristige Entwicklung innerhalb einer einheitlichen Zeitperiode berechnet werden. Je nach Wahl dieser Periode ergeben sich mitunter Trends mit verschiedenen Richtungen und Änderungsraten (Abbildung 5): So zeigt die Fischa-Dagnitz Quelle bei Betrachtung der gesamten Messzeitreihe (40 Jahre) eine langfristig zunehmende Schüttung (Abbildung 5a). Die Quellen Brunnental und Florianer Brunnbach weisen zwar stets, d. h. unabhängig vom gewählten Analysezeitraum, einen negativen Trend auf, die Stärke des Trends (Änderungsrate) variiert aber in Abhängigkeit von der genauen Definition (Abbildung 5b,c). Besonders komplex nimmt sich die Entwicklung des Pießling Ursprungs aus (Abbildung 5d): Je nach Wahl des Analysezeitraums ergibt sich ein positiver Trend (langfristige Betrachtung, 40-25 Jahre) oder ein negativer Trend (mittelfristige Betrachtung, 20-15 Jahre). Bei einem Analysezeitraum von 10 Jahren zeigt sie dagegen wieder einen positiven Trend.

Um eine konsistente Auswertung zu gewährleisten, wurde der Zeitraum für die Trendanalyse auf 1.1.2001-31.12.2020 festgelegt. Dies Wahl ermöglicht es einerseits, eine möglichst lange Periode abzubilden, andererseits werden möglichst viele Quellen in die Analyse eingebunden. Als zusätzliche Voraussetzung wurde das Vorliegen einer weitgehend kontinuierlichen Datenreihe ($\geq 80\%$) im analysierten Zeitraum festgelegt.

Für die im Anhang zusammengestellten Stammdatenblätter wurden die jeweiligen Trends zwecks einheitlicher Darstellung unabhängig von ihrer statistischen Signifikanz und Zeitreihenlänge berechnet, visualisiert und das zugehörige Signifikanzniveau (p-Wert) vermerkt. Zusätzlich wurden Trends signifikanz und Änderungsrate der jährlichen Mittelwerte, der Jahreshöchst- und -tiefstwerte sowie des Quotienten (Q_{\min}/Q_{\max}) derselben (als einfaches Streuungsmaß) für jede Quelle berechnet.

Abbildung 5 Langfristige Entwicklung der mittleren Quellschüttung von vier österreichischen Quellen im Zeitraum 1980-2020. Die Trends wurden für unterschiedlich lange Zeitintervalle berechnet. Die Steigung des Theil-Sen Slopes (als Linie über das zugehörige Zeitintervall) zeigt ob die Quellschüttung in der jeweiligen Periode ansteigt oder abnimmt, sowie die Größe der Änderungen.



Infobox: Trendanalyse

Die langfristige Entwicklung der Quellschüttung, der Wassertemperatur sowie der elektrischen Leitfähigkeit an den Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes wurde mittels Trendanalyse bewertet. Dabei wurde die Stärke einseitig gerichteter (monotoner) Veränderungen erfasst und gegenüber zufälligen Schwankungen statistisch abgegrenzt.

Das Standardverfahren zur Trendanalyse in der Wasserwirtschaft ist der saisonale Mann-Kendall-Test (MK-Test; Hirsch et al., 1982; Helsel et al., 2020). Dieser Test vergleicht die Anzahl der Zu- und Abnahmen zwischen allen Datenpunkten einer Zeitreihe. Bei einer unveränderlichen (stationären) Entwicklung halten sich diese in etwa die Waage, mit einer begrenzten zufallsbedingten Abweichung. Übertrifft die Zu- oder Abnahme in der beobachteten Datenreihe diese Abweichung, wird ein signifikanter Trend festgestellt. Da alle gemessenen Quellparameter einen typischen Jahresgang aufweisen, wurde die langfristige Entwicklung zunächst für jedes Monat getrennt bewertet und anschließend zu einer Teststatistik kombiniert (Helsel et al., 2020). Das Testverfahren berücksichtigt außerdem die in Kapitel 2.3.2 diskutierte Autokorrelation der Datenreihen (Hirsch und Slack, 1984).

Als robustes Maß für die Veränderungsrate wurde auf die Theil-Sen Gerade zurückgegriffen (Theil, 1950; Sen, 1968; Helsel et al., 2020). Dabei werden zunächst die Änderungsraten zwischen allen Datenpunkten einer Messzeitreihe berechnet. Der Median dieser Raten entspricht der Steigung der Theil-Sen Gerade. Dieses Verfahren ist besonders für die analysierten Zeitreihen geeignet, da es keine spezifische Messwertverteilung voraussetzt und robust gegenüber extremen Schwankungen und Ausreißern ist. Die Steigung der Theil-Sen Gerade entspricht der langfristigen Änderungsrate und wird zusammen mit dem Signifikanzniveau (MK-Test) für jede Datenreihe an jeder Quelle angeführt.

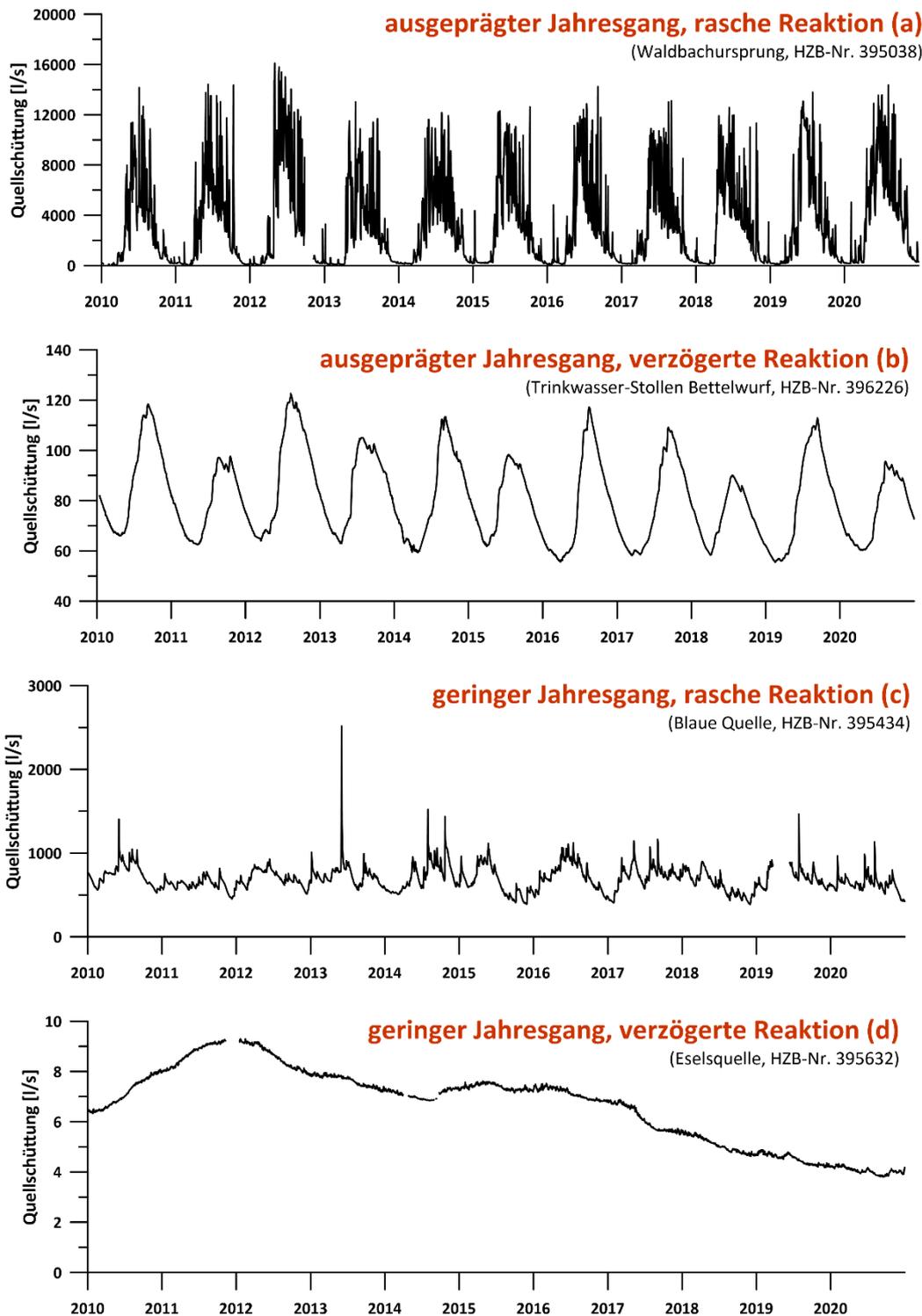
2.3 Quellschüttungsdynamik

Das Auslaufverhalten von Quellen wird einerseits von der Dynamik der Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet geprägt, andererseits von den hydraulischen Eigenschaften des Grundwasserleiters, der die Quelle speist. Das Zusammenspiel beider Einflussfaktoren bestimmt die Dynamik der Quellschüttung. Umgekehrt lässt die aufgezeichnete Quellschüttungszeitreihe Rückschlüsse auf meteorologische und hydrogeologische Einflussfaktoren zu und kann zur Charakterisierung und Klassifikation verschiedener Quelltypen genutzt werden. In der Folge werden zwei Kennwerte zur Beschreibung der Schüttungsdynamik vorgestellt: Der Jahresgang der Quellschüttung (Saisonalität) sowie ihre Autokorrelation.

Mit diesen beiden Kennwerten lässt sich die Form der Quell-Hydrographen grundsätzlich beschreiben. Quellen mit deutlich ausgeprägtem Jahresgang und rascher Reaktion auf Niederschlagsereignisse sind von hohen, schmalen Schüttungsspitzen und raschem Abklingen bereits kurz nach dem Ende jedes Niederschlagsereignisses gekennzeichnet (Abbildung 6a). Dagegen weisen Quellen mit ausgeprägtem Jahresgang und verzögerter Reaktion auf Niederschlagsereignisse auf einen Grundwasserleiter mit ausgeprägter Speicherkapazität hin, der die Impulse einzelner Niederschlagsereignisse abpuffert (Abbildung 6b).

Quellschüttungen mit kaum ausgeprägtem Jahresgang können entweder durch gleichmäßig über das Jahr verteilte Grundwasserneubildung oder einen Grundwasserleiter mit besonders hoher Speicherkapazität und Verweilzeiten, deutlich > 1 Jahr, bedingt sein. Bei rascher Reaktion auf einzelne Niederschlagsereignisse wird eher die Neubildungsdynamik ausschlaggebend sein (Abbildung 6c), bei verzögerter Reaktion und starker Dämpfung eher die Speicherkapazität (Abbildung 6d).

Abbildung 6: Jahresgang und Autokorrelation erfassen die grundlegenden Eigenschaften von Quellschüttungsganglinien. (a) Der Waldbachursprung zeigt einen ausgeprägten Jahresgang und rasche Reaktion auf Grundwasserneubildungsereignisse. (b) Der Trinkwasserstollen Bettelwurf zeigt einen ausgeprägten Jahresgang und eine verzögerte Reaktion. (c) Die Blaue Quelle zeigt einen geringen Jahresgang und rasche Reaktion. (d) Die Eselsquelle zeigt einen geringen Jahresgang und verzögerte Reaktion.



2.3.1 Saisonalität

Die Mechanismen der Grundwasserneubildung unterliegen einem Jahresgang, der die jeweils saisonal dominanten Neubildungskomponenten widerspiegelt. Die tendenziell starken konvektiven Niederschläge im Sommer führen dazu, dass der niederschlagsreichste Monat meist auf den Juni oder Juli entfällt. Im Winter fällt ein Teil des Niederschlags als Schnee, und kann erst während der Schneeschmelze im Frühjahr in den Grundwasserleiter infiltrieren. Im Sommer verdunstet ein erheblicher Anteil des Niederschlags, der somit nicht zur Grundwasserneubildung beiträgt. Je nach Beschaffenheit des Grundwasserleiters und des dahinterliegenden Einzugsgebiets wird diese Dynamik mehr oder weniger verändert an die Quellschüttung weitergegeben.

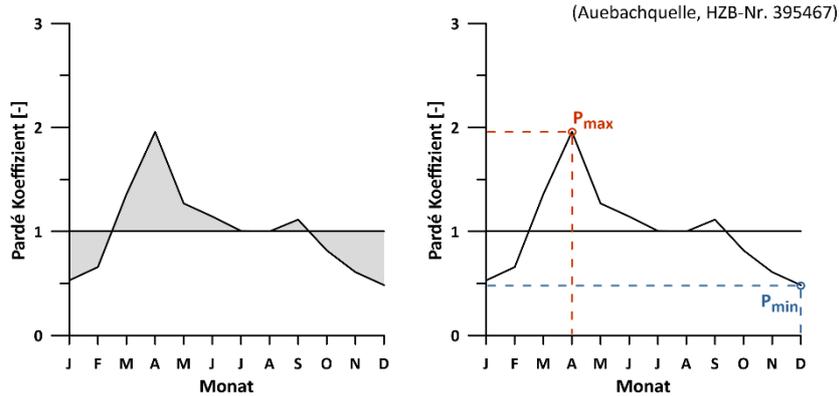
Die Saisonalität der Quellschüttungsganglinie (Jahresgang) wurde mittels Pardé-Koeffizienten P [-] quantifiziert (Pardé, 1947). Dabei wurde für jedes Monat i die mittlere Quellschüttung $\langle Q_i \rangle$ [l/s] mit der mittleren jährlichen Quellschüttung $\langle Q_a \rangle$ [l/s] verglichen (Blöschl et al., 2013):

$$P_i = \frac{\langle Q_i \rangle}{\langle Q_a \rangle}$$

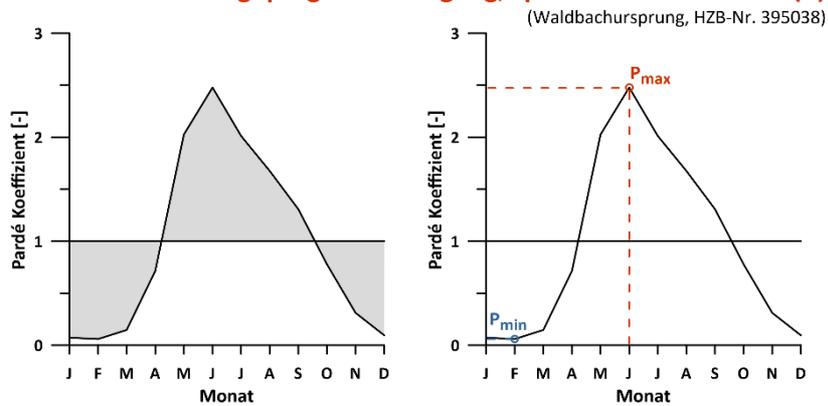
Liegen die Pardé-Koeffizienten einer Quelle stets nahe bei 1, spiegelt dies einen gleichförmig über das Jahr verteilten Abfluss wider. Quellen mit ausgeprägtem Jahresgang weisen dagegen Monate mit deutlich größeren und Monate mit deutlich kleineren Pardé-Koeffizienten auf ($P_i \gg 1$ oder $P_i \ll 1$). Zeitpunkt und Amplitude der einzelnen Pardé-Koeffizienten repräsentieren damit die saisonale Charakteristik der jeweiligen Quelle. Je stärker die Abweichung der Pardé-Koeffizienten von der Ausgleichslinie $\langle Q_i \rangle = \langle Q_a \rangle$ (d. h. je stärker die Abweichung ihrer Werte von 1), desto ausgeprägter der Jahresgang der Quelle. Besondere Bedeutung kommt dabei dem Monat mit der stärksten Schüttung (P_{\max}) sowie jenem mit der geringsten Schüttung (P_{\min}) zu (Abbildung 7). Daneben spielen die Dauer der Niederwasserperiode während der Wintermonate sowie die Intensität des Anstiegs während der Schneeschmelze eine besondere Rolle. Im Wesentlichen bestimmen Höhenlage und Ausrichtung des Einzugsgebietes den Zeitpunkt und Dauer der Schneeschmelze und damit die Stärke dieses Anstiegs: Südseitig gelegene Einzugsgebiete in mittleren Seehöhen zeigen einen solchen in der Regel zwischen Februar und April (Abbildung 7a), hochgelegene und nordseitig ausgerichtete Einzugsgebiete dagegen im April, Mai und Juni (Abbildung 7b). Niedrig gelegene Einzugsgebiete oder stark gepuffter Quellen weisen dagegen keinen nennenswerten Anstieg während der Schneeschmelzperiode auf (Abbildung 7c).

Abbildung 7: Die Stärke des Jahresgangs jeder Quelle wird anhand ihres Integrierten Jahresgangs (IJG) bemessen. Dabei wird zunächst die Summe der Abweichungen aller Pardé-Koeffizienten von der Ausgleichslinie bestimmt (grau hinterlegt). Anschließend wird der IJG in Prozent maximal möglicher Abweichung angegeben. Zusätzlich werden die Extremwerte P_{max} (rot) und P_{min} (blau) für jede Quelle bestimmt. Exemplarisch für (a) Auebachquelle, (b) Waldbachursprung und (c) Blaue Quelle dargestellt.

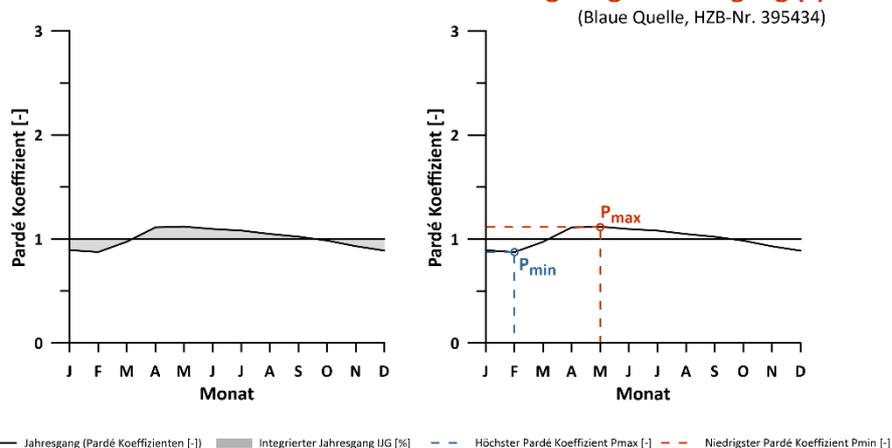
ausgeprägter Jahresgang, frühe Schneeschmelze (a)



ausgeprägter Jahresgang, späte Schneeschmelze (b)



geringer Jahresgang (c)



Die Gesamtstärke des Jahresgangs ergibt sich aus der zusammenfassenden Betrachtung aller 12 Pardé-Koeffizienten. Weichen diese im Lauf des Jahres stark von der Ausgleichslinie ab, so weist die Quelle einen ausgeprägten Jahresgang auf. Die Summe der Abweichungen ergibt sich durch Integration über alle 12 Pardé-Koeffizienten. Sie wird als Integrierter Jahresgang (IJG) [%] bezeichnet und ergibt sich aus (Abbildung 7):

$$\text{IJG} = \frac{\sum_{i=1}^{12} (|P_i - 1|)}{22} * 100 \%$$

Der Integrierte Jahresgang wird für jede Quelle berechnet und quantifiziert die Stärke des Quellschüttungsjahresganges. Er liegt zwischen 0 % (extrem gleichmäßiger Abfluss) und 100 % (extrem ausgeprägter Jahresgang). Die Methodik wird in der Infobox „Jahresgang“ näher erläutert.

Infobox: Jahresgang

Der Jahresgang der Quellparameter wird durch Vergleich der monatlichen Mittelwerte mit dem Jahresmittelwert abgeschätzt. Die 12 dimensionslosen Pardé-Koeffizienten für jede Quelle (ein Koeffizient pro Monat) stellen die Vergleichbarkeit der Quellschüttungsregime sicher (Blöschl et al., 2013). Die Form dieses Jahresgangs bildet die Basis für qualitative Klassifikationen nach Abflussregimen (z.B. Schürch et al., 2016). Im vorliegenden Projekt stellt sie eine von zwei Säulen der Clusteranalyse dar, die eine quantitative Quellklassifikation anhand der Schüttungsdynamik ermöglicht (siehe Kapitel 2.3.2 und 2.4).

Der höchste und niedrigste der 12 Pardé-Koeffizienten jeder Quelle, P_{\min} bzw. P_{\max} , geben Auskunft über die Extremwerte des Jahresgangs. Dabei fällt der Monat mit der im Schnitt stärksten Quellschüttung (P_{\max}) häufig mit der Schneeschmelzperiode zusammen. Diese setzt je nach Höhenlage des Quelleinzugsgebietes zwischen Februar und Juni ein. Die Beschaffenheit des Einzugsgebietes und des entwässerten Grundwasserleiters bestimmen, wie rasch dieser Grundwasserneubildungspuls an die Quelle weitergegeben wird. Das Monat mit der im Schnitt geringsten Quellschüttung (P_{\min}) fällt in der Regel mit Perioden zusammen, die kaum Grundwasserneubildung aufweisen. In diesen Perioden wird die Quellschüttung ausschließlich vom gespeicherten Grundwasser gespeist (Basisabfluss). Da dieser Speicher bei ausbleibender Grundwasserneubildung stetig leerläuft, fällt dieser Zeitpunkt häufig mit dem

Spätwinter, vor Einsetzen der Schneeschmelze, zusammen. Je höher die Speicherfähigkeit des Grundwasserleiters, desto langsamer und gedämpfter erfolgt dieses Leerlaufen.

Neben der Form des Jahresgangs wird auch die Gesamtstärke der saisonalen Schwankung jeder Quelle berechnet. Der Integrierte Jahresgang IJG [%] gibt diese Stärke als Prozentzahl zwischen extrem ausgeglichener Quellschüttung (kein Jahresgang) und extrem saisonaler Quellschüttung (maximal möglicher Jahresgang) an. Dabei entspricht ein Integrierter Jahresgang von IJG = 0 % einem völlig gleichförmigen Abfluss über das ganze Jahr hinweg – der mittlere monatliche Abfluss ist stets gleich, $P_1 = P_2 = \dots = P_{12} = 1$, die Summe der Abweichungen aller Pardé-Koeffizienten von der Ausgleichsline entspricht 0. Je höher die Summe dieser Abweichungen, desto größer der Integrierte Jahresgang. Die maximal mögliche Abweichung (IJG = 100 %) tritt auf, wenn der gesamte Abfluss in einem einzigen Monat erfolgt – in diesem Monat gilt $P_i = 12$, in allen anderen Monaten dagegen $P_i = 0$. Die Summe der Abweichungen von der Ausgleichsline entspricht daher $1 \times |12 - 1| + 11 \times |0 - 1| = 1 \times 11 + 11 \times 1 = 22$. Real existierende Quellen weisen stets einen Integrierten Jahresgang zwischen diesen beiden Endgliedern auf.

Zur Erfassung ihrer langjährigen Entwicklung wurden die Pardé-Koeffizienten zusätzlich für 10-Jahres Perioden berechnet und in 1-Jahresschritten über die gesamte Beobachtungsperiode verschoben (1996-2005; 1997-2006; 1998-2007 usw.; Bormann, 2010; Lebieczinski und Fürst, 2018).

2.3.2 Autokorrelation

Grundwasserneubildungsereignisse im Einzugsgebiet einer Quelle – etwa durch Niederschlag oder Schmelzwasserandrang – führen zur Infiltration von Wasser in den Grundwasserleiter. In der Folge erhöht sich der hydraulische Gradient des Grundwassers und verstärkt die Quellschüttung. Die Dauer dieser Neubildungsereignisse hängt im Einzelnen von den lokalen meteorologischen Bedingungen ab. Insgesamt betrachtet zeichnen sich jedoch charakteristische Muster ab: Während die Dauer einzelner Regenereignisse in der Regel einige Stunden oder Tage beträgt, halten Schneeschmelzperioden über mehrere Wochen an. Die charakteristische Dauer dieser unterschiedlichen Ereignisse steht in direktem Zusammenhang mit dem jeweiligen Prozess und kann zur Identifikation desselben genutzt werden (Blöschl und Sivapalan, 1995).

Die hydraulische Anregung des Grundwasserkörpers im Einzugsgebiet einer Quelle erfolgt demnach, je nach Art der Grundwasserneubildung, höchst unterschiedlich. Die Weitergabe dieser Grundwasserneubildungspulse an die Quelle hängt darüber hinaus von der Beschaffenheit des Untergrunds ab: Je nach Durchlässigkeit und Speicherfähigkeit des Grundwasserleiters reagieren manche Quellen mit scharfen, schmalen Abflussspitzen auf einzelne Ereignisse, andere Quellen zeigen eine stärker gedämpfte Reaktion. Ist das Einzugsgebiet einer Quelle nicht bekannt, lassen sich Neubildungsereignisse und Quellreaktion nicht mit Sicherheit einander zuordnen. Der Verlauf der Quellschüttungsganglinie gibt jedoch Auskunft über den kombinierten Effekt von Neubildungsdynamik und Aquifereigenschaften (Kresic und Stevanovic, 2010). Zur Analyse der Quellschüttungszeitreihen wird daher die empirische Autokorrelationsfunktion r [-] für jede Quelle berechnet (Kresic und Stevanovic, 2010):

$$r_{\tau} = \frac{n}{n - \tau} \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} (Q_t - \langle Q \rangle)(Q_{i+\tau} - \langle Q \rangle)}{(Q_t - \langle Q \rangle)^2}$$

(Anzahl an Messwerten n , mittlere Quellschüttung der gesamten Zeitreihe $\langle Q \rangle$ [l/s], Tagesmittel der Quellschüttung Q_t [l/s] am Tag t bzw. τ Tage zuvor). Je stärker die gemessene Quellschüttung von den vorangegangenen Tagen abhängt, desto höher der Korrelationskoeffizient r . Zur Berechnung desselben wird die Messdatenreihe jeweils sich selbst - verschoben um den Versatz τ - verglichen und der Korrelationskoeffizient für diese Verzögerung berechnet. Der Betrachtungszeitraum wird dabei systematisch von $\tau = 1$ Tag bis $\tau = 365$ Tage erweitert, um die Gesamtheit aller Einflussfaktoren – kurzfristiger wie langfristiger – abzubilden.

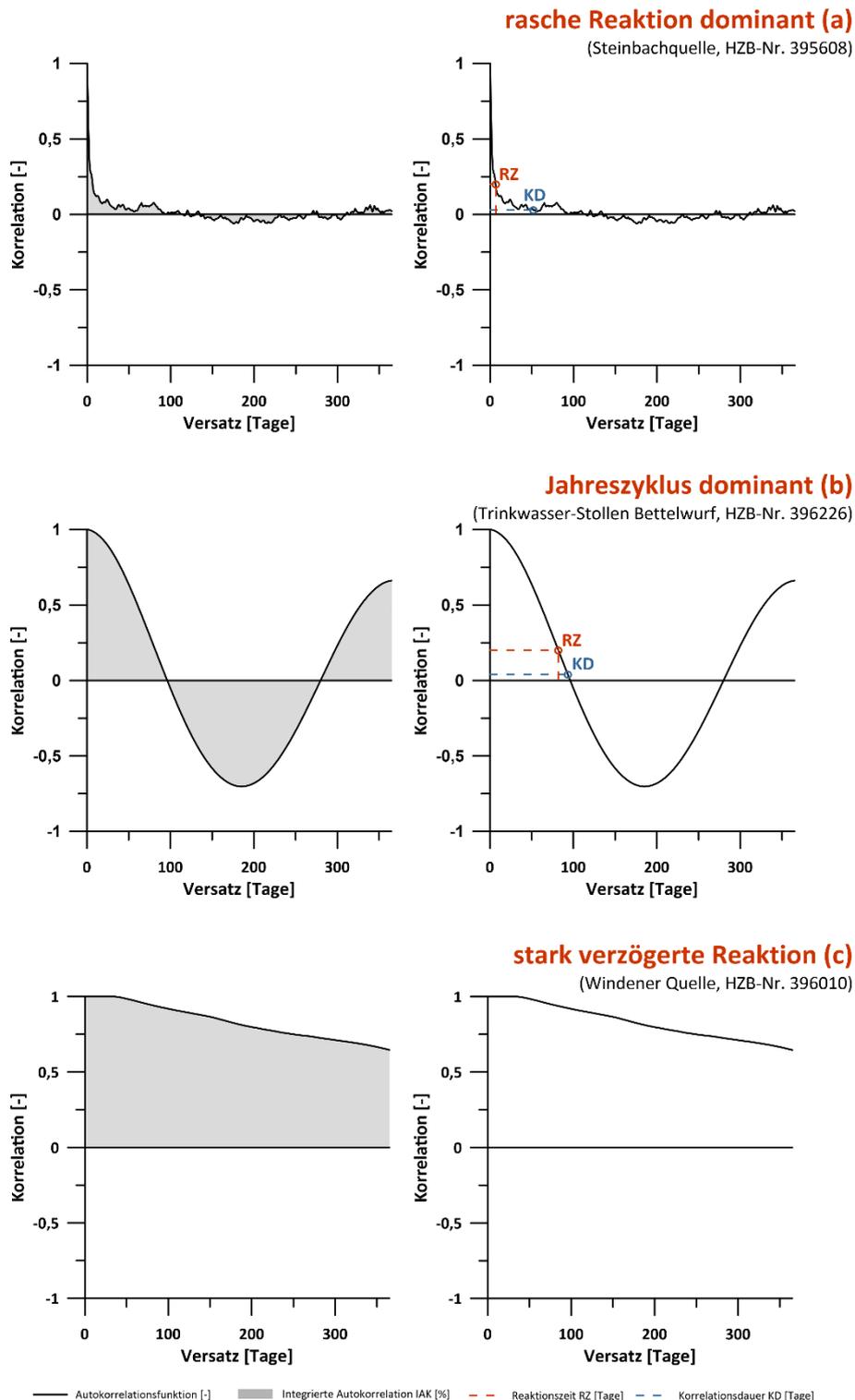
Die Form der Autokorrelationsfunktion gibt Auskunft über die dominanten Grundwasserneubildungskomponenten und die hydraulischen Eigenschaften des Grundwasserleiters

(Abbildung 8): Sind die einzelnen Messwerte kaum voneinander abhängig, zeigt die Autokorrelationsfunktion ein unstrukturiertes Hintergrundrauschen auf niedrigem Niveau (unregelmäßige Schwankungen nahe der Nulllinie). Hängt die tägliche Quellschüttung lediglich von Neubildungspulsen ab, die sich kurz zuvor im Einzugsgebiet ereigneten, so zeigt die Autokorrelationsfunktion der Quellschüttung ein rasches Abfallen nach wenigen Tagen und wird anschließend von unregelmäßigem Hintergrundrauschen dominiert (Abbildung 8a).

Länger anhaltende, periodisch auftretende Neubildungsereignisse, wie etwa das jährlich wiederkehrende Abschmelzen der Schneedecke im Einzugsgebiet, führen dagegen zu einer strukturierten mittelfristigen Quellreaktion (Abbildung 8b): Die Autokorrelationsfunktion zeigt einen glatten, wellenförmigen Verlauf mit ausgeprägter, negativer Korrelation im Mittelteil. Die Wellenlänge dieser sinusförmigen Schwingung entspricht dabei näherungsweise dem Wiederkehrintervall der Neubildungsereignisse. Das langsamere Abfallen und Aufsteigen des Graphen zeigen das langsamere Fortschreiten solcher Prozesse an – die Dauer der Schneeschmelze übertrifft deutlich die Dauer einzelner Regenereignisse.

Eine äußerst gedämpfte Quellreaktion auf Grundwasserneubildungsereignisse wird durch eine anhaltend hohe Autokorrelationsfunktion angezeigt (Abbildung 8c): Die Quellschüttung variiert in diesem Fall kaum von Tag zu Tag, sie liegt stets nahe den Werten der vorangegangenen Tage und Wochen. Quellen mit solchem Schüttungsverhalten weisen Ganglinien auf, in denen die einzelnen Neubildungsereignisse kaum voneinander unterscheidbar sind. Stattdessen bestimmt die Summe der Ereignisse den allmählichen Verlauf der Quellschüttungsganglinie.

Abbildung 8: Die Stärke der Autokorrelation einer Quelle wird anhand ihrer Integrierten Autokorrelation (IAK) bemessen (grau hinterlegte Fläche unter der Kurve). Die Integrierte Autokorrelation schwankt zwischen 0 % (keine Fläche) und 100 % (maximal mögliche Fläche). Zusätzlich werden die Korrelationsdauer KD (blau) und die Reaktionszeit RZ (rot) für jede Quelle bestimmt. Exemplarisch für (a) Steinbachquelle, (b) Trinkwasser-Stollen Bettelwurf und (c) Windener Quelle dargestellt.



Die Gesamtstärke der Autokorrelation wird anhand der Fläche unter dem Funktionsgraphen bestimmt. Sie entspricht der Integrierten Autokorrelation (IAK) [%] und wird quantifiziert durch (Abbildung 8):

$$IAK = \frac{\sum_{i=1}^{365} |r_i|}{365} * 100 \%$$

Die Integrierte Autokorrelation wird für jede Quelle berechnet. Sie liegt zwischen IAK = 0 % (extrem rasch reagierendes System aus Grundwasserneubildungsdynamik und Grundwasserleiter) und IAK = 100 % (extrem langsam reagierendes System). Darüber hinaus können einzelne Aspekte der Autokorrelationsfunktion durch definierte Kennzahlen erfasst werden: Die Dauer des Abklingens der Korrelation bis auf statistisch insignifikante Werte wird als Korrelationsdauer KD [Tage] bezeichnet und dient als Maß für die Quellreaktion auf einzelne Neubildungsereignisse (rasch/verzögert; Kresic und Stevanovic, 2010). Zusätzlich wird für Karstquellen traditionell die Dauer bis zum Abklingen der Autokorrelationsfunktion auf den Wert $r = 0,2$ ausgewiesen, die als Reaktionszeit RZ [Tage] bezeichnet wird (Mangin, 1984). Die Methodik wird in der Infobox „Autokorrelationsfunktion“ näher erläutert.

Infobox: Autokorrelationsfunktion

Die empirische Autokorrelationsfunktion der Quellschüttungsganglinie gibt Auskunft über die dominanten Grundwasserneubildungskomponenten und die hydraulischen Eigenschaften des Grundwasserleiters im Einzugsgebiet der Quelle (Kresic und Stevanovic, 2010). Sie stellt die mittlere Korrelation jedes Messwerts (Tagesmittel der Quellschüttung) mit früheren Messwerten (versetzt um τ Tage) dar. Korrelationskoeffizienten von +1 oder -1 zeigen eine perfekt positive bzw. negative Korrelation der Messwerte an (vollständige Abhängigkeit der Messwerte voneinander), Koeffizienten von 0 dagegen völlig unkorrelierte Werte (vollständige Unabhängigkeit). Die Autokorrelationsfunktion stellt die zweite Säule der Clusteranalyse dar, die eine quantitative Quellklassifikation anhand der Schüttungsdynamik ermöglicht (siehe Kapitel 2.3.1 und 2.4).

Die Autokorrelation der Quellschüttung spiegelt einerseits die Dynamik der Grundwasserneubildungsereignisse wider, andererseits die Verzögerung und Abpufferung dieser einzelnen Impulse im Grundwasserleiter. Verschiedene Grundwasserneubildungskomponenten weisen charakteristische Muster auf: Die Niederschlagsmenge von kurzfristigen, sommerlichen Wärmegewittern hängt in

der Regel kaum von der Niederschlagsmenge am Vortag ab und auch die Niederschlagsmenge von Stauniederschlägen verteilt sich meist auf einige Tage (maximal wenige Wochen). Dagegen erstreckt sich die Schneeschmelzperiode in Quelleinzugsgebieten in der Regel über mehrere Wochen, je nach Höhenlage und Relief des Einzugsgebietes mitunter auch Monate. Die entsprechenden Neubildungsereignisse weisen deutlich unterschiedliche Korrelationsstrukturen auf: Die Neubildungsmengen im Fall von Regenereignissen sind bereits nach wenigen Tagen kaum mehr untereinander korreliert (z. B. Mangin, 1984). Dagegen zeigen die Neubildungsmengen durch Schneeschmelze eine länger anhaltende Autokorrelation, die häufig erst nach Wochen abklingt.

Für die Quellreaktion auf einzelne Neubildungsereignisse ist der frühe Verlauf der Autokorrelationsfunktion entscheidend (bis zu einer Verzögerung von mehreren Wochen). In der Regel nimmt die Korrelation mit zunehmenden Versatz τ ab – bei reaktionsfreudigen Systemen erfolgt diese Abnahme rasch, bei trägen Systemen dagegen allmählich (Valdes et al., 2006; Mayaud et al., 2014). Im Zuge des vorliegenden Projekts wird dieses frühe Reaktionsverhalten durch zwei gebräuchliche Kennzahlen ausgedrückt: Die Korrelationsdauer KD [Tage] bezeichnet die Dauer bis zum Abklingen der Autokorrelationsfunktion auf statistisch insignifikante Werte (Kresic und Stevanovic, 2010). Die Berechnung erfolgt anhand des Anderson-Tests zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ (Anderson, 1942). Insbesondere in der Karsthydrologie wird dagegen häufig die Dauer bis zum Abklingen der Autokorrelationsfunktion auf Werte $r \leq 0,2$ berechnet. In der älteren Literatur wurde dieser Wert als Maß für die Verkarstung des Grundwasserleiters herangezogen und daher als „Memory Time“ (Speicherdauer) bezeichnet (Mangin, 1984). Tatsächlich hängt der Wert – ebenso wie die Korrelationsdauer KD – jedoch vom Zusammenspiel zwischen Grundwasserneubildungsdynamik und Strömungsverhältnissen im Untergrund ab (Eisenlohr et al., 1997; Jeannin und Sauter, 1998; Goldscheider und Drew, 2007; Kresic und Stevanovic, 2010) und wird daher im vorliegenden Bericht als Reaktionszeit RZ [Tage] bezeichnet.

Länger anhaltende Grundwasserneubildungsereignisse – etwa im Zuge der Schneeschmelze – sowie die mittelfristige Pufferwirkung des Grundwasserleiters bestimmen die mittleren Anteile der Autokorrelationsfunktion. Periodisch auftretende Neubildungspulse führen zu einer strukturierten mittelfristigen Quellreaktion, während aperiodisch auftretende Pulse zu unstrukturiertem

Hintergrundrauschen führen. Regelmäßiges Wechselspiel von Hoch- und Niederwasserbedingungen wird durch ausgeprägt negative Korrelationskoeffizienten angezeigt (z. B. Larocque et al., 1998; Davis, 2002). Die negative Amplitude tritt bei einer Verzögerung auf, die dem typischen Zeitintervall zwischen Hoch- und Niederwasser entspricht. Ein erneuter Anstieg der Korrelationskoeffizienten bei Erreichen einer Verzögerung von einem Jahr zeigt einen deutlichen Jahreszyklus an – im österreichischen Alpenraum ist dieser häufig durch Schnee- oder Gletschereisschmelze bedingt. Eine anhaltend hohe Autokorrelation zeigt dagegen ein stark gedämpftes Quellschüttungsverhalten an – entweder aufgrund überwiegend schwacher Anregung des Grundwasserspiegels durch kleinere Neubildungsereignisse oder aufgrund starker Abpufferung und Verteilung des infiltrierenden Wassers im Einzugsgebiet und im Grundwasserleiter.

Für jede Quelle wird die Gesamtstärke der Autokorrelation angegeben. Sie wird anhand der Integrierten Autokorrelation IAK [%] quantifiziert. Sie wird als Prozentzahl zwischen IAK = 0 % (Schüttungsganglinie äußerst stark von unregelmäßigen, kurzfristigen Schwankungen dominiert) und IAK = 100 % (Schüttungsganglinie frei von kurzfristigen Schwankungen, gedämpfter Verlauf) angegeben. Dabei entspricht IAK = 0 % einer Quellschüttungsganglinie, deren einzelne Werte völlig unabhängig voneinander sind – ab einem Versatz $\tau \geq 1$ Tag sind ihre Werte daher völlig unkorreliert ($r = 0$; minimal mögliche Fläche unter der Kurve der Autokorrelationsfunktion, d. h. $365 \times 0 = 0$). Je stärker die Abhängigkeit der Quellschüttung von den vorangegangenen Tagen ist, desto höher fällt die Integrierte Autokorrelation aus. Die maximal mögliche Abhängigkeit (IAK = 100 %) tritt auf, wenn die Quellschüttung stets gleich auf die Schüttung während der letzten 365 Tage reagiert (maximal mögliche Fläche unter dem Funktionsgraphen, d. h. $365 \times |\pm 1| = 365$). Real existierende Quellen weisen stets eine Integrierte Autokorrelation IAK zwischen diesen beiden Endgliedern auf.

