



Bundesweite Entwicklung der Grundwasserstände seit 1991: Langzeittrends, Variabilität und Auswirkungen der jüngsten Trockenphase

Maria Wetzel¹ · Stefan Broda¹ · Mariana Gomez¹ · Markus Zaepke¹ · Patrick Clos¹ · Stefan Kunz¹ · Tanja Liesch² · Marc Ohmer² · Bastian Habbel² · Michel Wingerling³ · Bernhard Pitschka⁴ · Antje Roucka⁴ · Timo Spörlein⁴ · Helen Scholz⁴ · Jörg Neumann⁴ · Sarah Zeilfelder⁵ · Lena-Katharina Schmidt-Rudolph⁶ · Angela Hermsdorf⁶ · Tina Treucker⁶ · Lucas Meyer⁷ · Jasmin Pikelke⁷ · Björn Panteleit⁸ · Michael Schröder⁹ · Lothar Moosmann⁹ · Theresa Frommen¹⁰ · Mario Hergesell¹⁰ · Gregor Barth¹¹ · Heike Handke¹¹ · Gunter Wriedt¹² · Jörg Elbracht¹³ · Sabine Bergmann¹⁴ · Christoph Weidner¹⁴ · Bastian Wörtler¹⁴ · Hannsjörg Schuster¹⁵ · Frank Bitzer¹⁶ · Stephan Sauer¹⁷ · Doris Duthmann¹⁷ · Peter Börke¹⁸ · Anke Schorling¹⁹ · Wolfgang Wiermann¹⁹ · Peter Balaske²⁰ · Jürgen Schrey²¹ · Luisa Lagmüller²¹ · Christopher Lehmann²¹ · Bernd König²¹ · Annett Peters²² · Katharina Lehmann²²

Eingegangen: 13. November 2025 / Überarbeitet: 19. Februar 2026 / Angenommen: 18. März 2026
© The Author(s) 2026

Zusammenfassung

Die Studie untersucht die Entwicklung der Grundwasserstände in Deutschland anhand von 5844 Messstellen sowie deren Reaktionsdynamik gegenüber klimatologischen Antrieben im Referenzzeitraum 1991–2020. Zusätzlich wird die Entwicklung seit 2018 im Kontext der außergewöhnlichen Dürreperiode betrachtet, um die Reaktionsfähigkeit und Vulnerabilität der Grundwassersysteme gegenüber extremen klimatischen Bedingungen zu bewerten. Erstmals erfolgt diese Auswertung bundesweit einheitlich und in enger Zusammenarbeit mit den zuständigen Landesbehörden.

An 43 % der untersuchten Messstellen werden signifikante Trends festgestellt, überwiegend in Form fallender Grundwasserstände mit einem Medianrückgang von 0,9 cm pro Jahr. Dies entspricht einem jährlichen Rückgang von 0,5 %, bezogen auf die Spannweite der jeweiligen Grundwasserganglinie. Diese Entwicklungen sind deutschlandweit erkennbar, jedoch regional unterschiedlich ausgeprägt und überwiegend klimatisch bedingt. Um Unterschiede in der Reaktionsdynamik systematisch zu erfassen, werden die Messstellen anhand ihrer Autokorrelationslängen in vier Dynamikklassen eingeteilt. Mit abnehmender Dynamik zeigt sich für den Referenzzeitraum eine Zunahme langfristiger Trends (von –0,3 % pro Jahr in Dynamikklasse 1 bis –1,16 % pro Jahr in Klasse 4) sowie eine höhere Persistenz klimatischer Effekte. Träge Systeme reagieren verzögert und sind damit nachhaltiger von Niedrigständen betroffen (Median: 9,8 Monate), während schnell reagierende Systeme kürzere Niedrigstandsphasen (Median: 2,2 Monate) aufweisen und sich rascher erholen. Besonders in der Entwicklung seit 2018 werden diese Unterschiede deutlich: Rund 60 % der trägen Messstellen weisen über fünf Jahre hinweg anhaltend niedrige Grundwasserstände auf, wobei etwa 20 % neue Niedrigstände erreichen und damit unterhalb der Minimalwerte der Referenzperiode liegen. Die Ergebnisse verdeutlichen den engen Zusammenhang zwischen klimatischer Variabilität und Grundwasserdynamik und bilden eine Grundlage für die fortlaufende Bewertung der Grundwasserstands-entwicklung in Deutschland.

Schlüsselwörter Grundwasserstände · Trendanalyse · Klimatische Variabilität · Referenzperiode · Bundesweite Auswertung

✉ Stefan Broda
stefan.broda@bgr.de

Ausführliche Informationen zu den Autoren befinden sich auf der letzten Seite dieses Artikels.

Groundwater level dynamics in Germany since 1991: Long-term trends, variability and impacts of the recent drought period

Abstract

This study provides a comprehensive assessment of groundwater level dynamics in Germany based on observations from 5844 monitoring sites and their response to climatological drivers between 1991 and 2020. The period since 2018 is analysed in the context of exceptional drought conditions to assess the response capacity and vulnerability of groundwater systems to extreme climatic conditions. This assessment represents the first nationwide groundwater level analysis based on a joint evaluation with the relevant state authorities.

Significant trends are identified at 43% of the monitoring sites, predominantly showing declining groundwater levels with a median decrease of 0.9 cm per year. This corresponds to a median annual decline of 0.5%, expressed relative to the groundwater level range at each monitoring site. These trends occur across Germany but vary regionally in magnitude and are primarily climate-driven. To capture differences in system response, the monitoring sites are grouped into four dynamic classes based on their autocorrelation lengths. With decreasing dynamic behaviour, long-term trends become more pronounced within the reference period 1991–2020 (from -0.3% per year in class 1 to -1.16% in class 4), and the persistence of climatic effects becomes more pronounced. Slow-reacting systems respond with delay and remain affected by low groundwater levels for longer time periods (median: 9.8 months), whereas fast-reacting systems experience shorter periods of low groundwater levels (median: 2.2 months) and recover more quickly. Since 2018, around 60% of slow-reacting sites have shown persistently low groundwater levels for five years, and up to 20% reached new minima below the lowest values of the reference period. The findings highlight the close link between climate variability and groundwater dynamics and provide a sound basis for the ongoing assessment of groundwater level evolution in Germany.

Keywords Groundwater levels · Trend analysis · Climatic variability · Reference period · National assessment (Germany)

Einleitung

Grundwasser ist die anteilig größte Ressource für die Trinkwasserversorgung in Deutschland. Etwa 70 % des in der öffentlichen Wasserversorgung eingesetzten Wassers stammen aus Grundwasser (DESTATIS 2024). Damit kommt dem Grundwasser eine zentrale Bedeutung für die Daseinsvorsorge und einer resilienten Wasserversorgung zu, insbesondere angesichts klimatischer Veränderungen. Vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels und zunehmender Herausforderungen im Umgang mit der Ressource Wasser, rückt die Entwicklung der Grundwasserstände verstärkt in den Fokus wissenschaftlicher, politischer und gesellschaftlicher Debatten (Fieger und Track 2025; Lütke-meier und Kuhn 2025; Moeck und Schulz 2025; Tröltzsch et al. 2024). Die systematische Messung und Dokumentation, Analyse und Prognose sind dabei grundlegende Voraussetzungen für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen.

Die klimatischen Veränderungen in Deutschland zeigen sich bereits deutlich: Neben dem kontinuierlichen Temperaturanstieg treten regional auch Veränderungen in den Niederschlagsmustern auf, mit zum Teil zunehmenden Niederschlägen in den Wintermonaten und längeren Trockenperioden (UBA 2023; DWD 2022). In den Jahren 2018 und 2019 erlebte Mitteleuropa eine außergewöhnlich langanhaltende Dürre (Hari et al. 2020). Diese war gekennzeichnet durch extreme Hitze und Niederschlagsdefizite (Vogel et al.

2019; Rousi et al. 2023), niedrige Grundwasserstände und lange Niedrigwasserperioden (Boergens et al. 2020; Pohle et al. 2025; Schwandt et al. 2022) sowie ausgeprägte Bodenfeuchtedefizite (Rauthe et al. 2025; Toreti et al. 2019). Unmittelbare Folgen zeigten sich vor allem in der Land- (Ernteeinbußen von 20–40 %) und Forstwirtschaft (deutliche Zunahme des zwangsweisen Holzeinschlags infolge von Trockenschäden und Borkenkäferbefall, etwa siebenfach höher als in den Jahren 2015–2017) (Conradt et al. 2023; Naumann et al. 2021; Shyroka et al. 2023) sowie in der Wasserversorgung (regionale Bewässerungsverbote, Trockenfallen privater Brunnen) (Rickert et al. 2022; Conradt et al. 2023). Künftige Klimaveränderungen werden voraussichtlich zu stärkeren saisonalen Schwankungen in Wasserverfügbarkeit und Temperatur führen sowie zu häufigeren und intensiveren mehrjährigen oder aufeinanderfolgenden Dürreereignissen (Rakovec et al. 2022; IPCC 2021). Modellbasierte Projektionen im Szenario RCP 8.5 deuten darauf hin, dass Dürreabfolgen wie in den Jahren 2018–2019 bis zu siebenmal häufiger auftreten könnten als im Zeitraum 1850–2005 (Hari et al. 2020).

Neben der Analyse langfristiger Trends rückt damit verstärkt auch das Reaktionsverhalten der Grundwassersysteme gegenüber klimatischen Extremereignissen in den Fokus. Die Reaktion der Grundwasserstände auf meteorologische Einflüsse erfolgt gedämpft und zeitlich verzögert (Bloomfield und Marchant 2013). Dies ist vor allem abhängig von der glättenden Wirkung des Wassertransports

durch die ungesättigte Zone sowie der Speicherfähigkeit des Grundwasserleiters, die hochfrequente Schwankungen dämpfen und längerfristige Trends im Grundwassersignal betonen können (Lischeid et al. 2021). Das Ausmaß dieser Dämpfung hängt maßgeblich von standortspezifischen bodenkundlichen und hydrogeologischen Eigenschaften ab. Wesentliche Einflussfaktoren sind der Grundwasserflurabstand, die Mächtigkeit und Ausprägung der ungesättigten Zone, der Grundwasserleitertyp und die Lagerungsverhältnisse (gespannt, ungespannt) sowie die hydraulische Leitfähigkeit, Systemgröße und einzelne Bilanzkomponenten wie in verschiedenen Studien gezeigt wurde (Lischeid et al. 2021; Haaf et al. 2020; Hellwig et al. 2020; Bloomfield und Marchant 2013; Hellwig und Stahl 2018). Dementsprechend variiert die Reaktion des Grundwassers auf klimatische Extremereignisse erheblich in Intensität und Persistenz, woraus sich standortspezifisch unterschiedliche Vulnerabilitäten gegenüber extremen Grundwasserständen infolge Trocken- und Feuchtephasen ergeben. Langanhaltende Phasen niedriger Grundwasserstände sind im Hinblick auf künftige klimatische Entwicklungen besonders relevant, da sie weitreichende Auswirkungen auf natürliche Ökosysteme und eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung haben können. Ein besseres Verständnis der verschiedenen Reaktionstypen und ihrer zugrundeliegenden Steuerungsgrößen ist daher unerlässlich.

Nach aktuellem Kenntnisstand des Autorenteam existieren lediglich zwei umfassende Auswertungen zur Entwicklung der Grundwasserstände an einer Vielzahl von Messstellen in Deutschland: CORRECTIV (Joeres et al. 2022) veröffentlichte erstmals einen bundesweiten Datensatz von 6626 Messstellen für den Zeitraum 1990–2021 und berichtete über signifikante Abnahmen der Grundwasserstände in zahlreichen Regionen Deutschlands, die auf klimatische sowie anthropogene Einflüsse zurückgeführt wurden. Ebeling et al. (2025) haben auf Grundlage dieses Datensatzes mithilfe von Methoden des maschinellen Lernens Reaktionen des Grundwasserspiegels gruppiert und mit räumlichen Einflussfaktoren verknüpft. Dabei wurden acht Cluster mit regional typischen Charakteristika identifiziert. Zwei der Cluster zeigten konsistente langfristige Trends, die auf anthropogene Einflüsse zurückgeführt werden konnten. Insgesamt konnten 50 % der Grundwasserstandsänderungen durch klimatische Einflussgrößen erklärt werden. Allerdings unterscheiden sich sowohl die konzeptionelle Ausrichtung als auch die methodischen Ansätze und die zugrundeliegende Datenbasis beider Studien von der hier vorliegenden Auswertung.

Die Bezeichnung „anthropogene Einflüsse“ bezieht sich in dieser Arbeit ausschließlich auf direkte Eingriffe, wie Grundwasserentnahmen, Wasserhaltungsmaßnahmen, künstliche Grundwasseranreicherung, Entwässerungssysteme und weitere vergleichbare Eingriffe. Die im weiteren

Verlauf vorgenommene Unterscheidung zwischen anthropogenen und klimatischen Einflüssen dient lediglich der Differenzierung unterschiedlicher Wirkmechanismen. Auch klimatische Veränderungen unterliegen anthropogener Beeinflussung.