Zur Erfassung ihrer langjährigen Entwicklung wurde die Autokorrelationsfunktion zusätzlich für 4-Jahres Perioden berechnet und in 1-Jahresschritten über die gesamte Beobachtungsperiode verschoben (1996-1999; 1997-2000; 1998-2001; usw.).

2.4 Clusteranalyse

Anhand der Quellschüttungsdynamik (Kapitel 2.3) wurden Cluster von Quellen mit ähnlichem Schüttungsverhalten ausgewiesen. Dabei wurden zunächst alle 96 untersuchten Quellen hinsichtlich ihrer Pardé-Koeffizienten untereinander verglichen und Quellen mit ähnlichem saisonalen Schüttungsverhalten zu Pardé-Clustern (PC) gruppiert. Analog dazu wurden Quellen mit ähnlicher Autokorrelation zu Autokorrelations-Clustern (AC) gruppiert. Das verwendete Analyseverfahren (k-means) ist in der Infobox „Mustererkennung“ näher erläutert.

Die Ergebnisse der beiden unabhängig voneinander gebildeten Clusterreihen wurden anschließend in einer Kreuztabelle (Kontingenztafel) gegenübergestellt und statistisch bewertet. Gehäuft auftretende Kombinationen einzelner Cluster wurden anhand ihrer Schnittmenge bestimmt und als Gruppen (Quelltyp I-IV) ausgewiesen. Die verwendete Methodik ist in der Infobox „Mustererkennung“ dargelegt. Diese statistische Klassifizierung wurde mit den geologischen Großeinheiten und der Verteilung meteorologischer Variablen in Österreichs abgeglichen, um Aussagen zur Quellschüttungsdynamik der Quellgruppen abzuleiten. Darüber hinaus erfolgte ein Vergleich mit der bestehenden Klassifikation von Quellen als Karstquelle, verdeckte Karstquelle, Kluftquelle, Hangschuttquelle oder Porengrundwasserquelle nach BMLFUW (2005).

Infobox: Mustererkennung

Das Erkennen übergeordneter Muster durch statistische Analyse der Zeitreihen des Hydrographischen Dienstes erfolgte in zwei Schritten: Zunächst wurden zwei Reihen von Clustern anhand der Schüttungsdynamik der Quellen gebildet (Pardé-Koeffizienten und Autokorrelationsfunktion, Kapitel 2.3). Anschließend wurden gehäuft auftretende Kombinationen aus Clustern dieser beiden Reihen analysiert.

Die Clusteranalyse vergleicht alle 96 Quellen anhand der Quellschüttung untereinander und bildet daraus möglichst homogene Cluster. Für die Clusterbildung wurde die k-means Methode verwendet (MacQueens, 1967). Für alle möglichen Kombinationen von Quellen wurde die Varianz innerhalb der Cluster mit der Varianz zwischen den einzelnen Clustern verglichen – je niedriger dieses Verhältnis, desto schärfer sind die einzelnen Cluster gegeneinander abgegrenzt. Für die Clusteranalyse der Saisonalität wurden dabei jeweils die 12 Pardé-Koeffizienten aller Quellen untereinander verglichen (Pardé-Cluster, PC),

für die Clusteranalyse der Autokorrelation die 365 Korrelationskoeffizienten der Autokorrelationsfunktion jeder Quelle (Autokorrelations-Cluster, AC).

Die Anzahl der Cluster wurde anhand der Ellbogen-Methode bestimmt. Dabei wurde die Clusteranalyse für 1, 2, 3, ..., 96 Cluster durchgeführt und stets das Verhältnis der Varianz innerhalb bzw. zwischen den Clustern verglichen. Ab einer gewissen Anzahl an Clustern nimmt dieses Verhältnis durch Hinzufügen weiterer Cluster nur noch geringfügig ab – diese Anzahl zeichnet sich durch einen „Ellbogen“ im Graphen aus und entspricht der optimalen Anzahl an Clustern für die Clusteranalyse.

Die beiden Reihen von Clustern (PC- und AC-Cluster) wurden anschließend in einer Kontingenztafel gegenübergestellt und statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen beiden Reihen mittels χ^2 Tests bewertet (Helsel et al., 2020). Für jede Schnittmenge von Clustern wurde zunächst die Erwartungshäufigkeit bestimmt (die Häufigkeit bei statistischer Unabhängigkeit der beiden Reihen voneinander). Deutliche Abweichungen von dieser Erwartungshäufigkeit deuten auf strukturierte Zusammenhänge zwischen beiden Reihen hin. Überdurchschnittlich häufig auftretende Kombinationen von Clustern wurden anschließend zu Gruppen (Quellentyp I-IV) zusammengefasst und bilden eine quantitative Grundlage für eine statistisch basierte Quellklassifikation. Die Ergebnisse dieser Analyse wurden anschließend mit traditionellen Klassifikationsverfahren verglichen und hinsichtlich regionaler Muster (meteorologische Kenngrößen, Geologie, Topographie usw.) untersucht, um Rückschlüsse auf die maßgebenden Einflussfaktoren ziehen zu können.

3 Ergebnisse und Interpretation

3.1 Trendanalyse

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse der Trendanalyse für Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit der Quellwässer zusammen. Zunächst wurden die zeitlichen Veränderungen für jede Quelle unabhängig von der jeweiligen Zeitreihenlänge berechnet, die zugehörigen Ergebnisse für jede Quelle können den Stammdatenblättern entnommen werden. Um Änderungen an unterschiedlichen Quellen untereinander vergleichen zu können, wurde die Trendanalyse außerdem für einen definierten, einheitlichen Zeitraum durchgeführt. Dieser Referenzzeitraum umfasst 20 Jahre, von 1.1.2001-31.12.2020. Aufgrund der Datenlage konnten bei 44 Quellen die langfristige Entwicklung der Quellschüttung, bei 30 Quellen die der Wassertemperatur sowie bei 35 jene der elektrischen Leitfähigkeit bewertet werden. Das folgende Kapitel legt die Ergebnisse der regionalen Trendanalyse in diesem Referenzzeitraum dar. Einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse gibt Tabelle 1.

3.1.1 Quellschüttung

Von den 96 Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes weisen 44 Quellen (46 %) in diesem Zeitraum eine weitgehend durchgehende (Lückenzeitraum < 20 %) kontinuierliche Quellschüttungs-Zeitreihe auf. Wird der Analyse ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ zugrunde gelegt (p -Wert < 0,05), so zeigen 8 Quellen (18 % der Trendanalysen) einen positiven Trend, 2 Quellen (5 %) dagegen einen negativen Trend (Abbildung 9a). Für die verbleibenden 34 Quellen (77 %) ist zu diesem Signifikanzniveau kein eindeutiger Trend nachweisbar.

Einen detaillierten Einblick in die langfristige Entwicklung der Quellschüttung geben Abbildung 9b (negative Tendenz) und Abbildung 9c (positive Tendenz). Die langfristige Entwicklung ist für verschieden strikte Signifikanzniveaus (p -Werte) dargestellt. Insgesamt zeigen 11 Quellen (25 % der Trendanalysen) eine tendenziell abnehmende Quellschüttung, 33 Quellen (75 %) dagegen eine tendenziell zunehmende Quellschüttung. Dieses Ergebnis muss vorsichtig betrachtet werden, da in vielen Fällen die Entwicklung statistisch nicht eindeutig belegbar ist (geringe Signifikanz, siehe Tabelle 1).

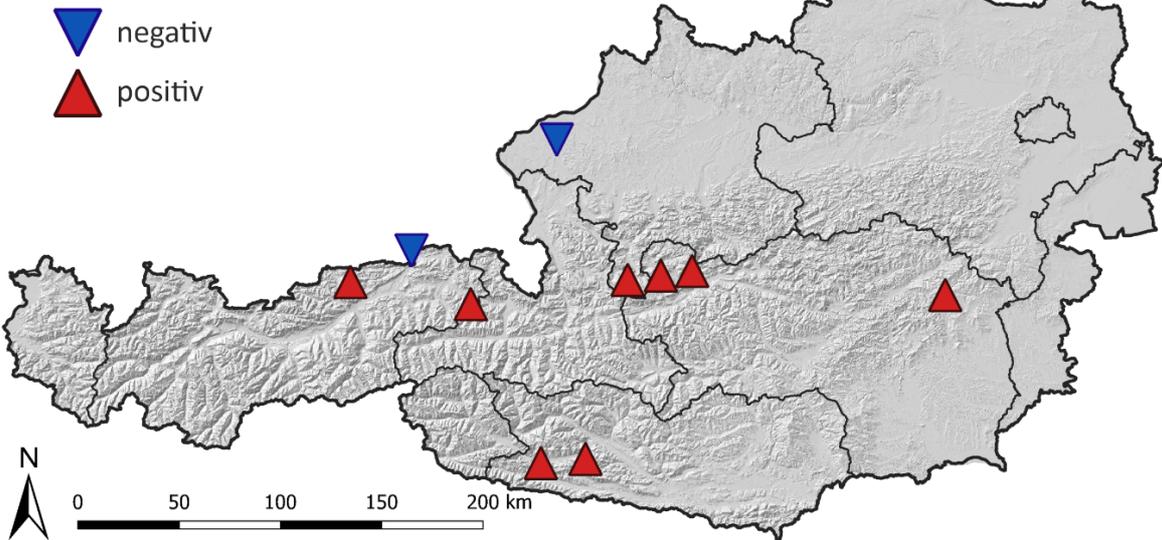
Tabelle 1: Trendanalyse aller Messstellen, für die im Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020 eine weitgehend durchgehende kontinuierliche Datenreihe vorliegt (Lückenzeitraum < 20 %). Für die Parameter Quellschüttung (Q) [(l/s) pro Jahr], Wassertemperatur (WT) [°C pro Jahr] und elektrische Leitfähigkeit (LF) [µS/cm pro Jahr] werden jeweils die Signifikanz des Trends (p-Wert) sowie die Rate der Änderung (Theil-Sen Schätzwert, TSS) angegeben.

| Quelle | HZB-Nr. | Q (p-Wert) | Q (TSS) | WT (p-Wert) | WT (TSS) | LF (p-Wert) | LF (TSS) |
|--------------------------------|---------|------------|---------|-------------|----------|-------------|----------|
| Auebachquelle | 395467 | 0.967 | 0.002 | 8.1E-06 | 0.033 | 4.0E-01 | -0.413 |
| Blaue Quelle | 395434 | 0.047 | -4.538 | | | 5.0E-03 | 0.785 |
| Brunnaderquelle | 395913 | 0.003 | 0.938 | 6.7E-02 | -0.016 | 5.9E-02 | -1.357 |
| Brunntal | 395137 | 0.796 | -0.689 | | | | |
| Daurainquelle | 395681 | 0.269 | 0.530 | | | | |
| Fellbachquelle | 395707 | 0.010 | 3.417 | 4.7E-04 | 0.010 | | |
| Fidelisquelle | 395756 | 0.742 | -0.213 | | | 6.4E-05 | 0.975 |
| Fischa-Dagnitz Quelle | 396135 | 0.756 | 0.673 | 4.4E-04 | 0.029 | | |
| Florianer Brunnbach | 395129 | 0.011 | -7.086 | | | | |
| Friedlbrunn Quelle | 395228 | 0.163 | 0.486 | 8.3E-07 | 0.054 | 1.9E-03 | 3.340 |
| Gerstenbödenquelle | 395731 | 0.051 | -0.447 | 1.5E-07 | 0.035 | 1.4E-07 | 1.389 |
| Geyerquelle | 395095 | 0.055 | -0.218 | 3.8E-05 | 0.030 | 1.4E-02 | -0.080 |
| Goldbachquelle | 395749 | | | | | 2.1E-01 | -0.099 |
| Gollinger Wasserfall | 395210 | 0.797 | 0.863 | 6.6E-04 | 0.012 | 5.0E-02 | 0.387 |
| Große Mühlquelle | 395574 | 0.809 | -0.653 | | | | |
| Hammerbachquelle | 395855 | 0.849 | 0.286 | 1.4E-02 | 0.019 | 4.9E-01 | -0.126 |
| Hirschbrunn-Seeaustritt | 395053 | | | 2.7E-03 | 0.010 | 5.3E-01 | 0.111 |
| Katzensteigquelle | 395418 | 0.063 | 0.726 | | | 7.5E-04 | 0.692 |
| Langwies/Miesbach | 395145 | 0.520 | 1.223 | | | | |
| Lappenbachquelle | 395715 | 0.030 | 0.416 | 6.1E-04 | 0.010 | | |
| Lehnbachquellen | 395400 | 0.254 | 0.364 | | | | |
| Marbachquelle | 395244 | 0.142 | 2.767 | 3.0E-05 | 0.017 | 1.7E-05 | 0.509 |
| Ochsenbrunnquelle | 395491 | 0.096 | 0.611 | | | 3.0E-08 | 1.493 |

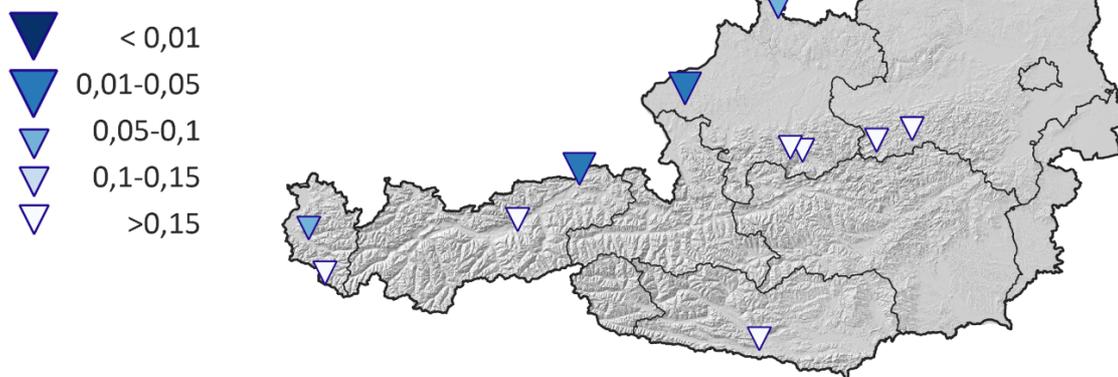
| Quelle | HZB-Nr. | Q (p-Wert) | Q (TSS) | WT (p-Wert) | WT (TSS) | LF (p-Wert) | LF (TSS) |
|----------------------------|---------|------------|---------|-------------|----------|-------------|----------|
| Ödensee-Kaltwassertrichter | 395905 | 0.002 | 0.300 | 9.9E-05 | 0.012 | 8.8E-02 | 0.260 |
| Pfannbauernquelle | 396127 | 0.287 | 0.685 | 4.2E-02 | 0.001 | 2.9E-01 | 0.109 |
| Pießling Ursprung | 395103 | 0.230 | 12.308 | | | | |
| Preunegger Siebenquellen | 395897 | 0.778 | 0.051 | 2.7E-04 | 0.029 | 8.0E-03 | -0.421 |
| Pulverermühlquelle | 395442 | 0.031 | 0.823 | 7.9E-06 | 0.018 | 1.8E-05 | 0.754 |
| Reihbachquelle | 395848 | 0.245 | 0.090 | 3.0E-04 | 0.006 | 7.2E-05 | 0.888 |
| Reithbachquelle | 395590 | 0.970 | -0.130 | 4.4E-03 | 0.008 | | |
| Rettenbachquelle | 395111 | 0.364 | 3.584 | 1.4E-02 | -0.007 | 9.6E-01 | -0.008 |
| Sagtümpel | 395863 | 0.042 | 1.743 | | | 7.3E-01 | 0.058 |
| Schreiende Brunnen | 395343 | 0.039 | 0.309 | 1.9E-04 | 0.016 | 7.2E-01 | 0.094 |
| Schwabeltalquelle | 395939 | 0.159 | 0.460 | 8.3E-05 | 0.004 | 7.7E-01 | -0.018 |
| Schwarzbach - Moosquelle | 395368 | 0.175 | 0.411 | 1.6E-08 | 0.023 | 8.1E-06 | 0.587 |
| Schwarzbodenquelle | 395426 | 0.057 | 0.498 | 2.1E-03 | 0.010 | 2.0E-04 | -0.500 |
| Schwarzlackenquelle | 395327 | 0.091 | 1.660 | | | 1.0E-02 | 0.590 |
| Siebenquellen | 396093 | 0.404 | 0.939 | | | 2.7E-05 | -3.075 |
| Steinbachquelle | 395608 | 0.204 | 4.292 | 1.8E-05 | 0.013 | 1.0E-01 | 0.475 |
| Steyernquelle | 395079 | 0.610 | 0.839 | 4.2E-02 | 0.007 | 3.7E-02 | -0.861 |
| Stubbachquelle | 395350 | 0.995 | -0.021 | | | 3.6E-03 | 0.421 |
| Teufelskirche | 395012 | 0.229 | -4.653 | 3.0E-01 | -0.003 | 7.4E-01 | -0.079 |
| Union Quelle | 395673 | 0.188 | -1.012 | 7.5E-01 | -0.001 | 7.5E-03 | 1.174 |
| Waldbachursprung | 395038 | 0.020 | 10.979 | 3.4E-04 | -0.009 | 3.9E-02 | -0.272 |
| Wasseralmquelle | 396077 | 0.218 | 1.000 | 1.1E-02 | 0.003 | 1.9E-04 | 1.603 |
| Wassermansloch | 395871 | 0.180 | 1.488 | 3.2E-02 | 0.004 | 2.8E-01 | -0.135 |

Abbildung 9: Quellschüttungstrends im Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020 für 44 Quellen. (a) Ausschließlich signifikante Quellschüttungstrends (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$). (b) Langfristig abnehmende Quellschüttung in diesem Zeitraum. (c) Langfristig zunehmende Quellschüttung in diesem Zeitraum und zugehörige; p-Werte = Signifikanzwerte.

(a) Signifikanzniveau p-Wert < 0,05



(b) negative Trends p-Werte



(c) positive Trends p-Werte

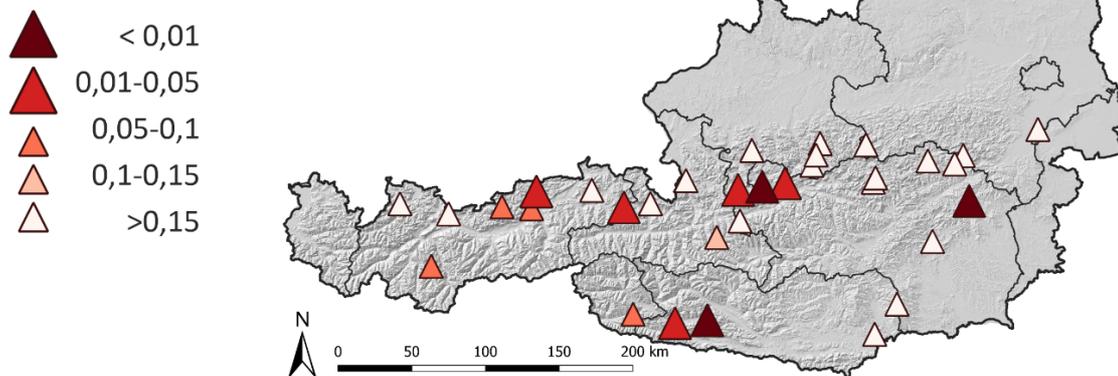
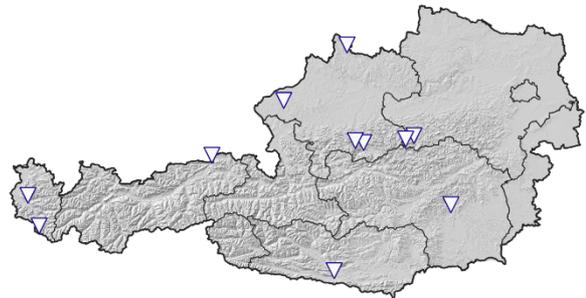
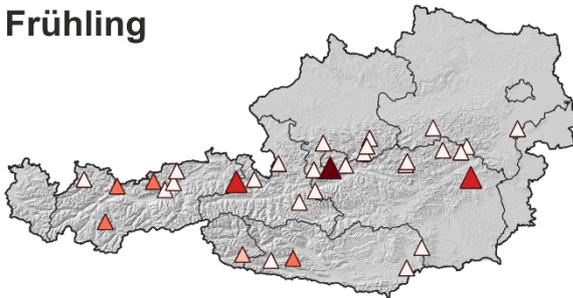
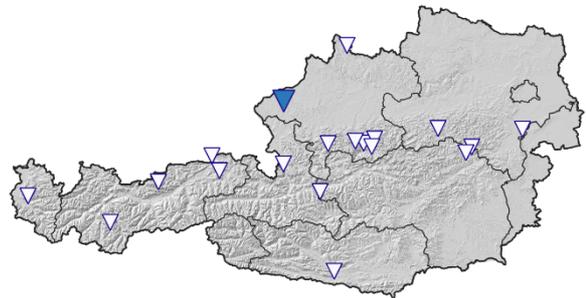
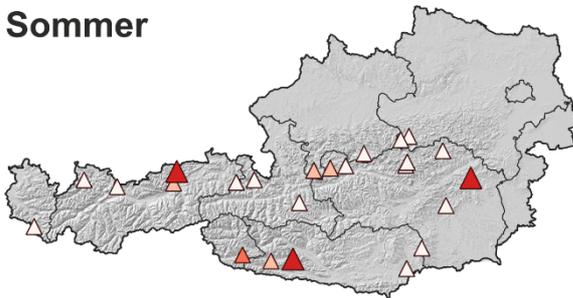


Abbildung 10: Quellschüttungstrends für den Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020, separat berechnet für die vier Jahreszeiten Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August), Herbst (September, Oktober, November) und Winter (Dezember, Januar, Februar); p- Werte = Signifikanzwerte.

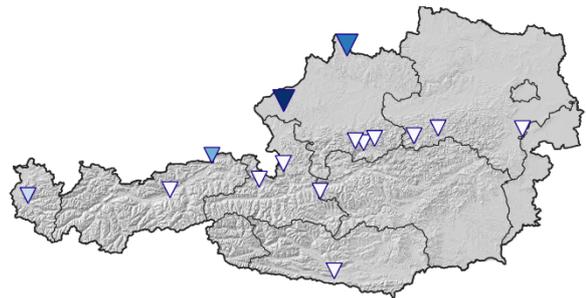
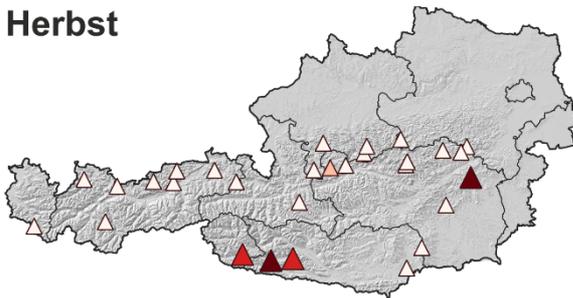
Frühling



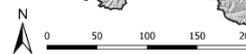
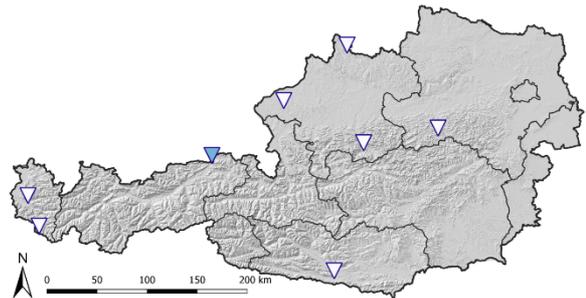
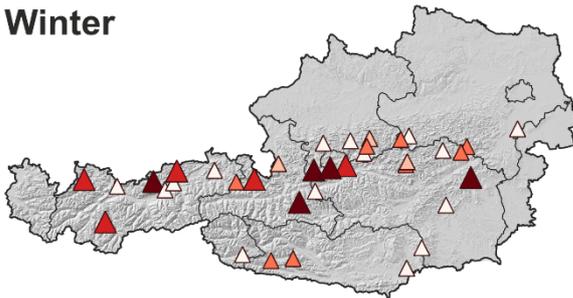
Sommer



Herbst



Winter



positive Trends (p-Werte)

- ▲ < 0,01
- ▲ 0,01-0,05
- ▲ 0,05-0,1
- ▲ 0,1-0,15
- ▲ > 0,15

negative Trends (p-Werte)

- ▼ < 0,01
- ▼ 0,01-0,05
- ▼ 0,05-0,1
- ▼ 0,1-0,15
- ▼ > 0,15

Abbildung 10 veranschaulicht die Ergebnisse der Trendanalysen für jede Jahreszeit, mit deutlich unterschiedlichen Ergebnissen: Im Frühjahr wird tendenziell eine Zunahme der Quellschüttung beobachtet. 32 Quellen zeigen langfristig eine positive Tendenz der Quellschüttung, wenn auch überwiegend gering signifikant. Dagegen zeigen lediglich 12 Quellen eine Entwicklung in Richtung abnehmender Quellschüttung. Auch im Winter nimmt die Quellschüttung insgesamt zu, hier zeigen 36 Quellen einen positiven Trend, der insgesamt auch statistisch besser belegt ist (10 Quellen zeigen einen p-Wert $< 0,05$). Die Quellen mit signifikanter Änderung (p-Werte $\leq 0,05$) liegen häufig in den Nördlichen Kalkalpen. An 8 Quellen wird dagegen eine Abnahme der winterlichen Quellschüttung beobachtet, auf niedrigem Signifikanzniveau. Im Sommer und Herbst halten sich zu- und abnehmende Tendenzen der Quellschüttungen in etwa die Waage, wobei diese Entwicklung kaum signifikant ist. Eine Ausnahme zeigt sich im Westen der Südlichen Kalkalpen: Hier nimmt die Quellschüttung deutlich zu (p-Werte $\leq 0,05$).

Die Rate der Änderung wird in Tabelle 1 für jede Quelle in l/s pro Jahr dargelegt. Bei Quellen mit tendenzieller Schüttungszunahme ändert sich der jährliche Abfluss im Schnitt um 0,61 % pro Jahr, wobei die Zunahme im Einzelnen zwischen 0,005 und 1,94 % schwankt (Tabelle 1). An den Quellen mit tendenzieller Abnahme ändert sich der jährliche Abfluss um -0,5 %, wobei auch hier zwischen den Quellen beträchtliche Unterschiede bestehen (-1,45 bis -0,02 %, Tabelle 1).

3.1.2 Wassertemperatur

Hinsichtlich der Wassertemperatur weisen 30 Quellen (31 %) im Referenzzeitraum eine weitgehend durchgehende kontinuierliche Zeitreihe auf. Auf Basis eines Signifikanzniveaus $\alpha = 0,05$ zeigen 25 Quellen (83 % der Trendanalysen) eine zunehmende Wassertemperatur, lediglich bei 2 Quellen (7 %) wird eine signifikante Abkühlung des Quellwassers beobachtet (Abbildung 11). Für die verbleibenden 3 Quellen (10 %) ist kein signifikanter Trend (Signifikanzniveau $\alpha > 0,05$) nachweisbar.

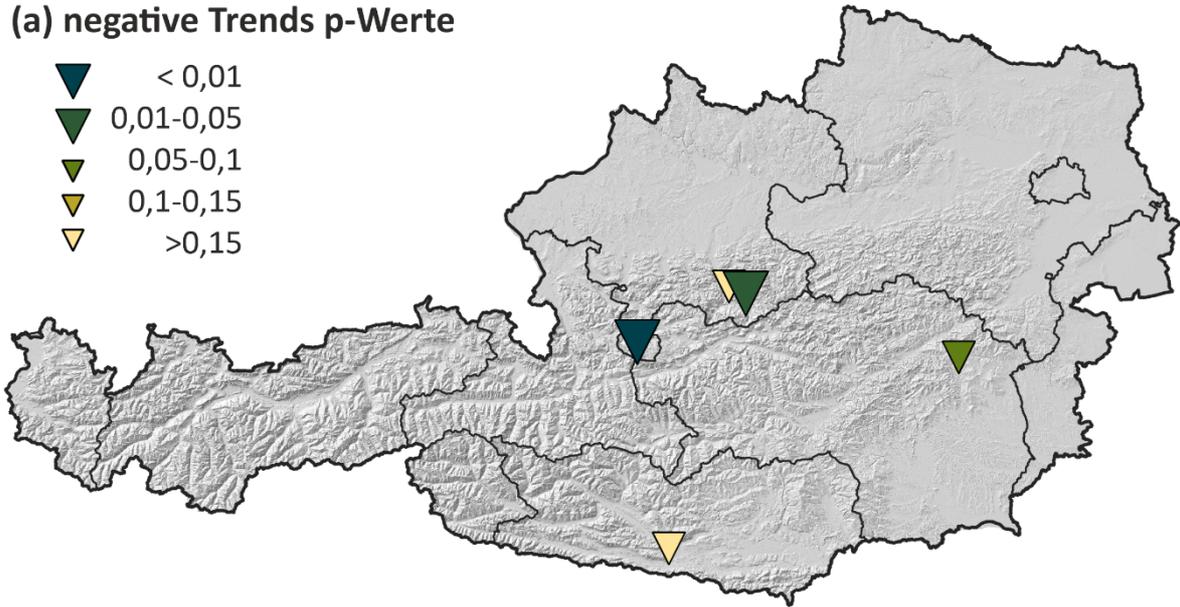
Die saisonale Entwicklung der Wassertemperatur wird in Abbildung 12 nach Jahreszeiten differenziert dargestellt. Saisonale Unterschiede sind kaum zu erkennen. Im Winter, Frühjahr und Sommer zeigen 19 Quellen (63 %) eine Erwärmung zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$. Im Herbst zeigen 21 Quellen (70 %) einen signifikanten Anstieg in der Wassertemperatur. Im Frühjahr und Winter zeigen 2 Quellen (7 %) eine signifikante Temperaturabnahme. Im Sommer und Herbst wird eine Abkühlung zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ nur an einer

Quelle (3 %) bestätigt. Wird das Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$ betrachtet, so fällt der Wasser-
 temperaturanstieg im Sommer am geringsten aus (15 Quellen), gefolgt von Frühling und
 Herbst (jeweils 18 Quellen). Im Winter zeigen zu diesem Signifikanzniveau 18 Quellen einen
 eindeutigen Anstieg der Wassertemperatur.

Abbildung 11: Wassertemperaturtrends im Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020 für 30 Quellen.
 (a) Langfristig abnehmende Wassertemperatur in diesem Zeitraum. (b) Langfristig
 zunehmende Wassertemperatur in diesem Zeitraum; p-Werte = Signifikanzwerte.

(a) negative Trends p-Werte

-  < 0,01
-  0,01-0,05
-  0,05-0,1
-  0,1-0,15
-  > 0,15



(b) positive Trends p-Werte

-  < 0,01
-  0,01-0,05
-  0,05-0,1
-  0,1-0,15
-  > 0,15

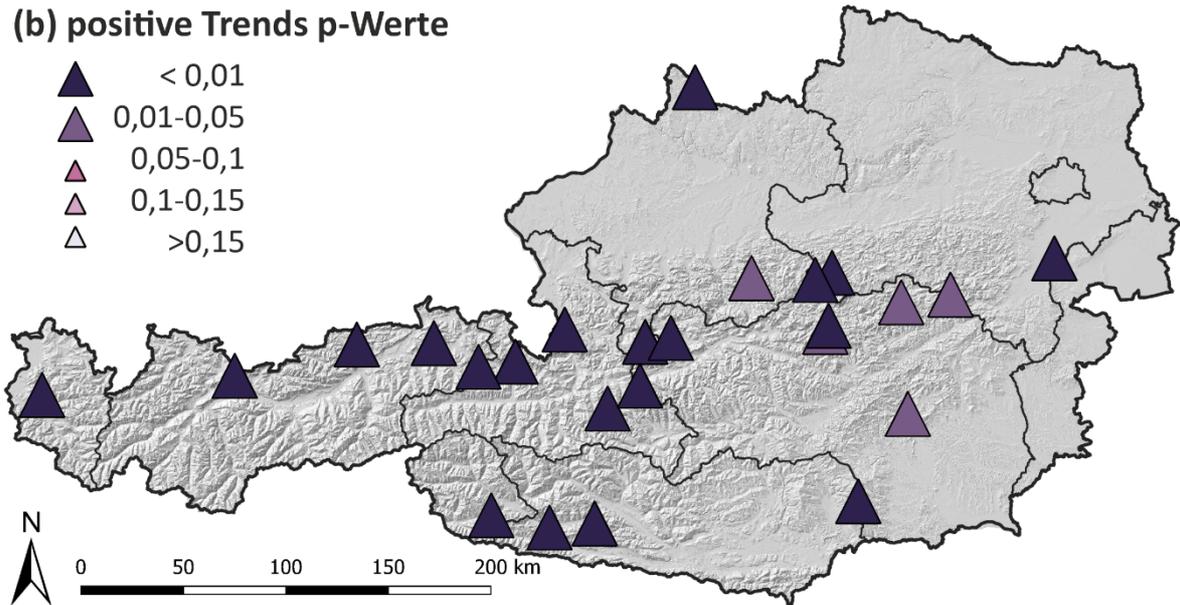
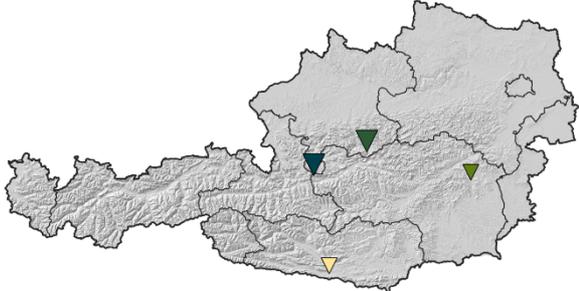
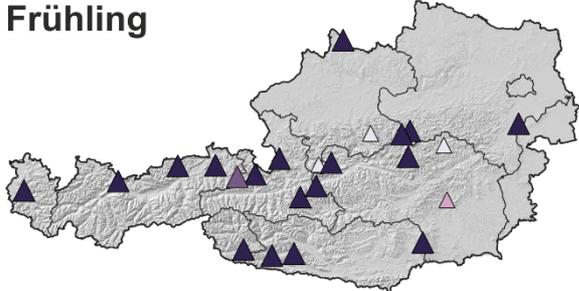
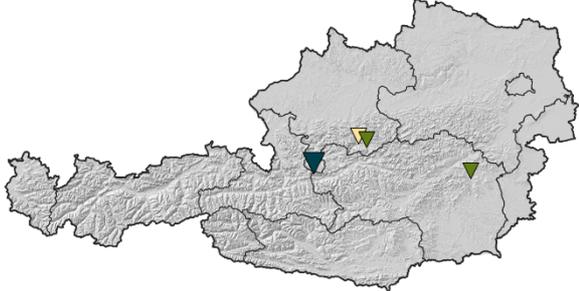
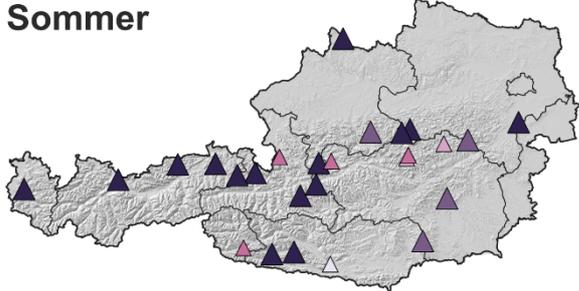


Abbildung 12: Wassertemperaturtrends für den Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020, separat berechnet für die vier Saisonen Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August), Herbst (September, Oktober, November) und Winter (Dezember, Januar, Februar); p- Werte = Signifikanzwerte.

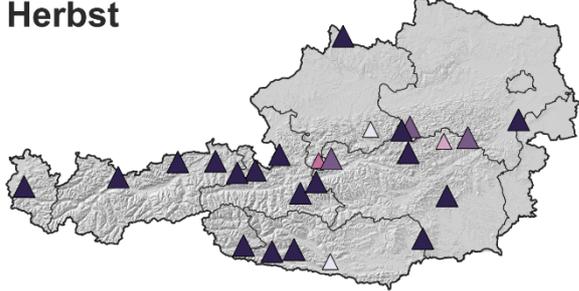
Frühling



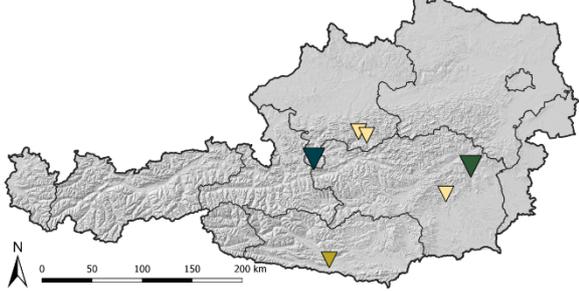
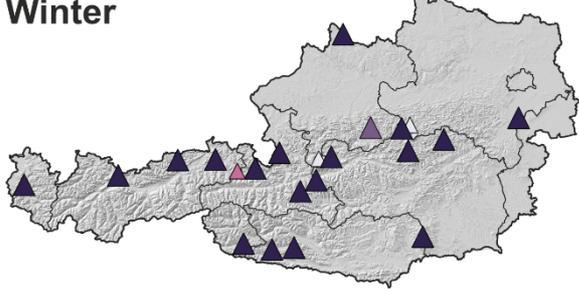
Sommer



Herbst



Winter



positive Trends (p-Werte)

- ▲ < 0,01
- ▲ 0,01-0,05
- ▲ 0,05-0,1
- ▲ 0,1-0,15
- △ > 0,15

negative Trends (p-Werte)

- ▼ < 0,01
- ▼ 0,01-0,05
- ▼ 0,05-0,1
- ▼ 0,1-0,15
- ▼ > 0,15

Tabelle 1 fasst die Erwärmungs- bzw. Abkühlungsrate für jede Quelle zusammen. Im Schnitt nimmt die Quellwassertemperatur um $0,016\text{ °C/Jahr}$ zu. An einzelnen Quellen erreicht die Erwärmung Raten von bis zu $0,05\text{ °C/Jahr}$ (Tabelle 1). Die wenigen Quellen mit tendenziell abkühlender Wassertemperatur zeigen eine langsame Entwicklung, vier von fünf 5 Quellen weisen Abkühlungsraten $< 0,01\text{ °C/Jahr}$ auf.

3.1.3 Elektrische Leitfähigkeit

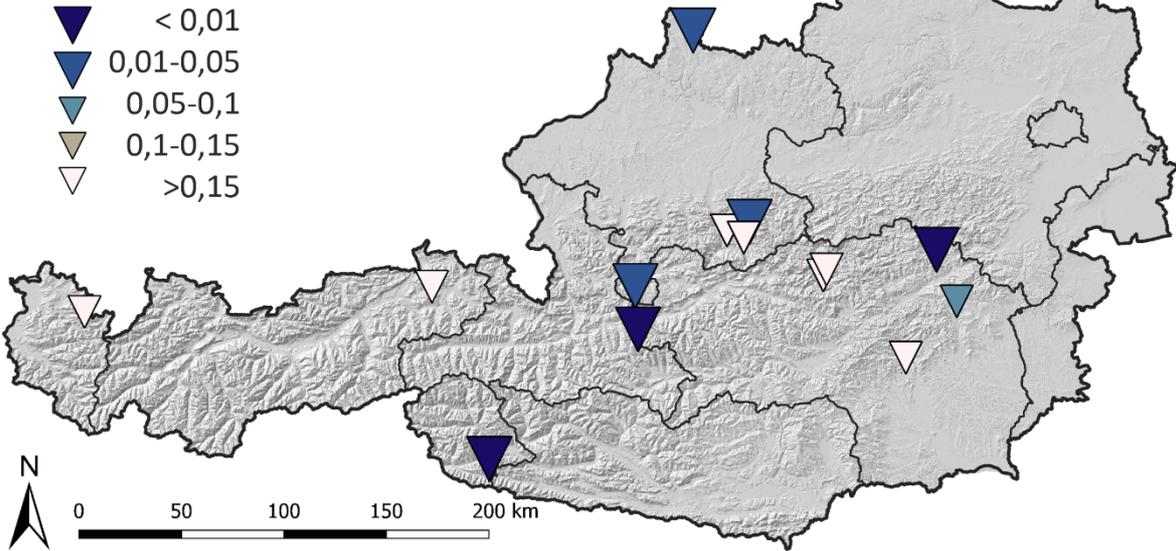
Für die elektrische Leitfähigkeit des Quellwassers liegt an 35 Messstellen (36 %) eine weitgehend durchgehende kontinuierliche Datenreihe im Referenzzeitraum vor. Zum Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ zeigen 14 Quellen (40 % der Trendanalysen) einen positiven Trend, überwiegend im Westen Österreichs (Abbildung 13). Dagegen weisen 6 Quellen (17 %) einen negativen Trend auf – diese sind auf die östliche Landeshälfte beschränkt. Für 15 Quellen (43 %) ist kein eindeutiger Trend nachweisbar.