In der vorliegenden Studie wird die langfristige Entwicklung der Grundwasserstände an 5844 Messstellen deutschlandweit systematisch analysiert. Als Bezugszeitraum dient die Referenzperiode 1991–2020, die als anerkannter klimatologischer Standard für aktuelle klimatologische Bewertungen gilt (WMO 2017; Kaspar et al. 2021). Diese bildet in dieser Studie die Grundlage zur Bewertung langfristiger Trends, relativer Schwellenwerte sowie zur Einordnung aktueller Entwicklungen. Im Fokus stehen die langfristige Entwicklung der Grundwasserstände, die Identifikation von Perioden anhaltender Grundwasserniedrig- und -hochstände sowie die Klassifikation typischer Reaktionsmuster. Darauf aufbauend erfolgt eine Bewertung der aktuellen Entwicklung seit 2018 mit Blick auf die Dynamik der Grundwasserstandsänderungen und deren Bedeutung für die Vulnerabilität gegenüber klimatischen Extremereignissen. Durch die erstmalig bundesweit einheitliche Auswertung in Kooperation mit den Landesbehörden wird die Grundlage für künftige, methodisch fundierte Bewertungen geschaffen.

Methoden

Datengrundlage und -vorprozessierung

Die Analyse basiert auf einem bundesweiten Datensatz von ursprünglich mehr als 15.000 Grundwassermessstellen, deren Zeitreihen von den zuständigen Fachbehörden der 16 deutschen Bundesländer bereitgestellt wurden (Tab. 1). Im Rahmen der Vorprozessierung werden heterogene Datenformate harmonisiert und auf monatliche Mittelwerte aggregiert. Die anschließende Analyse bezieht sich auf den Zeitraum 1991–2024, für den eine mehrstufige Qualitätskontrolle durchgeführt wird, um unvollständige oder zu kurze Zeitreihen auszuschließen: So werden Zeitreihen mit mehr als 20 % fehlenden Werten oder größeren Datenlücken von über sechs Monaten nicht in die Analyse einbezogen.

Technische Sprünge und Ausreißer in den monatlichen Grundwasserstandszeitreihen werden mit einem perzentilbasierten Schwellenwertverfahren identifiziert. Die Schwellen basieren auf der Spannweite zwischen dem 5. und 95. Perzentil und kombinieren globale sowie lokal rollierende (kausal, 60 Monate) Perzentile in gewichteter Form (75 % global, 25 % lokal). Werte außerhalb der Schwellen werden nach visueller Einzelfallprüfung entfernt. Vergleichbare Vorgehensweisen zur Behandlung von Ausreißern in Grundwasserzeitreihen finden sich u. a. in

Tab. 1 Übersicht der in den Bundesländern für das Grundwassermessnetz Menge zuständigen Behörden und Aktualisierungsintervalle von Daten sowie Berichten zur Grundwasserstandsentwicklung (Stand Oktober 2025)

Table 1 Overview of the authorities responsible for the groundwater monitoring network in the federal states and update intervals for data and reports on groundwater level development (as of October 2025)

Bundesland	Behörde	Aktualisierungsintervall*	Link zu Berichtswesen und Datenportalen
Baden-Württemberg	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW)	Berichtswesen: monatlich Datenportal: täglich	Berichtswesen: https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/wasser/guq-messungen Datenportal: https://umwelt Daten.lubw.baden-wuerttemberg.de (Grundwassermessnetz)
Bayern	Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU BY)	Täglich	Berichtswesen: https://www.nid.bayern.de/grundwasser Datenportal: https://www.gkd.bayern.de/de/grundwasser/oberesstockwerk
Berlin	Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt (SenMVKU)	Berichtswesen: unregelmäßig	Berichtswesen: https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/wasser-und-geologie/
Brandenburg	Landesamt für Umwelt Brandenburg (LfU BB)	Datenportal: täglich Berichtswesen: im Rahmen der WRRL (alle 6 Jahre)	Datenportal: https://wasserportal.berlin.de (Grundwasser) Berichtswesen: https://mleuv.brandenburg.de/mleuv/de/umwelt/wasser/gewaesserschutz-und-entwicklung/europaeische-wasserrahmenrichtlinie-im-ueberblick/bestaendaufnahmen
Bremen	Die Senatorin für Umwelt, Klima und Wissenschaft, Referat 32	Datenportal: täglich Berichtswesen: täglich Grundwasserstände online	Datenportal: https://apw.brandenburg.de Berichtswesen: https://umwelt.bremen.de/umwelt/hochwasser-und-kuestenschutz-quantitative-wasserwirtschaft/grundwasserstaende-2384530
Hamburg	Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA)	Monatlich	Berichtswesen: https://www.hamburg.de/politik-und-verwaltung/behoerden/bukea/themen/wasser/grundwasser/grundwasserstand-176112
Hessen	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)	Berichtswesen: monatlich (Bericht)	Berichtswesen: https://www.hlnug.de/themen/wasser/grundwasser/aktuelles
Mecklenburg-Vorpommern	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG)	Datenportal: täglich Unregelmäßig	Datenportal: https://www.hlnug.de/messwerte/datenportal/grundwasser Berichtswesen: https://www.lung.mv-regierung.de/fachinformationen/wasser/hydrologie/
Niedersachsen	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)	Berichtswesen: jährlich Datenportal: täglich	Datenportal: https://www.umweltkarten.mv-regierung.de/script/index.php (im Kartenportal Umwelt M-V, Thema Grundwasser, Thema Landesmessnetz Grundwasser) Berichtswesen: https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/wasserwirtschaft/grundwasser/veroeffentlichungen/publikationsreihe_grundwasser/publikationsreihe-grundwasser-198537.html und https://urls.niedersachsen.de/v33u Datenportal: https://www.grundwasserstandonline.nlwkn.niedersachsen.de

Tab. 1 (Fortsetzung)
Table 1 (Continued)

Bundesland	Behörde	Aktualisierungsintervall*	Link zu Berichtswesen und Datenportalen
Nordrhein-Westfalen	Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK)	Berichtswesen: monatlich	Berichtswesen: https://www.lanuk.nrw.de/themen/wasser/hydrologische-messnetz/hydrologische-berichte/ Datenportal: https://www.elwasweb.nrw.de und https://www.opengeodata.nrw.de
Rheinland-Pfalz	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RP)	Datenportal: täglich Datenportal: 1–3 Monate	Datenportal: https://wasserportal.rlp-umwelt.de/auskunftssysteme/grundwasserstaende-und-beschaffenheit/karte-grundwassermessstellen https://geoportal.saarland.de/mapbender/frames/index.php?lang=de&gui_id=Geoportal-SL-2020&LAYER%5bzooom%5d=1&LAYER%5bvisible%5d=1&LAYER%5bquerylayer%5d=1&LAYER%5bid%5d=42875
Saarland	Landesamt für Umwelt und Arbeitsschutz (LUA)	Unregelmäßig	
Sachsen	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)	Täglich	Berichtswesen und Datenportal: https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/ida/p/grundwasserstand
Sachsen-Anhalt	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW)	Berichtswesen: monatlich Datenportal: täglich	Berichtswesen: https://hochwasservorhersage.sachsen-anhalt.de/hydrologische-berichte/monatsbericht Datenportal: https://gld.lhw.sachsen-anhalt.de
Schleswig-Holstein	Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein (LfU SH)	Unregelmäßig (mind. jährlich)	Datenportal: https://umweltportal.schleswig-holstein.de/kartendienste?lang=de&topic=thessd&bgLayer=sgx_geodatenzentrum_de_de_basemapde_web_raster_grau_DE_EPSG_25832_ADV&E=564939.87&N=5995993.78&zoom=5&layers=e3328191716cd0de228ef8cc1998952e
Thüringen	Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN)	Berichtswesen: monatlich Datenportal: 1–3 Monate	Berichtswesen: https://hnz-th.thueringen.de/ Datenportal: https://antares.thueringen.de/cadenza/q/1zangq395wiQ7fBdVloTTU
Bund	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	Berichtswesen und Datenportal: monatlich	https://gruvo.bgr.de

* Bezieht sich auf den Veröffentlichungszyklus des Dienstes, nicht auf den eigentlichen Messrhythmus der Grundwasserstände. Die Messhäufigkeit variiert zwischen kontinuierlicher Erfassung (Datensammler mit Datenfernübertragung) und periodischen Terminwerten (z. B. 1., 8., 15. Tag des Monats)

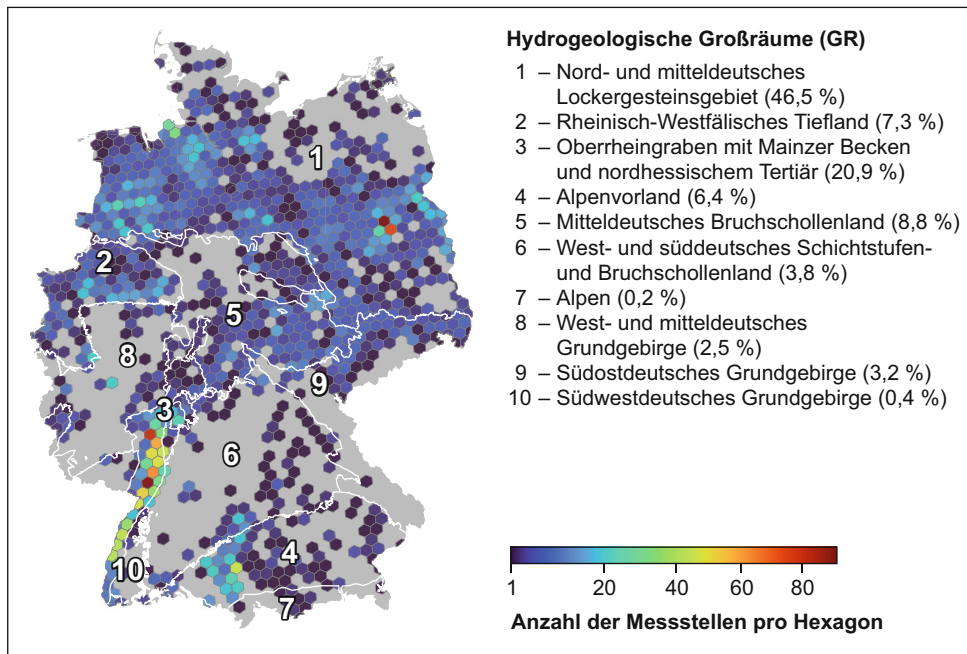


Abb. 1 Räumliche Verteilung der in dieser Studie berücksichtigten 5844 Grundwassermessstellen. Die Farbskala zeigt die Anzahl der Messstellen pro H3-Hexagon (Auflösung 5; mittlere Zellfläche $\approx 245 \text{ km}^2$). Grau dargestellte Bereiche enthalten keine Messstellen. Zur räumlichen Orientierung sind die Grenzen der hydrogeologischen Großräume dargestellt. Die in Klammern angegebenen Werte beziehen sich auf den Anteil der Messstellen, die innerhalb der jeweiligen Großräume liegen

Fig. 1 Spatial distribution of the 5844 groundwater monitoring stations considered in this study. The colour scale shows the number of monitoring stations per H3 hexagon (resolution 5; average cell area $\approx 245 \text{ km}^2$). Areas shown in grey do not contain any monitoring stations. The boundaries of the major hydrogeological districts are shown for orientation. The values in brackets refer to the proportion of monitoring sites located within the respective major districts

Tab. 2 Grundwasserstandsklassen nach Perzentilbereichen

Table 2 Groundwater level classes by percentile ranges

Perzentilbereich [%]	GW-Standsklasse
<5	Extrem niedrig
≥ 5 bis <15	Sehr niedrig
≥ 15 bis <25	Niedrig
≥ 25 bis ≤ 75	Normal
> 75 bis ≤ 85	Hoch
> 85 bis ≤ 95	Sehr hoch
> 95	Extrem hoch

Wunsch und Liesch (2020). Technische Sprünge (z.B. Logger-Versatz) werden zusätzlich per Changepoint-Analyse mit dem PELT-Algorithmus detektiert (Killick et al. 2012) und mit der Python-Bibliothek ruptures umgesetzt (Truong et al. 2018). Betroffene Messstellen werden nach visueller Prüfung aus dem Datensatz ausgeschlossen.

Verbleibende Datenlücken werden anschließend mittels iterativer Imputation gefüllt, bei der fehlende Werte spaltenweise wiederholt aus den übrigen Variablen geschätzt werden (Van Buuren und Groothuis-Oudshoorn 2011). Als Regressionsmodell wird eine Bayesian-Ridge-Regression (MacKay 1992; Tipping 2001) innerhalb des scikit-learn IterativeImputer verwendet (Pedregosa et al. 2011). Der An-

satz nutzt dabei die räumlich-kohärenten Zusammenhänge zwischen Messstellen und erhält die zeitliche Struktur, indem pro Zeitpunkt eine konsistente multivariate Schätzung erfolgt. Dieses Verfahren wird gewählt, da es multivariate Zusammenhänge zwischen Messstellen berücksichtigt, robuste Schätzungen bei moderatem Stichprobenumfang erlaubt und sich in hydrologischen Anwendungen zur Rekonstruktion fehlender Zeitreihenwerte bewährt hat.

Abgesehen von der hier verwendeten perzentilbasierten Ausreißer- und Changepoint-Erkennung erfolgen alle weiteren Verarbeitungsschritte analog zur in Ohmer et al. (2026) beschriebenen Methodik, auf die für weitere Details verwiesen wird. Nach Abschluss der Vorprozessierung erfüllten 5844 Messstellen die Qualitätskriterien ($\leq 20\%$ Fehlwerte, Datenlücken ≤ 6 Monate, Ausschluss von Niveauverschiebungen) und wurden in die Analyse einbezogen.