Abbildung 14 zeigt die Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit nach Jahreszeiten getrennt. Die saisonalen Unterschiede sind ähnlich zur Wassertemperatur nicht stark ausgeprägt. Ein Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit zu einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ ist im Sommer und Winter bei 13 Quellen (37 %) sowie im Herbst und Frühjahr bei 12 Quellen (34 %) erkennbar. Signifikant abnehmende Leitfähigkeit ist hingegen bei 3 Quellen (9 %) im Sommer, 5 Quellen (14%) im Herbst, 8 Quellen (23 %) im Winter und 4 Quellen (11 %) im Frühjahr erkennbar.

Die Rate der Änderung wird in Tabelle 1 für jede Quelle ausgewiesen. Bei Quellen mit tendenziell steigender Leitfähigkeit beträgt sie im Schnitt um $0,8\text{ }\mu\text{S/cm}$ pro Jahr, wobei die Zunahme im Einzelnen zwischen $0,06$ und $3,3\text{ }\mu\text{S/cm}$ pro Jahr schwankt (Tabelle 1). An den Quellen mit tendenzieller Abnahme ändert sie sich im Mittel um $-0,53\text{ }\mu\text{S/cm}$ pro Jahr, wobei auch hier zwischen den Quellen beträchtliche Unterschiede bestehen ($-0,008$ bis $-3,1\text{ }\mu\text{S/cm}$ pro Jahr, Tabelle 1). Tendenzuell zeigen Quellen mit einem Anstieg in der elektrischen Leitfähigkeit im Winter die signifikanteste Änderung (Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$).

Abbildung 13: Trends der elektrischen Leitfähigkeit des Quellwassers im Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020 für 35 Quellen. (a) Langfristig abnehmende elektrische Leitfähigkeit in diesem Zeitraum. (b) Langfristig zunehmende elektrische Leitfähigkeit in diesem Zeitraum; p-Werte = Signifikanzwerte.

(a) negative Trends p-Werte



(b) positive Trends p-Werte

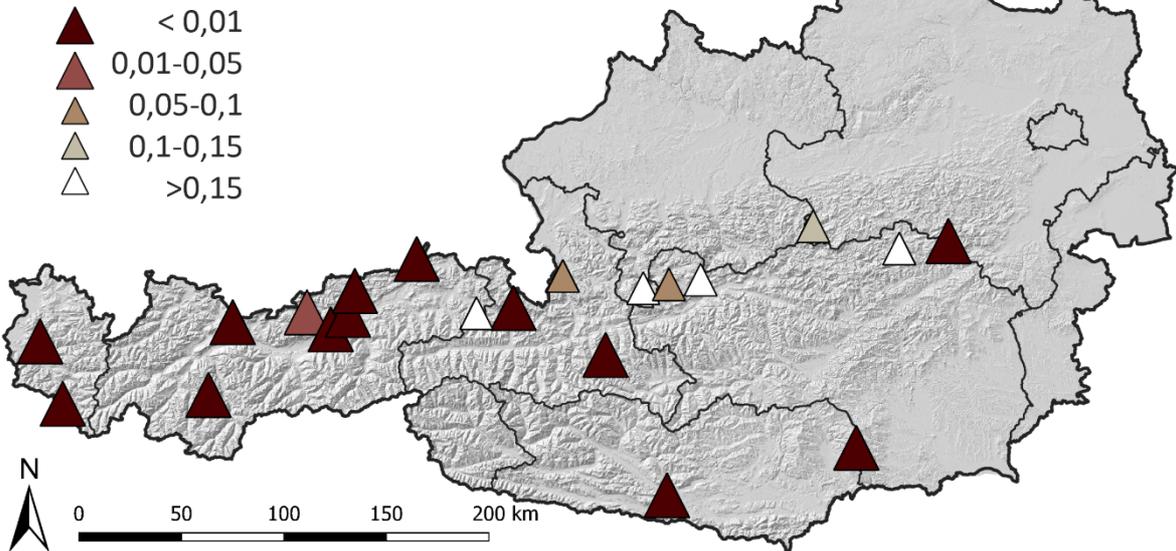
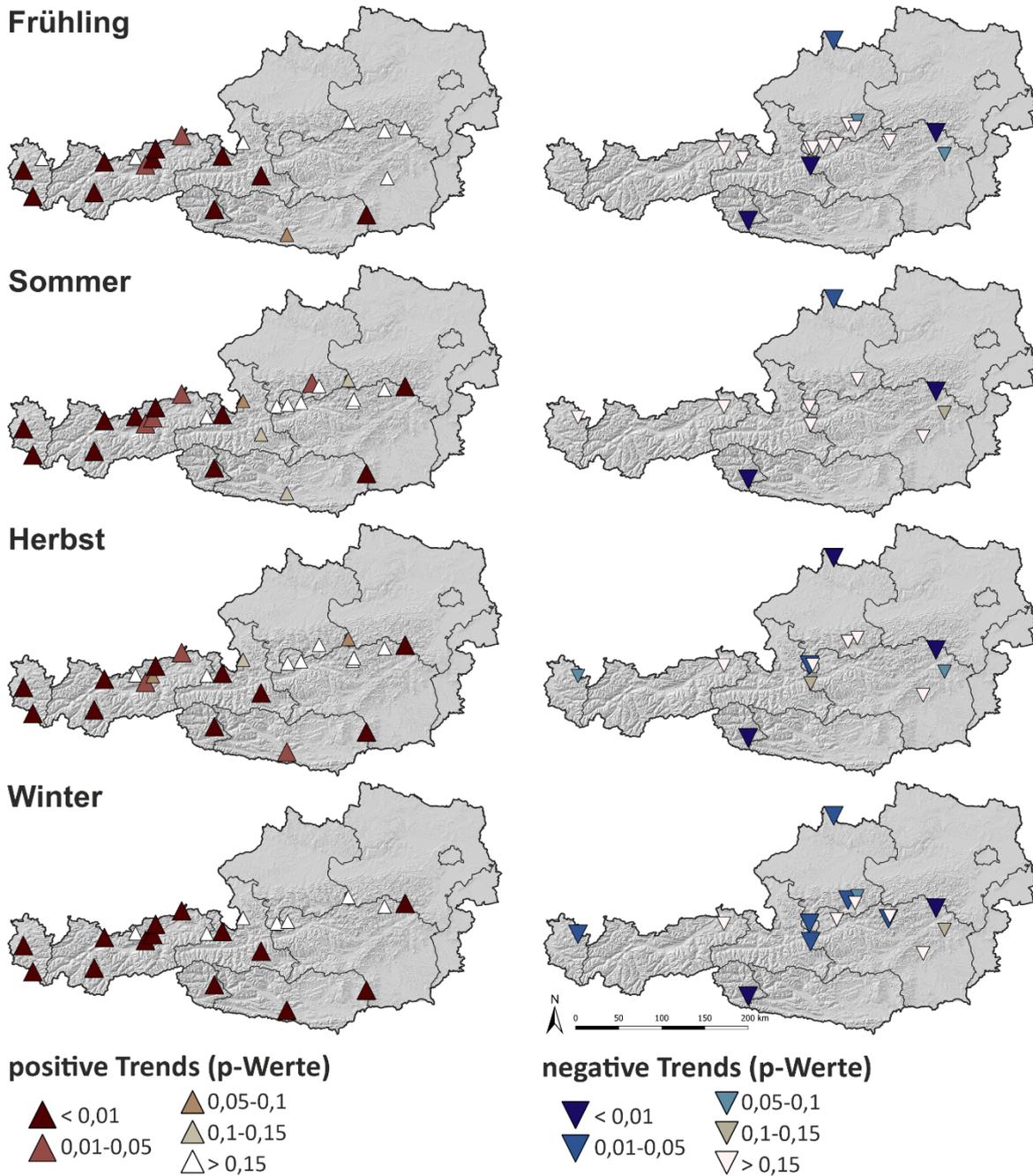


Abbildung 14: Trends der elektrischen Leitfähigkeit für den Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020, separat berechnet für die vier Saisonen Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August), Herbst (September, Oktober, November) und Winter (Dezember, Januar, Februar); p-Werte = Signifikanzwerte.



3.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Länge der Datenreihe ist für die Trendberechnung von großer Bedeutung. Um langfristige Entwicklungen an Quellparametern mit klimatischen Veränderungen in Zusammenhang setzen zu können, werden möglichst lange, weitgehend lückenlose Datenreihen benötigt. Dies gilt insbesondere für jene Parameter, die einen großen Wertebereich (z.B. Quellschüttung) besitzen, um signifikante Änderungen feststellen zu können. Grundsätzlich gilt, je höher die Variabilität der untersuchten Parameter ist, desto länger sollten die Zeitreihen sein (Helsel et al., 2020). Das spiegelt sich in den unterschiedlichen Signifikanzwerten bei den Parametern Quellschüttung, Wassertemperatur und Leitfähigkeit wider: Während Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit (geringe Variabilität) langfristige Änderungen Signifikanzniveaus von $\alpha \leq 0,05$ im Beobachtungszeitraum zeigen, sind die langfristigen Änderungen in der Quellschüttung (hohe bis sehr hohe Variabilität) großteils deutlich geringer signifikant. Die langfristigen Quelldatensätze des Messstellennetzes des Hydrographischen Dienstes, das bereits seit Jahrzehnten besteht, sind daher von großer Bedeutung. Das gilt vor allem für die zahlreichen Quellen in alpinen Regionen, die einen hohen Betreuungsaufwand benötigen, aber besonders wertvolle Daten zur Entwicklung der natürlichen Wasserressourcen aufzeichnen.

Aus den Ergebnissen der Trendanalyse des Zeitbereichs 1.1.2001 – 31.12.2020 lassen sich generelle Aussagen treffen.

- Die Mehrheit der Quelle zeigt einen positiven Trend bei der Quellschüttung, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Signifikanz meistens gering ist.
- Der Großteil der Quellen zeigt einen eindeutigen Anstieg um durchschnittlich $0,016 \text{ °C/Jahr}$ der Wassertemperatur (jeweils bezogen auf ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$). Nur an zwei Quellen nimmt die Wassertemperatur signifikant ab, an drei weiteren Quellen ist kein signifikanter Trend nachweisbar.
- Der Großteil der Quellen mit Schwerpunkt im Westen zeigt einen signifikanten positiven Trend der elektrischen Leitfähigkeit, wobei viele dieser Quellen auch einen positiven Trend der Wassertemperatur aufweisen.
- Saisonale Unterschiede werden besonders deutlich in der Quellschüttung, treten aber untergeordnet auch in der Wassertemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit auf. Dabei tritt die signifikantesten Änderungen tendenziell im Winter auf. Bei Quellen mit einem Anstieg in elektrischer Leitfähigkeit und Temperatur wird häufig das Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$ während des Winters erreicht.

Der deutliche Anstieg der Signifikanz in der Winterperiode kann im Zusammenhang mit der Quellschüttungsdynamik gesehen werden. Der Winter ist in den meist alpinen Einzugsgebieten der österreichischen Quellen von einer aufbauenden Schneedecke geprägt. An der Quelle dominiert in dieser Zeit der Basisabfluss. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Gesamtschüttung sowie den geringen Schüttungsschwankungen des Basisabflusses, werden Änderungen in dieser Periode am ehesten signifikant. Während Zeiten intensiver Grundwasserneubildungen werden langfristige Änderungen dagegen durch die großen Wassermengen im Aquifer überlagert und weisen daher eine geringe Signifikanz auf.

Auf die Quellschüttungsdynamik einzelner Quellen, sowie ihre regionalen Charakteristika, wird im folgenden Kapitel eingegangen.

3.2 Quellschüttungsdynamik

3.2.1 Quellcharakterisierung

Um das breite Spektrum an Quellen und ihrer Schüttungsdynamik abzubilden, werden die Ergebnisse anhand der Quellen Teufelskirche (HZB-Nr. 395012, Oberösterreich), Fidelisquelle (HZB-Nr. 395756, Vorarlberg), Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848, Steiermark) und Eselsquelle (HZB-Nr. 395632, Niederösterreich) exemplarisch erläutert (Abbildung 15). Die vier Quellen unterscheiden sich hinsichtlich ihres Quelltyps und ihrer Quellschüttungsdynamik (Abbildung 16), sowie ihrer Einzugsgebiete (Seehöhe, Fläche, geologischer Aufbau). Sie werden beispielhaft für die im vorliegenden Projekt durchgeführte statistische Analyse aller 96 vom Hydrographischen Dienst beobachteten Quellen diskutiert. Die vollumfängliche Auswertung ist in den Stammdatenblättern für jede Quelle im Anhang zusammengefasst.

Abbildung 15: Lage der exemplarisch vorgestellten Quellen Teufelskirche, Fidelisquelle, Reihbachquelle und Eselsquelle (rot hervorgehoben) im Vergleich zur Lage aller 96 analysierten Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes.

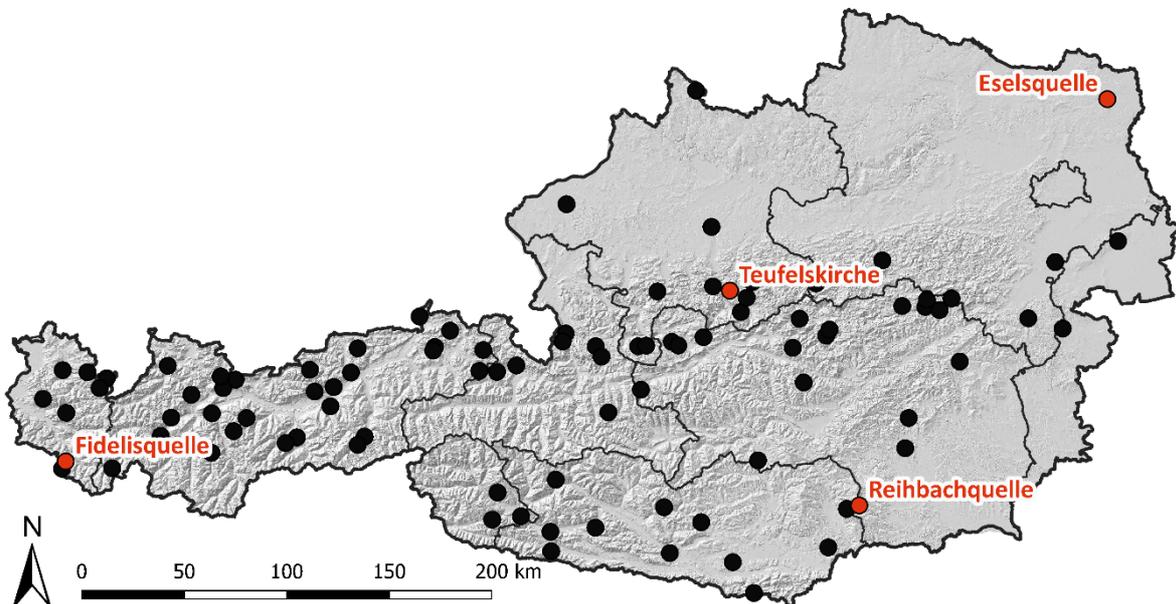
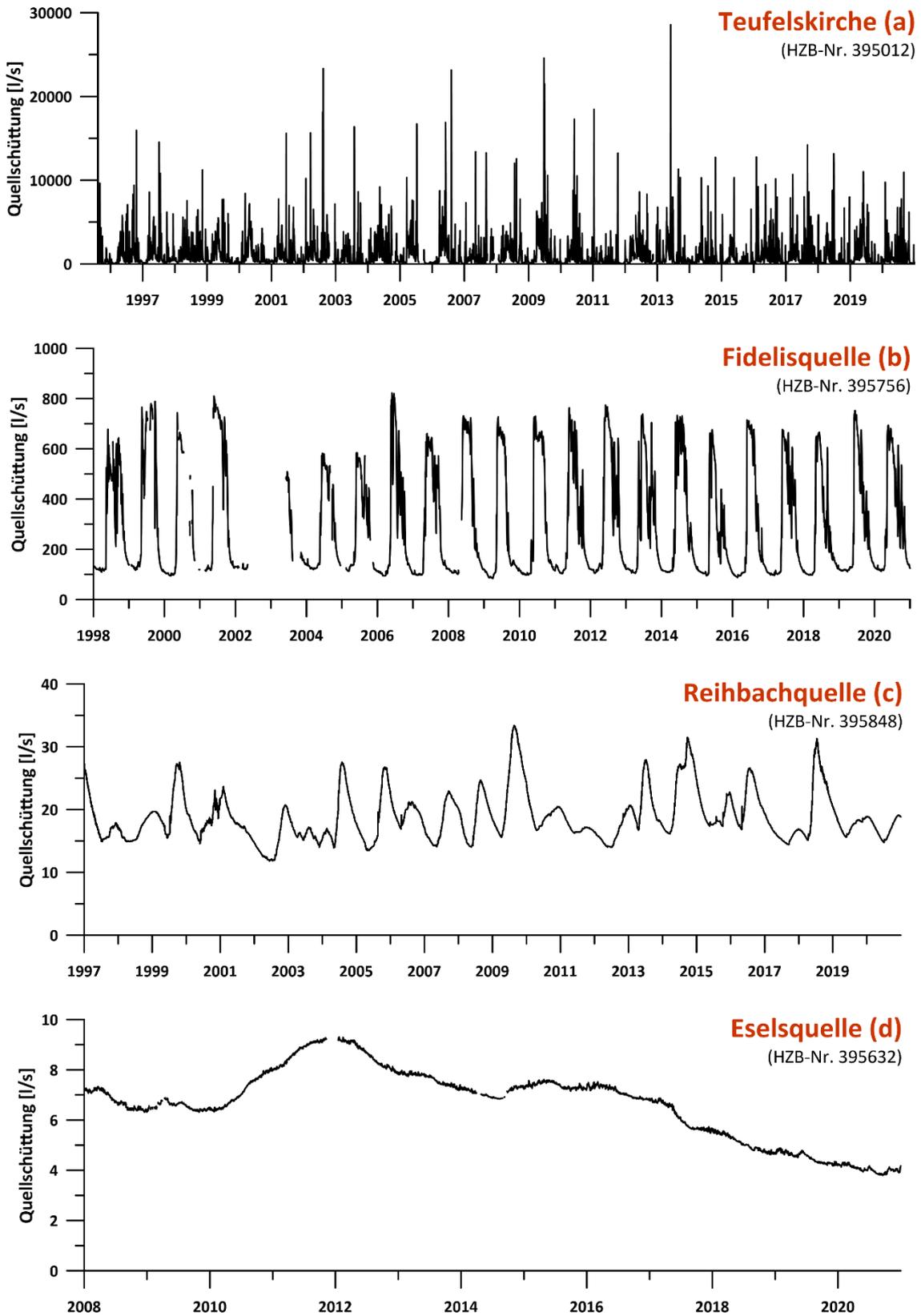


Abbildung 16: Quellschüttungsganglinie der vier exemplarisch vorgestellten Quellen, (a) Teufelskirche, (b) Fidelisquelle, (c) Reihbachquelle und (d) Eselsquelle.



Teufelskirche: Die Karstquelle Teufelskirche (HZB-Nr. 395012) liegt im Gemeindegebiet von St. Pankraz im politischen Bezirk Kirchdorf (Oberösterreich). Sie tritt auf 541 m ü. A. in der Südabdachung des Sengsengebirges in den Oberösterreichischen Voralpen aus, die mittlere Einzugsgebietshöhe wird anhand von Isotopendaten auf etwa 1600 m ü. A. geschätzt (BMLRT, 2021c). Die Quelle liegt knapp über der Talachse des Vorderen Rettenbachtals, das stromabwärts der Quelle von einem perennierenden Gewässer, stromaufwärts jedoch nur saisonal von einem oberflächlichen Gerinne entwässert wird. Der Vordere Rettenbach mündet in die Steyr (im Bereich des Klauser Stausees) und diese schließlich in die Donau.

Das stark verkarstete Sengsengebirge ist durch eine besonders niedrige Gewässerdichte charakterisiert, es wird im Wesentlichen durch wenige Großquellen wie die Teufelskirche entwässert (Haseke, 1998). Forstwirtschaft sowie ausgedehnte Karstflächen mit Legföhrenbeständen prägen das Einzugsgebiet der Quelle. Nach Norden greift es bis über die Kammlinie des Sengsengebirges hinaus, wie Markierungsversuche bestätigen (Haseke, 1998). Der Hauptkamm des Gebirges wird von Wettersteinkalk der Staufen-Höllengebirgsdecke gebildet (Tirolisches Deckensystem), der südlich vorgelagerte Höhenzug dagegen von Hauptdolomit (Griesmeier und Hornung, 2023). Die Tiefenlinie des Einzugsgebietes folgt im Wesentlichen der Streichrichtung der parallelen Teichlstörung (Haseke, 1998).

Von 11.8.1995 bis 31.12.2020 liegen weitgehend kontinuierliche Zeitreihen der Quellschüttung und Wassertemperatur vor, gelegentlich unterbrochen von kürzeren Datenlücken (2,5 % bzw. 2,1 % für die Quellschüttungs- bzw. die Wassertemperatur-Datenreihe). Die Quellschüttung schwankt zwischen 22 und 28568 l/s (Mittelwert 990 l/s), die Wassertemperatur zwischen 5,1 und 8,0 °C (Mittelwert 6,6 °C). Die elektrische Leitfähigkeit wird seit 1.10.1995 kontinuierlich erfasst, unterbrochen von kürzeren Datenlücken (5,3 %). Sie schwankt zwischen 130 und 285 µS/cm, im Mittel liegt sie bei 217 µS/cm.

Fidelisquelle: Die Fidelisquelle (HZB-Nr. 395756) ist eine teilweise gefasste Karstquelle im Gemeindegebiet St. Gallenkirch im politischen Bezirk Bludenz (Vorarlberg). Sie tritt in einer Seehöhe von 1310 m ü. A. in der Ostflanke des Rätikons aus. An der Quellfassung wird derzeit nur noch ein geringer Teil des Quellwassers für ein stillgelegtes Kraftwerk entnommen und anschließend dem Gerinne wieder vollständig zugeführt. Das Gerinne mündet östlich der Fassung in den Suggadinbach, welcher seinerseits die Ill und diese ihrerseits den Rhein speist. Im Bereich des Quellaustritts dominieren Wälder und Weideflächen das Landschaftsbild, die höher gelegenen Teile des Einzugsgebiets sind von verkarsteten Hochflächen, schroffen Gipfelkämmen und Schuttfächern geprägt.

Im Bereich des Quellaustritts sind penninische Decken (Prätigau-Flysch, Sulzfluh-Decke und Falknis-Decke) als tektonisches Fenster unter der ostalpinen Silvretta-Decke aufgeschlossen (Fuchs und Pirkl, 1980; Fuchs, 1984; Schmid et al., 2004). Hydrogeologische Bedeutung kommt dabei insbesondere den intensiv verkarsteten Kalksteinen der Sulzfluh-Decke zu, an die mehrere große Quellen in der unmittelbaren Umgebung der Ortschaft Gargellen gebunden sind. Während diese Kalke im Bereich des Sarotlamassivs (dem Grenzgebirge zur Schweiz) größtenteils von den geringdurchlässigen Gesteinen der Silvretta-Decke überdeckt werden, schneidet der Suggadinbach sie im Talgrund an und schafft damit einen bedeutenden Quellhorizont (Mathis, 2005). Für die Fidelisquelle belegt ein Markierungsversuch, dass große Teile ihres Einzugsgebietes auf Schweizer Staatsgebiet und damit außerhalb ihres orographischen Einzugsgebietes liegen (vgl. Mathis, 2005). Die Auswertung stabiler Isotopendaten weist auf ein hoch gelegenes Einzugsgebiet hin, mit einer mittleren Einzugsgebietshöhe von ca. 2100 m ü. A. (BMLRT, 2021c).

Von 1.1.1998 bis 31.12.2020 liegen weitgehend kontinuierliche Zeitreihen der Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrischen Leitfähigkeit vor, teilweise unterbrochen von Datenlücken (11,2 % der Quellschüttungs-Datenreihe, 19,0 % der Wassertemperatur-Datenreihe, 14,8 % der Leitfähigkeit-Datenreihe). Die Quellschüttung schwankt zwischen 84 und 822 l/s um einen Mittelwert von 295 l/s, die Wassertemperatur zwischen 3,9 und 7,3 °C (Mittelwert 5,8 °C), die elektrische Leitfähigkeit zwischen 72 und 193 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Mittelwert 148 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Reihbachquelle: Die Reihbachquelle (HZB-Nr. 395848) wird im Hydrographischen Dienst als Kluftquelle geführt (BMLFUW, 2005) und liegt auf 1500 m ü. A. auf der Koralpe, südwestlich der Weinebene, im Gemeindegebiet Bad Schwanberg (Bezirk Deutschlandsberg). Der Höhenzug der Koralpe wird oberhalb der Quelle von Amphiboliten, Schiefen und Gneisquarziten des Koralpe-Wölz-Deckensystems aufgebaut (Beck-Mannagetta, 1980; Schmid et al., 2004). Moränenablagerungen im Nahbereich der Quelle gehen auf kleinere, lokal begrenzte Kargletscher der pleistozänen Kaltzeiten zurück, während der Großteil der Koralpe eisfrei blieb und damit den Erhalt einer älteren Reliktlandschaft entlang der Höhenzüge gestattete (van Husen, 1997; Legrain et al., 2014, 2015). Regional betrachtet sind – von eingeschalteten Marmorzügen abgesehen – größere Quellen an die mächtigen Verwitterungsdecken in den flachen Hochlagen der Koralpe gebunden (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2015).

Das Einzugsgebiet der Reihbachquelle weist eine mittlere Seehöhe von etwa 1610 m ü. A. auf (BMLRT, 2021c). Die Quellschüttung wird neben dem Kluftgrundwasserleiter auch durch

Moränenmaterial und die Verwitterungsschwarte des zerklüfteten Aquifers im Einzugsgebiet geprägt. Die Quelle speist den Reihbach, der zunächst in die Schwarze Sulm fließt, welche wiederum in die Mur mündet. Wälder und Weiden prägen die Landnutzung oberhalb der Quelle.

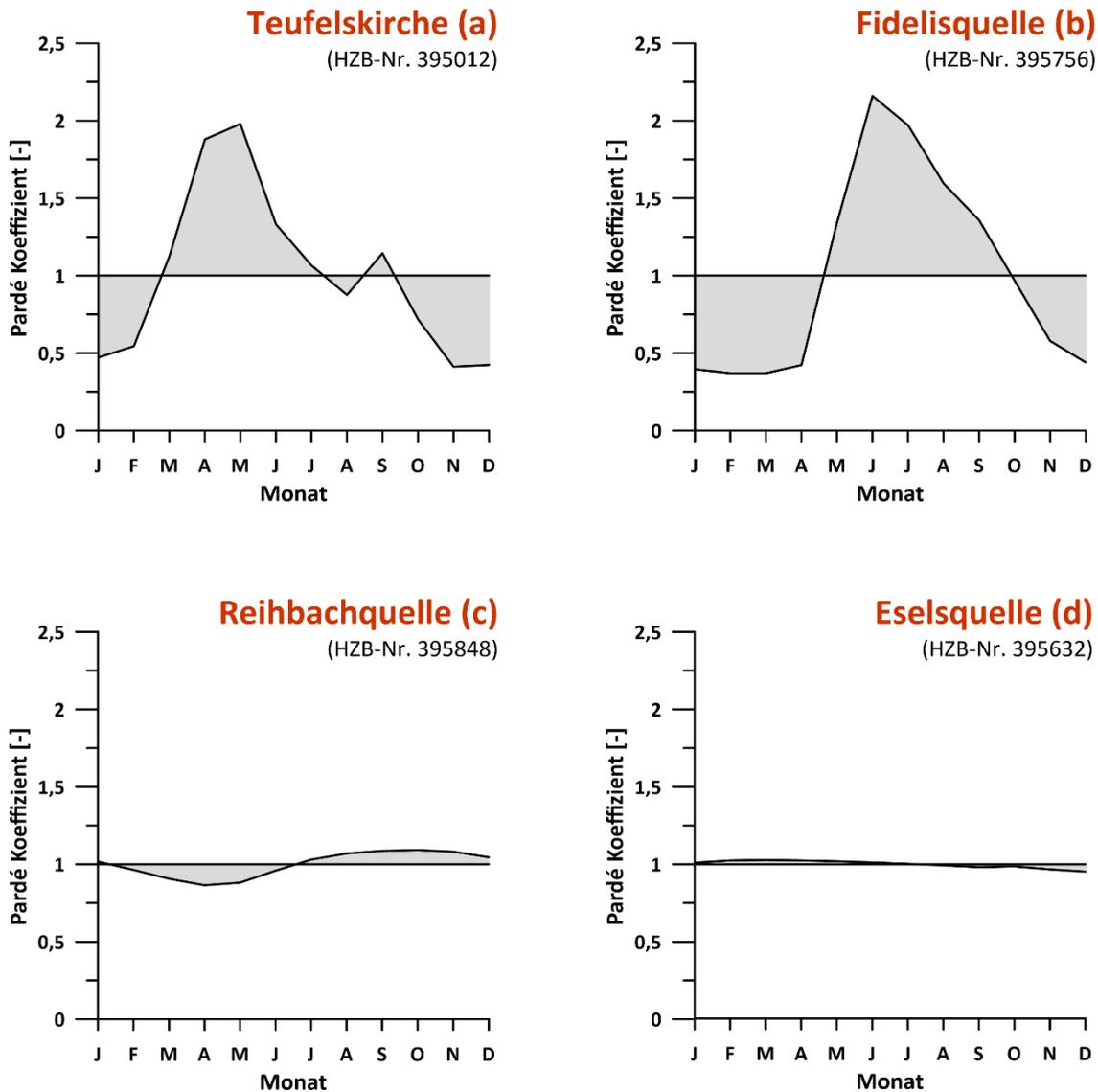
Von 1.1.1997 bis 31.12.2020 liegt eine lückenlose Quellschüttungs-Zeitreihe vor, sie schwankt zwischen 12 und 33 l/s (Mittelwert 19 l/s). Von 22.11.1996 bis 31.12.2020 liegen weitgehend kontinuierliche Zeitreihen der Wassertemperatur (0,1 % Datenlücken) sowie der elektrischen Leitfähigkeit (15,3 % Datenlücken) vor. Die Wassertemperatur schwankt zwischen 5,9 und 6,2 °C (Mittelwert 6,0 °C), die elektrische Leitfähigkeit zwischen 106 und 144 µS/cm (Mittelwert 124 µS/cm).

Eselsquelle: Die Eselsquelle (HZB-Nr. 395632) ist eine Porengrundwasserquelle im Gemeindegebiet Prinzendorf an der Zaya im politischen Bezirk Gänserndorf (Niederösterreich). Die Quelle wird für die Wasserversorgung der Gemeinde Zistersdorf verwendet. Sie tritt im Böhmisches Massiv auf einer Seehöhe von 200 m ü. A. aus, wobei die mittlere Einzugsgebietshöhe nur unwesentlich höher liegt (BMLRT, 2021c). Der Quellüberlauf mündet nördlich der Quelle in die Zaya, die ihrerseits der March und diese schließlich der Donau zuströmt.

Das Einzugsgebiet der Quelle ist von Ackerbau und Waldwirtschaft geprägt. Geologisch dominieren pleistozäner Löss sowie Sande und Mergel der Skalica-Formation, die ihrerseits Leithakalk überlagern (Sedimente neogener Randbecken des Wiener Beckens; Kreuss, 2018). Die Leithakalke sind entlang des Steinberg-Höhenzugs östlich der Quelle aufgeschlossen, sowie in den tiefer eingeschnittenen Abschnitten des Eselbach-Tales, wo teils befahrbare Höhlen ihre intensive Verkarstung dokumentieren (Mayer et al., 1989).

Von 1.1.2008 bis 31.12.2020 liegt eine nahezu kontinuierliche Abflusszeitreihe vor (3,3 % Datenlücken). Die Quellschüttung schwankt zwischen 3,8 und 9,3 l/s, ihr Mittelwert liegt bei 6,6 l/s. Von 30.8.2007 bis 11.9.2020 wurde die Wassertemperatur erfasst (15,7 % Datenlücken), sie schwankt zwischen 10,8 und 11,7 °C um einen Mittelwert von 11,2 °C. Von 19.9.2007 bis 11.9.2020 liegt eine Zeitreihe der elektrischen Leitfähigkeit vor (15,8 % Datenlücken), sie schwankt zwischen 794 und 834 µS/cm (Mittelwert 817 µS/cm).

Abbildung 17: Saisonalität (Pardé-Koeffizienten) der vier exemplarisch vorgestellten Quellen (a) Teufelskirche, (b) Fidelisquelle, (c) Reihbachquelle und (d) Eselsquelle. Der grau eingefärbte Bereich zeigt die Abweichung vom langfristigen Mittelwert (Integrierter Jahresgang).



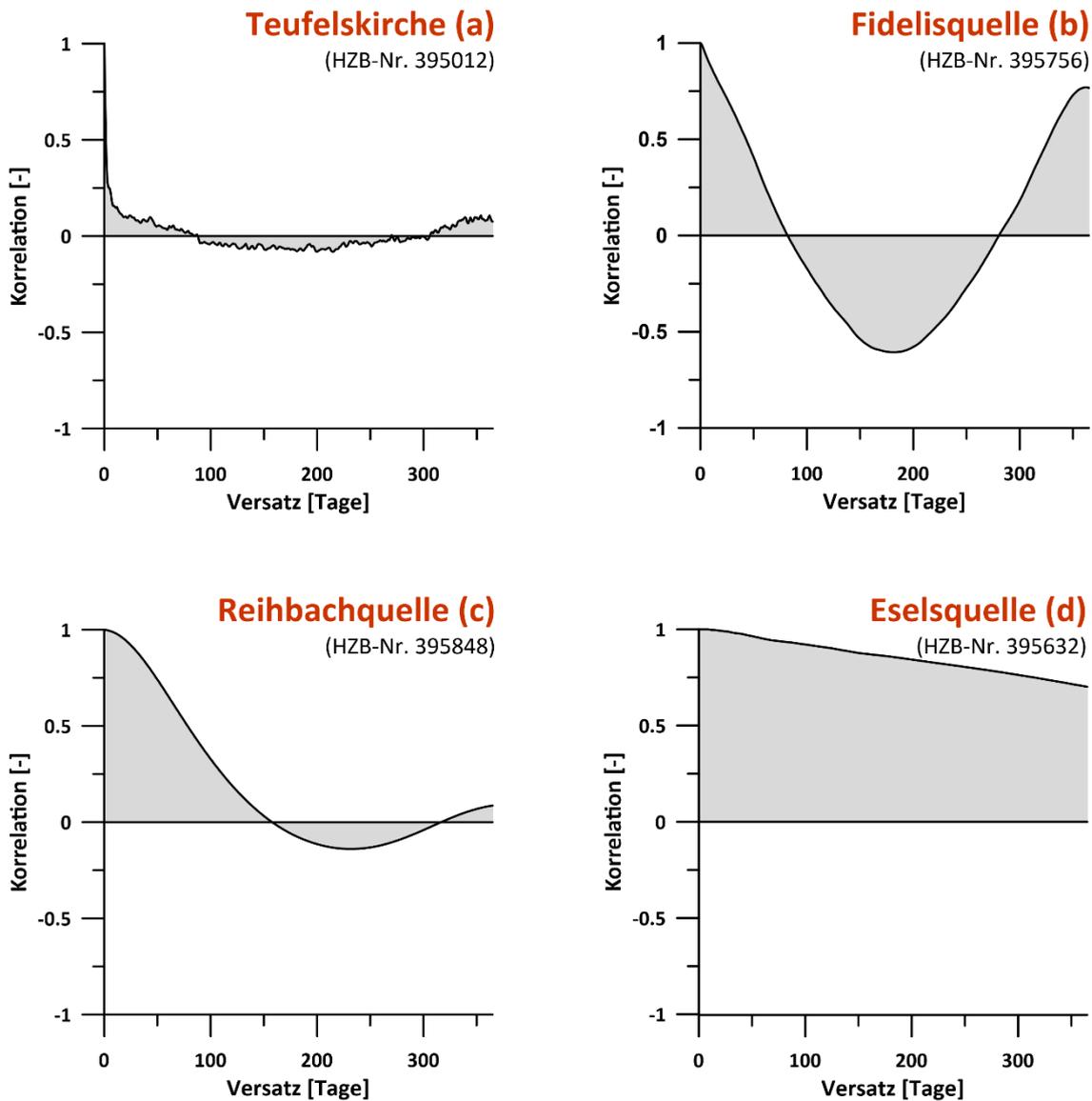
Die Saisonalität der vier exemplarisch vorgestellten Quellen zeigt stark unterschiedliche Ausprägungen (Abbildung 17). Die Karstquellen Teufelskirche und Fidelisquelle zeigen beide einen ausgeprägten Jahresgang, der sich in stark schwankenden Pardé-Koeffizienten ausdrückt (Abbildung 17a,b): An der Teufelskirche zwischen 0,4 im November und 2,0 im Mai, an der Fidelisquelle zwischen 0,4 im März und 2,2 im Juni. Die insgesamt stark ausgeprägte Saisonalität spiegelt sich direkt in den hohen Integrierten Jahresgängen von IJG = 23 % (Teufelskirche) und IJG = 31 % (Fidelisquelle) wider. Die Form des Jahresgangs unterscheidet sich

jedoch stark: Während die Teufelskirche von November bis Jänner ausgeprägte Niederwasserbedingungen aufweist und ihre stärkste Schüttung bereits im Mai erreicht (Abbildung 17a), zeigt die Fidelisquelle eine deutlich längere Niederwasserperiode (von November bis April) und erreicht Spitzenabflüsse im Schnitt erst im Juni (Abbildung 17b). Auch während der Sommermonate zeigt die Fidelisquelle eine länger anhaltende Periode starker Schüttung.

Die starke Schwankung der Quellschüttung ist typisch für Karstquellen und durch die starke Verkarstung des Wettersteinkalkes (Teufelskirche) bzw. Sulzfluhkalkes (Fidelisquelle) bedingt. Form und Zeitpunkt des Jahresgangs weisen jedoch auf unterschiedliche Grundwasserneubildungsdynamiken hin: Das hochgelegene Einzugsgebiet der Fidelisquelle ist im Winter mehrere Monate von einer mächtigen Schneedecke geprägt, während dieser Periode kommt es kaum zur Grundwasserneubildung. Die anhaltenden Niederwasserbedingungen spiegeln daher das Leerlaufen des Karstaquifers wider. Das späte Abschmelzen der Schneedecke ist durch den späten Spitzenabfluss (Juni) dokumentiert. Dagegen ist das deutlich niedriger gelegene Einzugsgebiet der Teufelskirche von kürzerer Schneedeckendauer geprägt, gelegentlich unterbrochen von Regenereignissen. Insgesamt setzt die Schneeschmelze früher ein, sodass bereits im Mai die Spitzenschüttung erreicht wird.

Reihbachquelle und Eselsquelle zeigen dagegen eine kaum ausgeprägte Saisonalität (Abbildung 17c,d). Die Pardé-Koeffizienten schwanken an der Reihbachquelle zwischen 0,9 und 1,1 (Abbildung 17c), an der Eselsquelle weichen sie überhaupt nur geringfügig vom Mittelwert ab (Abbildung 17d). Entsprechend gering fallen die Werte des Integrierten Jahresgangs beider Quellen aus, mit IJG = 4 % für die Reihbachquelle und IJG = 1 % im Fall der Eselsquelle. Die gering ausgeprägte Saisonalität spiegelt die Aquifereigenschaften der Quellen wider, die überwiegend Porengrundwasserleiter entwässern – im Fall der Reihbachquelle die nahegelegenen Moränen sowie insbesondere die Verwitterungsschwarte des geklüfteten Festgesteins, im Fall der Eselsquelle die Sande und Mergel der Skalica-Formation sowie deren quartäre Lössbedeckung. Diese Aquifere weisen im Vergleich zu Karstquellen längere Verweilzeiten auf und sorgen für einen ausgeglichenen Abfluss über das ganze Jahr hinweg.

Abbildung 18: Empirische Autokorrelationsfunktion der vier exemplarisch vorgestellten Quellen (a) Teufelskirche, (b) Fidelisquelle, (c) Reihbachquelle und (d) Eselsquelle. Der grau eingefärbte Bereich zeigt die Integrierte Autokorrelation (IAK).