Für die räumliche Einordnung der Ergebnisse wird die hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland herangezogen, welche geologische und hydraulische Zusammenhänge abbildet (BGR und SGD 2015). Diese Gliederung erlaubt eine fachlich fundierte Bewertung, da sie im Gegensatz zu administrativen Grenzen die Standorteigenschaften und Prozesse in hydrogeologisch vergleichbar aufgebauten

Landesteilen berücksichtigt. Auf eine bundeslandbasierte Auswertung wird aus diesem Grund bewusst verzichtet.

Die in der vorliegenden Auswertung verwendeten Messstellen sind über das gesamte Bundesgebiet verteilt, wobei deutliche regionale Unterschiede in der Messstellendichte bestehen (Abb. 1). Eine vergleichsweise geringe Dichte besteht in Süddeutschland, insbesondere innerhalb der hydrogeologischen Großräume GR6 (West- und Süddeutsches Schichtstufen- und Bruchschollenland), im nördlichen Teil von GR5 (Nordwestdeutsches Bergland), in GR8 (West- und mitteldeutsches Grundgebirge) sowie Nordostdeutschland (GR1, Nord- und mitteldeutsches Lockergesteinsgebiet). Demgegenüber weisen einige Regionen eine sehr hohe Messstellendichte auf. Dies betrifft insbesondere den Bereich des Oberrheingraben bis zum Mainzer Becken sowie Berlin. 46,5 % der Messstellen befinden sich im Nord- und mitteldeutschen Lockergesteinsgebiet (GR1). Diese regionalen Unterschiede lassen sich in erster Linie durch die jeweiligen hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Verhältnisse erklären. In den großräumigen Lockergesteinsgebieten Nord- und Mitteldeutschlands führen die intensive Grundwassernutzung und die hohe Erschließungsdichte zu einem entsprechend engmaschigen Messnetz. In Festgesteinsregionen ist die Erfassung aufgrund der komplexeren hydrogeologischen Strukturen eingeschränkt und für die Trinkwasserversorgung bzw. Grundwassernutzung weniger relevant. Dort erfolgt die Beobachtung häufig über Quellschüttungen, die in der vorliegenden Analyse allerdings nicht berücksichtigt werden.

Eine flächendeckende Differenzierung nach Spannungszustand (ungespannt, gespannt), Grundwasserstockwerk sowie Ausbau- oder Filtertiefe der Messstellen ist grundsätzlich sinnvoll, wird jedoch nicht vorgenommen, da entsprechende Detailinformationen für einen größeren Teil der Messstellen nicht oder unvollständig vorliegen. Um dennoch ein möglichst umfassendes Bild zu erhalten, gehen sämtliche nach der Datenaufbereitung verfügbaren Grundwassermessstellen in die Analyse ein. Dementsprechend beinhaltet der zugrundeliegende Datensatz Messstellen aus unterschiedlichen Grundwasserstockwerken und umfasst sowohl gespannte als auch ungespannte Grundwasserleiter.

Statistische Auswertemethoden

Zur Analyse der langfristigen Entwicklung der Grundwasserstände wird der modifizierte Mann-Kendall-Test nach Hamed und Rao (1998) eingesetzt, um auch bei autokorrelierten Zeitreihen verlässliche Trendinformationen zu gewinnen (Mirabbasi et al. 2020; Chávez García Silva et al. 2024). Der nicht-parametrische Test eignet sich insbesondere für schiefe, saisonale oder unvollständige Zeitreihen und ist damit gut für Grundwasserstandsdaten geeignet. Mirabbasi et al. (2020) zeigen, dass der modifizierte Test im Ver-

gleich zur klassischen Variante durch die Berücksichtigung der Autokorrelation zuverlässiger signifikante, großräumige, fallende Trends erkennen kann. Zur Quantifizierung der Trendstärke wird die Sen's slope nach Theil (1950) und Sen (1968) berechnet. Die Berechnungen werden mit der Python-Bibliothek `pymannkendall` (Hussain und Mahmud 2019) durchgeführt. Als signifikant gelten Trends mit einem p -Wert kleiner als 0,05. Neben der absoluten Änderung in Zentimetern pro Jahr werden die Trends auch relativ in Prozent pro Jahr angegeben. Zur Berechnung der relativen Trendstärke wird der absolute Trend auf die Spannweite der jeweiligen Zeitreihe normiert. Dieses Vorgehen ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit der Trendstärken zwischen den Messstellen und erfolgt analog zur Methodik nach Grimm-Strele, wie sie im Rahmen der Wasser Rahmenrichtlinie häufig angewendet wird (NLWKN 2013). Zusätzlich wird eine qualitative Einordnung des relativen Trends in fünf Klassen, von stark fallend bis stark steigend, vorgenommen.

Auf eine Bruchpunktanalyse zur Erkennung möglicher Trendänderungen wird hier bewusst verzichtet. Aufgrund der heterogenen Einflussfaktoren sowie der großen Zahl und räumlichen Verteilung der Messstellen über ganz Deutschland würden sich dabei zahlreiche, methodisch schwer vergleichbare Teiltrends ergeben. Der Fokus dieser Analyse liegt jedoch auf der Charakterisierung großräumiger, langfristiger Trends im Zeitraum 1991–2020, um eine überregionale Vergleichbarkeit zwischen den Messstellen zu ermöglichen. Für detaillierte regionale Analysen kann eine Trendbruchanalyse jedoch wertvolle Zusatzinformationen liefern (Wendel et al. 2012).

Zur Identifikation und Einordnung historischer Extremwerte wurde ein etabliertes Perzentil-basiertes Klassifikationsschema verwendet, das auch in behördlichen Auswertungen angewendet wird (u.a. NLWKN 2022; MLUK 2022; HLNUG 2025). Basierend auf den Perzentilen der Referenzperiode 1991–2020 erfolgt eine Klassifizierung der Grundwasserstände in sieben Kategorien, von extrem niedrig bis extrem hoch (Tab. 2). Die perzentilbasierte Klassifikation ist in ihrer Funktionsweise mit anomaliebasierten Indizes wie dem standardisierten Grundwasser-Index vergleichbar (Bloomfield und Marchant 2013). Sie ermöglicht eine leicht interpretierbare, kontextbezogene Bewertung aktueller Entwicklungen, etwa, ob ein beobachteter Grundwasserstand für den jeweiligen Monat oder das hydrologische Jahr ungewöhnlich niedrig oder hoch ist. Beide zeitlichen Auflösungen werden in die Analyse einbezogen. Während bei monatlicher Auflösung die Klassifikation auf den jeweiligen Monat bezogen wird, beziehen sich jährliche Klassifikationen auf Mittelwerte hydrologischer Jahre (November des Vorjahres bis Oktober des jeweiligen Jahres). Da die Klassengrenzen auf der Referenzperiode 1991–2020 basieren, können langfristige Trends inner-

Tab. 3 Übersicht der analysierten räumlichen und zeitlichen Merkmale sowie die zugehörigen Referenzen
Table 3 Overview of the analysed spatial as well as temporal characteristics and associated references

Merkmal	Beschreibung	Referenz bzw. Bibliothek
Trend	Modifizierter Mann-Kendall-Test unter Berücksichtigung von Autokorrelation in Zeitreihen ($p < 0,05$)	Pymankendall (Hamed und Rao 1998; Hussain und Mahmud 2019)
Pardé-Saisonalität	Stärke der saisonalen Schwankung, berechnet aus dem Verhältnis monatlicher Mittelwerte zum Gesamtmittel der normalisierten Zeitreihe	PASTAS (Collenteur et al. 2019)
Autokorrelationslänge	Zeitlicher Horizont, bis zu dem eine hohe Autokorrelation der Ganglinie besteht (Grenzwert: 0,7)	Eigene Berechnung, statsmodels (Seabold und Perktold 2010)
Anzahl Niedrigstand- bzw. Hochstandphasen	Anzahl der Extremphasen unterhalb des 15. bzw. oberhalb des 85. Perzentils der Grundwasserstandreihe	PASTAS (Collenteur et al. 2019)
Dauer Niedrigstand- bzw. Hochstandphasen	Mediandauer der erkannten Niedrig- bzw. Hochstandphasen in Monaten	PASTAS (Collenteur et al. 2019)
Grundwasserstand unter Geländehöhe	Differenz zwischen Geländeoberkante und Median des Grundwasserstands	Eigene Berechnung
Jährliche Amplitude	Differenz zwischen Jahresmaximum und -minimum angegeben als Median der Jahresamplituden über alle hydrologischen Jahre	Eigene Berechnung
Kreuzkorrelationen mit meteorologischen Treibern	Maximaler Kreuzkorrelationskoeffizient inkl. Reaktionszeit (lag) zwischen Grundwasserstand und Temperatur bzw. Niederschlag (jeweils monatliche Zeitreihen)	Eigene Berechnung
Kreuzkorrelationen mit aggregierten meteorologischen Treibern	Maximaler Kreuzkorrelationskoeffizient zwischen Grundwasserstand und aggregierten Zeitreihen von Temperatur und Niederschlag, bestimmt über verschiedene Aggregationszeiträume (in monatlichen Schritten bis 5 Jahre)	Eigene Berechnung
Distanz zum nächsten Fließgewässer	Entfernung der Messstelle zum nächstgelegenen Fließgewässer (in Kilometer)	Datensatz: EU-MOHP (Nölscher et al. 2022)
Hohlraumart	Einteilung in Poren-, Kluft/Poren-, Kluft- und Kluft/Karstgrundwasserleiter	Datensatz: HÜK250 (BGR und SGD 2019)

Tab. 4 Klassifikation der relativen Trendstärke nach Grimm-Strele (modifiziert) und prozentualer Anteil der Messstellen
Table 4 Classification of relative trend according to Grimm-Strele (modified) and percentage of monitoring wells

Bewertung	Relative Trendstärke pro Jahr [%]	Anteil der Messstellen [%]
Stark fallend	< -1	8
Fallend	-1 bis $-0,5$	14
Gleichbleibend	$-0,5$ bis $0,5$	69
Steigend	$0,5$ bis 1	4
Stark steigend	> 1	5

halb dieses Zeitraums zu einer zeitlichen Verschiebung der Klassenzuordnung führen, sodass Grundwasserniedrig- bzw. -hochstände gegen Ende der Referenzperiode relativ häufiger bzw. seltener erreicht werden.

Zur Untersuchung möglicher Zusammenhänge zwischen der Entwicklung der Grundwasserstände und standortspezifischen Eigenschaften werden sowohl Eigenschaften der auf Monatswerte aggregierten Zeitreihen als auch räumliche Standortinformationen ausgewertet (Tab. 3). Die räumlichen Merkmale werden messstellenspezifisch extrahiert und umfassen den Abstand zum nächstgelegenen Fließgewässer (Nölscher et al. 2022) sowie den Grundwasserleitertyp (BGR und SGD 2019).

Zahlreiche Zeitreihenmerkmale wurden mit der Python-Bibliothek PASTAS (Collenteur et al. 2025; Heudorfer et al. 2019; Haaf et al. 2020) berechnet, um zentrale Ei-

genschaften der Grundwasserganglinien systematisch zu analysieren. Dazu zählen unter anderem die Pardé-Saisonalität zur Quantifizierung der saisonalen Dynamik sowie die Anzahl und Dauer von Niedrig- und Hochstandphasen. Diese sind definiert als aufeinanderfolgende Monate unterhalb des 15. bzw. oberhalb des 85. Perzentils der Ganglinie, wobei sich die Perzentile auf alle Werte der Referenzperiode 1991–2020 beziehen. Ergänzend wird der Median des Grundwasserstands unter Geländehöhe und der jährlichen Amplitude bestimmt. Als Maß der zentralen Tendenz wurde der Median verwendet, da dieser gegenüber Extremwerten weniger empfindlich ist und die charakteristischen Bedingungen eines Standorts zuverlässiger abbildet.

Zur systematischen Erfassung der Reaktionszeit auf meteorologische Antriebe erfolgt eine Kreuzkorrelationsanalyse zwischen Grundwasserstand und den klimatischen