Die Autokorrelationsfunktion unterscheidet sich ebenfalls hinsichtlich Form und Gesamtstärke (Integrierte Autokorrelation) deutlich zwischen den Quellen (Abbildung 18). Die Autokorrelation der Teufelskirche nimmt bereits nach wenigen Tagen stark ab (Abbildung 18a), im Einklang mit der stark schwankenden Ganglinie der Quelle (Abbildung 16a). Trotz des großen Speichervolumens in den Karbonatgesteinen des Sengengebirges reagiert das System rasch und zeigt nur geringe Abweichungen zur Basislinie ($r = 0$) – dementsprechend niedrig fällt auch die Integrierte Autokorrelation der Teufelskirche aus (IAK = 6 %). Dieses Verhalten ist einerseits durch die starke Verkarstung des Wettersteinkalkes bedingt, das

einen raschen Transport von Niederschlagswasser zur Quelle ermöglicht. Andererseits spiegelt es die häufigen Niederschlagsereignisse im Nordstau der österreichischen Alpen wider.

Gänzlich anders stellt sich das Schüttungsverhalten der Fidelisquelle dar: Ihre Autokorrelationsfunktion zeigt eine kontinuierlich anhaltende Sinusbewegung, mit negativen Spitzenwerten nach 204 Tagen ($r = -0,12$) und anschließendem Ansteigen zu stark positiv korrelierten Werten von $r = +77$ nach Verstreichen eines Jahres (Abbildung 18b). Dementsprechend ist auch die Ganglinie der Fidelisquelle, trotz erheblicher Saisonalität, von deutlich stärker ausgeprägter Trägheit gekennzeichnet, mit breiten und weniger ausgeprägten Spitzen und deutlich gedämpfter, kurzfristiger Fluktuation im Vergleich zur Teufelskirche (Abbildung 16b). Die Integrierte Autokorrelation der Fidelisquelle liegt mit $IAK = 42\%$ entsprechend höher. Die deutlich unterschiedliche Charakteristik, trotz ähnlich starker Verkarstung, ist durch die unterschiedliche Grundwasserneubildungsdynamik bedingt: Die langanhaltende Schneedecke im Einzugsgebiet der Fidelisquelle führt zu einer vergleichsweise regelmäßigen Neubildungsdynamik, mit einem mehrere Wochen anhaltenden Neubildungsimpuls jedes Frühjahr. Die Periodizität dieser Dynamik von 1 Jahr erklärt die hohe positive Korrelation nach > 280 Tagen (Abbildung 18b). Dagegen führt die lange anhaltende Schneedeckendauer zu ebenso regelmäßig auftretenden Niederwasserbedingungen während des langen Winters, die sich in der ausgeprägten negativen Korrelation nach etwa 7 Monaten ausdrückt. Der Basisabfluss erscheint gegenüber den Spitzenabflüssen stets um diese Zeitspanne später (Abbildung 16b).

Die Reihbachquelle zeigt wiederum ein anderes Verhalten, das zunächst von verzögerter Reaktion und entsprechend anhaltender Autokorrelation gekennzeichnet ist (Abbildung 18c). Nach 4-5 Monaten zeigt die Zeitreihe nur noch geringe Korrelation – Neubildungsereignisse die länger zurückliegen haben kaum noch Einfluss auf die momentane Quellschüttung. Dieses Verhalten lässt sich durch die – im Vergleich zu den oben vorgestellten Karstquellen – relativ geringe Durchlässigkeit des Poren- und Kluftgrundwasserleiters der Reihbachquelle erklären. Dagegen ist die Grundwasserneubildungsdynamik im Vergleich zum höher gelegenen Einzugsgebiet der Fidelisquelle weniger stark von der regelmäßig wiederkehrenden Schneedeckendynamik geprägt – dieses Muster wird durch den Einfluss der in unregelmäßigen Abständen auftretenden Regenfälle und Sommergewitter überprägt und ist dadurch weniger deutlich zu erkennen. In Grundzügen zeigt Abbildung 18c zwar ein ähnliche, sinusförmige Grundbewegung wie Abbildung 18b und dokumentiert damit, dass Schnee auch hier eine wichtige Rolle bei der Grundwasserneubildung spielt – das Muster ist jedoch nicht gleich dominant wie bei der hochalpinen Fidelisquelle. Entsprechend fällt die Integrierte Autokorrelation der Reihbachquelle mit $IAK = 27\%$ auch deutlich niedriger aus.

Die Eselsquelle zeigt die am stärksten gedämpfte Reaktion der vier beispielhaft vorgestellten Quellen, mit anhaltend positiver Autokorrelation (Abbildung 18d). Dieses Verhalten drückt sich in einer äußerst ausgeglichenen Quellschüttungsganglinie aus, die nur untergeordnet und stark gedämpft von kurzfristigen Schwankungen gekennzeichnet ist (Abbildung 16d). Entsprechend hoch liegt mit IAK = 86 % auch die Integrierte Autokorrelation der Eselsquelle. Die ausgesprochen verzögerte Reaktion des Grundwassersystems der Eselsquelle ist einerseits durch die im Vergleich zu Karstgrundwasserleitern geringere Durchlässigkeit des dahinterliegenden Porenaquifers bedingt. Andererseits unterscheidet sich die Grundwasserneubildungsdynamik im niederösterreichischen Weinviertel deutlich von den alpinen Einzugsgebieten der höher gelegenen Quellen: Die Schneedeckendauer ist äußerst kurz, die Grundwasserneubildung von zwar unregelmäßigen, aber vergleichsweise einheitlicher über das Jahr verteilten Impulsen gekennzeichnet. Die Kombination von niedrigerer Durchlässigkeit, hoher Speicherfähigkeit und ganzjähriger Grundwasserneubildung führt zur gedämpften Reaktion und ausgeprägten Autokorrelation der Eselsquelle.

Die vier vorgestellten Quellen zeigen die Grundzüge der Quellschüttungsdynamik beispielhaft auf. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Auswertung aller 96 Quellen zusammenfassend dargelegt.

3.2.2 Regionale Auswertung

Die vier in Kapitel 3.2.1 besprochenen Quellen veranschaulichen das breite Spektrum des Auslaufverhaltens österreichischer Quellen. Pardé-Koeffizienten und Autokorrelationsfunktion, sowie zeitliche Änderungen in ihrem Verlauf, können für jede Quelle dem zugehörigen Stammdatenblatt entnommen werden (siehe Anhang). Die Kennzahlen zur Beschreibung der Saisonalität (Integrierter Jahresgang IJG, höchster Pardé-Koeffizient P_{max} , niedrigster Pardé-Koeffizient P_{min}) sowie der Autokorrelation (Integrierte Autokorrelation IAK, Korrelationsdauer KD, Reaktionszeit RZ) aller 96 Quellen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Abbildung 19 zeigt die räumliche Verteilung der Saisonalität anhand dieser Kennzahlen, sowie die Häufigkeitsverteilung derselben. Es zeichnet sich ein konsistentes Muster aller drei Kennzahlen im Bundesgebiet ab: Die Quellen in den Nördlichen Kalkalpen sowie in den hochgelegenen Gebirgsgruppen im Westen des Landes weisen deutlich ausgeprägte Jahresgänge auf. Die Quellen im Osten und Südosten, sowie jene im Nördlichen Alpenvorland und der Böhmisches Masse, zeichnen sich dagegen tendenziell durch gering ausgeprägte Saisonalität aus.

Tabelle 2: Quellschüttungsdynamik der 96 analysierten Quellmessstellen. Integrierter Jahrgang IJG [%], Integrierte Autokorrelation IAK [%], Maximaler Pardé-Koeffizient Pmax [-], Minimaler Pardé-Koeffizient Pmin [-], Reaktionszeit RZ [Tage], Korrelationsdauer KD [Tage].

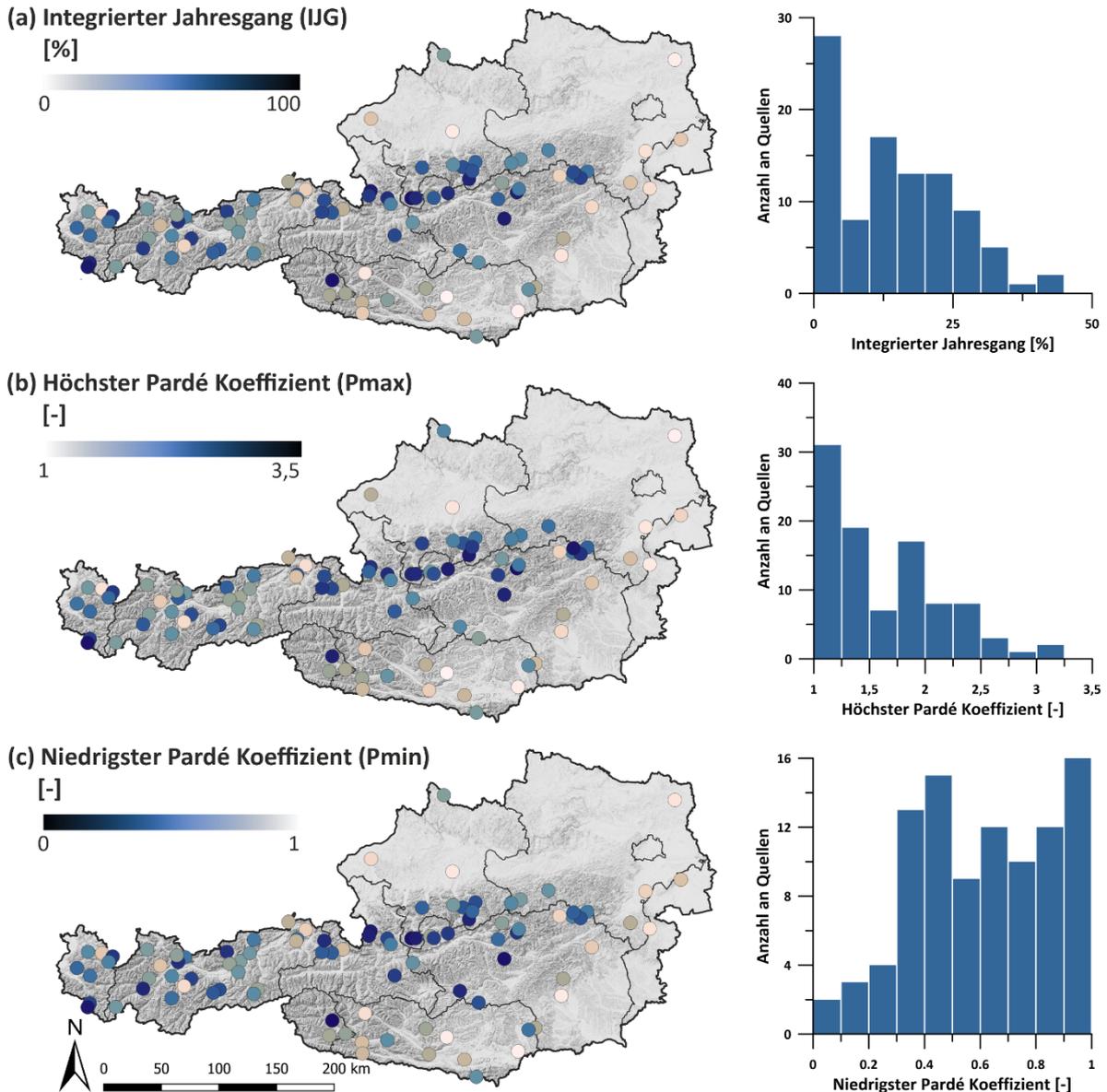
| Quelle | HZB-Nr. | IJG [%] | IAK [%] | Pmin [-] | Pmax [-] | RZ [Tage] | KD [Tage] |
|-----------------------|---------|---------|---------|----------|----------|-----------|-----------|
| Alfutzquelle | 396192 | 9 | 39 | 1.3 | 1.3 | 76 | 89 |
| Aubachquelle | 395764 | 27 | 14 | 2.3 | 2.3 | 43 | 80 |
| Auebachquelle | 395467 | 17 | 8 | 2.0 | 2.0 | 19 | 55 |
| Bärenebenequelle | 396325 | 2 | 22 | 1.1 | 1.1 | 85 | 107 |
| Blaue Quelle | 395434 | 4 | 20 | 1.1 | 1.1 | 83 | 113 |
| Brunauquelle | 395335 | 15 | 47 | 1.5 | 1.5 | 75 | 87 |
| Brunnaderquelle | 395913 | 2 | 49 | 1.1 | 1.1 | >365 | >365 |
| Brunntal | 395137 | 13 | 6 | 1.6 | 1.6 | 11 | 82 |
| Dachserfall | 395251 | 28 | 22 | 2.3 | 2.3 | 48 | 71 |
| Draurainquelle | 395681 | 1 | 48 | 1.0 | 1.0 | 268 | 350 |
| Eibachquelle | 396291 | 20 | 42 | 1.8 | 1.8 | 64 | 76 |
| Erbsattelquelle | 395970 | 8 | 10 | 1.4 | 1.4 | 43 | 117 |
| Eselsquelle | 395632 | 1 | 86 | 1.0 | 1.0 | >365 | >365 |
| Etzbachquelle | 396796 | 20 | 17 | 2.1 | 2.1 | 36 | 49 |
| Fellbachquelle | 395707 | 10 | 19 | 1.4 | 1.4 | 71 | 251 |
| Fidelisquelle | 395756 | 31 | 42 | 2.2 | 2.2 | 65 | 80 |
| Fischa-Dagnitz Quelle | 396135 | 2 | 56 | 1.0 | 1.0 | 604 | NA |
| Flathquellen | 396465 | 25 | 44 | 1.9 | 1.9 | 65 | 78 |
| Florianer Brunnbach | 395129 | 3 | 7 | 1.1 | 1.1 | 29 | 175 |
| Friedlbrunn Quelle | 395228 | 4 | 19 | 1.1 | 1.1 | 80 | 106 |
| Fürstenquelle | 396341 | 14 | 41 | 1.5 | 1.5 | 71 | 84 |
| Galgenwaldquelle | 396788 | 17 | 12 | 1.5 | 1.5 | 45 | 75 |
| Gerstenbödenquelle | 395731 | 19 | 29 | 1.8 | 1.8 | 65 | 86 |

| Quelle | HZB-Nr. | IIG [%] | IAK [%] | Pmin [-] | Pmax [-] | RZ [Tage] | KD [Tage] |
|----------------------------|---------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Geyerquelle | 395095 | 10 | 25 | 1.5 | 1.5 | 82 | 107 |
| Goldbachquelle | 395749 | 2 | 5 | 1.1 | 1.1 | 5 | 65 |
| Goldschmiedquelle | 396754 | 2 | 62 | 1.1 | 1.1 | >365 | >365 |
| Gollinger Wasserfall | 395210 | 35 | 22 | 2.3 | 2.3 | 53 | 81 |
| Gossenbachquelle | 395384 | 41 | 24 | 2.6 | 2.6 | 52 | 75 |
| Große Mühlquelle | 395574 | 15 | 9 | 1.8 | 1.8 | 24 | 50 |
| Hainschbauerquelle | 396564 | 11 | 20 | 1.4 | 1.4 | 35 | 41 |
| Hammerbachquelle | 395855 | 4 | 15 | 1.1 | 1.1 | 95 | 224 |
| Hegnauerbründl Lindgraben | 396036 | 2 | 22 | 1.0 | 1.0 | 99 | 126 |
| Heiterwandquelle | 396333 | 3 | 31 | 1.1 | 1.1 | 112 | 136 |
| Hipflquelle | 396606 | 13 | 17 | 1.5 | 1.5 | 47 | 61 |
| Hirschbrunn-Seeaustritt | 395053 | 30 | 18 | 2.4 | 2.4 | 40 | 67 |
| Kaltes Bächle | 396721 | 17 | 27 | 1.8 | 1.8 | 55 | 70 |
| Katzensteigquelle | 395418 | 11 | 43 | 1.3 | 1.3 | 85 | 99 |
| Klingelmühlquelle | 395087 | 1 | 27 | 1.1 | 1.1 | 207 | 245 |
| Kohlgrubenquellen | 396432 | 12 | 23 | 1.3 | 1.3 | 66 | 89 |
| Kressbach | 395780 | 11 | 16 | 1.4 | 1.4 | 48 | 117 |
| Kronhofquelle | 396614 | 3 | 17 | 1.1 | 1.1 | 50 | 67 |
| Lacknerbrunnquelle | 395517 | 6 | 31 | 1.2 | 1.2 | 67 | 84 |
| Lammerquelle | 395293 | 16 | 28 | 1.6 | 1.6 | 75 | 91 |
| Langwies/Miesbach | 395145 | 22 | 5 | 2.1 | 2.1 | 4 | 48 |
| Lappenbachquelle | 395715 | 3 | 22 | 1.2 | 1.2 | 113 | >365 |
| Lareinsonntagspleisquellen | 396382 | 10 | 38 | 1.3 | 1.3 | 73 | 87 |
| Lastal-Stollenquelle | 395541 | 23 | 22 | 2.0 | 2.0 | 57 | 81 |
| Lehnbachquellen | 395400 | 11 | 15 | 1.3 | 1.3 | 58 | 98 |
| Marbachquelle | 395244 | 24 | 29 | 1.9 | 1.9 | 61 | 79 |
| Marulbachquelle | 395772 | 19 | 21 | 1.8 | 1.8 | 41 | 59 |

| Quelle | HZB-Nr. | IIG [%] | IAK [%] | Pmin [-] | Pmax [-] | RZ [Tage] | KD [Tage] |
|----------------------------|---------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Moosbrunnquelle | 395483 | 5 | 25 | 1.2 | 1.2 | 91 | >365 |
| Mühlbachquelle | 395376 | 2 | 33 | 1.1 | 1.1 | 96 | 117 |
| Müllnernquelle | 396572 | 3 | 25 | 1.1 | 1.1 | 138 | 280 |
| Obwaldquelle | 396705 | 37 | 29 | 3.1 | 3.1 | 51 | 67 |
| Ochsenbrunnquelle | 395491 | 17 | 47 | 1.5 | 1.5 | 75 | 88 |
| Ödensee-Kaltwassertrichter | 395905 | 8 | 17 | 1.4 | 1.4 | 48 | 80 |
| Oswaldquelle | 396523 | 5 | 13 | 1.1 | 1.1 | 67 | 93 |
| Pfannbauernquelle | 396127 | 2 | 25 | 1.1 | 1.1 | 113 | 153 |
| Pießling Ursprung | 395103 | 32 | 21 | 2.7 | 2.7 | 47 | 70 |
| Pöllauer Ursprung | 396770 | 13 | 21 | 1.3 | 1.3 | 63 | 76 |
| Preunegger Siebenquellen | 395897 | 12 | 31 | 1.5 | 1.5 | 64 | 82 |
| Pucherhäuslquelle | 395285 | 23 | 19 | 2.0 | 2.0 | 48 | 76 |
| Puffquelle | 396549 | 2 | 31 | 1.1 | 1.1 | 180 | >365 |
| Pulverermühlquelle | 395442 | 16 | 14 | 1.6 | 1.6 | 50 | 90 |
| Quelle Haggen | 395558 | 25 | 34 | 2.0 | 2.0 | 59 | 76 |
| Reihbachquelle | 395848 | 4 | 27 | 1.1 | 1.1 | 119 | 151 |
| Reithbachquelle | 395590 | 14 | 7 | 1.7 | 1.7 | 17 | 72 |
| Rettenbachquelle | 395111 | 23 | 9 | 2.2 | 2.2 | 14 | 70 |
| Riedlbachquelle | 395996 | 22 | 19 | 2.0 | 2.0 | 40 | 60 |
| Roßlochquelle | 395822 | 16 | 23 | 1.8 | 1.8 | 54 | 78 |
| Sagtümpel | 395863 | 29 | 13 | 2.7 | 2.7 | 32 | 58 |
| Sauwinkelquellen | 396440 | 3 | 28 | 1.1 | 1.1 | 137 | 181 |
| Schönebenquelle | 396762 | 34 | 23 | 2.5 | 2.5 | 45 | 69 |
| Schreiende Brunnen | 395343 | 25 | 28 | 2.3 | 2.3 | 49 | 74 |
| Schwabeltalquelle | 395939 | 16 | 15 | 1.8 | 1.8 | 45 | 74 |
| Schwarzbach - Moosquelle | 395368 | 16 | 41 | 1.4 | 1.4 | 75 | 91 |
| Schwarzbodenquelle | 395426 | 4 | 37 | 1.2 | 1.2 | >365 | >365 |

| Quelle | HZB-Nr. | IIG [%] | IAK [%] | Pmin [-] | Pmax [-] | RZ [Tage] | KD [Tage] |
|-------------------------------|---------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Schwarze Torrenquelle | 395319 | 26 | 37 | 1.8 | 1.8 | 68 | 81 |
| Schwarzlackenquelle | 395327 | 25 | 36 | 1.9 | 1.9 | 64 | 84 |
| Siebenbrunnenquelle | 395533 | 22 | 33 | 2.1 | 2.1 | 62 | 79 |
| Siebenquellen | 396093 | 25 | 19 | 2.3 | 2.3 | 46 | 69 |
| Steinbachquelle | 395608 | 14 | 4 | 1.6 | 1.6 | 7 | 52 |
| Steyernquelle | 395079 | 19 | 4 | 1.8 | 1.8 | 6 | 85 |
| Stubbachquelle | 395350 | 8 | 32 | 1.2 | 1.2 | 85 | 101 |
| Teufelskirche | 395012 | 23 | 6 | 2.0 | 2.0 | 7 | 74 |
| Tiebelquelle | 396531 | 1 | 33 | 1.0 | 1.0 | 183 | 318 |
| Totes Weib Quelle | 396812 | 24 | 6 | 2.8 | 2.8 | 10 | 32 |
| Trinkwasserstollen Bettelwurf | 396226 | 9 | 49 | 1.3 | 1.3 | 83 | 94 |
| Union Quelle | 395673 | 3 | 20 | 1.1 | 1.1 | 80 | 209 |
| Untere Schmittequelle | 396424 | 8 | 26 | 1.3 | 1.3 | 66 | 92 |
| Ursprungquelle (Lehnberg) | 395509 | 28 | 38 | 1.9 | 1.9 | 64 | 80 |
| Ursulaquelle | 395582 | 3 | 35 | 1.1 | 1.1 | 217 | >365 |
| Waldbachursprung | 395038 | 42 | 37 | 2.5 | 2.5 | 68 | 85 |
| Wasseralmquelle | 396077 | 17 | 24 | 1.8 | 1.8 | 54 | 72 |
| Wassermannsloch | 395871 | 33 | 12 | 3.2 | 3.2 | 26 | 58 |
| Windener Quelle | 396010 | 3 | 83 | 1.1 | 1.1 | >365 | >365 |

Abbildung 19 Österreichweite Verteilung (a) des Integrierten Jahresganges IJG, (b) der höchsten Pardé-Koeffizienten Pmax und (c) der niedrigsten Pardé-Koeffizienten Pmin. Die Farbskalierung in Abbildung (c) ist invertiert, um die Extremwerte besser hervorzuheben.



Der Integrierte Jahresgang der 96 Quellen liegt im Mittel bei IJG = 14 % (Abbildung 19a). Vier Quellen weisen mit IJG = 1 % einen äußerst geringen Jahresgang auf. Den stärksten Jahresgang (IJG = 42 %) zeigt die Karstquelle Waldbachursprung im Dachsteingebirge (Oberösterreich). Pmax liegt im Mittel bei 1,6 und schwankt insgesamt zwischen 1,02 und 3,2 (Abbildung 19b). Der Mittelwert von Pmin liegt bei 0,6 und reicht im Einzelnen von

0,02 bis 0,98 (Abbildung 19c). Das räumliche Muster der drei Kennzahlen zeigt im Wesentlichen ein konsistentes Bild (Abbildung 19).

Abbildung 20 zeigt die räumliche Verteilung der Autokorrelation österreichischer Quellschüttungsganglinien anhand der drei abgeleiteten Kennzahlen, sowie die Häufigkeitsverteilung derselben. Im Vergleich zur Saisonalität zeichnet sich für die Autokorrelation ein grundsätzlich anderes Muster ab:

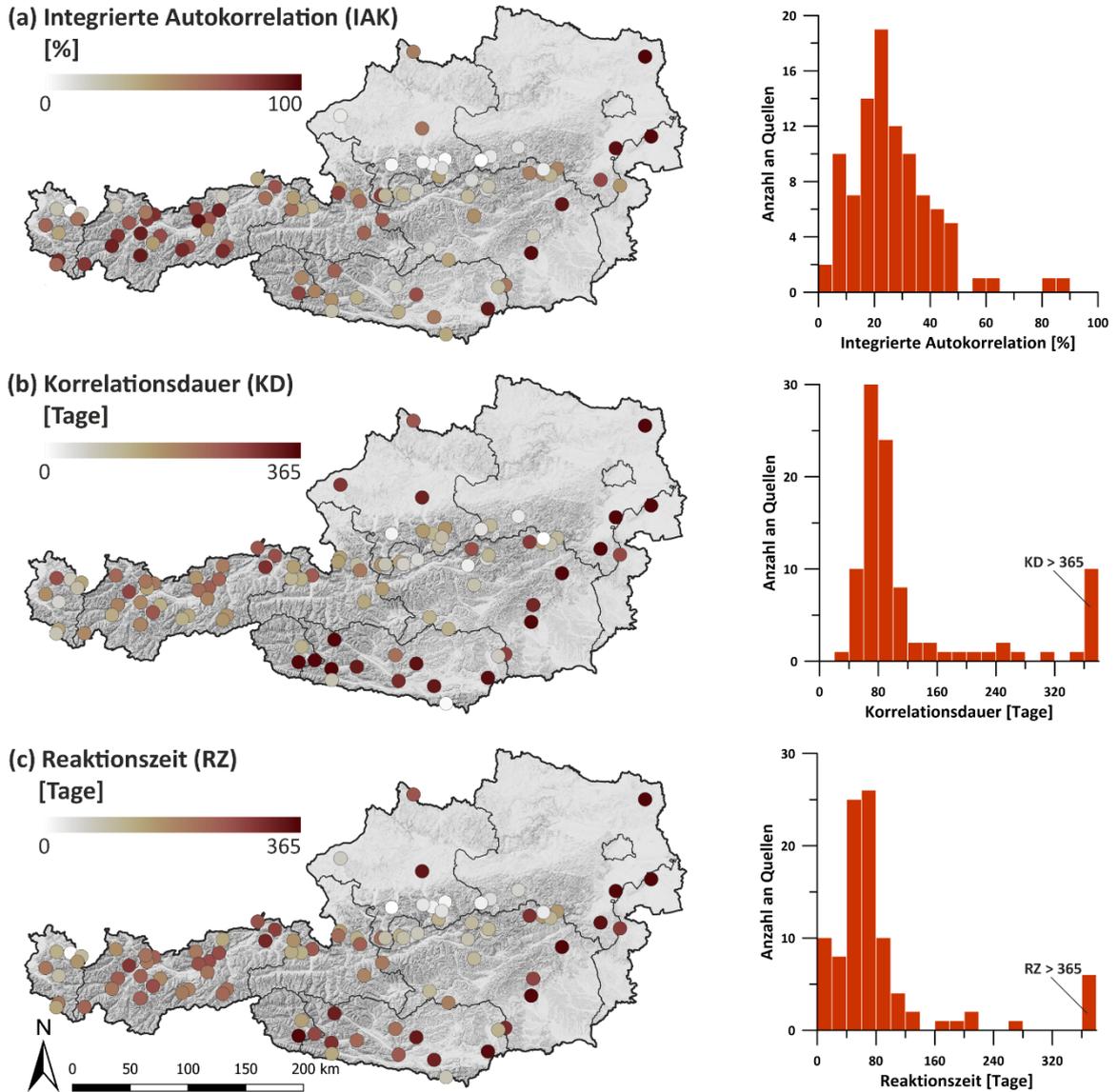
Quellen in den Nördlichen Kalkalpen sind von rasch abfallender Autokorrelation gekennzeichnet, insbesondere in den niedrigeren vorgelagerten Ketten und in den östlichen Ausläufern der Nördlichen Kalkalpen. Dieses Verhalten drückt sich durch niedrige Werte der Integrierten Autokorrelation (Abbildung 20a), der Korrelationsdauer (Abbildung 20b), sowie der Reaktionszeit (Abbildung 20c) in diesen Bereichen aus und spricht für eine rasche Reaktion auf Niederschlagsereignisse.

Hochgelegene Quellen, vor allem in den westlichen Zentralalpen, zeichnen sich dagegen durch langsamere Reaktion und ausgeprägte, periodische Jahreszyklen in der Grundwasserneubildungsdynamik aus. Dies schlägt sich in diesen Bereichen in einer hohen Integrierten Autokorrelation nieder (Abbildung 20a), bei mäßig langer Korrelationsdauer (Abbildung 20b) und Reaktionszeit (Abbildung 20c). Diese Merkmalskombination weist auf den starken Einfluss der Schneeschmelze als Grundwasserneubildungskomponente hin.

Die Quellen im Alpenvorland, insbesondere im Osten des Landes, zeichnen sich durch besonders langsame Reaktion auf einzelne Grundwasserneubildungsereignisse aus, wie aus den hohen Werten für alle drei Kennzahlen hervorgeht (Abbildung 20). Auch die Quellen im Süden und Südosten des Landes zeigen tendenziell hohe Werte und weisen eine entsprechend verzögerte Reaktion auf.

Der Mittelwert der Integrierten Autokorrelation liegt österreichweit bei $I_{AK} = 26\%$, wobei die Karstquellen Steyernquelle und Steinbachquelle mit $I_{AK} = 4\%$ die niedrigsten Werte aufweisen (Abbildung 20a). Den höchsten Wert zeigt die oben vorgestellte Eselsquelle ($I_{AK} = 86\%$). Der Mittelwert der Korrelationsdauer liegt österreichweit bei 127 Tagen, den niedrigsten Wert weist das Tote Weib auf (HZB-Nr. 396812). Für 10 Quellen liegt er bei > 365 Tagen und kann daher nicht exakt bestimmt werden (Abbildung 20b). Der Mittelwert der Reaktionszeit liegt im Schnitt deutlich tiefer (86 Tage), am kürzesten (4 Tage) im Fall der Quelle Langwies/Miesbach (HZB-Nr. 395145). Für 6 Quellen liegt er bei mehr als 365 Tagen (Abbildung 20c).

Abbildung 20 Österreichweite Verteilung (a) der Integrierten Autokorrelation IAK, (b) der Korrelationsdauer KD und (c) der Reaktionszeit RZ. Werte > 365 Tagen sind dabei in einer Gruppe zusammengefasst.



3.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Basierend auf der Autokorrelation der Quellschüttung und ihren Pardé-Koeffizienten können Rückschlüsse auf die meteorologischen und hydrogeologischen Bedingungen in den jeweiligen Einzugsgebieten bzw. den entwässerten Grundwasserkörpern gezogen werden. Die davon abgeleiteten Parameter Integrierter Jahresgang (IJG) und Integrierte Autokorrelation (IAK) drücken die Stärke des saisonalen Jahresganges (IJG) bzw. der Korrelation der Schüttungsganglinie (IAK) aus. Sie unterscheiden sich deutlich von Quelle zu Quelle und lassen damit Rückschlüsse auf grundsätzliche Unterschiede hinsichtlich der Quellschüttungsdynamik zu. Diese Information wird durch die spezifischeren Kennzahlen P_{max} und P_{min} (für den Verlauf des Jahresganges) bzw. Korrelationsdauer (KD) und Reaktionszeit (RZ) (für den Verlauf der Autokorrelationsfunktion) ergänzt.

Die regionale Verteilung dieser Parameter weist deutlich Regionen von ähnlichen Wertebereichen auf (Abbildung 19, Abbildung 20). Die Quellen mit stark ausgeprägter Saisonalität (hoher IJG) liegen hauptsächlich in den Nördlichen Kalkalpen. Die ausgeprägte Saisonalität dieser Quellen geht einher mit den extremsten maximalen und minimalen Pardé Koeffizienten (P_{max} bzw. P_{min}). Auch die Quellen in den hochgelegenen Gebirgsgruppen im Westen Österreichs zeigen tendenziell stark ausgeprägte Jahresgänge. Im Süden und Osten Österreichs zeigen die Quellen hingegen eine deutlich schwächer ausgeprägte Saisonalität (niedriger IJG), entsprechend auch niedrigere P_{max} bzw. P_{min} Werte (Abbildung 19).

Hinsichtlich der Autokorrelation sind deutlich Unterschiede zwischen hoch- und tiefgelegenen Bereichen (Seehöhe), sowie zwischen Nördlichen und Südlichen Kalkalpen erkennbar (Abbildung 20). Die geringste Autokorrelation (niedrige IAK) und somit die rascheste Reaktion auf Grundwasserneubildungspulse tritt im Osten der Nördlichen Kalkalpen auf (Abbildung 20a). Die IAK-Werte an den Quellen der Südlichen Kalkalpen sind im Vergleich dazu etwas höher und somit die Reaktionszeiten auch verzögert, liegen aber in der österreichweiten Betrachtung im mittleren Bereich. Besonders deutlich tritt der Unterschied der Nördlichen und Südlichen Kalkalpen bei den Werten der Korrelationsdauer KD hervor, die im Süden deutlich höhere Werte aufweisen (Abbildung 20a). Dies lässt sich durch die unterschiedliche Niederschlagscharakteristik in den beiden Gebirgsgruppen, sowie durch den geologischen Aufbau der jeweiligen Quelleinzugsgebiete erklären, wie im folgenden Kapitel näher ausgeführt wird.

Die höchsten IAK-Werte werden einerseits in den hochgelegenen Gebirgsgruppen im Westen erreicht, andererseits in den Niederungen im Osten Österreichs. Diese beiden Gruppen

können jedoch anhand der Korrelationsdauer KD deutlich voneinander unterschieden werden, die im Westen tendenziell niedrigere Werte annimmt, im Osten dagegen höhere (Abbildung 20b). Ein ähnliches Muster zeigt auch die Reaktionszeit RZ (Abbildung 20c). Diese Kennzahlen charakterisieren unterschiedliche Aspekte der Autokorrelationsfunktion und ergänzen sich daher gegenseitig: Die hohe IAK spricht für eine insgesamt stark ausgeprägte Korrelation, wie sie sowohl bei stark jahreszyklischem Verhalten (Schneedeckeneinfluss) als auch bei stark abgepufferter Reaktion (Alpenvorland) auftritt. Die hohe Korrelationsdauer (KD-Werte) sowie verzögerte Reaktionszeit (RZ-Werte) der niedriggelegenen Quellen zeigen die stark verzögerte Reaktion der Quellen im Osten auf Grundwasserneubildungspulse an (Abbildung 20b) und veranschaulichen, dass diese Quellen nicht so wie die hochgelegenen Quellen von der (jahres-)periodischen Schwankung der Autokorrelation beeinflusst sind.

3.3 Räumliche / Zeitliche Klassen

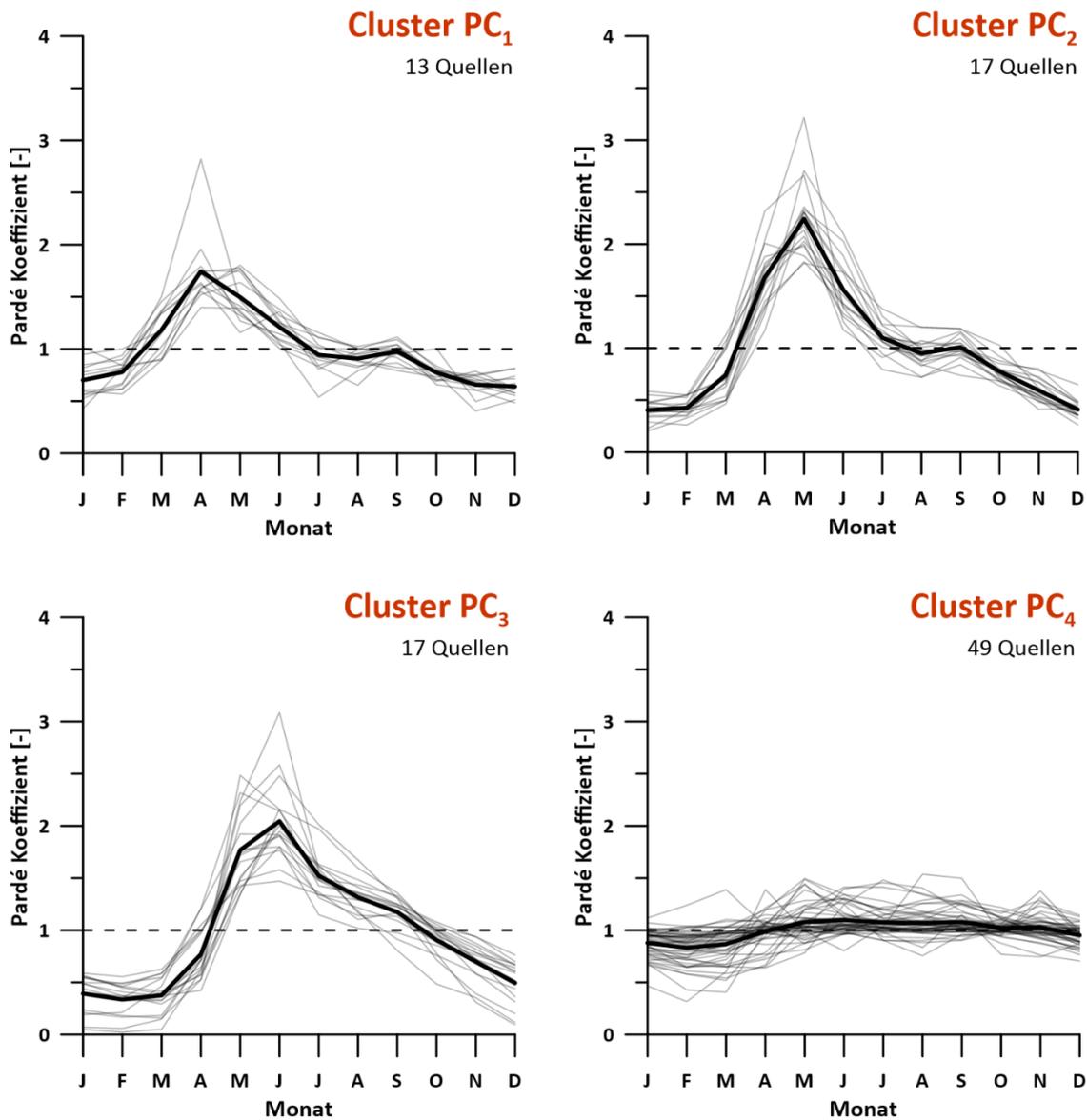
Aufbauend auf der einheitlichen Charakterisierung der Quellschüttungsdynamik wurden alle 96 Messstellen des Hydrographischen Dienstes zu Clustern mit ähnlichem Auslaufverhalten zusammengefasst. Die Clusteranalyse wurde zunächst unabhängig voneinander für das saisonale Schwankungsverhalten (Pardé-Koeffizienten, Kapitel 3.3.1) sowie die Autokorrelationsfunktion der Quellen (Kapitel 3.3.2) durchgeführt. In einem zweiten Schritt wurden die beiden Clusterreihen auf typische Kombinationen von Merkmalen untersucht (Kapitel 3.3.3) und anschließend in den regionalen meteorologischen und geologischen Kontext eingeordnet.

3.3.1 Pardé-Cluster

Die Clusteranalyse der saisonalen Schwankung ergab vier deutlich voneinander abgegrenzte Cluster, die im Folgenden als Pardé-Cluster (PC) bezeichnet werden. Tabelle 3 fasst die Eigenschaften der vier PC-Cluster zusammen. Es zeigt sich eine deutliche Neigung der Quellen zur Clusterbildung: Die Summe der Abweichungsquadrate lässt sich zu 69 % durch Abweichungen zwischen den einzelnen PC-Clustern erklären, lediglich 31 % gehen auf Unterschiede innerhalb der jeweiligen Cluster zurück. Abbildung 21 zeigt die Pardé-Koeffizienten der einzelnen Quellen (graue Linien) sowie die mittlere Saisonalität des Clusters (schwarze Linie, Cluster-Mittellinie).

Der **Cluster PC1** (13 Quellen) zeigt eine ausgeprägte Saisonalität bei relativ früh einsetzender Schneeschmelze (Abbildung 21): Die Pardé-Koeffizienten der Cluster-Mittellinie schwanken im Mittel zwischen 0,6 und 1,7, der Integrierte Jahresgang liegt bei 13 %. Die Pardé-Koeffizienten der einzelnen Quellen schwanken noch deutlich stärker, sie erreichen Maxima von bis zu 2,8 und Minima von bis zu 0,4. Der Integrierte Jahresgang der einzelnen Quellen liegt zwischen 10 und 24 %. Die Spitzenabflüsse treten im April auf (9 Quellen), mitunter auch im Mai (4 Quellen). Während des Sommers klingen die Abflüsse rasch ab, bereits im Juli liegen sie tendenziell unter dem Jahresmittelwert. Von November bis Jänner sind die Quellen von Niederwasserbedingungen geprägt (Basisabfluss).