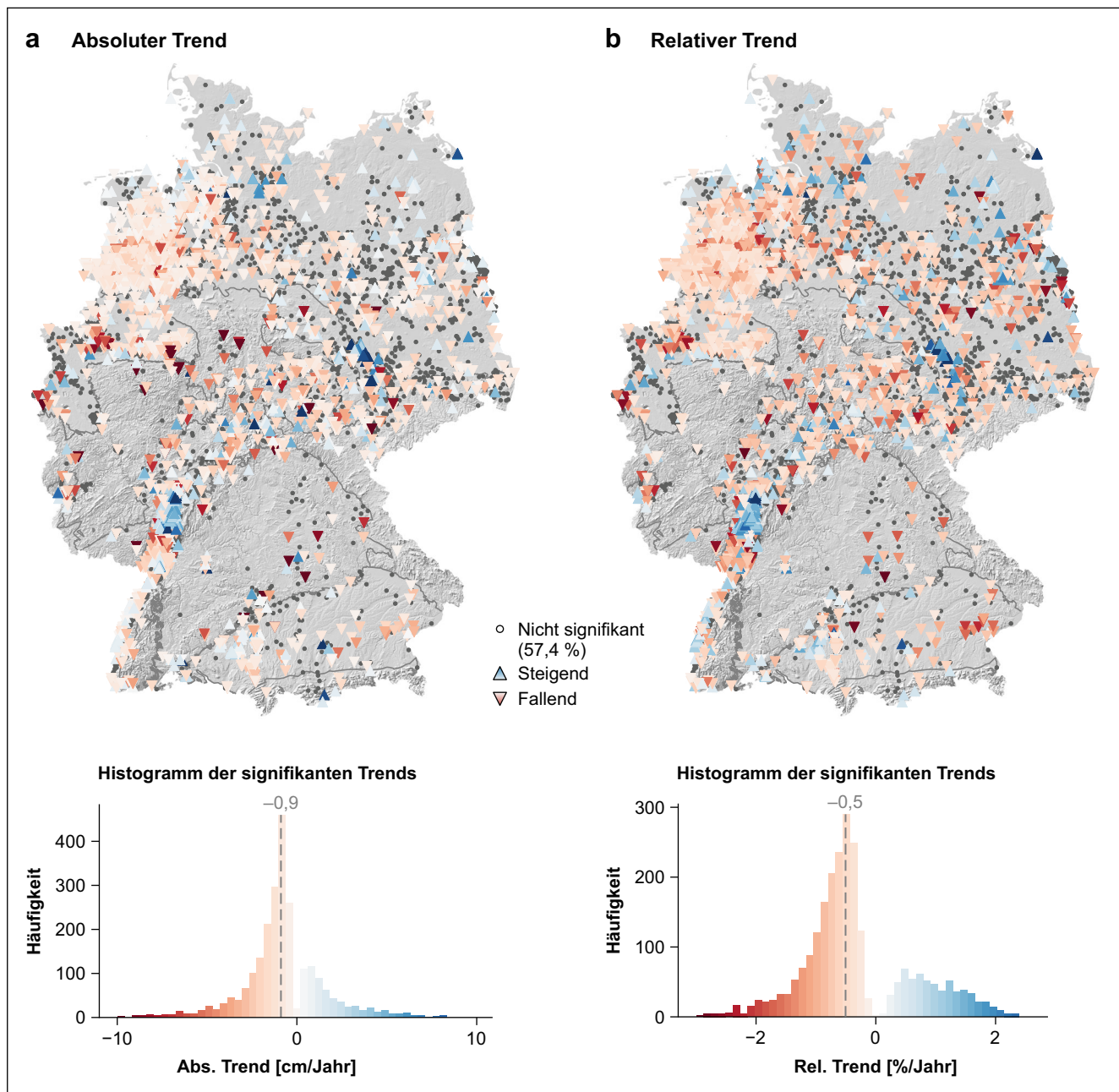


Abb. 2 Langfristige Trends der Grundwasserstände in der Referenzperiode 1991–2020 (a) Absoluter Trend in cm/Jahr (b) Relativer Trend in %/Jahr (bezogen auf die jeweilige Spannweite). Signifikante Trends sind farblich und nach Stärke abgestuft dargestellt. Nicht signifikante Trends sind weiß gekennzeichnet. Zur Orientierung sind die Grenzen der hydrogeologischen Großräume in grau dargestellt

Fig. 2 Long-term trends in groundwater levels in the reference period 1991–2020 (a) Absolute trend in cm/year (b) Relative trend in %/year (relative to the respective range). Significant trends are colour-coded and graded according to strength. Non-significant trends are shown in white. For orientation, the boundaries of the major hydrogeological districts are shown in grey

Einflussgrößen Niederschlag und Lufttemperatur. Für jede Messstelle wurden die entsprechenden Temperatur- und Niederschlagsreihen aus dem HYRAS 5.0-Datensatz (Razafimaharo et al. 2020) extrahiert. Die Kreuzkorrelationsanalyse erlaubt die Identifikation zeitlich verzögerter linearer Zusammenhänge zwischen meteorologischen Antrieben und der Grundwasserstandsdynamik (Bloomfield

und Marchant 2013; López Moreira Mazacotte et al. 2025; Fiorillo und Doglioni 2010). Hierzu wird die Korrelation zwischen beiden Zeitreihen für unterschiedliche zeitliche Verschiebungen berechnet. Der Zeitversatz (Lag) mit der stärksten Korrelation wird als mittlere Reaktionszeit des Grundwassersystems interpretiert und beschreibt, mit welcher zeitlichen Verzögerung Änderungen in Nieder-