Abbildung 21: Die Ergebnisse der Clusteranalyse hinsichtlich der Saisonalität der 96 untersuchten Quellen (Pardé-Cluster).



Der **Cluster PC2** (17 Quellen) zeigt die stärkste Saisonalität, die Schneeschmelze setzt tendenziell etwas später ein als bei PC1 (Abbildung 21): Die mittlere Saisonalität schwankt zwischen 0,4 und 2,2 (Cluster-Mittellinie), die Pardé-Koeffizienten der einzelnen Quellen erreichen Extremwerte von bis zu 3,2 (Pmax) bzw. von 0,2 (Pmin). Der Integrierte Jahresgang der Cluster-Mittellinie liegt bei 21 %, der Integrierte Jahresgang einzelner Quellen zwischen 17 und 33 %. Die Spitzenabflüsse treten mit einer Ausnahme durchwegs im Mai auf, Niederwasserabfluss dominiert von Dezember bis Februar.

Tabelle 3: Ergebnisse der Clusteranalyse der saisonalen Schwankung (Pardé-Koeffizienten). Angegeben sind die maximalen bzw. minimale Pardé-Koeffizienten Pmax [-] bzw. Pmin [-] und der Integrierte Jahresgang IJG [%] jeder Cluster-Mittellinie (Cluster) sowie der Bereich der Quellen jedes Clusters (Quellen).

| Cluster | Anzahl | Pmax (Cluster) | Pmax (Quellen) | Pmin (Cluster) | Pmin (Quellen) | IJG (Cluster) | IJG (Quellen) | Spitzenabfluss (Anzahl Quellen) |
|-------------------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---|
| Pardé-Cluster PC1 | 13 | 1,7 | 1,4-2,8 | 0,6 | 0,4-0,7 | 13 | 10-24 | Apr (9), Mai (4) |
| Pardé-Cluster PC2 | 17 | 2,2 | 1,8-3,2 | 0,4 | 0,2-0,5 | 21 | 17-33 | Apr (1), Mai (16) |
| Pardé-Cluster PC3 | 17 | 2,0 | 1,5-3,1 | 0,3 | 0,02-0,6 | 24 | 16-42 | Mai (3), Jun (14) |
| Pardé-Cluster PC4 | 49 | 1,1 | 1,0-1,5 | 0,8 | 0,3-1,0 | 4 | 1-17 | Jän(1), Mär(3), Apr(2), Mai(9), Jun(9), Jul(3), Aug(4), Sep(6), Okt(2), Nov(10) |

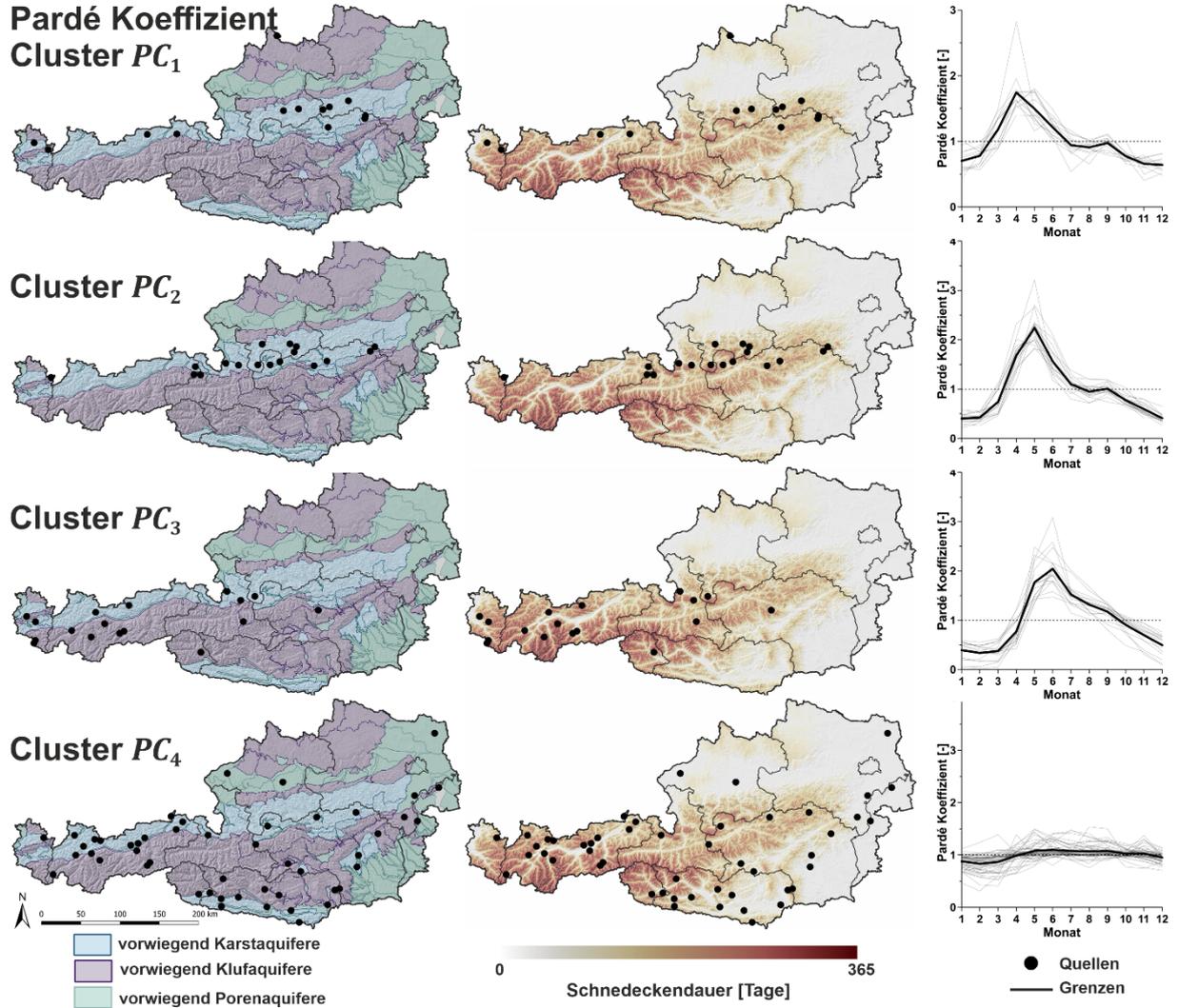
Der **Cluster PC3** (17 Quellen) zeigt gegenüber PC1 und PC2 einen später einsetzenden Jahresgang (Abbildung 21): Nach einem von Dezember bis März anhaltenden Basisabfluss erreichen die meisten Quellen (14) im Juni ihr Maximum, das mit 2,0 (Cluster-Mittellinie) bzw. 1,5-3,1 (einzelne Quellen) sehr deutlich ausfällt. Entsprechend hoch liegt auch der Integrierte Jahresgang der Cluster-Mittellinie (24 %) bzw. der einzelnen Quellen (16-42 %). Die niedrigsten Pardé-Koeffizienten werden im Spätwinter erreicht, mit 0,3 (Cluster-Mittellinie) bzw. 0,02-0,6 (einzelne Quellen), vor dem Einsetzen der Schneeschmelze.

Der umfangreiche **Cluster PC4** (49 Quellen) zeigt dagegen kaum ausgeprägt Saisonalität (Abbildung 21): Die Pardé-Koeffizienten der Cluster-Mittellinie schwanken lediglich zwischen 0,8 und 1,1. Auch die Koeffizienten der einzelnen Quellen zeigen keine ausgeprägte Dynamik, die Tiefstwerte liegen bei 0,3-1,0, die Höchstwerte bei 1,0-1,5. Der Integrierte Jahresgang der Cluster-Mittellinie fällt mit 4 % sehr niedrig aus (einzelne Quellen 1-17 %). Durch die kaum ausgeprägte Saisonalität verteilen sich auch die Spitzenabflüsse ohne erkennbares Muster über verschiedene Monate.

Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigt die räumliche Verteilung der vier PC Cluster und bringt diese in Zusammenhang mit den übergeordneten hydrogeologischen Einheiten Österreichs (vorwiegend Karstgrundwasserleiter/Kluftgrundwasserleiter/Porengrundwasserleiter), der Schneedeckendauer sowie Verteilung von Niederschlagshäufigkeit und -intensität. Dieser Vergleich ermöglicht Aussagen über Einflüsse der Aquifereigenschaften und Grundwasserneubildungsverhältnisse auf die Saisonalität der Quellschüttung. Die Infobox „Topographie und Geologie“ erläutert die zu Grunde gelegten Datensätze und die großmaßstäblichen Muster der Schneedeckendynamik. Auf die großräumigen Niederschlagsmuster in Österreich wird in der Infobox „Niederschlagsverteilung in den Alpen“ eingegangen.

Quellen mit der am stärksten ausgeprägten Saisonalität (PC1 und PC2) treten fast ausschließlich in den Nördlichen Kalkalpen auf (Abbildung 22). Die nicht in den Gebieten der verkarstungsfähigen alpinen Großeinheiten liegenden Quellen (Schreiende Brunnen HZB-Nr. 395343, Pucherhäuslquellen HZB-Nr. 395285) entwässern kleinere, Gebiete mit verkarstungsfähigen Gesteinen, die maßstabsbedingt nicht in der Großeinheit „Karstaquifere“ erfasst werden konnten. Einzig die Geyerquelle (HZB-Nr. 395095) im Norden von Österreich bildet eine Ausnahme und ist keinen verkarstungsfähigen Gesteinen zuordenbar. Wie exemplarisch anhand der Quelle Teufelskirche in Abschnitt 3.2.1 ausgeführt, ist die Quellschüttungsdynamik aufgrund der (zumeist vorliegenden) Verkarstung und der damit verbundenen raschen Infiltration von Wässern stark von Niederschlagsereignissen oder Schneeschmelze beeinflusst. Die Saisonalität der Quellschüttung ist im Winter und Frühjahr hauptsächlich durch die Schneedeckendynamik geprägt, mit einer Niederwasserperiode während des Schneedeckenaufbaus im Winter und einem raschen Schüttungsanstieg mit Beginn der Schneeschmelze im Frühjahr. Die Schneeschmelze setzt in den Einzugsgebieten der Quellen aufgrund der im Vergleich zu PC3 niedrigen Seehöhenlage früh ein. In den Sommermonaten sind die Quellen in den Nördlichen Kalkalpen von häufigen, aber im Vergleich zu den Südlichen Kalkalpen weniger intensiven Niederschlagsereignissen geprägt (Abbildung 23).

Abbildung 22: Räumliche Verteilung der Pardé-Cluster PC1-PC4, verglichen mit großräumigen hydrogeologischen Einheiten (links) bzw. der durchschnittlichen Dauer der Schneedecke (rechts).



Infobox: Topographie und Geologie

Die Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes verteilen sich auf alle Großlandschaften Österreichs und weisen ein entsprechend breites Spektrum an Höhenlagen auf (Abbildung 2a). Die mittlere Seehöhe Österreichs liegt bei 948 m ü. A. (Spannweite 113-3798 m ü. A.), die mittlere Seehöhe der beobachteten Quellaustritte bei 919 m ü. A. (Spannweite 143-2005 m ü. A.). Zwei Drittel des Bundesgebietes werden zum alpinen Raum gezählt, dem der Großteil der österreichischen Quellen zugeordnet werden kann (95 %). Die meteorologischen Bedingungen in den österreichischen Alpen prägen daher in besonders hohem Maße die Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet der analysierten Quellen.

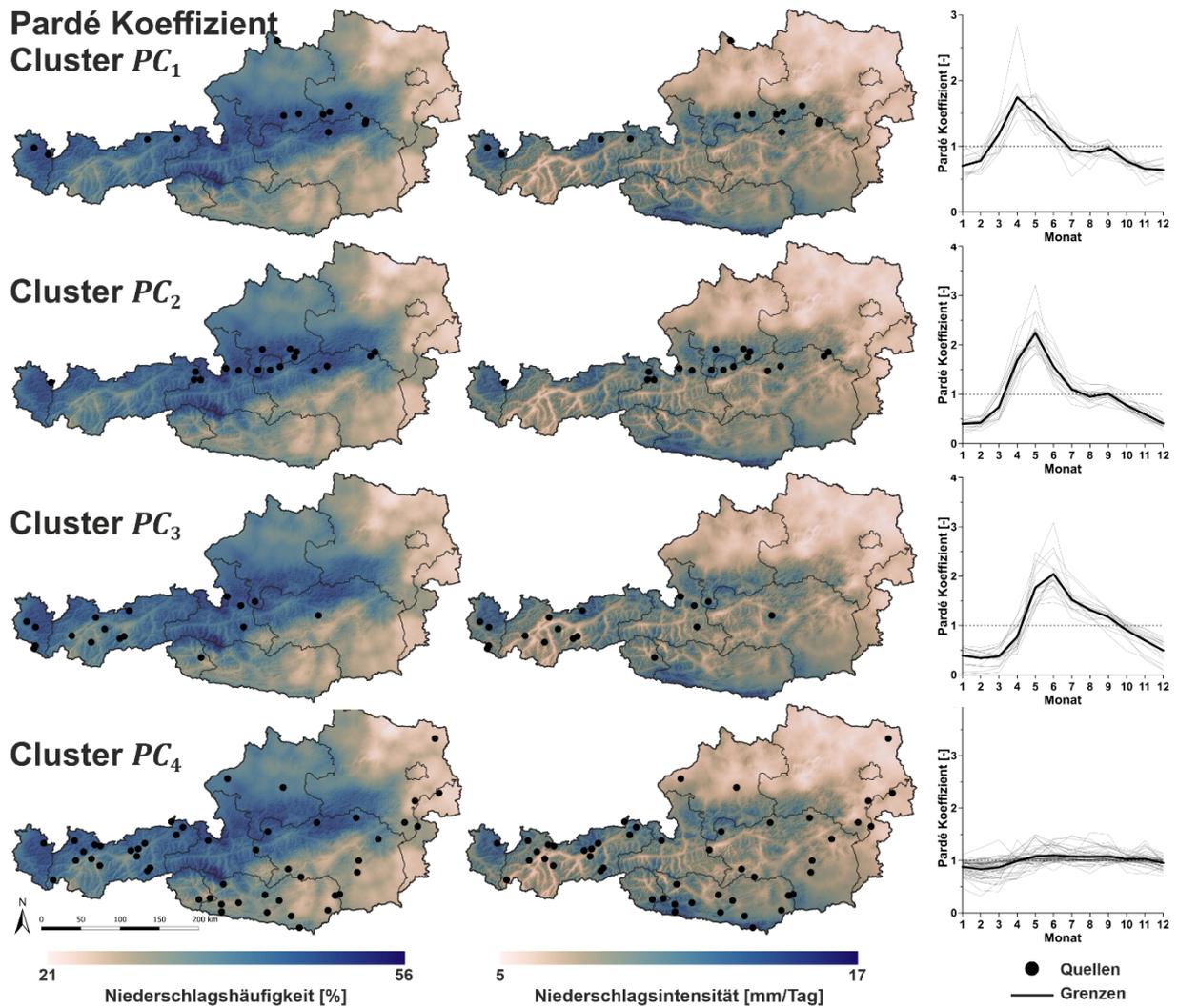
Da die mittlere Lufttemperatur mit der Seehöhe abnimmt, korreliert die durchschnittliche Schneedeckendauer gut mit der Topographie Österreichs. Die hochgelegenen Anteile Österreichs sind von lange anhaltender Winterschneedecke gekennzeichnet, insbesondere in den Ötztaler und Stubai Alpen, den Zillertaler Alpen und den Hohen Tauern. Die mittlere Schneedeckendauer wurde im vorliegenden Bericht anhand des gerasterten SNOWGRID-CL Datensatzes der GeoSphere Austria dargestellt (Olefs et al., 2020), die Mittelwertbildung erfolgte dabei für den gesamten Messzeitraum der Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes (1974-2021). Lange Schneedeckendauer im Einzugsgebiet einer Quelle bedingt entsprechend lange Niederwasserbedingungen während der Wintermonate, da der Niederschlag währenddessen in fester Form gespeichert wird und die Grundwasserneubildung weitgehend unterbunden ist. Mächtige und lange andauernde Schneedecken können erhebliche Mengen an Wasser speichern, das während der Schneeschmelze in vergleichsweise kurzer Zeit freigesetzt wird und zu Spitzenabflüssen im Frühjahr führt – je länger die Schneedeckendauer, desto später die Spitzenabflüsse. Dementsprechend sind schneedominierte Quellen tendenziell von einem ausgeprägten Jahresgang gekennzeichnet (Abbildung 24). Zugleich tritt die Schneeschmelze regelmäßig im Jahresrhythmus auf und entwickelt damit eine deutlich stärkere Periodizität als die höchst unregelmäßig verteilten Regenereignisse (Abbildung 25).

Geologisch ist Österreich von großer Vielfalt geprägt (Abbildung 1a). Für die vorliegende regionale Vergleichsstudie werden lediglich die hydrogeologisch

dominanten Eigenschaften des Untergrunds herausgegriffen und in großmaßstäblichen Gruppen zusammengefasst. Dabei wird grob unterschieden zwischen überwiegend von Karst-, Kluft- und Porengrundwasserleitern geprägten Gebieten (BMLFUW, 2015). Stark verkarstete Grundwasserleiter sind in der Regel von hoher Durchlässigkeit gekennzeichnet (Ford und Williams, 2007). Sie konzentrieren sich in Österreich auf die Nördlichen und Südlichen Kalkalpen, in denen besonders viele Quellen mit ausgeprägtem Jahresgang zu finden sind (Abbildung 22). Sie reagieren tendenziell rasch auf Grundwasserneubildungsereignisse (Kresic und Stevanovic, 2010), entsprechend neigen sie zu rasch abfallender Autokorrelationsfunktion (Abbildung 25). Dagegen neigen insbesondere Porengrundwasserleiter zu einer stärkeren Abpufferung der Neubildungsdynamik mit entsprechend ausgeglichenerem Jahresgang (geringe Saisonalität) der daran gebundenen Quellen (Abbildung 22).

Quellen mit einem Anstieg in der Quellschüttung später im Jahr (Mai/Juni) und vergleichbar geringeren Saisonalität (PC3) treten hauptsächlich in hydrogeologischen Großeinheiten auf, die vorwiegend von Kluftaquiferen geprägt sind (Abbildung 22). Viele der Quellen des Clusters PC3 liegen in Bereichen der Zentralalpen und im Westen Österreichs, in Regionen mit lang andauernder Schneedecke (Abbildung 22). Karstquellen aus PC3 in Salzburg und Oberösterreich entwässern nahezu ausschließlich hoch gelegene Plateauareale: Der Waldbachsprung (HZB-Nr. 395038) entwässert das zentrale, teilweise vergletscherte Gipfelplateau des Dachsteingebirges (Völkl und Eybl, 2019). Das Einzugsgebiet der Schwarzen Torrenquelle (HZB-Nr. 395319) umfasst nahezu ausschließlich die Hochfläche des Hagengebirges in den Berchtesgadener Alpen (Klappacher und Knapczyk, 1979). Der Dachserfall (HZB-Nr. 395251) entwässert das Hochplateau des Tennengebirges (Klappacher und Haeckel-Knapczyk, 1985). Diese Einzugsgebiete zeichnen sich durch eine lange Verweildauer der Schneedecke aus. Eine Ausnahmestellung nimmt die östlichste Quelle dieses Clusters ein: Die Schönebenquelle entwässert den gleichnamigen Blockgletscher und liegt auf einer Seehöhe von 1720 m ü. A. (Abbildung 2; Winkler et al., 2016). Blockgletscherquellen zeigen ein ähnliches Schüttungsverhalten wie Karstquellen und weisen daher ebenfalls eine ausgeprägte Saisonalität auf (Wagner et al., 2020). Die verspätete Schneeschmelze bzw. der verzögerte Anstieg in der Quellschüttung im Frühjahr kann auf das hohe Einzugsgebiet zurückgeführt werden. Zusätzlich entwässert die Quelle ein abgeschattetes Kar nordöstlich des Hochreicharts (2416 m) in den Seckauer Tauern.

Abbildung 23: Räumliche Verteilung der Pardé-Cluster PC1-PC4, verglichen mit der durchschnittlichen Niederschlagshäufigkeit (links) bzw. der durchschnittlichen Niederschlagsintensität (rechts).



Die Quellen mit gering ausgeprägter Saisonalität der Quellschüttung treten in ganz Österreich auf. Der Vergleich mit den hydrogeologischen Gegebenheiten und den damit verbundenen Grundwasserneubildungsprozessen lässt kein eindeutiges Muster erkennen (Abbildung 22 und Abbildung 23). Auffällig ist jedoch, dass alle Quellen in den verkarsteten Gesteinen der Südlichen Kalkalpen keine oder nur geringe Saisonalität aufweisen. Die Einzugsgebiete dieser Messstellen bestehen überwiegend aus dolomitischen Gesteinen, die eine geringe Verkarstung aufweisen. Gegenüber den Quellen der Nördlichen Kalkalpen besitzen die Aquifere somit tendenziell eine niedrigere hydraulische Durchlässigkeit und ein höheres Speichervermögen – folglich ein größeres Potential, Grundwasserneubildungspulse abzu-dämpfen.

Infobox: Niederschlagsverteilung in den Alpen

Die räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschläge im Einzugsgebiet der Quellen prägt maßgeblich die Dynamik ihrer Quellschüttung. Jener Anteil des Niederschlagswassers, der durch den Boden in tiefere Untergrundschichten infiltriert und schließlich den Grundwasserkörper erreicht, trägt zur Grundwasserneubildung bei. Da die Dynamik der Grundwasserneubildung das Schüttungsverhalten der Quellen steuert, wurden im vorliegenden Projekt zwei grundlegende, meteorologische Parameter zur Beschreibung der Niederschlagscharakteristik berechnet: Die Niederschlagshäufigkeit wird anhand der jährlichen Anzahl an Tagen mit > 1 mm Niederschlagsmenge berechnet, die Niederschlagsintensität anhand der mittleren Niederschlagsmenge an diesen Tagen (Klein Tank et al., 2009). Diese Kenngrößen wurden zur graphischen Gegenüberstellung anhand des gerasterten SPARTACUS-Datensatzes der GeoSphere Austria (Hiebl und Frei, 2018) als Mittelwerte über den gesamten Messzeitraum der Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes berechnet (1974-2021).

Der Nordwesten Österreichs ist häufig von atlantisch beeinflussten Westwinden geprägt, die insbesondere entlang der langgestreckten Kette der Nördlichen Kalkalpen als Stauniederschläge abregnen („Nordstau“; Frei und Schär, 1998). Diese Bereiche sind von häufigen, mäßig intensiven Niederschlägen geprägt (Hiebl und Frei, 2018), die Quellschüttungsdynamik wird daher in den Nördlichen Kalkalpen von häufigen, unregelmäßigen Neubildungsereignissen beeinflusst. Quellen mit rasch reagierenden Grundwasserleitern, z. B. Karstquellen, weisen eine entsprechend rasch abfallende Autokorrelation auf (Abbildung 25). Zugleich bedingt die erhebliche Niederschlagsmenge, die im Winter teils als Schnee fällt, einen tendenziell ausgeprägten Jahresgang der Quellen in diesem Bereich (Abbildung 23).

Der Süden Österreichs ist dagegen von Strömungen mit tendenziell hoher Luftfeuchtigkeit aus dem Mittelmeerbereich geprägt (Frei und Schär, 1998). Diese führen zu heftigen Niederschlagsereignissen, die im Vergleich zum Nordstau eher episodisch auftreten („Adriatief“; Isotta et al., 2014; Hiebl und Frei, 2018). In der Folge werden die Grundwasserspeicher in größeren Abständen deutlich aufgefüllt, die Dynamik der Quellschüttung im Süden weist tendenziell eine verzögerte Reaktion auf – mit entsprechend langanhaltender Autokorrelation (sofern der

entwässerte Grundwasserleiter eine ausreichende Speicherkapazität aufweist; Abbildung 26).

Die Zentralalpen liegen dagegen im Regenschatten der niederschlagsreichen Nördlichen und Südlichen Kalkalpen: Niederschläge regnen bereits größtenteils an den vorgelagerten Gebirgsketten ab und erreichen die hochgelegenen Bereiche entlang des Alpenhauptkammes seltener. Dies führt zur Ausbildung der „Inneralpinen Trockenzone“, die in Österreich Teile der Ötztaler und Stubai Alpen, der Zillertaler Alpen sowie der südlichen Hohen Tauern umfasst und von mäßig hohen Jahresniederschlägen gekennzeichnet ist (Frei und Schär, 1998). Die Quellen in diesen Anteilen der Alpen zeigen einen vom Schnee bestimmten Jahreszyklus, der während der kurzen Sommermonate nur untergeordnet von Niederschlägen unterbrochen wird. Da die Niederschläge im Sommer tendenziell von geringer Intensität geprägt sind, zeigt sich ein ausgeprägtes, sinusförmiges Muster der Autokorrelationsfunktion dieser Quellen (Abbildung 25).

Die niedriger gelegenen Gebiete im Osten Österreichs sind von kontinentalem Klima geprägt, mit besonders geringen Jahresniederschlägen (Frei und Schär, 1998; Hiebl und Frei, 2018). Die Quellen in diesem Bereich, der aufgrund der geringen Seehöhe zudem kaum von Schneeschmelzwasserandrang überprägt wird, zeigen wenig ausgeprägte Reaktion (Abbildung 25) und ausgeglichenen Jahresgang (Abbildung 23).

3.3.2 Autokorrelation Cluster

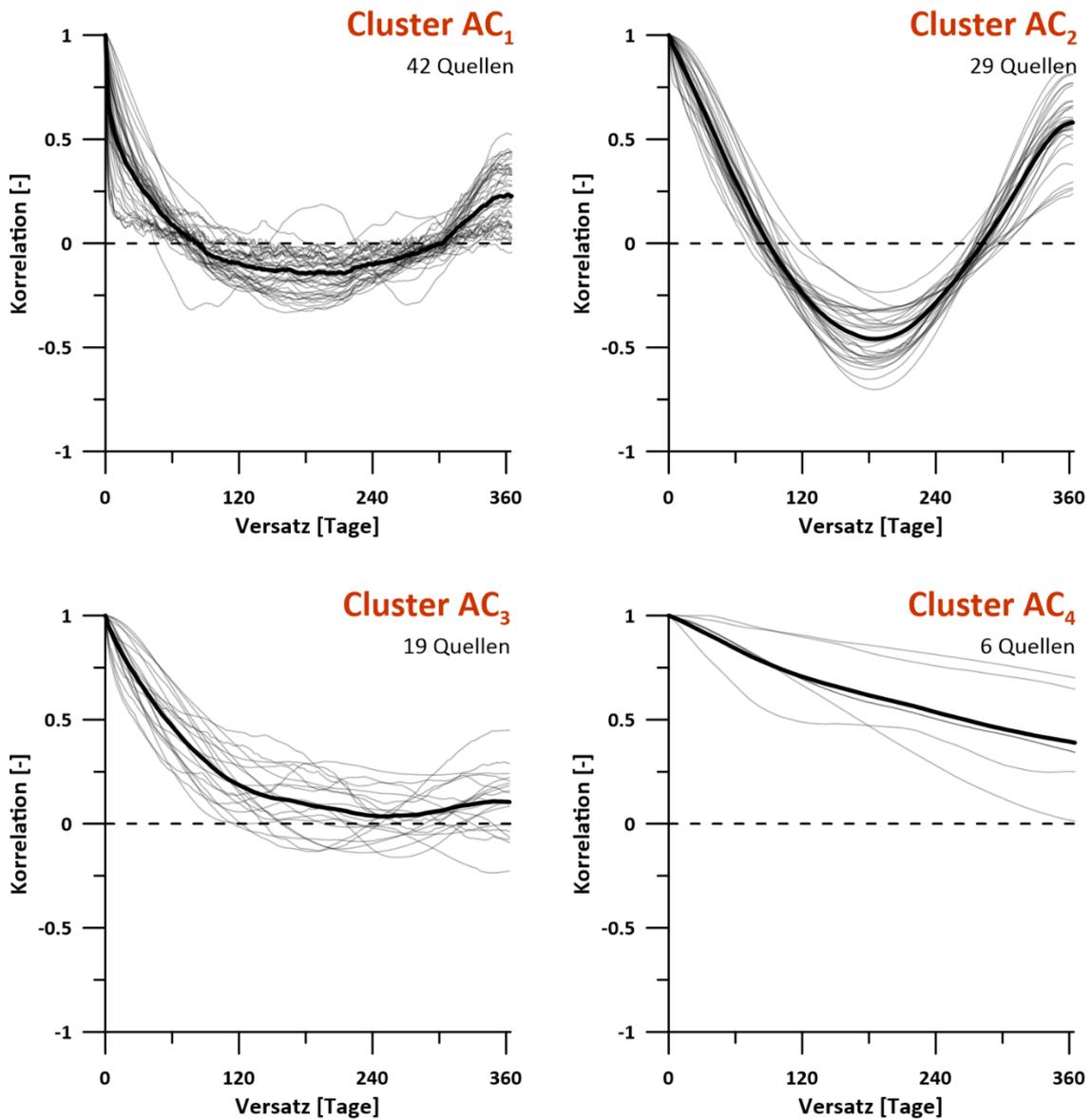
Die Clusteranalyse der empirischen Autokorrelationsfunktion ergab ebenfalls vier deutlich voneinander abgegrenzte Cluster, die im Folgenden als Autokorrelations-Cluster (AC) bezeichnet werden. Tabelle 4 fasst die Eigenschaften der vier AC Cluster zusammen. Auch hier weisen die Quellen eine deutliche Neigung zur Clusterbildung auf: Die Summe der Abweichungsquadrate geht zu 77 % auf Abweichungen zwischen den einzelnen Autokorrelations-Clustern zurück, 23 % dagegen auf Unterschiede innerhalb der jeweiligen Cluster. Abbildung 24 zeigt die Autokorrelationsfunktionen der einzelnen Quellen (grau) sowie die mittlere Autokorrelationsfunktion jedes Clusters (Cluster-Mittellinie, schwarz).

Cluster AC1 zeigt eine rasch abfallende Korrelation (Abbildung 24) und fasst damit Quellen zusammen, die rasch und intensiv auf einzelne Grundwasserneubildungsereignisse reagieren. Die Integrierte Autokorrelation des Clusters liegt entsprechend niedrig (14 %), die Integrierte Autokorrelation einzelner Quellen schwankt zwischen 4 und 24 %. Nach etwa 60 Tagen weisen die meisten Quellen keine deutliche Korrelation mehr auf, es dominiert unstrukturiertes Hintergrundrauschen mit leichter Tendenz zu negativen Korrelationskoeffizienten. Gegen Ende des Jahres steigt die Korrelation wieder an, bleibt jedoch im Allgemeinen $< 0,5$.

Cluster AC2 zeigt ein sinusförmiges Muster ohne große Unregelmäßigkeiten (Abbildung 24), mit stark negativer Korrelation nach etwa 7 Monaten. Gegen Ende der Jahresperiode steigen die Korrelationskoeffizienten deutlich an. Die Integrierte Autokorrelation der Cluster-Mittellinie liegt mit 35 % eher hoch, die Integrierte Autokorrelation einzelner Quellen in diesem Cluster schwankt zwischen 25 und 49 %. AC2 ist der einzige Cluster mit derart ausgeprägter, negativer Korrelation und einem ebenso ausgeprägten Wiederanstieg. Die Regelmäßigkeit des Musters weist auf eine zyklisch auftretende Grundwasserneubildungsdynamik hin.

Cluster AC3 zeigt gegenüber den beiden ersten Clustern zunächst eine deutlich langsamere Reaktion (Abbildung 24), die Korrelationskoeffizienten sinken im Laufe des ersten Halbjahres nur allmählich ab. Danach bleibt die Korrelation jedoch durchwegs niedrig, wobei die einzelnen Quellen im Detail unregelmäßige Fluktuationen zeigen. Im Unterschied zu den Cluster AC1 und AC2 ist weder eine halbjährige, negative Korrelation, noch ein Wiederanstieg der Korrelation gegen Ende der Jahresperiode zu erkennen. Insgesamt betrachtet liegt die Integrierte Autokorrelation mit 22 % daher zwischen den Clustern AC1 und AC2. Einzelne Quellen des AC3 weisen eine Integrierte Autokorrelation zwischen 13 und 37 % auf.

Abbildung 24: Die Ergebnisse der Clusteranalyse hinsichtlich ihrer Autokorrelation.



Quellen des **Clusters AC₄** zeigen eine äußerst träge Reaktion, auch nach einem Jahr ist die Quellschüttung noch stark positiv korreliert (Abbildung 24). Die Integrierte Autokorrelation liegt entsprechend hoch (64 %), einzelne Quellen zeigen eine Integrierte Autokorrelation zwischen 48 und 86 %. Keine dieser Quellen weist eine negative Korrelation auf.

Tabelle 4: Ergebnisse der Clusteranalyse der Autokorrelationsfunktion. Angegeben sind die Anzahl der Quellen pro Cluster, die Korrelationsdauer KD [Tage], die Reaktionszeit RZ [Tage] und die Integrierte Autokorrelation IAK [%] der Cluster-Mittellinie (Cluster) sowie deren Bereich aller Quellen jedes Clusters (Quellen).

| Cluster | Anzahl | KD (Cluster) | KD (Quellen) | RZ (Cluster) | RZ (Quellen) | IAK (Cluster) | IAK (Quellen) |
|----------------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| AKF Cluster AC1 | 42 | 75 | 32-175 | 43 | 4-83 | 14 | 4-24 |
| AKF Cluster AC2 | 29 | 86 | 67-117 | 70 | 49-96 | 35 | 25-49 |
| AKF Cluster AC3 | 19 | 232 | 93-318 | 116 | 67-217 | 22 | 13-37 |
| AKF Cluster AC4 | 6 | >365 | >365 | >365 | >365 | 64 | 48-86 |

Abbildung 25 zeigt, dass die Quellen des Clusters AC1 hauptsächlich in den Nördlichen Kalkalpen liegen. Niederschläge in den Nördlichen Kalkalpen sind relativ häufig und von geringer Intensität geprägt (Abbildung 26). Die Wasserspiegel in den assoziierten Grundwasserleitern reagieren rasch und intensiv auf die einzelnen Grundwasserneubildungsereignisse, ein typisches Verhaltensmuster von Karstquellen. Diese Dynamik aus Grundwasserneubildungspulsen und Aquiferen mit hohen Durchlässigkeiten spiegelt sich in der Autokorrelation wider. Das rasche Abklingen der Autokorrelation, gefolgt von unstrukturiertem Hintergrundrauschen, spiegelt die rasche Impulsweitergabe der Niederschlagsereignisse an die Quellen wider. Untergeordnet zeigt die Autokorrelation einen geringen Jahreszyklus mit einer negativen Amplitude bei $\tau \approx 180$ Tagen, gefolgt von einem Wiederanstieg ab $\tau > 200$ Tagen. In alpinen Einzugsgebieten ist während der Wintermonate eine geschlossene Schneedecke vorherrschend. Durch die vergleichbar niedrigen Seehöhen im Osten der Nördlichen Kalkalpen schmilzt hier die Schneedecke rascher ab und beeinflusst die Autokorrelation nur leicht.

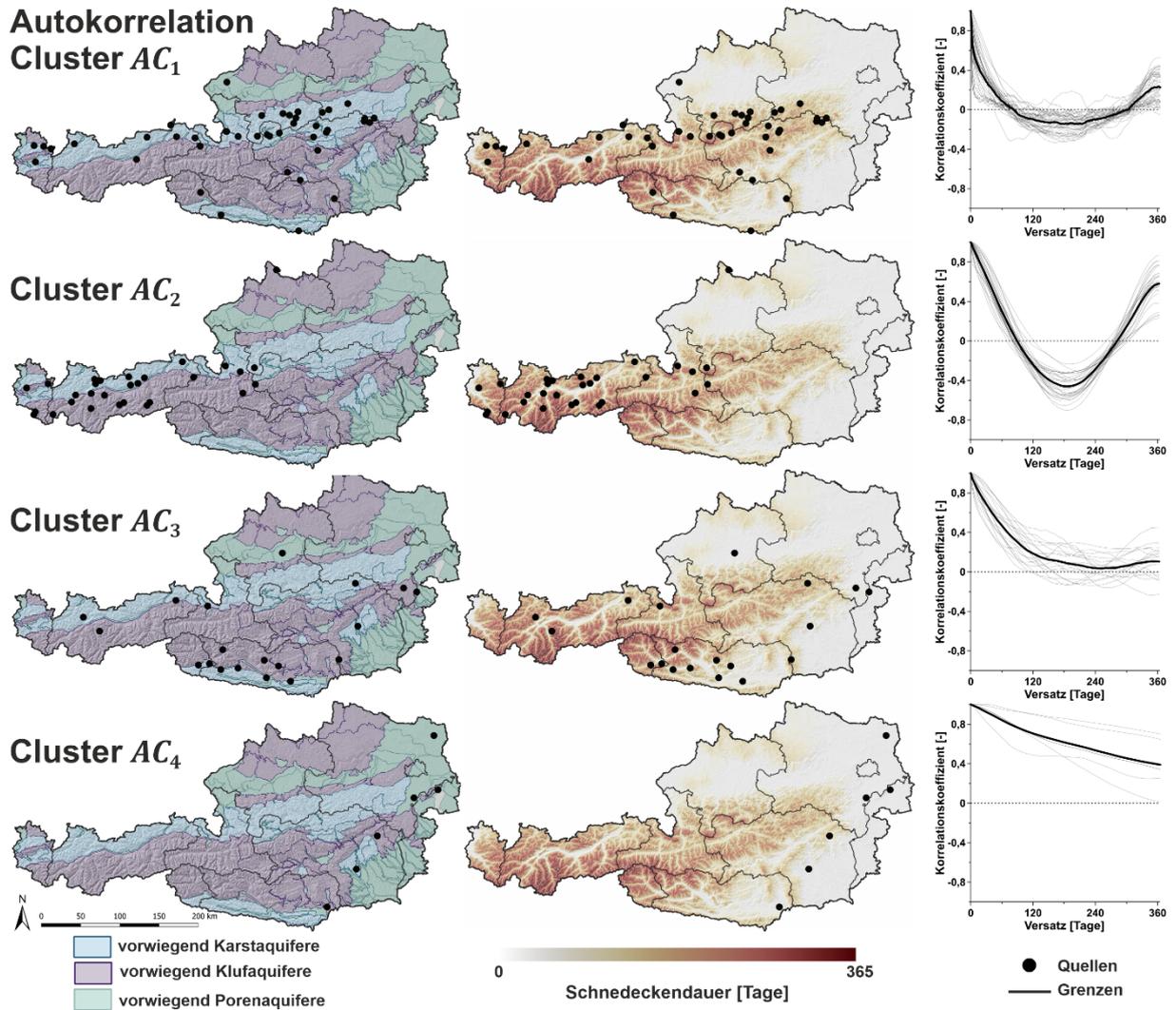
Die Quellen des Clusters AC2 liegen überwiegend in den Zentralalpen oder entwässern große Plateaugebirge der Nördlichen Kalkalpen (Abbildung 25). Das ermöglicht eine lange anhaltende Schneedecke (Abbildung 25) und mit steigenden Einzugsgebietshöhen auch einen größeren Anteil von Schnee im Gesamtniederschlag. Die einheitliche, sinusförmige Autokorrelation der Quellen im Cluster AC2 steht in Einklang mit der ausgeprägten Dynamik

der Schneedecke in schneedominierten Einzugsgebieten. Ein erheblicher Anteil dieser Quellen liegt in Regionen mit niedrigerer Niederschlagshäufigkeit (Abbildung 26). Die geologischen Gegebenheiten der Zentralalpen bedingen potenziell häufiger Kluftaquifere mit niedrigerer hydraulischer Durchlässigkeit, einzelne Regenereignisse werden daher tendenziell gedämpft an die Quellen weitergegeben (Abbildung 25). Beide Faktoren stärken Schnee als dominante Grundwasserneubildungskomponente und damit das einheitliche Erscheinungsbild der Autokorrelation aller Quellen des Clusters AC2.

Die Quellen des Clusters AC3 sind im Vergleich zu Cluster AC2 weniger von Schnee geprägt. Im Vergleich zu Cluster AC1 zeigen sie weniger häufige Niederschlagsereignisse (die ein unregelmäßiges Muster verursachen würden) an. Die dahinterstehenden Grundwasserleiter reagieren verzögert auf Grundwasserneubildungsereignisse, ihre Durchlässigkeit ist im Vergleich zu AC1 und AC2 etwas geringer. Die meisten Quellen dieses Clusters liegen in den Südlichen Kalkalpen (Abbildung 25). Im Vergleich zu den Quellmessstellen der Nördlichen Kalkalpen weisen die in den Südlichen Kalkalpen gelegenen Messstellen tendenziell geringdurchlässigere Grundwasserleiter auf (Abschnitt 3.3.1) und sind geprägt von intensiven, episodisch auftretenden Niederschlagsereignissen (Abbildung 26). Die Pufferkapazität des Aquifers sowie einzelne intensive Niederschlagsereignisse als dominante Grundwasserneubildungskomponenten führen zu einem vergleichbar langsameren Absinken der Autokorrelation (Leerlaufen des Speichers), gefolgt von einer niedrig bleibenden Korrelation ohne starkem Hintergrundrauschen.

Die Quellen im Cluster AC4 zeigen keinen saisonalen Zyklus (Schneedeckendynamik) und reagieren sehr langsam auf einzelne Grundwasserneubildungsereignisse (Abbildung 25). Dieses Verhalten ist für Quellen in niedrigeren Lagen (geringmächtige und unregelmäßig auftretende Schneedecke im Einzugsgebiet) und Grundwasserleiter mit tendenziell niedrigeren Durchlässigkeiten (Porengrundwasserleiter) typisch. Niederschlagsereignisse sind in den Regionen des Clusters AC4 vergleichsweise selten, was auf den kontinentalen Einfluss zurückgeht (Abbildung 26).

Abbildung 25: Räumliche Verteilung der Autokorrelations-Cluster AC1-AC4, verglichen mit großräumigen hydrogeologischen Einheiten (links) bzw. der durchschnittlichen Dauer der Schneedecke (rechts).



3.3.3 Quellgruppen

Die Clusteranalyse lieferte zwei Reihen von Clustern, die einerseits das saisonale Schüttungsverhalten zusammenfassen (Pardé-Cluster PC1-PC4, siehe Kapitel 3.3.1), andererseits die Reaktion der Quellen auf Grundwasserneubildungsereignisse beschreiben (Autokorrelations-Cluster AC1-AC4, siehe Kapitel 3.3.2). In diesem Kapitel werden die Zusammenhänge zwischen beiden Clusterreihen statistisch untersucht und typische Kombinationen von PC-Clustern und AC-Clustern identifiziert und zu Gruppen zusammengefasst.

Strukturierte Zusammenhänge zwischen den beiden Clusterreihen wurden mittels Kontingenztafel analysiert (Abbildung 27). Zunächst wurde für jede mögliche Cluster-Kombination der Erwartungswert E ihrer Schnittmenge anhand ihrer Randverteilungen (fett gedruckt) berechnet. Der Erwartungswert entspricht jeweils dem Produkt der beiden Randhäufigkeiten, geteilt durch die Gesamtzahl analysierter Quellen (96), und ist in jedem Feld der Kreuztabelle oben rechts angegeben (Abbildung 27). Beispielsweise erklärt bedeutet dies: der Erwartungswert $E(1,1)$ der Schnittmenge von PC1 (13 Quellen) und AC1 (42 Quellen) entspricht $E(1,1) = (13 \times 42) / 96 = 5,7$ Quellen. Bei völliger stochastischer Unabhängigkeit der beiden Clusterreihen voneinander liegt die tatsächlich beobachtete Besetzungszahl B (in Abbildung 27 groß und zentriert dargestellt) im Schnitt nahe bei ihrem Erwartungswert und weicht nur gelegentlich aufgrund zufälliger Schwankungen davon ab. Die relative Abweichung zwischen beobachteter (B) und erwarteter (E) Schnittmenge ist in Abbildung 27a farblich codiert – braune Farben zeigen überdurchschnittlich häufige Kombinationen, blaue Farben unterdurchschnittlich häufige Kombinationen, die Farbintensität gibt die Stärke der Abweichung an.

Das deutlich erkennbare Farbmuster in Abbildung 27a legt einen strukturierten Zusammenhang zwischen beiden Clusterreihen nahe. Aufgrund der teils geringen Besetzungszahl wurde ein randomisierter χ^2 Test mittels Monte Carlo Simulation mit 10000 Wiederholungen durchgeführt (Hope, 1968; Hedderich und Sachs, 2018; Helsel et al., 2020), der einen strukturierten Zusammenhang zwischen beiden Clustergruppen nahelegt (p -Wert = $10E-4$). Dieses Ergebnis spricht eindeutig gegen die stochastische Unabhängigkeit beider Clustergruppen, es liegt stattdessen ein strukturierter Zusammenhang vor. Überdurchschnittlich häufige Kombinationen von Clustern ergeben sich für $AC1 \cap PC1$ bzw. $AC1 \cap PC2$ (Gruppe I), für $AC2 \cap PC3$ (Gruppe II), $AC3 \cap PC4$ (Gruppe III) und für $AC4 \cap PC4$ (Gruppe IV) (Abbildung 27a). Diese Gruppen werden daher im Folgenden als typische Quellgruppen betrachtet und sind in Abbildung 27b hervorgehoben. Zusammen machen sie 64 der 96 analysierten Quellen aus, die verbleibenden 32 Quellen weisen untypische Cluster-Kombination auf.

Abbildung 27: (a) Kreuztabelle (Kontingenztafel), in der Autokorrelations-Cluster (AC) und Pardé-Cluster (PC) gegenübergestellt werden. (b) Überdurchschnittlich häufig auftretende Kombinationen von AC und PC Clustern werden zu typischen Quellgruppen zusammengefasst: Gruppe I (blau), Gruppe II (rot), Gruppe III (gelb), Gruppe IV (grün).

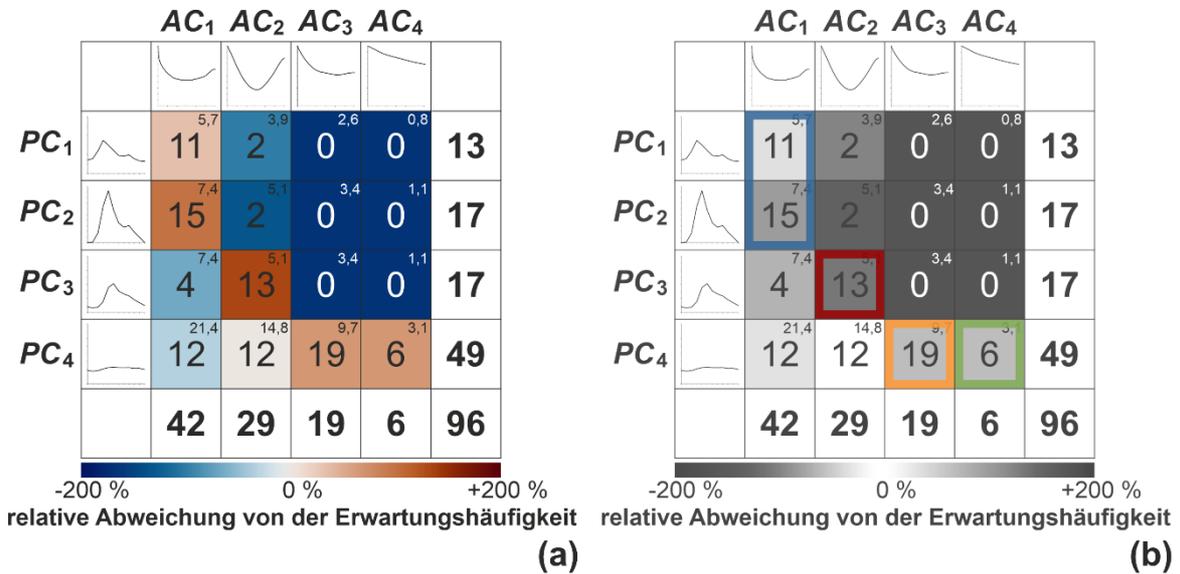
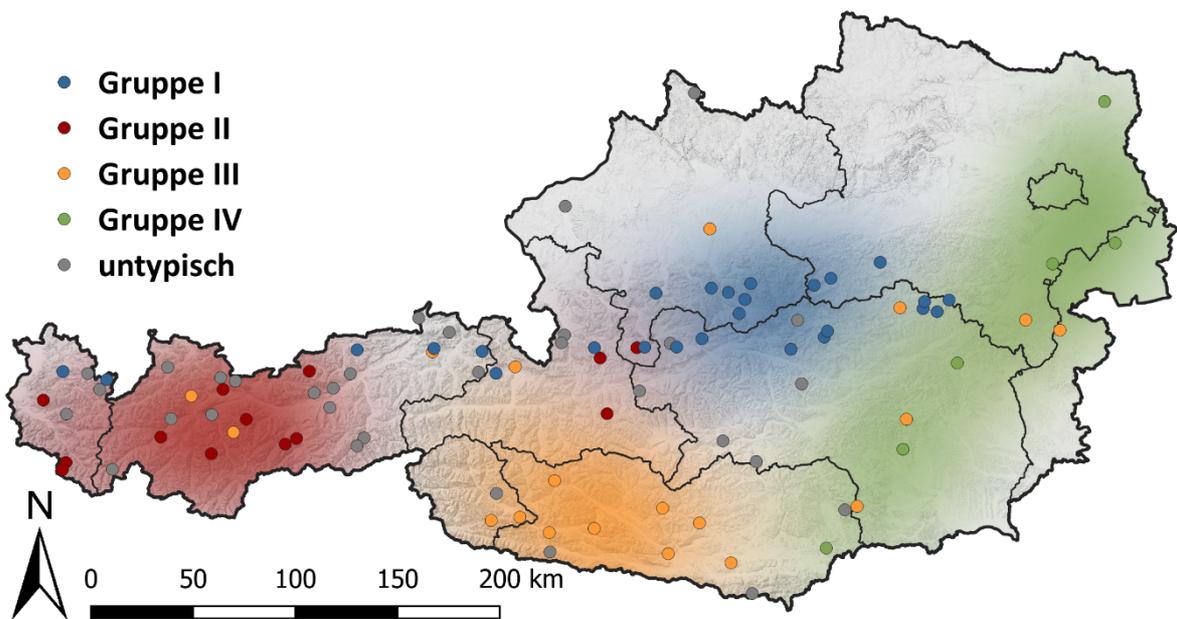


Abbildung 28: Die räumliche Verteilung der Quelltypen I-IV. Bereiche mit hoher Konzentration einer bestimmten Quellgruppe sind als Dichtekarte hervorgehoben (Kerndichteschätzer).

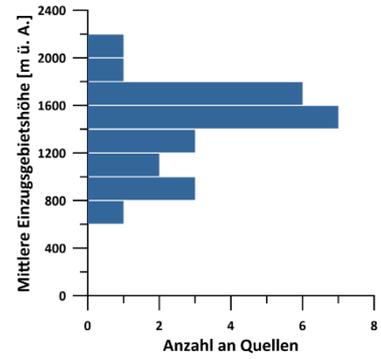
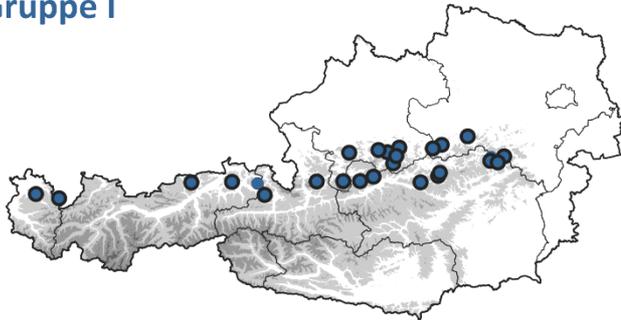


Die räumliche Verteilung der Quellgruppen I-IV weist klare geographische Schwerpunkte für jede der vier Quellgruppen aus (Abbildung 28): Gruppe I (blau) weist einen Schwerpunkt im Osten der Nördlichen Kalkalpen auf (Oberösterreich, Niederösterreich, Steiermark), ist jedoch in den gesamten Nördlichen Kalkalpen vertreten. Gruppe II (rot) zeigt einen Schwerpunkt in Nordtirol und in den hochgelegenen Gebirgsgruppen. Gruppe III (gelb) ist vor allem im Süden Österreichs konzentriert, besonders in Kärnten, streut jedoch stark über das gesamte Bundesgebiet. Gruppe IV (grün) tritt in den östlichen Niederungen und entlang des Ostrandes der Alpen auf.

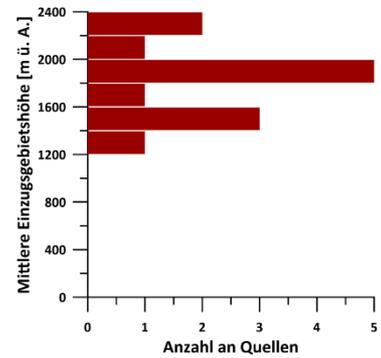
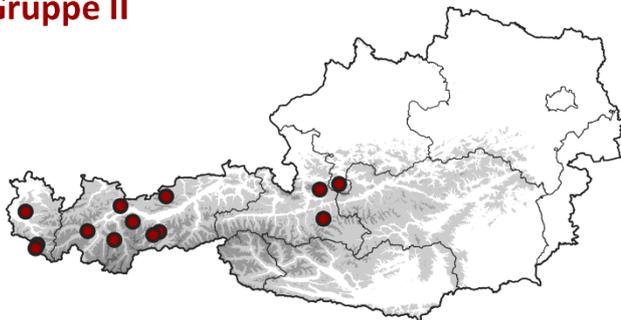
Hinsichtlich der mittleren Einzugsgebietshöhe ihrer Quellen weisen die Gruppen I-IV ebenfalls deutlich unterschiedliche Eigenschaften auf. Abbildung 29 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Einzugsgebietshöhen als Histogramme, die im Wesentlichen mit der großmaßstäblichen Topographie Österreichs übereinstimmt. Die mittlere Einzugsgebietshöhe wurde für die Quellen anhand von Isotopendaten abgeschätzt (BMLFUW, 2021c), wie in der Infobox „Mittlere Seehöhe von Quelleinzugsgebieten“ erläutert wird. Es zeigt sich, dass Quellen der Gruppe II im Schnitt besonders hochgelegene Einzugsgebiete aufweisen, während die Quellen der Gruppe IV auf die niedrig gelegenen Regionen Österreichs beschränkt sind. Die Quellen der Gruppen I und III liegen dazwischen, bei etwas unterschiedlicher Häufigkeitsverteilung innerhalb der jeweiligen Gruppe (Abbildung 29).

Abbildung 29: Räumliche Verteilung der typischen Quellgruppen I-IV und Häufigkeitsverteilung der mittleren Einzugsgebietshöhe innerhalb jeder Gruppe.

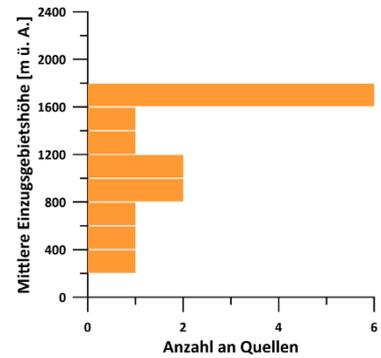
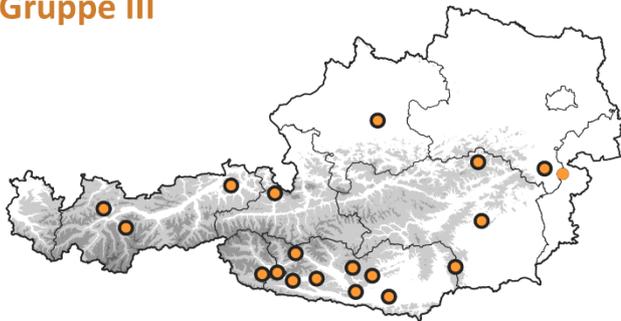
(a) Gruppe I



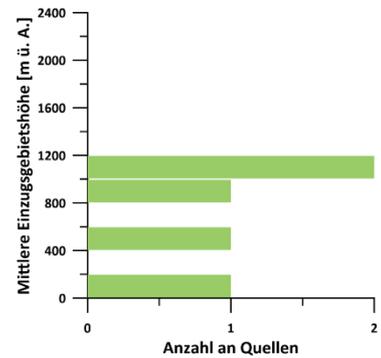
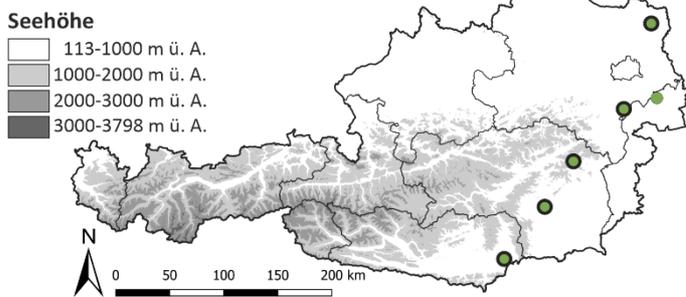
(b) Gruppe II



(c) Gruppe III



(d) Gruppe IV



- Abschätzung der mittleren Einzugsgebietshöhe liegt vor
- keine Abschätzung der mittleren Einzugsgebietshöhe

Infobox: Mittlere Seehöhe von Quelleinzugsgebieten

Isotopenverhältnisse in Quellwässern sind wie ein Fingerabdruck, der Rückschlüsse auf die mittlere Seehöhe des Einzugsgebiets und die Verweildauer im Grundwasserleiter zulässt. Für jede Quelle wurde die mittlere Höhenlage des jeweiligen Einzugsgebiets einheitlich bestimmt. Die Ergebnisse sind in BMLRT (2021c) und Kainz et al. (2022) zusammengefasst. Im Folgenden soll die Methodik kurz abgebildet werden, genauere Erläuterungen können den zitierten Berichten entnommen werden.

Innerhalb des Wasserkreislaufs verändern sich die Isotopenverhältnisse von Wasserstoff und Sauerstoff durch chemisch/physikalische Prozesse. Diese Fraktionierung ist temperaturabhängig und führt zu einem „Höheneffekt“ von Niederschlagswässern in alpinen Regionen. Steigen feuchte Luftmassen entlang des Höhengradienten auf und regnen ab, werden zuerst schwere Isotope durch die Niederschläge ausgewaschen. Das bedeutet, je höher die Luftmassen aufsteigen, desto leichter sind die Isotope im entstehenden Niederschlag. Ist der Höhengradient der Niederschlag-Isotopensignatur in der Region bekannt, können in Kombination mit der Quellen-Isotopensignatur Rückschlüsse auf die mittlere Seehöhe des Quelleinzugsgebiets gezogen werden.

Die Abschätzung der mittleren Seehöhe unterliegt jedoch Unsicherheiten, dies ist beispielsweise der Fall, wenn der herangezogene Höhengradient des Isotopensignals im Niederschlag nicht die Neubildungsbedingungen im spezifischen Quelleinzugsgebiet widerspiegelt. Des Weiteren können sich mehrere Effekte überlagern und auf die Isotopensignatur im Quellwasser wirken. Variationen der Niederschlag-Isotopensignatur können z. B. durch lokal unterschiedliche Niederschlagsbedingungen, variable Herkunft der Luftmassen, sekundäre Verdunstungsprozesse oder saisonale Effekte entstehen. Die Isotopensignatur der Quellwässer setzt sich aus mehreren Grundwasserneubildungskomponenten zusammen und unterliegt ebenfalls saisonalen Änderungen. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass Verdunstungseffekte und Fraktionierung bei Schneeschmelze die Isotopensignatur von Quellwässern beeinflussen und das Höhensignal überlagern können. Die abgeleiteten mittleren Seehöhen der Einzugsgebiete sind daher als Orientierungswerte zu interpretieren, die mit Hilfe weiterer Methoden (wie

beispielsweise Markierungsversuchen, Niederschlags-Abfluss-Modellen, Erfahrungswerten) optimiert werden können.

Um die mittlere Einzugsgebietshöhe abzuschätzen, wurde jeder Quelle eine nächstgelegene Niederschlagsreferenzstation aus dem GZÜV-Isotopenmessnetz (ANIP) zugewiesen. Aus dem langjährigen, niederschlagsgewichteten Mittel des Sauerstoff-18-Verhältnisses ($\delta^{18}\text{O}$) an der Niederschlagsreferenzstation und dem Mittelwert des $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisses an der Quelle wurden anhand des $\delta^{18}\text{O}$ -Höhengradienten die mittlere Einzugsgebietshöhe der Quelle abgeschätzt. Hierfür wurde die Neuberechnung des Höheneffekts mit dem Gradienten von $-0,23 \text{ ‰} \pm 0,03 \text{ ‰} \delta^{18}\text{O}$ pro 100 m für die nördlichen klimatologischen Teilregionen verwendet (BMLRT, 2021c). Der Höhengradient des Isotopensignals im Niederschlag beträgt für die südlichen klimatologischen Teilregionen Österreichs (Kärnten) auf Basis der verfügbaren Niederschlagsdaten $-0,09 \text{ ‰} \pm 0,023 \text{ ‰} \delta^{18}\text{O}$ pro 100 m Höhenunterschied.

Quellen mit rascher Reaktion und geringer Autokorrelation (AC1) weisen in der Regel eine ausgeprägte Saisonalität auf (PC1, PC2). Die 26 Quellen der Gruppe I zeigen diese typische Kombination (blaue Umrandung in Abbildung 27b). Alle Quellen der Gruppe I liegen in den Nördlichen Kalkalpen und damit auch im Einflussbereich der Nordstau-Niederschläge (Abbildung 29a, Abbildung 30). Durch die hohe Durchlässigkeit der Karstaquifere reagiert die Quellschüttung der Quellen aus Gruppe I rasch auf die häufigen Niederschlagsereignisse, die verhältnismäßig weniger intensiv als jene in den Südlichen Kalkalpen sind (rasches Absinken und Hintergrundrauschen der Autokorrelation). Die mittleren Seehöhen der Einzugsgebiete der meisten Quellen liegen im Bereich 1200-1800 m ü. A. (Abbildung 29a). Im Winter sind diese Einzugsgebiete von einer durchgehenden Schneedecke dominiert, das spiegelt sich in einem ausgeprägten Jahresgang des Pardé-Koeffizienten sowie einem untergeordneten Jahreszyklus in der Autokorrelation wider.

Quellen mit ausgeprägt sinusförmiger Autokorrelationsfunktion (AC2) weisen in der Regel eine deutliche Saisonalität mit langer Winterperiode und spät einsetzender Schneeschmelze auf (Pardé-Cluster PC3). Die 13 Quellen der Gruppe II zeigen damit sowohl hinsichtlich ihrer Saisonalität (langer Basisabfluss durch lange Schneedeckendauer) als auch hinsichtlich ihrer Autokorrelation (deutliche Jahreszyklus) einen dominanten Einfluss der Schneedecke im Einzugsgebiet auf die Quellschüttung an (rote Umrandung in Abbildung 27b). Die Quellen dieser Schnee-dominierten Gruppe liegen in den höchsten Anteilen der Zentralalpen oder entwässern hohe Plateaumassive der Nördlichen Kalkalpen (Abbildung

29b). Diese Gebiete zeichnen sich einerseits durch niedrige Jahrestemperatur und dadurch langer Schneedeckendauer (große Höhe) aus (Abbildung 30), andererseits durch geringe Niederschlagssummen (Inneralpine Trockenzone, Abbildung 31).

Abbildung 30: Räumliche Verteilung der Quellgruppen I-IV, verglichen mit großräumigen hydrogeologischen Einheiten (links) bzw. der durchschnittlichen Dauer der Schneedecke (rechts).

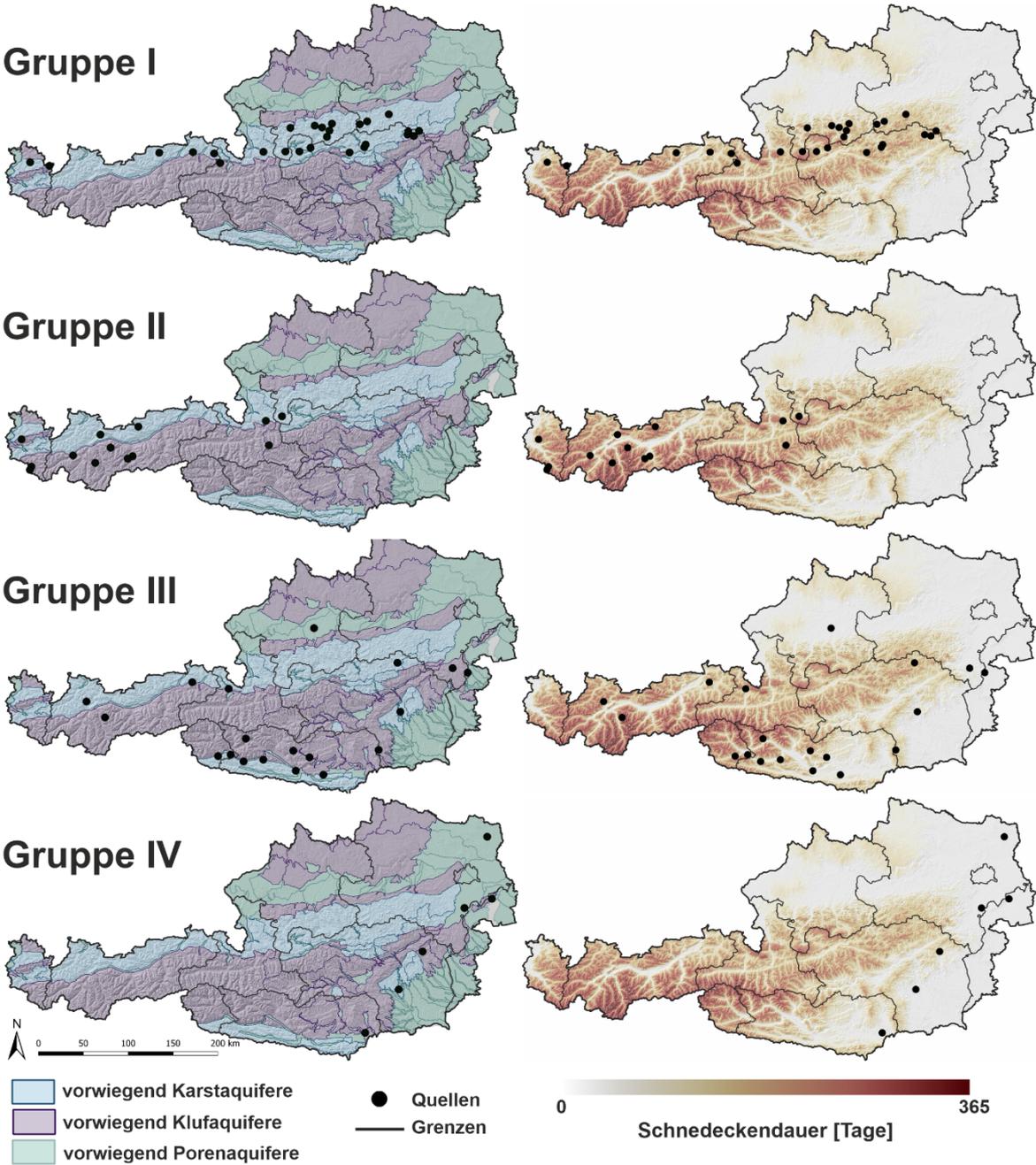
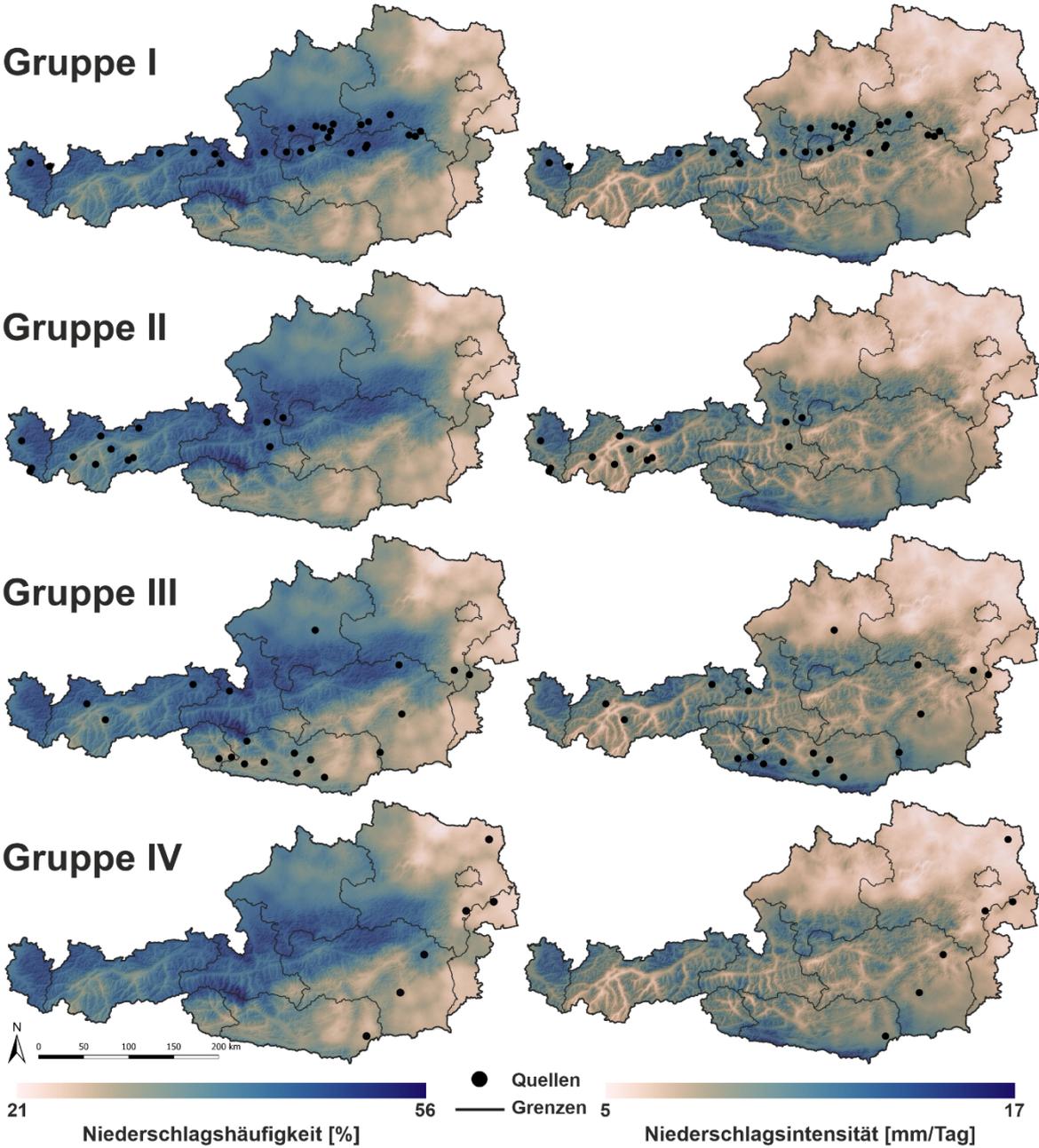


Abbildung 31: Räumliche Verteilung der Quellgruppen I-IV, verglichen mit der durchschnittlichen Niederschlagshäufigkeit (links) bzw. der durchschnittlichen Intensität von Niederschlagsereignissen (rechts)

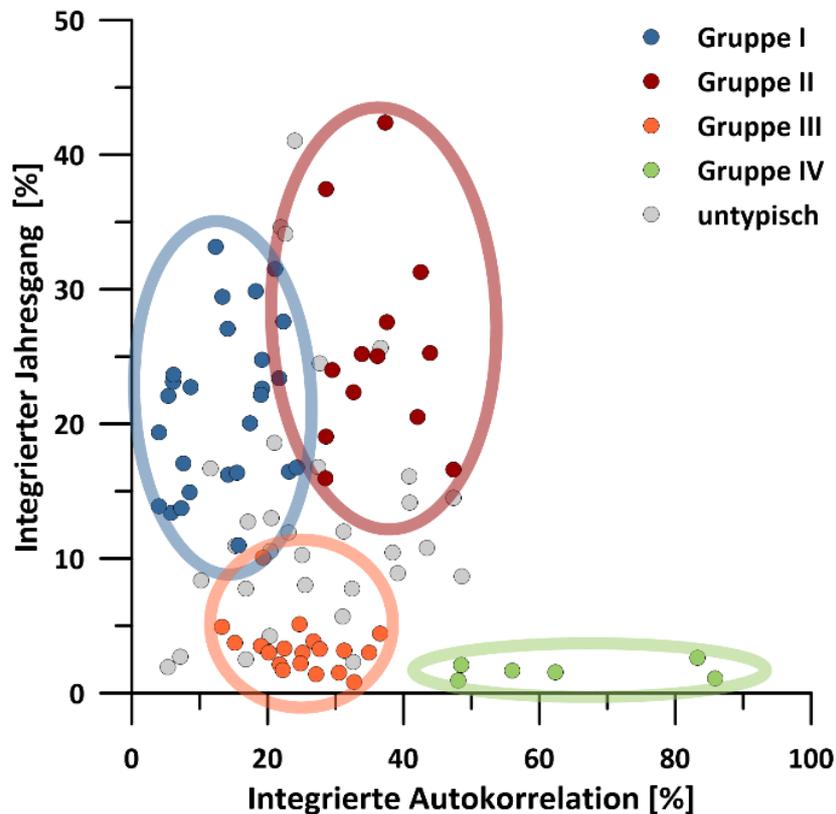


Quellen mit mäßig ausgeprägter Autokorrelation und verzögerter Reaktion (AC3) fallen stets mit geringer Saisonalität zusammen (PC4). Die 19 Quellen mit dieser Kombination bilden die Gruppe III (gelbe Umrandung in Abbildung 27b). Räumlich weisen diese Quellen eine Konzentration im Süden Österreichs auf, sind jedoch stärker als alle anderen Gruppen über das Bundesgebiet verstreut (Abbildung 28, Abbildung 29c). Häufig liegen die mittleren Einzugsgebiete daher in ähnlichen Höhen wie die der Quellen der Gruppe I in den Nördlichen Kalkalpen (1600-1800 m ü. A.), einige Quellen besitzen jedoch auch eine sehr viel niedrigere mittlere Seehöhe des Einzugsgebiets (300-600 m ü. A.). Im Vergleich zu den Quellen der Nördlichen Kalkalpen (Gruppe I) werden die Schneeschmelzpulse durch die dolomitisch geprägten Aquifere mit geringerer hydraulischer Durchlässigkeit in den Südlichen Kalkalpen stärker abgepuffert. Hinsichtlich der Niederschlagsbedingungen sind die Südlichen Kalkalpen von eher seltenen, aber intensiven Niederschlagsereignissen geprägt (Abbildung 31). Dadurch werden die Aquifere in den langen, schneefreien Perioden durch einzelne starke Niederschlagspulse angeregt, zwischen denen ein langsames Leerlaufen (ohne wesentliche erneute Grundwasserneubildung) möglich ist. Diese Perioden des langsamen Leerlaufens sowie die Puffereigenschaften der dolomitischen Einzugsgebiete sind verantwortlich für die langsam absinkende Autokorrelationskurve sowie das fehlende Hintergrundrauschen der Autokorrelation.

Quellen mit sehr verzögerter Reaktion und hoher Autokorrelation (AC4) weisen stets einen sehr geringen Jahresgang auf (PC4). Die 6 Quellen der Gruppe IV (grüne Umrandung in Abbildung 27b) sind auf niedrig gelegene Regionen im Osten Österreichs beschränkt (Abbildung 29d). Diese Gebiete zeichnen sich durch eine kurz andauernde Winterschneedecke und die weite Verbreitung von Porengrundwasserleitern mit vergleichbar niedrigen hydraulischen Durchlässigkeiten aus (Abbildung 30). Im östlichen Bereich Österreichs sind Grundwasserneubildungspulse durch Niederschlag zudem weniger intensiv und seltener (Abbildung 31).

Abbildung 32 stellt den Integrierten Jahresgang (IJG, Maß für die Saisonalität) der Integrierten Autokorrelation (IAK, Maß für die Korrelation der Schüttungsganglinie) nach Quellgruppen gegenüber. Zwei Drittel aller Quellen (64 von 96 Quellen) fallen in eine der vier typischen Gruppen und weisen ein strukturiertes Muster mit deutlich voneinander abgegrenzten Bereichen auf. Die verbleibenden 32 Quellen sind in Abbildung 32 als „untypisch“ ausgewiesen und zeigen keine klare Tendenz.

Abbildung 32: Das Verhältnis von Integriertem Jahresgang (IJG) zu Integrierter Autokorrelation (IAK), aufgeschlüsselt nach Quellgruppen I-IV.



Quellen der Gruppen I und II unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihres Reaktionsverhaltens auf Grundwasserneubildungspulse (Integrierte Autokorrelation) und zeigen eine ähnlich breit streuende Saisonalität (Integrierter Jahresgang), wobei jene der Gruppe II im Schnitt von einem etwas stärkeren Jahresgang geprägt sind (Abbildung 32). Quellen der Gruppen III heben sich bezüglich ihres Reaktionsverhaltens auf Grundwasserneubildungspulse ebenfalls deutlich voneinander ab, wobei die Integrierte Autokorrelation zwischen 13 und 37 % (Gruppe III) bzw. 49 und 83 % (Gruppe IV) liegt (Abbildung 32). Insgesamt sind Quellen mit erkennbarem Jahresgang (IJG > 5 %) klar an eine Obergrenze der Reaktionszeit auf Grundwasserneubildungspulse gebunden (IAK < 50 %).

In weiterer Folge werden die identifizierten Gruppen (I-IV) mit der bestehenden Quellklassifikation nach BMLFUW (2005) verglichen. Anschließend werden der Integrierte Jahresgang, die Integrierte Autokorrelation und die mittlere Einzugsgebietshöhe der jeweiligen

Quellen nach Gruppen zusammengefasst und untereinander verglichen. Die Infobox „Gegenüberstellung der Quellgruppen I-IV“ erläutert den Hintergrund der vergleichenden Analyse.

Abbildung 33 zeigt die Verteilung der Quelltypen Karstquelle, verdeckte Karstquelle, Kluftquelle, Hangschuttquelle und Porengrundwasserquelle (BMLFUW, 2005) für jede der Quellgruppen I-IV. Es zeigt sich, dass unterschiedliche Quelltypen dominant in den Quellgruppen vorliegen (Abbildung 34). Deutlich wird, dass Gruppe I von Karstquellen dominiert wird, während alle übrigen Quelltypen unterrepräsentiert sind. Gruppe II weist überdurchschnittlich viele verdeckte Karstquellen und Kluftquellen auf. Gruppe III ist besonders deutlich von Kluftquellen geprägt. In Gruppe IV treten dagegen Porengrundwasserquellen überdurchschnittlich häufig auf. Diese Zahlen sind vor dem Hintergrund geringer absoluter Anzahlen und geringer statistischer Evidenz zu betrachten (Abbildung 33). Die statistische Evidenz beruht auf einem χ^2 -Test (Kapitel 2.4) mit einem p-Wert von 0,08.

Infobox: Gegenüberstellung der Quellgruppen I-IV

Im Unterschied zur Quellklassifikation nach BMLFUW (2005) erfolgte die Ausweisung von Quellgruppen (Typ I-IV) nach statistischen Eigenschaften der Quellschüttungsdynamik (Clusteranalyse der Kenngrößen Saisonalität und Autokorrelation). Um die Plausibilität der resultierenden Quellgruppen I-IV zu bewerten, wurde die Verteilung der Quellen innerhalb jeder Gruppe einer statistischen Analyse unterzogen. Zunächst wurde für mehrere Quelleigenschaften (Quelltyp nach BMLFUW (2005), mittlere Einzugsgebietshöhe, Integrierte Autokorrelation und Integrierter Jahresgang) untersucht, ob statistisch signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen bestehen. Die Bewertung erfolgte dabei je nach Art der Eigenschaft unterschiedlich:

Hinsichtlich des Quelltyps nach BMLFUW (2005) wurden strukturierte Zusammenhänge zwischen den Quellgruppen I-IV und den fünf Quelltypen nach BMLFUW (2005) mittels Kontingenztafelanalyse untersucht (Kapitel 2.4). Dabei wurde die statistische Signifikanz eines strukturierten Zusammenhangs mittels χ^2 -Test überprüft (Helsel et al., 2020), die relative Abweichung vom Erwartungswert wurde für jede Quellgruppe in Form von Balkendiagrammen ausgewiesen (Abbildung 34). Aufgrund der geringen Besetzungszahl wurde der

Test randomisiert mittels Monte Carlo Simulation mit 10000 Wiederholungen durchgeführt (Hope, 1968; Hedderich und Sachs, 2018).

Hinsichtlich mittlerer Einzugsgebietshöhe, Integriertem Jahresgang und Integrierter Autokorrelation erfolgte die Analyse in zwei Schritten (Helsel et al., 2020): (a) Zunächst wurde mittels Kruskal-Wallis Test bewertet, ob die Eigenschaften gleichmäßig zwischen allen Gruppen verteilt sind oder ob signifikante Unterschiede bestehen (Kruskal und Wallis, 1952). Sofern solche Unterschiede bestätigt wurden, wurden (b) paarweise Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen mittels Rangsummentest untersucht (Wilcoxon, 1945; Mann und Whitney, 1947). Die Größe der Abweichung zwischen einzelnen Gruppen wurde (c) mittels Hodges-Lehman-Schätzwert bewertet (Hodges und Lehman, 1963). Diese Methoden (Kruskal-Wallis Test, Rangsummentest und Hodges-Lehman-Schätzwert) zeichnen sich dadurch aus, dass sie keine Annahmen über die Verteilung der untersuchten Werte voraussetzen und daher robust genug für die Zwecke dieser Studie sind (Hollander et al., 2014; Helsel et al., 2020). Die Ergebnisse sind für jede Quelleigenschaft in einer Matrix zusammengefasst, deren Diagonale die Mediane jeder Gruppe angibt (weiß), die obere Hälfte die Signifikanz der paarweisen Unterschiede (p-Werte, farblich rot codiert), die untere Hälfte die Größe der paarweisen Unterschiede (Differenzen, farblich blau codiert). Die Ergebnisse wurden in Kurznotation zusammengefasst, wobei „I > II“ auf signifikante Unterschiede zwischen Gruppe I und Gruppe II hinweist; „I = II“ zeigt dagegen an, dass keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Gruppe I und II nachgewiesen werden konnten (Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$).

Abbildung 33: Quelltypen nach BMLFUW (2005) Klassifikation in den statistisch ausgewiesenen Gruppen I-IV.

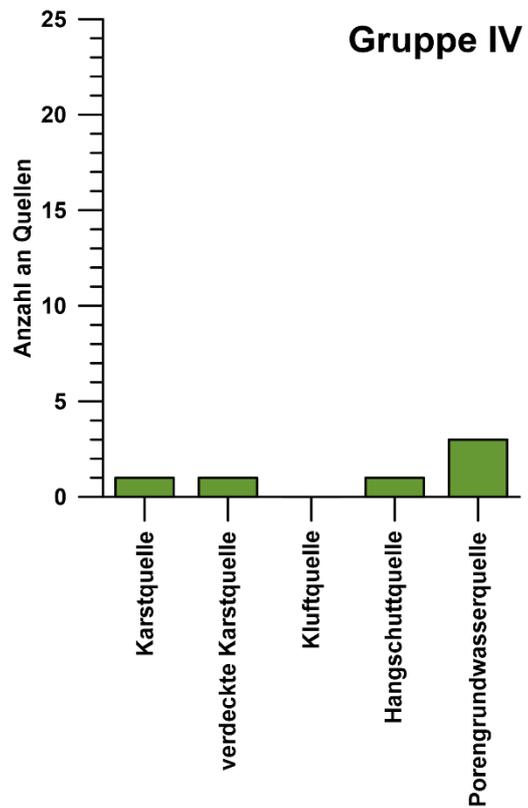
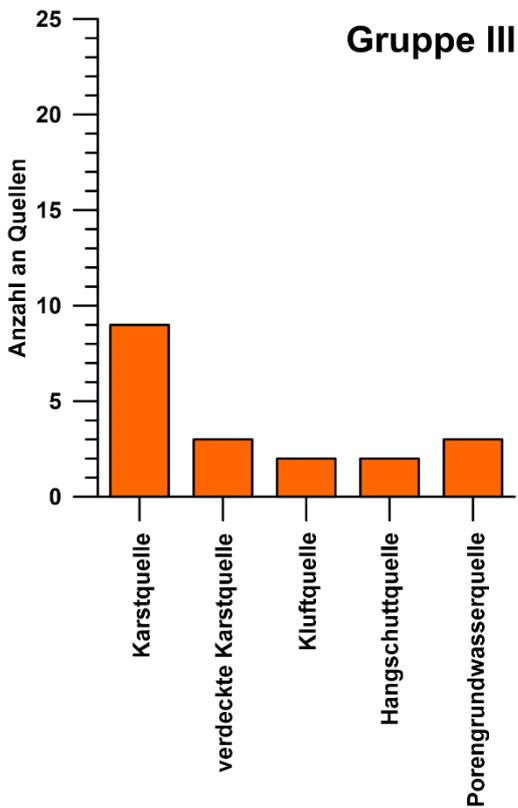
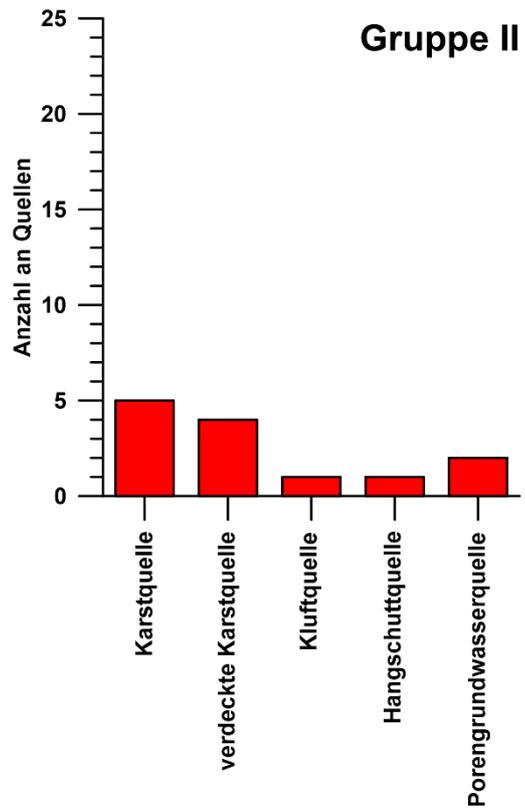
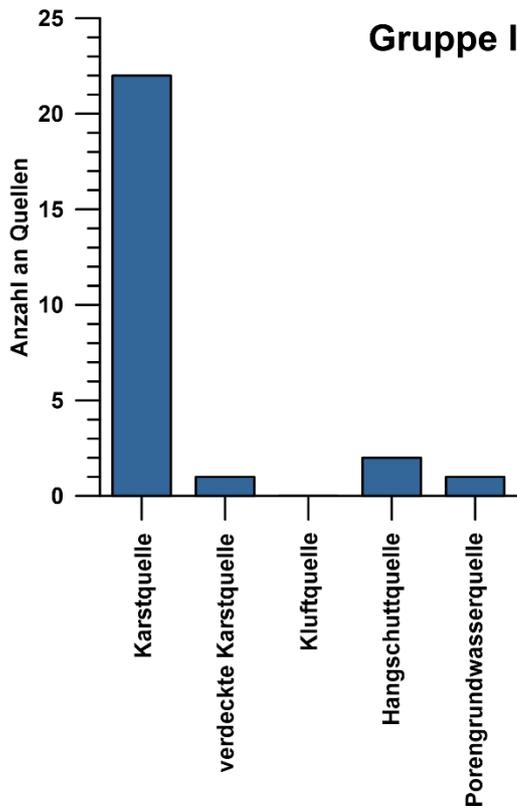


Abbildung 34: Abweichungen der Quelltypen nach BMLFUW (2005) in den einzelnen Gruppen von der durchschnittlichen Verteilung in Österreich.

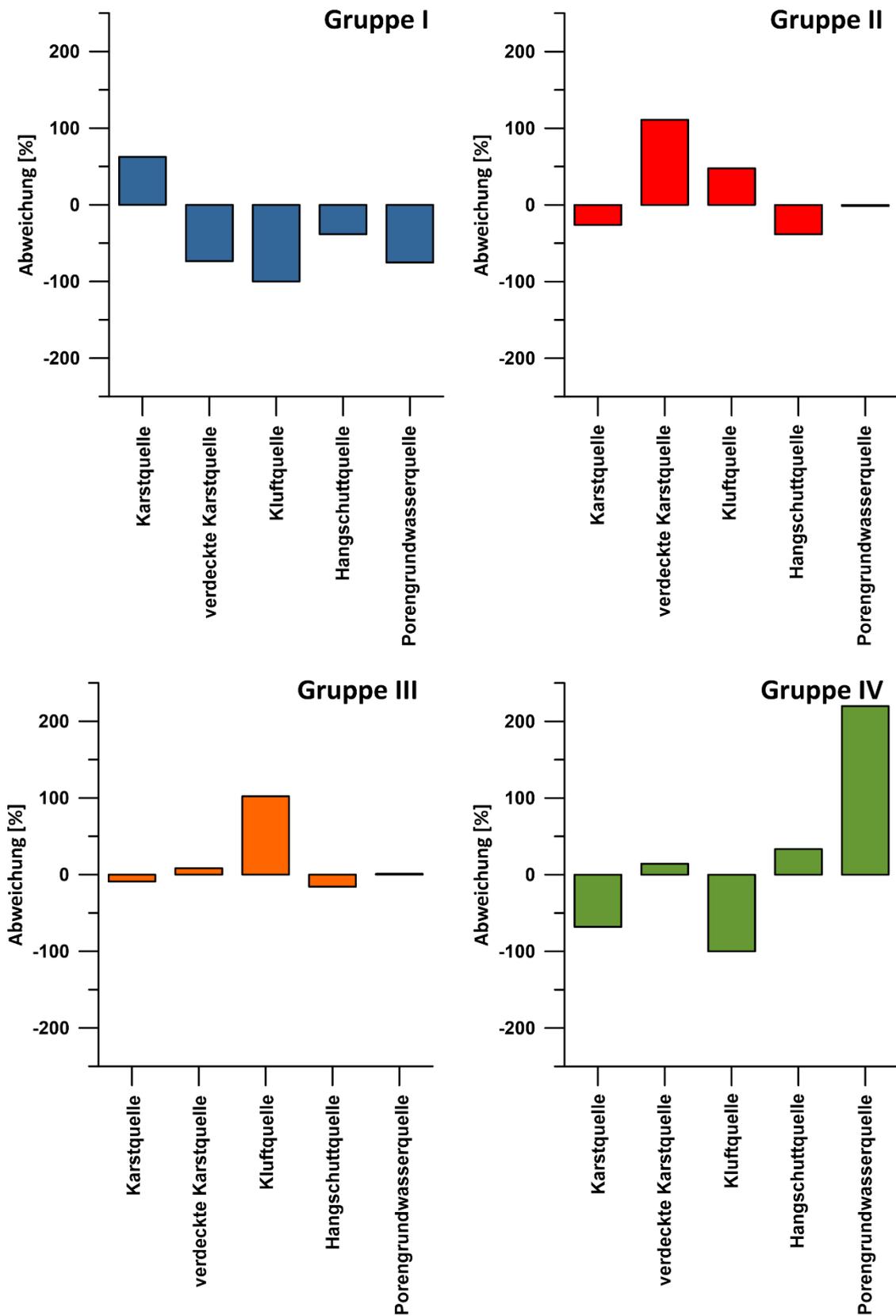


Abbildung 35a stellt den Integrierten Jahresgang der Quellen nach Gruppen gegenüber, Abbildung 35b stellt die paarweisen Unterschiede zwischen den Gruppen zusammen. Insgesamt ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (p-Wert des Kruskal-Wallis Tests = $3,47E-10$). Die Quellen der Gruppen I und II (Median des Integrierten Jahresganges 22 % in Gruppe I bzw. 25 % in Gruppe II) zeigen signifikant höhere saisonale Schwankungen als die Quellen der Gruppe III (Median 3 %) bzw. der Gruppe IV (Median 2 %). Insgesamt ergibt sich damit für den Integrierten Jahresgang der Gruppen zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$: $I = II > III > IV$. Dies steht im Einklang mit den überrepräsentierten Karstquellen und verdeckten Karstquellen in diesen beiden Gruppen.

Abbildung 35. Integrierter Jahresgang. (a) Boxplots (b) Statistische Auswertung.

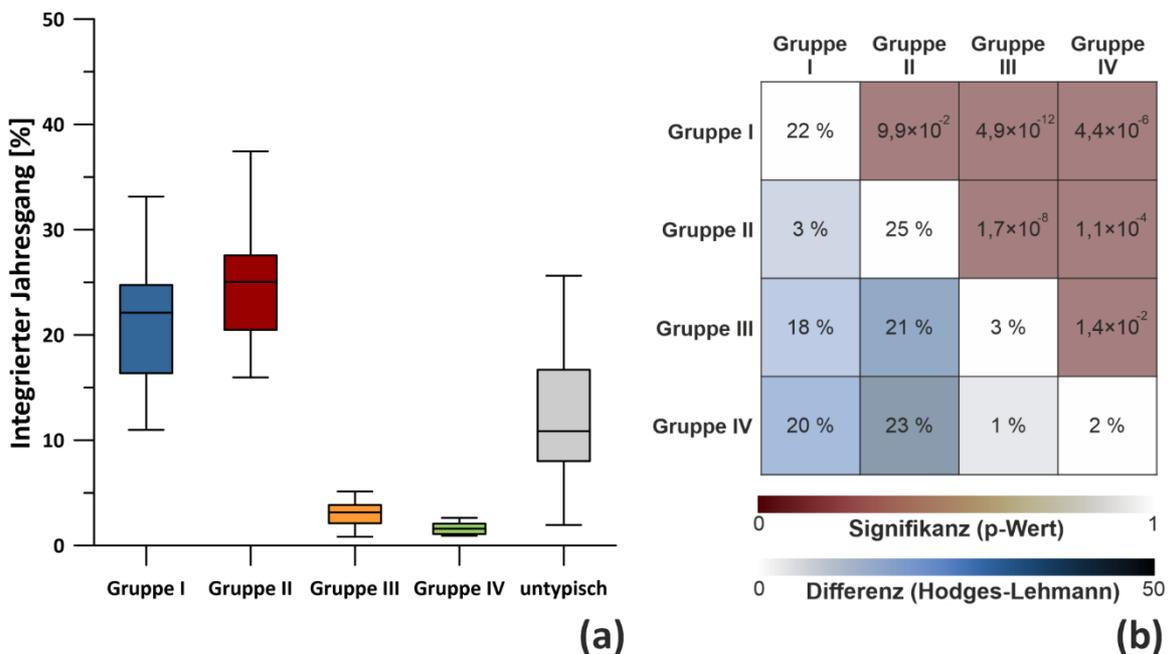


Abbildung 36a stellt die Integrierte Autokorrelation der Quellgruppen zusammen, die ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen aufweist (p-Wert des Kruskal-Wallis Tests = $2,29E-10$). Auch die paarweisen Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen sind stets signifikant (zum 5 % Niveau). Besonders deutlich zeigt sich die träge Reaktion der Quellgruppe IV (Median der Integrierten Autokorrelation 59 %). Die Quellen der Gruppe II weisen dagegen bereits erheblich niedrigere Werte der Integrierten Autokorrelation auf (Median 36 %). Noch rascher reagieren die Quellen der Gruppe III auf Neubildungsereignisse (Median 25 %). Die stärkste Reaktion (niedrigste Integrierte Autokorrelation) weisen die Quellen der Gruppe I auf (Median 14 %). Insgesamt ergibt sich damit für die Integrierte Autokorrelation der Gruppen zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$: $IV > II > III > I$.

Abbildung 36. Integrierte Autokorrelation. (a) Boxplots (b) Statistische Auswertung.

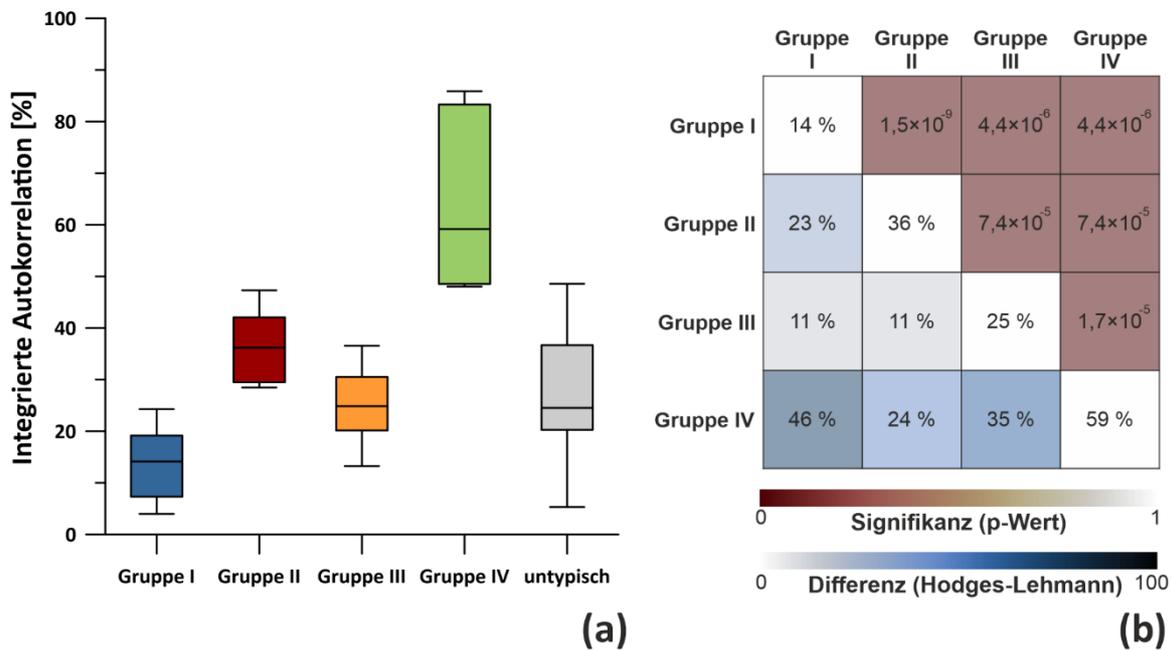


Abbildung 37a vergleicht die mittleren Einzugsgebietshöhen der Quellen, zusammengefasst nach Gruppen I-IV. Die mittleren Einzugsgebietshöhen wurden vom BMLRT (2021c) anhand von Isotopendaten ermittelt, die Hintergründe sind in der Infobox „Mittlere Seehöhe von Quelleinzugsgebieten“ erläutert. Es ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$), wie der Kruskal-Wallis Tests nachweist (p-Wert $6,4E-04$). Die Signifikanzniveaus und absoluten Differenzen zwischen den einzelnen Gruppen sind in Abbildung 37b ausgewiesen. Die Quellen der Gruppe II weisen im Schnitt die höchsten Einzugsgebiete auf (Median 2000 m ü. A.) und liegen signifikant höher als die Einzugsgebiete der Gruppen I und III (zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$). Sie liegen damit im Schnitt etwa 400 m höher als die Quelleinzugsgebiete der Gruppen I und III sowie 650 m höher als die Einzugsgebiete der Gruppe IV. Während die Quelleinzugsgebiete der Gruppen I (Median 1530 m ü. A.) und III (Median 1605 m ü. A.) eine ähnliche Höhenlage aufweisen, liegen die Quellen der Gruppe IV (Median 1000 m ü. A.) in deutlich niedrigeren Gebieten. Insgesamt ergibt sich damit für die mittleren Einzugsgebietshöhen der Quellgruppen zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$: $II > I = III > IV$.

Abbildung 37. Mittlere Quelleinzugsgebietshöhe. (a) Boxplots (b) Statistische Auswertung.

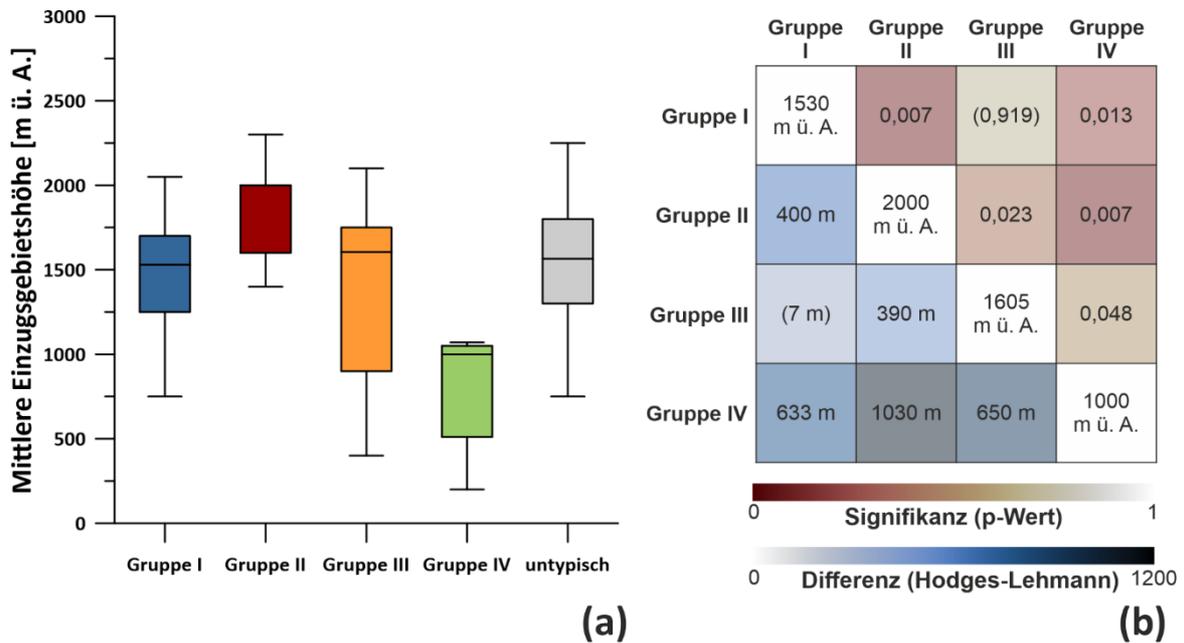


Tabelle 5 ordnet die 96 analysierten Quellen den einzelnen Clustern (Autokorrelations-Cluster AC, Pardé-Cluster PC) sowie den daraus gebildeten Quellgruppen I-IV zu. Zusätzlich ist für jede Quelle die traditionelle Klassifikation nach BMLFUW (2005) angegeben (Spalte „Quellentyp“).

Tabelle 5: Clusteranalyse (Autokorrelationscluster AC, Pardé-Cluster PC).

Orientierungswert Seehöhe (OWS-EZG) entspricht der abgeschätzten mittleren Seehöhe des Einzugsgebiets der jeweiligen Quelle basierend auf BMLRT (2021c). Die Quellgruppe ergibt sich aus der Zuordnung der Kontingenztafel (Abbildung 27). Leere Zelle = eine Zuordnung zu einer Quellgruppe ist nicht möglich (entspricht der Bezeichnung „untypisch“ in Abbildung 28). Der Quelltyp entspricht der Klassifikation nach BMLFUW (2005).

| Quelle | HZB-Nr. | OWS-EZG (m ü. A.) | AC | PC | Quellgruppe | Quelltyp |
|-----------------------|---------|----------------------|----|----|-------------|------------------------|
| Alfutzquelle | 396192 | 1800 | 2 | 4 | | verdeckte Karstquelle |
| Aubachquelle | 395764 | 1250 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Auebachquelle | 395467 | 1000 | 1 | 1 | I | Hangschuttquelle |
| Bärenebenequelle | 396325 | 2100 | 3 | 4 | III | Hangschuttquelle |
| Blaue Quelle | 395434 | 750 | 1 | 4 | | Karstquelle |
| Brunauquelle | 395335 | 2100 | 2 | 4 | | Porengrundwasserquelle |
| Brunnaderquelle | 395913 | 1070 | 4 | 4 | IV | verdeckte Karstquelle |
| Brunntal | 395137 | 1250 | 1 | 1 | I | Karstquelle |
| Dachserfall | 395251 | 1300 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Draurainquelle | 395681 | 1050 | 4 | 4 | IV | Porengrundwasserquelle |
| Eibachquelle | 396291 | 2000 | 2 | 3 | II | verdeckte Karstquelle |
| Erbsattelquelle | 395970 | 1040 | 1 | 4 | | Hangschuttquelle |
| Eselsquelle | 395632 | 200 | 4 | 4 | IV | Porengrundwasserquelle |
| Etzbachquelle | 396796 | 1600 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Fellbachquelle | 395707 | 2000 | 3 | 4 | III | verdeckte Karstquelle |
| Fidelisquelle | 395756 | 2100 | 2 | 3 | II | Karstquelle |
| Fischa-Dagnitz Quelle | 396135 | 1000 | 4 | 4 | IV | Porengrundwasserquelle |
| Flathquellen | 396465 | 2300 | 2 | 3 | II | Hangschuttquelle |
| Florianer Brunnbach | 395129 | | 1 | 4 | | Porengrundwasserquelle |
| Friedlbrunn Quelle | 395228 | 2000 | 3 | 4 | III | Porengrundwasserquelle |
| Fürstenquelle | 396341 | 2000 | 2 | 4 | | Kluftquelle |

| Quelle | HZB- Nr. | OWS- EZG (m ü. A.) | AC | PC | Quellgruppe | Quelltyp |
|------------------------------|-------------|--------------------------|----|----|-------------|------------------------|
| Galgenwaldquelle | 396788 | 900 | 1 | 4 | | Hangschuttquelle |
| Gerstenbödenquelle | 395731 | 1450 | 2 | 3 | II | Karstquelle |
| Geyerquelle | 395095 | 900 | 2 | 1 | | Hangschuttquelle |
| Goldbachquelle | 395749 | 1450 | 1 | 4 | | verdeckte Karstquelle |
| Goldschmiedquelle | 396754 | 510 | 4 | 4 | IV | Hangschuttquelle |
| Gollinger Wasserfall | 395210 | 1650 | 1 | 3 | | Karstquelle |
| Gossenbachquelle | 395384 | 2600 | 1 | 3 | | Hangschuttquelle |
| Große Mühlquelle | 395574 | 1000 | 1 | 1 | I | Karstquelle |
| Hainschbauerquelle | 396564 | 905 | 1 | 4 | | Karstquelle |
| Hammerbachquelle | 395855 | 450 | 3 | 4 | III | Karstquelle |
| Hegnauerbründl Lindgraben | 396036 | | 3 | 4 | III | Kluftquelle |
| Heiterwandquelle | 396333 | 1750 | 3 | 4 | III | Karstquelle |
| Hipflquelle | 396606 | 1800 | 1 | 4 | | Karstquelle |
| Hirschbrunn-Seeaustritt | 395053 | 1700 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Kaltes Bächle | 396721 | | 2 | 1 | | Karstquelle |
| Katzensteigquelle | 395418 | 1050 | 2 | 4 | | Porengrundwasserquelle |
| Klingelmühlquelle | 395087 | 400 | 3 | 4 | III | Porengrundwasserquelle |
| Kohlgrubenquellen | 396432 | 1300 | 1 | 4 | | Kluftquelle |
| Kressbach | 395780 | 750 | 1 | 1 | I | Porengrundwasserquelle |
| Kronhofquelle | 396614 | | 1 | 4 | | Karstquelle |
| Lacknerbrunnquelle | 395517 | 1800 | 2 | 4 | | Porengrundwasserquelle |
| Lammerquelle | 395293 | 1550 | 2 | 3 | II | Porengrundwasserquelle |
| Langwies/Miesbach | 395145 | 1650 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Lappenbachquelle | 395715 | 1800 | 3 | 4 | III | Karstquelle |
| Lareinsonntagspleisquellen | 396382 | 2250 | 2 | 4 | | Hangschuttquelle |
| Lastal-Stollenquelle | 395541 | | 1 | 2 | I | verdeckte Karstquelle |

| Quelle | HZB- Nr. | OWS- EZG (m ü. A.) | AC | PC | Quellgruppe | Quellentyp |
|--------------------------------|-------------|--------------------------|----|----|-------------|------------------------|
| Lehnbachquellen | 395400 | 1800 | 1 | 4 | | Karstquelle |
| Marbachquelle | 395244 | 2250 | 2 | 3 | II | Karstquelle |
| Marulbachquelle | 395772 | 1700 | 1 | 3 | | verdeckte Karstquelle |
| Moosbrunnquelle | 395483 | 1650 | 3 | 4 | III | Karstquelle |
| Mühlbachquelle | 395376 | 1500 | 2 | 4 | | Karstquelle |
| Müllnernquelle | 396572 | 900 | 3 | 4 | III | verdeckte Karstquelle |
| Obwaldquelle | 396705 | 2000 | 2 | 3 | II | Karstquelle |
| Ochsenbrunnquelle | 395491 | 2000 | 2 | 3 | II | Porengrundwasserquelle |
| Ödensee- Kaltwassertrichter | 395905 | 1530 | 1 | 4 | | verdeckte Karstquelle |
| Oswaldquelle | 396523 | 1400 | 3 | 4 | III | Karstquelle |
| Pfannbauernquelle | 396127 | 1600 | 3 | 4 | III | Karstquelle |
| Pießling Ursprung | 395103 | 1950 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Pöllauer Ursprung | 396770 | 1270 | 1 | 4 | | Karstquelle |
| Preunegger Siebenquellen | 395897 | 2070 | 2 | 4 | | Porengrundwasserquelle |
| Pucherhäuslquelle | 395285 | 2050 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Puffquelle | 396549 | 1200 | 3 | 4 | III | Hangschuttquelle |
| Pulverermühlquelle | 395442 | 1150 | 1 | 1 | I | Hangschuttquelle |
| Quelle Haggen | 395558 | 1750 | 2 | 3 | II | Kluftquelle |
| Reihbachquelle | 395848 | 1610 | 3 | 4 | III | Kluftquelle |
| Reithbachquelle | 395590 | 1050 | 1 | 1 | I | Karstquelle |
| Rettenbachquelle | 395111 | 1800 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Riedlbachquelle | 395996 | 1790 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Roßlochquelle | 395822 | 1490 | 1 | 1 | I | Karstquelle |
| Sagtümpel | 395863 | 1680 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Sauwinkelquellen | 396440 | 800 | 3 | 4 | III | verdeckte Karstquelle |
| Schönebenquelle | 396762 | 1860 | 1 | 3 | | Hangschuttquelle |

| Quelle | HZB- Nr. | OWS- EZG (m ü. A.) | AC | PC | Quellgruppe | Quelltyp |
|----------------------------------|-------------|--------------------------|----|----|-------------|------------------------|
| Schreiende Brunnen | 395343 | 1400 | 2 | 2 | | Karstquelle |
| Schwabeltalquelle | 395939 | 1480 | 1 | 1 | I | Karstquelle |
| Schwarzbach – Moosquelle | 395368 | 1500 | 2 | 4 | | Karstquelle |
| Schwarzbodenquelle | 395426 | 1700 | 3 | 4 | III | Karstquelle |
| Schwarze Torrenquelle | 395319 | 1800 | 2 | 2 | | verdeckte Karstquelle |
| Schwarzlackenquelle | 395327 | 1600 | 2 | 3 | II | verdeckte Karstquelle |
| Siebenbrunnenquelle | 395533 | 2000 | 2 | 3 | II | verdeckte Karstquelle |
| Siebenquellen | 396093 | 1700 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Steinbachquelle | 395608 | 950 | 1 | 1 | I | Karstquelle |
| Steyernquelle | 395079 | 1450 | 1 | 1 | I | Karstquelle |
| Stubbachquelle | 395350 | 1500 | 2 | 4 | | Karstquelle |
| Teufelskirche | 395012 | 1600 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Tiebelquelle | 396531 | 1200 | 3 | 4 | III | Porengrundwasserquelle |
| Totes Weib Quelle | 396812 | | 1 | 1 | I | Karstquelle |
| Trinkwasserstollen Bettelwurf | 396226 | 1600 | 2 | 4 | | Karstquelle |
| Union Quelle | 395673 | 1700 | 3 | 4 | III | Karstquelle |
| Untere Schmittequelle | 396424 | 1100 | 2 | 4 | | Porengrundwasserquelle |
| Ursprungquelle (Lehnberg) | 395509 | 1400 | 2 | 3 | II | verdeckte Karstquelle |
| Ursulaquelle | 395582 | 850 | 3 | 4 | III | Karstquelle |
| Waldbachursprung | 395038 | 1950 | 2 | 3 | II | Karstquelle |
| Wasseralmquelle | 396077 | 1600 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Wassermannsloch | 395871 | 1570 | 1 | 2 | I | Karstquelle |
| Windener Quelle | 396010 | | 4 | 4 | IV | Karstquelle |

3.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Auf Basis des Abflussverhalten konnten vier repräsentative Quellgruppen identifiziert werden. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer hydrogeologischen Eigenschaften sowie der regional dominanten Grundwasserneubildungskomponenten.

Die **Gruppe I** umfasst ausschließlich Karstquellen der Nördlichen Kalkalpen (Abbildung 30). Die mittlere Einzugsgebietshöhen dieser Quellen streuen um den Median 1530 m ü. A. (Abbildung 29). In diesen Höhen liegt im Winter eine geschlossene Schneedecke, deren Abschmelzen eine wichtige Grundwasserneubildungskomponente darstellt (Anstieg und Maximum der Pardé-Koeffizienten im Frühjahr, geringer Anstieg der Autokorrelation nach ca. 200 Tagen). Die dominierenden Grundwasserneubildungskomponenten sind jedoch die häufigen Niederschläge während der langen schneefreien Sommerperioden (starkes Hintergrundrauschen der Autokorrelation). Die Karstaquifere bilden einen Speicher mit hoher Durchlässigkeit, Grundwasserneubildungssignale werden rasch an die Quellen weitergegeben (geringe Integrierte Autokorrelation IAK, kurze Korrelationsdauer KD und Reaktionszeit RZ; Abbildung 32). Die unregelmäßigen, aber häufigen Niederschlagsereignisse von tendenziell geringer Intensität entlang der der Nördlichen Kalkalpen (Abbildung 30) füllen die Speicher kurzfristig immer wieder auf und verhindern daher ein langfristiges Leerlaufen des Aquifers bzw. eine hohe Autokorrelation der Quellschüttung.

Die Grundwasserneubildung der Quellen aus **Gruppe II** ist schneedominiert. In den vergleichbar hohen Einzugsgebieten der Quellen (Median 2000 m ü. A.; Abbildung 29) ist die Schneedeckenmächtigkeit tendenziell höher als bei den anderen Gruppen, der Schneedeckenaufbau dauert länger an (Abbildung 30). Die Schneeschmelze setzt entsprechend später ein, was sich an den Quellen in einem verspäteten Anstieg der Pardé-Koeffizienten widerspiegelt. Der zyklische Schneedeckenauf- und -abbau zeigt sich in der gleichmäßigen, sinusförmigen Autokorrelationsfunktion dieser Quellen (Abbildung 32). Die IAK fällt entsprechend hoch aus, KD und RZ liegen dagegen im mittleren Bereich. Die Schneeschmelze stellt einen kontinuierlichen Grundwasserneubildungspuls in den Monaten April bis Juni dar, der zu einem stetigen Anstieg der Quellschüttung führt – gefolgt von einer stetigen Abnahme der Quellschüttung nachdem die Schneedecke abgeschmolzen ist und während des Schneedeckenaufbaus im folgenden Winter. Quellen dieser Gruppe liegen vermehrt in den Zentralalpen. Die Grundwasserneubildung durch Regenereignisse ist in diesen Regionen tendenziell nicht so stark ausgeprägt (Inneralpine Trockenzone) und daher eine nicht so dominante Grundwasserneubildungskomponente (Abbildung 31).

Quellen der **Gruppe III** zeichnen sich durch geringe jährliche Schüttungsschwankungen und hohe Pufferkapazität der Aquifere aus (fehlende Saisonalität, geringer IJG, langsam abnehmende Autokorrelation mit hoher IAK). Quellen dieser Gruppe treten verteilt in allen hydrogeologischen Großeinheiten Österreichs auf, in Regionen mit unterschiedlichen Niederschlagsbedingungen und in unterschiedlichen Höhenlagen (Abbildung 30, Abbildung 31). Die mittlere Einzugsgebietshöhe (Median 1605 m ü. A.; Abbildung 29) der Quellen aus Gruppe III liegt in einem ähnlichen Bereich wie die mittlere Einzugsgebietshöhe der Quellen aus Gruppe I (Abbildung 29, Abbildung 37). Auch in den Einzugsgebieten dieser Quellen bildet sich daher eine winterliche Schneedecke aus (Abbildung 31), deren Schneeschmelzimpuls an den Quellen durch die Aquifereigenschaften stark abgepuffert wird (mäßiger Anstieg der Quellschüttung). Die Quellen reagieren durch die Pufferkapazität der Aquifere auch nicht kurzfristig auf einzelne Niederschlagsereignisse (kein Hintergrundrauschen in der Autokorrelation). Eine regionale Dominanz in der Gruppe III bilden die Quellen in den Südlichen Kalkalpen (Abbildung 28). Die Quellen in dieser Region weisen dolomitisch geprägte Einzugsgebiete mit geringerer hydraulischer Durchlässigkeit auf (kein Hintergrundrauschen). Die Niederschläge in den Südlichen Kalkalpen sind von einer hohen Intensität, aber tendenziell geringen Häufigkeit geprägt (Abbildung 31). Die assoziierten Grundwasserleiter fungieren daher als Speicher, die in größeren Abständen von einzelnen, intensiven Niederschlagsereignissen aufgefüllt werden, gefolgt von längeren Perioden des langsamen Leerlaufens (langsame Abnahme der Autokorrelation, durchgehend positiv).

Die **Gruppe IV** bildet sich aus Quellen mit niedrig gelegenen Einzugsgebieten (Median 1000 m ü. A.; Abbildung 29) im Südosten bis Osten Österreichs. In diesen Regionen kann sich keine mächtige Schneedecke ansammeln und Niederschläge fallen auch in den Wintermonaten oft als Regen (Abbildung 30). Die Quellen unterliegen keinem Jahreszyklus und zeigen keine Saisonalität (geringer IJG, sehr hohe IAK). Die Aquifere puffern Grundwasserneubildungsimpulse stark ab (sehr langsam abnehmende Autokorrelation ohne Hintergrundrauschen, lange KD und RZ).

4 Schlussfolgerungen

Österreich ist basierend auf dem Wasserrechtsgesetz (WRG) und der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) verpflichtet, Grundwasser und im Speziellen auch Quellwasservorkommen sowohl quantitativ als auch qualitativ zu überwachen. Dies erfolgt im Wesentlichen über das Messnetz des Hydrographischen Dienstes laut Wasserkreislauberhebungsverordnung (WKEV) und das Messnetz gemäß Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV). Auf Basis der einzigartigen Datenreihen der Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes konnte das Trendverhalten der Quellparameter Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit für einen 20-jährigen Zeitbereich von 01.01.2001 bis 31.12.2020 an 44 Quellen für Schüttung, 30 für Wassertemperatur und 35 für elektrische Leitfähigkeit untersucht werden. Des Weiteren stellt die Datenbasis eine sehr gute Grundlage für eine systematische hydrogeologische Charakterisierung der Quellwässer in Bezug auf ihr Schüttungsverhalten dar. Es ergeben sich nachstehende Schlussfolgerungen:

- Die Trends der Wassertemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit sind vergleichsweise gut bestimmbar und weisen eine hohe Signifikanz auf. Es zeigt sich, dass der Großteil der Quellen einen positiven Trend beider Parameter aufweist. Der mehrheitliche Anstieg der Wassertemperatur und auch der elektrischen Leitfähigkeit weist auf einen Zusammenhang mit den sich ändernden meteorologischen Bedingungen (Erhöhung der Lufttemperatur) aufgrund des Klimawandels hin.
- Trends der Quellschüttung sind nur eingeschränkt ableitbar (geringe Signifikanz), da an vielen Quellen die starke jährliche Schüttungsschwankung die langfristige Tendenz überprägt. Generell zeigt sich jedoch, dass die Quellschüttung bei den meisten Quellen zugenommen hat, im Speziellen trifft diese Beobachtung auf das Abflussverhalten in den Wintermonaten zu. Die Änderungen des Winterniederschlags und die damit einhergehende Änderung der Schneedeckendynamik dürften für den Anstieg der Quellschüttung in der Winterperiode verantwortlich sein.
- Es konnte an 4 Quellen mit einer Datenreihe der Quellschüttung von 40 Jahren und mehr gezeigt werden, dass eine Trendanalyse entsprechend stark von Anfangs- und Endwert geprägt ist. An den Zeitreihen der 4 Quellen ist ersichtlich, dass in Abhängigkeit der herangezogenen Zeitperiode und damit verbundenen Anfangs- und Endwerte Trends sich stark ändern und sogar umkehren können.
- Daraus lässt sich ableiten, dass aufgrund der variablen Entwicklung der Quellschüttung in der Vergangenheit keine zufriedenstellende Extrapolation eines

Trends der Quellschüttung in die Zukunft möglich ist. Die Quellschüttung und vor allem die Schüttungsdynamik werden sowohl durch die meteorologischen Gegebenheiten als auch die hydrogeologischen Eigenschaften des Grundwasserleiters geprägt.

- Für eine detaillierte Interpretation der Trendergebnisse der Quellparameter ist es daher notwendig, zuerst die Dynamik der Quellschüttung zu charakterisieren und in einem weiteren Schritt die Einzugsgebiete der einzelnen Quellen auszuweisen. Dadurch wird es möglich, beurteilen zu können, ob die Trends primär auf Änderungen der meteorologischen Gegebenheiten (Klimawandel) und/oder Änderungen der Aquifereigenschaften zurückgeführt werden können.

Die Ergebnisse der Charakterisierung des Quellschüttungsverhaltens ergeben, dass ein Großteil der vom Hydrographischen Dienst beobachteten Quellen in Österreich im Wesentlichen vier unterschiedliche Entwässerungsdynamiken aufweisen und somit in die Quellgruppe I-IV untergliedert werden können.

- **Quellgruppe I** ist auf die verkarsteten Nördlichen Kalkalpen im Einflussbereich des Nordstau-Regimes beschränkt.
- **Quellgruppe II** umfasst im Wesentlichen die schneedominierten Quellen in hochgelegenen Gebirgsgruppen in Nordtirol und Salzburg.
- **Quellgruppe III** reagiert deutlich verzögert auf episodische Neubildungsereignisse, und die Quellen sind gehäuft im Süden, streuen jedoch über das gesamte Bundesgebiet.
- Der **Quellgruppe IV** können die Quellen mit niedriger gelegenen Einzugsgebieten im Osten des Bundesgebietes zugeordnet werden.

Die Ergebnisse in Bezug auf Quellschüttungsdynamik ermöglichen nachstehende Schlussfolgerungen:

- Zwei Drittel der Quellmessstellen lassen sich anhand ihrer Schüttungsdynamik einer dieser vier Quellgruppen zuordnen.
- Eine klare Zuordnung der Quellgruppen zu hydrogeologischen Großeinheiten ist nicht gegeben, da sich die Quellschüttungsdynamik aus dem Zusammenspiel von Grundwasserneubildung und Strömungsverhältnissen im Grundwasserleiter (Aquifereigenschaften) ergibt. So finden sich beispielsweise in den verkarsteten Gebieten der Nördlichen Kalkalpen Quellen, die den Quellgruppen I bis III zugeordnet werden können.

- Jede Quellgruppe spiegelt daher eine Kombination an klar unterscheidbaren Kriterien basierend sowohl auf meteorologischen als auch hydrogeologischen Gegebenheiten im Quelleinzugsgebiet wider. Die Verteilung dieser vier Quellgruppen zeichnet eine Kombination der großräumigen topographischen, meteorologischen und hydrogeologischen Muster im österreichischen Bundesgebiet nach.
- Anhand der Quellschüttungsdynamik wurde Schnee für die Quellgruppen I und II als wichtige bzw. dominante Grundwasserneubildungskomponente identifiziert. Für diese Quellgruppen sind künftig Änderungen der Schüttungsdynamik zu erwarten, da die Schneedeckendynamik besonders sensibel auf die Erwärmung im Zuge des fortschreitenden Klimawandels reagiert. Die höher gelegenen Bereiche der österreichischen Alpen, die bei allmählicher Erwärmung noch deutlich über der gegenwärtigen, winterlichen Schneefallgrenze liegen, reagieren etwas später auf diese Entwicklung, weshalb eine raschere Veränderung der Quellschüttungsdynamik in Gruppe I gegenüber der Quellgruppe II erwartet werden kann.
- In Bezug auf wasserwirtschaftliche Fragestellungen und potentieller Nutzbarkeit der Wässer der Quellen der Gruppen I und II sind diese hinsichtlich ihrer Vulnerabilität besonders sorgfältig zu behandeln. Ihre Schüttungsdynamik weist klar auf das Vorhandensein einer schnellen Komponente hin. Infiltrierende Niederschlags- oder Schneeschmelzwasser gelangen innerhalb von wenigen Stunden zur Quelle, weshalb sich eine entsprechend geringe bis keine Filterung von Schadstoffen ergibt.
- Die Quellgruppen III und IV sind durch deutlich geringere saisonale Schwankungen geprägt, was auf eine gute Speicherfähigkeit und geringere hydraulische Durchlässigkeit des Grundwasserleiters und/oder sehr komplexe (geologische) Rahmenbedingungen im Einzugsgebiet (allogen und autogene Grundwasserneubildung) hinweist. Die Schüttungsdynamik dürfte bei diesen Quellgruppen weniger von den Niederschlagsereignissen als bei den Quellgruppen I und II geprägt sein.

Gesamtheitlich konnten die untersuchten Quellen in ihrem Schüttungsverhalten in einem ersten Schritt systematisch charakterisiert werden, was eine fundierte Grundlage für weitere Aussagen und Untersuchungen in Bezug wasserwirtschaftliche Nutzung darstellt. Die Messstellen des Hydrographischen Dienstes repräsentieren einen guten Querschnitt, der in Österreich vorkommenden Grundwasserleiter und den daran gebundenen Quellen. Aufgrund der sehr guten Datenlage (teilweise Zeitreihen über 40 Jahre) konnte für die im Österreichischen Bundesgebiet vorkommenden Grundwasserleiter und den daran gebundenen Quellen eine systematische, hydrogeologische Charakterisierung erarbeitet werden. Dieser methodische Ansatz ist sicherlich für einen Großteil der Quellen anwendbar, für die

Quellschüttungsdaten von mindestens einem hydrologischen Jahr vorliegen. Somit ist eine methodische Grundlage geschaffen worden, generell Quellen in ihrem Schüttungsverhalten systematische zu beschreiben und zu charakterisieren. In etwa ein Drittel der Messstellen konnten keiner der 4 identifizierten Quellgruppen eindeutig zugeordnet werden. Die Ursache lässt sich anhand der an den Quellen gemessenen Daten nur eingeschränkt ermitteln, da für die Quellen ihre Einzugsgebiete noch nicht klar ausgewiesen sind. Die Grundwasserneubildung ist ein komplexes Zusammenspiel der meteorologischen Gegebenheiten (Niederschlag und Schneeschmelze) und der (hydro-)geologischen und klimatischen Rahmenbedingungen des Einzugsgebiets sowie der Vegetationsbedeckung, weshalb für detaillierte Aussagen zu wasserwirtschaftlichen Anforderungen Kenntnisse über meteorologische Rahmenbedingungen UND das Einzugsgebiet vorliegen müssen. Eine Ausweisung und Berücksichtigung der Quelleinzugsgebiete für eine detaillierte Bewertung der Quellen im Zuge wasserwirtschaftlicher Nutzungen ist daher unumgänglich.

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Trendanalyse aller Messstellen, für die im Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020 eine weitgehend durchgehende kontinuierliche Datenreihe vorliegt (Lückenzeitraum < 20 %). Für die Parameter Quellschüttung (Q) [(l/s) pro Jahr], Wassertemperatur (WT) [°C pro Jahr] und elektrische Leitfähigkeit (LF) [µS/cm pro Jahr] werden jeweils die Signifikanz des Trends (p-Wert) sowie die Rate der Änderung (Theil-Sen Schätzwert, TSS) angegeben. ... | 33 |
| Tabelle 2: Quellschüttungsdynamik der 96 analysierten Quellmessstellen. Integrierter Jahresgang IJG [%], Integrierte Autokorrelation IAK [%], Maximaler Pardé-Koeffizient Pmax [-], Minimaler Pardé-Koeffizient Pmin [-], Reaktionszeit RZ [Tage], Korrelationsdauer KD [Tage]..... | 55 |
| Tabelle 3: Ergebnisse der Clusteranalyse der saisonalen Schwankung (Pardé-Koeffizienten). Angegeben sind die maximalen bzw. minimale Pardé-Koeffizienten Pmax [-] bzw. Pmin [-] und der Integrierte Jahresgang IJG [%] jeder Cluster-Mittellinie (Cluster) sowie der Bereich der Quellen jedes Clusters (Quellen). | 66 |
| Tabelle 4: Ergebnisse der Clusteranalyse der Autokorrelationsfunktion. Angegeben sind die Anzahl der Quellen pro Cluster, die Korrelationsdauer KD [Tage], die Reaktionszeit RZ [Tage] und die Integrierte Autokorrelation IAK [%] der Cluster-Mittellinie (Cluster) sowie deren Bereich aller Quellen jedes Clusters (Quellen). | 76 |
| Tabelle 5: Clusteranalyse (Autokorrelationscluster AC, Pardé-Cluster PC). Orientierungswert Seehöhe (OWS-EZG) entspricht der abgeschätzten mittleren Seehöhe des Einzugsgebiets der jeweiligen Quelle basierend auf BMLRT (2021c). Die Quellgruppe ergibt sich aus der Zuordnung der Kontingenztafel (Abbildung 27). Leere Zelle = eine Zuordnung zu einer Quellgruppe ist nicht möglich (entspricht der Bezeichnung „untypisch“ in Abbildung 28). Der Quelltyp entspricht der Klassifikation nach BMLFUW (2005). | 98 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Die Lage aller 96 analysierten Quellen in Bezug auf die Bundesländer Österreichs. (a) Verteilung der Quellen auf die wichtigsten geologischen Einheiten Österreichs. Als Referenz ist die geologische Karte Österreichs hinterlegt (KM500-GE, Geologische Bundesanstalt 2022; www.geologie.ac.at ; CC BY-NC-ND 4.0). (b) Räumliche Verteilung der Quelltypen nach BMLFUW (2005). Kartengrundlage: Geoland Basemap Gelände (www.basemap.at ; CC-BY 4.0), Legende der geologischen Einheiten siehe Anhang 1. | 11 |
| Abbildung 2: (a) Die Seehöhe [m ü. A.] aller Quellaustritte. Die Verteilung folgt im Wesentlichen der großräumigen Topographie Österreichs. (b) Die mittlere Schüttung [l/s] aller Quellen im Beobachtungszeitraum bis 31.12.2020. Die schüttungsstarken Karstquellen in den Nördlichen Kalkalpen treten deutlich hervor. Kartengrundlage: Geoland Basemap Gelände (www.basemap.at ; CC-BY 4.0)..... | 12 |
| Abbildung 3 Datenverfügbarkeit der 96 analysierten Quellen auf Tagesbasis im Zeitraum 1.1.1976-31.12.2020 für die Parameter Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit. In rot ist der Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020 begrenzt, der für die Trendanalysen verwendet wird. | 13 |
| Abbildung 4 Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit der Blauen Quelle HZB-Nr. 395434 (a) und der Steyrnquelle HZB-Nr. 395079 (b). Die blauen Linien stellen die für die Analyse verwendeten Daten dar. In rot sind die Perioden dargestellt, die von den Analysen ausgeschlossen wurden. Diese Datenabschnitte weisen abweichende Auflösung der Messwerte, große Datenlücken oder Quellschüttungen von 0 l/s auf. | 14 |
| Abbildung 5 Langfristige Entwicklung der mittleren Quellschüttung von vier österreichischen Quellen im Zeitraum 1980-2020. Die Trends wurden für unterschiedlich lange Zeitintervalle berechnet. Die Steigung des Theil-Sen Slopes (als Linie über das zugehörige Zeitintervall) zeigt ob die Quellschüttung in der jeweiligen Periode ansteigt oder abnimmt, sowie die Größe der Änderungen. | 16 |
| Abbildung 6: Jahresgang und Autokorrelation erfassen die grundlegenden Eigenschaften von Quellschüttungsganglinien. (a) Der Waldbachursprung zeigt einen ausgeprägten Jahresgang und rasche Reaktion auf Grundwasserneubildungsereignisse. (b) Der Trinkwasserstollen Bettelwurf zeigt einen ausgeprägten Jahresgang und eine verzögerte Reaktion. (c) Die Blaue Quelle zeigt einen geringen Jahresgang und rasche Reaktion. (d) Die Eselsquelle zeigt einen geringen Jahresgang und verzögerte Reaktion. | 19 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 7: Die Stärke des Jahresgangs jeder Quelle wird anhand ihres Integrierten Jahresgangs (IJG) bemessen. Dabei wird zunächst die Summe der Abweichungen aller Pardé-Koeffizienten von der Ausgleichslinie bestimmt (grau hinterlegt). Anschließend wird der IJG in Prozent maximal möglicher Abweichung angegeben. Zusätzlich werden die Extremwerte Pmax (rot) und Pmin (blau) für jede Quelle bestimmt. Exemplarisch für (a) Auebachquelle, (b) Waldbachursprung und (c) Blaue Quelle dargestellt. | 21 |
| Abbildung 8: Die Stärke der Autokorrelation einer Quelle wird anhand ihrer Integrierten Autokorrelation (IAK) bemessen (grau hinterlegte Fläche unter der Kurve). Die Integrierte Autokorrelation schwankt zwischen 0 % (keine Fläche) und 100 % (maximal mögliche Fläche). Zusätzlich werden die Korrelationsdauer KD (blau) und die Reaktionszeit RZ (rot) für jede Quelle bestimmt. Exemplarisch für (a) Steinbachquelle, (b) Trinkwasser-Stollen Bettelwurf und (c) Windener Quelle dargestellt. | 26 |
| Abbildung 9: Quellschüttungstrends im Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020 für 44 Quellen. (a) Ausschließlich signifikante Quellschüttungstrends (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$). (b) Langfristig abnehmende Quellschüttung in diesem Zeitraum. (c) Langfristig zunehmende Quellschüttung in diesem Zeitraum und zugehörige; p-Werte = Signifikanzwerte..... | 35 |
| Abbildung 10: Quellschüttungstrends für den Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020, separat berechnet für die vier Jahreszeiten Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August), Herbst (September, Oktober, November) und Winter (Dezember, Januar, Februar); p-Werte = Signifikanzwerte. | 36 |
| Abbildung 11: Wassertemperaturtrends im Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020 für 30 Quellen. (a) Langfristig abnehmende Wassertemperatur in diesem Zeitraum. (b) Langfristig zunehmende Wassertemperatur in diesem Zeitraum; p-Werte = Signifikanzwerte..... | 38 |
| Abbildung 12: Wassertemperaturtrends für den Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020, separat berechnet für die vier Saisonen Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August), Herbst (September, Oktober, November) und Winter (Dezember, Januar, Februar); p-Werte = Signifikanzwerte. | 39 |
| Abbildung 13: Trends der elektrischen Leitfähigkeit des Quellwassers im Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020 für 35 Quellen. (a) Langfristig abnehmende elektrische Leitfähigkeit in diesem Zeitraum. (b) Langfristig zunehmende elektrische Leitfähigkeit in diesem Zeitraum; p-Werte = Signifikanzwerte. | 41 |
| Abbildung 14: Trends der elektrischen Leitfähigkeit für den Zeitraum 1.1.2001-31.12.2020, separat berechnet für die vier Saisonen Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August), Herbst (September, Oktober, November) und Winter (Dezember, Januar, Februar); p-Werte = Signifikanzwerte..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 15: Lage der exemplarisch vorgestellten Quellen Teufelskirche, Fidelisquelle, Reihbachquelle und Eselsquelle (rot hervorgehoben) im Vergleich zur Lage aller 96 analysierten Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes. | 45 |
| Abbildung 16: Quellschüttungsganglinie der vier exemplarisch vorgestellten Quellen, (a) Teufelskirche, (b) Fidelisquelle, (c) Reihbachquelle und (d) Eselsquelle. | 46 |
| Abbildung 17: Saisonalität (Pardé-Koeffizienten) der vier exemplarisch vorgestellten Quellen (a) Teufelskirche, (b) Fidelisquelle, (c) Reihbachquelle und (d) Eselsquelle. Der grau eingefärbte Bereich zeigt die Abweichung vom langfristigen Mittelwert (Integrierter Jahresgang)..... | 50 |
| Abbildung 18: Empirische Autokorrelationsfunktion der vier exemplarisch vorgestellten Quellen (a) Teufelskirche, (b) Fidelisquelle, (c) Reihbachquelle und (d) Eselsquelle. Der grau eingefärbte Bereich zeigt die Integrierte Autokorrelation (IAK). | 52 |
| Abbildung 19 Österreichweite Verteilung (a) des Integrierten Jahresganges IJG, (b) der höchsten Pardé-Koeffizienten Pmax und (c) der niedrigsten Pardé-Koeffizienten Pmin. Die Farbskalierung in Abbildung (c) ist invertiert, um die Extremwerte besser hervorzuheben. | 59 |
| Abbildung 20 Österreichweite Verteilung (a) der Integrierten Autokorrelation IAK, (b) der Korrelationsdauer KD und (c) der Reaktionszeit RZ. Werte > 365 Tagen sind dabei in einer Gruppe zusammengefasst..... | 61 |
| Abbildung 21: Die Ergebnisse der Clusteranalyse hinsichtlich der Saisonalität der 96 untersuchten Quellen (Pardé-Cluster). | 65 |
| Abbildung 22: Räumliche Verteilung der Pardé-Cluster PC1-PC4, verglichen mit großräumigen hydrogeologischen Einheiten (links) bzw. der durchschnittlichen Dauer der Schneedecke (rechts). | 68 |
| Abbildung 23: Räumliche Verteilung der Pardé-Cluster PC1-PC4, verglichen mit der durchschnittlichen Niederschlagshäufigkeit (links) bzw. der durchschnittlichen Niederschlagsintensität (rechts). | 71 |
| Abbildung 24: Die Ergebnisse der Clusteranalyse hinsichtlich ihrer Autokorrelation. | 75 |
| Abbildung 25: Räumliche Verteilung der Autokorrelations-Cluster AC1-AC4, verglichen mit großräumigen hydrogeologischen Einheiten (links) bzw. der durchschnittlichen Dauer der Schneedecke (rechts). | 78 |
| Abbildung 26: Räumliche Verteilung der Autokorrelations-Cluster AC1-AC4, verglichen mit der durchschnittlichen Niederschlagshäufigkeit (links) bzw. der durchschnittlichen Intensität von Niederschlagsereignissen (rechts). | 79 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 27: (a) Kreuztabelle (Kontingenztafel), in der Autokorrelations-Cluster (AC) und Pardé-Cluster (PC) gegenübergestellt werden. (b) Überdurchschnittlich häufig auftretende Kombinationen von AC und PC Clustern werden zu typischen Quellgruppen zusammengefasst: Gruppe I (blau), Gruppe II (rot), Gruppe III (gelb), Gruppe IV (grün).... | 81 |
| Abbildung 28: Die räumliche Verteilung der Quelltypen I-IV. Bereiche mit hoher Konzentration einer bestimmten Quellgruppe sind als Dichtekarte hervorgehoben (Kerndichteschätzer). | 81 |
| Abbildung 29: Räumliche Verteilung der typischen Quellgruppen I-IV und Häufigkeitsverteilung der mittleren Einzugsgebietshöhe innerhalb jeder Gruppe. | 83 |
| Abbildung 30: Räumliche Verteilung der Quellgruppen I-IV, verglichen mit großräumigen hydrogeologischen Einheiten (links) bzw. der durchschnittlichen Dauer der Schneedecke (rechts). | 87 |
| Abbildung 31: Räumliche Verteilung der Quellgruppen I-IV, verglichen mit der durchschnittlichen Niederschlagshäufigkeit (links) bzw. der durchschnittlichen Intensität von Niederschlagsereignissen (rechts)..... | 88 |
| Abbildung 32: Das Verhältnis von Integriertem Jahresgang (IJG) zu Integrierter Autokorrelation (IAK), aufgeschlüsselt nach Quellgruppen I-IV. | 90 |
| Abbildung 33: Quelltypen nach BMLFUW (2005) Klassifikation in den statistisch ausgewiesenen Gruppen I-IV. | 93 |
| Abbildung 34: Abweichungen der Quelltypen nach BMLFUW (2005) in den einzelnen Gruppen von der durchschnittlichen Verteilung in Österreich..... | 94 |
| Abbildung 35. Integrierter Jahresgang. (a) Boxplots (b) Statistische Auswertung. | 95 |
| Abbildung 36. Integrierte Autokorrelation. (a) Boxplots (b) Statistische Auswertung..... | 96 |
| Abbildung 37. Mittlere Quelleinzugsgebietshöhe. (a) Boxplots (b) Statistische Auswertung. | 97 |

Literaturverzeichnis

Amt der Steiermärkischen Landesregierung (Hg.): Wasserversorgungsplan Steiermark 2015. Ein Leitfaden für die öffentliche Wasserversorgung. Graz 2015.

Anderson, R. L.: Distribution of the Serial Correlation Coefficient. Ann. Math. Statist. 1942, Bd. 13 (1), S. 1-13.

Beck-Mannagetta, P.: Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000, Blatt 188 Wolfsberg. Wien: Geologische Bundesanstalt 1980.

Blöschl, G./Sivapalan, M.: Scale issues in hydrological modelling: a review. Hydrological Processes 1995, Bd. 9, S. 251-290.

Blöschl, G./Sivapalan, M./Wagener, T./Viglione, A./Savenije, H. (Hg.): Runoff Prediction in Ungauged Basins. Synthesis across Processes, Places and Scales. Cambridge: Cambridge University Press 2013.

BMLFUW: Quellbeobachtung im Hydrographischen Dienst in Österreich. Mitteilungen des Hydrographischen Zentralbüros, Heft 70, Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft 2005.

BMLFUW: Zweiter nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan (NGP). Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion IV Wasserwirtschaft, 2015.

BMLRT: Wasserschatz Österreichs Grundlagen für nachhaltige Nutzungen des Grundwassers. Wien: Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus 2021a.

BMLRT: Wasserschatz Österreichs Grundlagen für nachhaltige Nutzungen des Grundwassers, Hintergrunddokument. Wien: Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus 2021b.

BMLRT: Kurzbeschreibungen und Abschätzungen der mittleren Höhenlage des Einzugsgebietes von Quellen des Hydrographischen Dienstes. Interne Kurzberichte (Stand

2020). Wien: Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus. Unter Mitarbeit von Umweltbundesamt 2021c.

Bormann, H.: Runoff regime changes in German rivers due to climate change. *Erdkunde* 2010, Bd. 64 (3), S. 257-279.

Box, G. E. P./Jenkins, G. M./Reinsel, G. C.: Time series analysis. Forecasting and control. Hoboken: Wiley 2015.

Davis, J. C.: Statistical and Data Analysis in Geology. 3. Aufl. New Delhi: Wiley 2002.

Eisenlohr L./Bouzelboudjen M./ Király L./ Rossier Y.: Numerical versus statistical modelling of natural response of a karst hydrogeological system. *Journal of Hydrology* 1997, Bd. 202, S. 244-262.

Fisher, R. A.: Statistical Methods and Scientific Inference. 3. Auflage. New York: Hafner Press 1973.

Ford, D./Williams, P. W.: Karst hydrogeology and geomorphology, Chichester, Hoboken: John Wiley & Sons 2007.

Frei, C./Schär, C.: A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *Int. J. Climatol.* 1998, Band 18, 873-900.

Fuchs, G.: Geologische Karte der Republik Österreich 1:25 000. Erläuterungen zu Blatt 169 Partenen (Ost und West). Wien: Geologische Bundesanstalt 1984.

Fuchs, G./Pirkl, H.: Geologische Karte der Republik Österreich 1:25 000. Blatt 169 Partenen (West). Wien: Geologische Bundesanstalt 1980.

Goldscheider, N./Drew, D. P. (Hg.): Methods in karst hydrogeology. London: Taylor & Francis 2007.

Griesmeier, G. E. U./Hornung, T.: GEOFAST 1:50 000. Zusammenstellung ausgewählter Archivunterlagen der Geologischen Bundesanstalt. Blatt 68 Kirchdorf an der Krems. Wien: Geologische Bundesanstalt 2023.

Haseke, H./Pröll, E.: Karst-Monitoring 1998 und Ereigniskampagnen 1998. Leonstein: Nationalpark Oö. Kalkalpen 1998.

Hedderich, J./Sachs, L.: Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R. 16. Auflage. Berlin: Springer Spektrum 2018.

Helsel, D. R./Hirsch, R. M./Ryberg, K. R./Archfield, S. A./Gilroy, E. J.: Statistical Methods in Water Resources. U. S. Geological Survey Techniques and Methods, Bd. 4, Kapitel A3. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey 2020.

Hiebl, J./Frei, C.: Daily precipitation grids for Austria since 1961—development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling. Theor Appl Climatol 2018, Band 132 (1-2), S. 327-345.

Hirsch, R. M./Slack, J. R.: A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. Water Resources Research 1984, Bd. 20 (6), S. 727-732.

Hirsch, R. M./Slack, J. R./Smith, R. A.: Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. Water Resources Research 1982, Bd. 18 (1), S. 107-121.

Hodges, J. L./Lehmann, E. L.: Estimates of Location Based on Rank Tests. The Annals of Mathematical Statistics 1963, Bd. 34 (2), S. 598-611.

Hollander, M./Wolfe, D. A./Chicken, E.: Nonparametric statistical methods. 3. Aufl. Hoboken: John Wiley & Sons Inc 2014.

Hope, A. C. A.: A Simplified Monte Carlo Significance Test Procedure. Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological) 1968, Bd. 30 (3), S. 582-598.

Husen, D. van: LGM and late-glacial fluctuations in the Eastern Alps. Quaternary International 1997, Band 38/39, S. 109-118.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press 2021.

Isotta, F. A./Frei, C./Weilguni, V./Perčec Tadić, M./Lassègues, P./Rudolf, B./Pavan, V./Cacciamani, C./Antolini, G./Ratto, S. M./Munari, M./Micheletti, S./Bonati, V./Lussana, C./Ronchi, C./Panettieri, E./Marigo, G./Vertačnik, G.: The climate of daily precipitation in the Alps. Development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. *Int. J. Climatol.* 2014, Band 34 (5), 1657-1675.

Jeannin, P.-Y./Sauter, M.: Analysis of karst hydrodynamic behaviour using global approaches: A review. *Bulletin d'Hydrologéologie* 1998, Bd. 16, S. 31-48.

Kainz, S./Wagner, T./Brielmann, H./Leis, A./Brandstätter, J./Hausleber, M./Obwegs, M./Avian, M./Haslinger, K./Winkler, G.: Einzugsgebietscharakterisierung von Quellen als Grundlage für wasserwirtschaftliche Überlegungen in Bezug auf Klimawandel – EZGQklim. Unveröffentlichter Bericht. Graz: Karl-Franzens-Universität 2022.

Klappacher, W./Knapczyk, H. (Hg.): Salzburger Höhlenbuch, Band 3. Salzburg: Landesverein für Höhlenkunde in Salzburg 1979.

Klappacher, W./Haseke-Knapczyk, H. (Hg.): Salzburger Höhlenbuch, Band 4. Salzburg: Landesverein für Höhlenkunde in Salzburg 1985.

Klein Tank, A. M. G./Zwiers, F. W./Zhang, X.: Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. *World Climate Data and Monitoring Programme (WCDMP)*, Band 72. Genf: World Meteorological Organization 2009.

Kresic, N./Stevanovic, Z.: *Groundwater Hydrology of Springs. Engineering, Theory, Management, and Sustainability.* Burlington: Butterworth-Heinemann 2010.

Kreuss, O.: GEOFAST 1:50 000. Zusammenstellung ausgewählter Archivunterlagen der Geologischen Bundesanstalt. Blatt 25 Poysdorf. Wien: Geologische Bundesanstalt 2018.

Kruskal, W. H./Wallis, W. A.: Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association* 1952, Bd. 47 (260), S. 583-621.

Larocque, M./Mangin, A./Razack, M./Banton, O.: Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology* 1998, Bd. 205, S. 217-231.

Lebiedzinski, K./Fürst, J.: Entwicklung der alpinen Abflussregime in Österreich im Zeitraum 1961-2010. Österr. Wasser- und Abfallw. 2018, Bd. 70 (9-10), S. 474-484.

Legrain, N./Stüwe, K./Wölfler, A.: Incised relict landscapes in the eastern Alps. Geomorphology 2014, Band 221 (2), 124-138.

Legrain, N./Dixon, J./Stüwe, K./Blanckenburg, F. von/Kubik, P.: Post-Miocene landscape rejuvenation at the eastern end of the Alps. Lithosphere 2015, Band 7 (1), 3-13.

MacQueen, J.: Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability 1967, Bd. 1, S. 281-297.

Mangin, A. : Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. Journal of Hydrology 1984, Bd. 67, S. 25-43.

Mann, H. B./Whitney, D. R.: On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. Ann. Math. Statist. 1947, Bd. 18 (1), S. 50-60.

Mathis, C.: Die Fidelisquelle. Mitteilungen des Hydrographischen Zentralbüros 2005, Band 70, S. 59-65.

Mayaud, C./Wagner, T./Benischke, R./Birk, S.: Single event time series analysis in a binary karst catchment evaluated using a groundwater model (Lurbach system, Austria). Journal of Hydrology 2014, Bd. 511 (100), S. 628-639.

Mayer, A./Pavuz, R./Wirth, J.: Die Höhlen des Steinberges im Weinviertel (Niederösterreich). Die Höhle 1989, Bd. 40 (2), 37-49.

ÖNORM B 2400: Hydrologie — Hydrographische Begriffe und Zeichen, Ergänzende Bestimmungen zur ÖNORM EN ISO 772. (Ausgabe: 2016-03-01)

Olefs, M./Koch, R./Schöner, W./Marke, T.: Changes in Snow Depth, Snow Cover Duration, and Potential Snowmaking Conditions in Austria, 1961–2020—A Model Based Approach Atmosphere 2020, Band 11 (12), S. 1330.

Pardé, M.: Fleuves et rivières. Paris: Colin 1947.

Schmid, S. M./Fügenschuh, B./Kissling, E./Schuster, R.: Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. *Eclogae geol. Helv.* 2004, Band 97 (1), S. 93-117.

Schürch, M./Sinreich, M./Kozel, R.: Grundwasserregime an Quellen. *Aqua & Gas* 2016, Heft 12, S. 14-22.

Sen, P. K.: Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association* 1968, Bd. 63 (324), S. 1379-1389.

Theil, H.: A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. *Koninklijke Nederlandse Akademie Van Wetenschappen Proceedings* 1950, Bd. 53, S. 386–392, 521–525, 1397-1412.

Valdes, D./Dupont, J. P./ Massei, N./ Laignel, B./ Rodet, J.: Investigation of karst hydrodynamics and organization using autocorrelation and T- Δ C curves. *Journal of hydrology* 2006, Bd. 329, S. 432-443.

Völkl, G./Eybl, J.: Künstliche und natürliche Markierungen des Karstwassers am Beispiel des Dachsteinmassivs. *Österr. Wasser- und Abfallw.* 2019, Bd. 71 (1-2), S. 51-65.

Wagner, T./Brodacz, A./Krainer, K./Winkler, G.: Active rock glaciers as shallow groundwater reservoirs, Austrian Alps. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 2020, Band 37 (1), S. 215-230.

Winkler, G./Wagner, T./Pauritsch, M./Birk, S./Kellerer-Pirklbauer, A./Benischke, R./Leis, A./ Morawetz, R./Schreilechner, M./Hergarten, S.: Identification and assessment of groundwater flow and storage components of the relict Schöneben Rock Glacier, Niedere Tauern Range, Eastern Alps (Austria). *Hydrogeology Journal* 2016, Bd. 24, 937–953.

Wilcoxon, F.: Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin* 1954, Bd. 1 (6), S. 80-83

Abkürzungen

Lateinische Zeichen

| | |
|-----------|--|
| AC | Autokorrelations-Cluster |
| ca. | circa |
| bzw. | beziehungsweise |
| d. h. | das heißt |
| IJG | Integrierter Jahresgang |
| IAK | Integrierte Autokorrelation |
| KD | Korrelationsdauer |
| LF | Elektrische Leitfähigkeit |
| MK-Test | Mann-Kendall Test |
| OWS-EZG | Orientierungswert der mittleren Einzugsgebietshöhe |
| PC | Pardé-Cluster |
| P_i | Pardé-Koeffizient im Monat i |
| P_{max} | Maximaler Pardé-Koeffizient |
| P_{min} | Minimaler Pardé-Koeffizient |
| Q | Abfluss |
| Q_a | Mittlere jährliche Schüttung |
| Q_i | Mittlere Quellschüttung des Monats i |
| Q_t | Tagesmittel der Quellschüttung |
| r | Empirische Autokorrelationsfunktion |
| RZ | Reaktionszeit |
| TSS | Theil-Sen Schätzwert |
| usw. | und so weiter |
| WT | Wassertemperatur |

Griechische Zeichen

| | |
|----------|---|
| α | Signifikanzniveau |
| τ | Versatz an Tagen, für den die Autokorrelationsfunktion berechnet wird |

Anhang 1: Legende zur Geologischen Karte

Legende zur Geologischen Karte (Abbildung 1a), basierend auf dem Kartographischen Modell KM500 Austria – Geologie (GeoSphere Austria, 2023; www.geologie.ac.at).

-  1 - Firn, Gletscher
-  2 - Quartär i. Allg. (Alluvium; Pleistozän entlang der Hauptentwässerungslinien und Moränen im Alpenvorland)
-  3 - Molassezone; Obereozän - Miozän; Inneralpine Becken; Neogen
-  4 - Allochthone und parautochthone Molasse; Obereozän - Miozän/Oberjura
-  5 - Alttertiärklippen (Ernstbrunner Klippen)
-  6 - Andesit, Dazit, Trachyt; Karpat, Baden
-  7 - Basalt, Basanit, Nephelinit, Tuff, Sarmat/Pannon - Plio-/Pleistozän
-  8 - Post-variszische Klastika (Perm von Zöbing); Perm
-  9 - Granitoid (Südböhmischer Pluton); Karbon
-  10 - Metamorphite i. Allg.: meist Paragneis, Glimmerschiefer (Moldanubikum, Moravikum)
-  11 - Orthogneis
-  12 - Migmatit
-  13 - Amphibolit
-  14 - Marmor, Kalksilikatgestein
-  15 - Granulit
-  16 - Ultrabasit
-  17 - Kontinentalrandsediment (Helvetikum i.w.S. inkl. Grestener- und Hauptkilppenzone); Jura - Mitteleozän
-  18 - Liebensteiner- und Feuerstätter Decke (nicht differenziert); Lias - Eozän
-  19 - Rhenodanubischer Flysch; Unterkreide - Eozän

-  20 - Tiefmarines Sediment - Ophiolith (Ybbsitzer-, Sulzer- und St. Veiter-Klippen, Nordrandzone); Jura - Kreide
-  21 - Tektonische Melange ostalpiner und penninischer Gesteine (Matreier Zone - Nordrahmenzone, Richbergkogel-Serie, Arosa-Zone); Permomesozoikum
-  22 - Ozeanisches Metasediment, z. T. flyschartig (Bündner Schiefer, Rechnitzer Serie, Prättigauflysch); Jura - Kreide, z. T. Alttertiär
-  23 - Grünschiefer, Prasinit, Serpentin
-  24 - Eklogit führendes Metasediment
-  25 - Metasediment (in Falknis- und Sulzfluh-Decke nicht differenziert); Permomesozoikum, z. T. Alttertiär
-  26 - Metasediment (Tasna-Decke); Permotrias
-  27 - Metasediment (Brennkogel-, Kaserer-Serie); Jura - Kreide
-  28 - Metasediment (Hochstegen-Serie); Malm
-  29 - Metasediment (Wustkogel-, Seidlwinkel-, Schrovín-Serie); Permotrias
-  30 - Orthogneis (Zentralgneis); Permokarbon
-  31 - Metasediment, Metavulkanit (Habach-, Greiner-, Storz-, Kareck-Serie); Paläozoikum
-  32 - Migmatit, Anatexit, migmatischer Paragneis (Altes Dach, Altkristallin i. Allg.)
-  33 - Amphibolit (Zwölferzug-Basisamphibolit)
-  34 - meist Klastika (Gosau - Schichten); Oberkreide - Eozän
-  35 - überwiegend Karbonatgestein; Mitteltrias - Unterkreide
-  36 - Siliciklastika; Permoskyth
-  37 - überwiegend Karbonatgestein; Mitteltrias - Jura
-  38 - Siliciklastika; Permoskyth
-  39 - Porphyroid; Perm
-  40 - Karbonatgestein, Klastika (Karbon von Nötsch); oberes Vise - Oberkarbon
-  41 - Karbonatgestein, Klastika (Grauwackenzone / Veitscher Decke); oberes Vise - Oberkarbon
-  42 - Phyllit, Metaklastika, Metavulkanit (Grauwackenzone/Silbersberg-Decke westl. Aflenz nicht ausgeschieden); Altpaläozoikum i. Allg. ?Permoskyth
-  43 - Post-variszische Klastika; Oberkarbon

-  44 - überwiegend pelitisch-psammitisches Sediment; Oberordovicium
-  45 - Quarzphyllite, z. T. Phyllonite
-  46 - Karbonatgestein
-  47 - Basischer Vulkanit
-  48 - Porphyroid (Blasseneck Porphyroid); Oberordovicium
-  49 - Granitoid; Permokarbon
-  50 - Altkristallin i. Allg. (meist Paragneis, Glimmerschiefer lokal, auch Granatphyllit)
-  51 - Orthogneis
-  52 - Amphibolit
-  53 - Marmor
-  54 - Ultrabazit
-  55 - Schladminger Kristallin
-  56 - Bundschuh Kristallin
-  57 - Granitoid; Permokarbon
-  58 - Tonalit, Granodiorit, Oligozän
-  59 - Ganggestein (im Gefolge der tertiären Intrusionen)
-  60 - Karbonatgestein; Trias
-  61 - Post-variszische Klastika und Karbonatgestein; Oberkarbon - Perm
-  62 - Kalk, Feinklastika
-  63 - Phyllit; Oberordovicium - Unterkarbon
-  64 - Comelico-Porphyroid; Ordovicium
-  65 - Gewässer

Anhang 2: Stammdatenblätter

Dieser Anhang, der auf Anfrage bei der Abteilung Wasserhaushalt im BML erhältlich ist, stellt die Ergebnisse der Auswertung für jede der 96 analysierten Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes zusammen. Die Quellen scheinen in der Reihenfolge ihrer HZB-Nr. auf, pro Quelle sind die Ergebnisse auf vier Seiten zusammengefasst.

Die Zeitreihen von Quellschüttung [l/s], Wassertemperatur [°C] und elektrischer Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$] werden zusammen mit ihrer langfristigen Entwicklung dargestellt. Letztere wird mittels Trendgerade (Theil-Sen Schätzwert) und p-Wert (Signifikanzniveau) zusammengefasst. Zusätzlich wird für jedes Jahr und jeden Parameter die kumulative Häufigkeit dargestellt, um langfristige Verschiebungen der Jahres-Verteilungen zu erfassen.

Die zweite Seite jedes Stammdatenblattes zeigt die Entwicklung der jährlichen Verteilungen von Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrischer Leitfähigkeit als Boxplots. Die Box entspricht dabei dem jährlichen Quartilabstand (Differenz zwischen 0.25-Quantil und 0.75-Quantil), der Querbalken dem jährlichen Median. Die langfristige Entwicklung dieser Werte wird graphisch hervorgehoben. Zusätzlich ist der jährliche Mittelwert für jeden Parameter dargestellt, der bei extremen Verteilungen (etwa der Quellschüttung von Karstquellen mit kurzen aber besonders hohen Spitzenabflüssen) deutlich vom Median abweicht.

Die dritte Seite fasst die Quellschüttungsdynamik jeder Quellung und ihre langfristige Entwicklung zusammen. Empirische Autokorrelationsfunktion und Pardé Koeffizienten sind als Mittelwert für den gesamten Zeitraum dargestellt. Die langfristige Entwicklung dieser Kennwerte ist durch sukzessive verschobene Vierjahresperioden ebenfalls dargestellt.

Abschließend ist für jede Quelle die langfristige Tendenz charakteristischer Jahreskennzahlen der Parameter Quellschüttung, Wassertemperatur und elektrischer Leitfähigkeit mittels Trendgerade (Theil-Sen Schätzwert) dargestellt. Die Trends wurden dabei jeweils für den Jahresmittelwert, -maxima, -minima und -quotienten (Min/Max) berechnet. Die Jahreszyklen beziehen sich dabei jeweils auf das hydrologische Jahr (1.Oktober-30.September).

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft

Stubenring 1, 1010 Wien

bml.gv.at