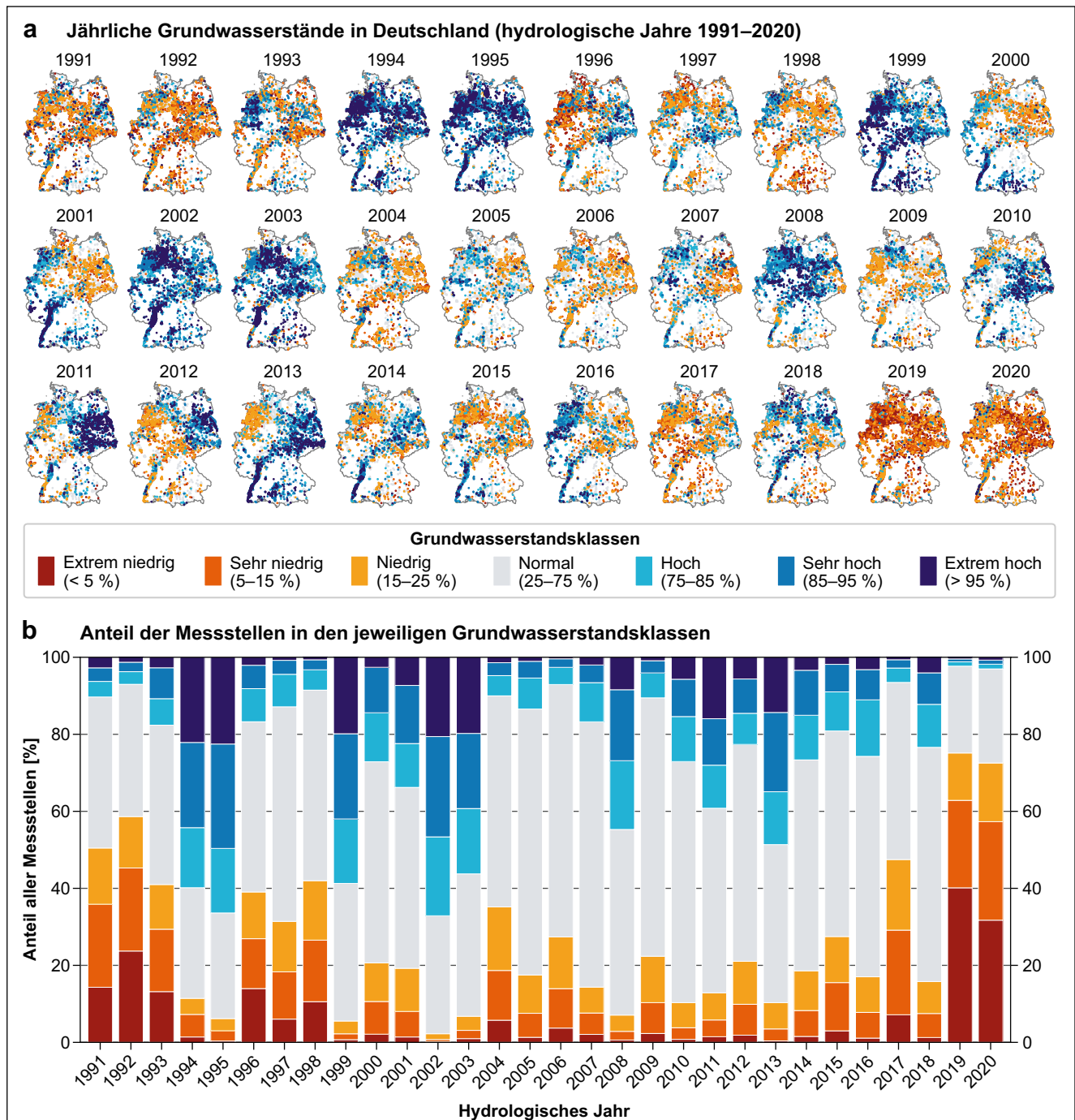


Abb. 3 **a** Räumliche und zeitliche Entwicklung der Grundwasserstandsklassen in der Referenzperiode 1991–2020, basierend auf den Jahresmedianwerten je hydrologisches Jahr. **b** Anteil der Messstellen in den jeweiligen Grundwasserstandsklassen pro hydrologisches Jahr

Fig. 3 **a** Spatial and temporal development of groundwater level classes in the reference period 1991–2020, based on annual median values per hydrological year. **b** Proportion of measuring stations in the respective groundwater level classes per hydrological year

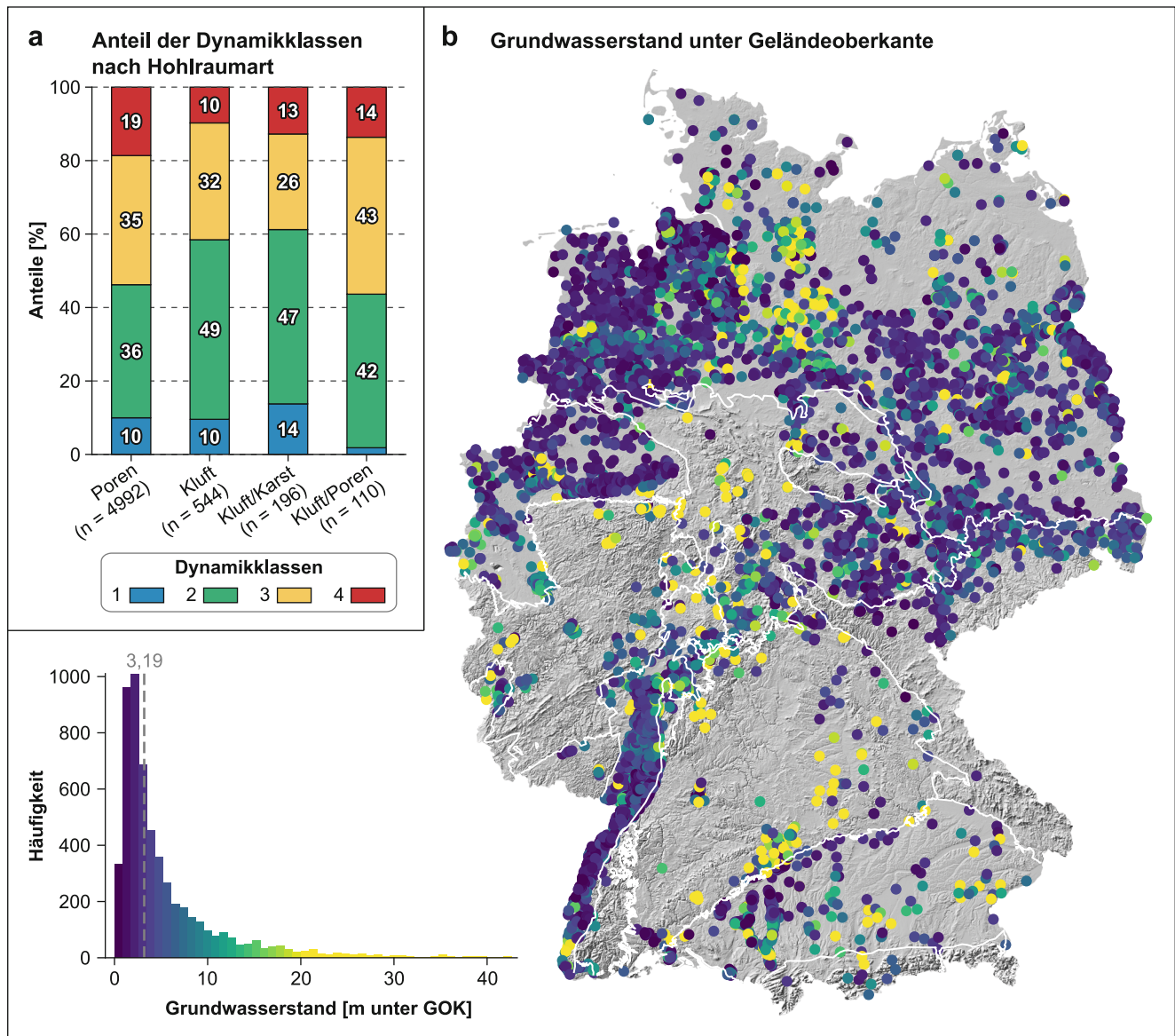


Abb. 4 **a** Anteil der Dynamikklassen in Abhängigkeit von der Hohlraumart nach HÜK250 (BGR und SGD 2019). **b** Grundwasserstand unter der Geländeoberkante (m unter GOK), bezogen auf den Median des Zeitraums 1991–2020. Zur räumlichen Orientierung sind die Grenzen der hydrogeologischen Großräume dargestellt

Fig. 4 **a** Proportion of dynamic classes depending on cavity type according to HÜK250 (BGR and SGD 2019). **b** Groundwater level below ground surface (m b.g.s.), based on the median for the period 1991–2020. The boundaries of the major hydrogeological districts are shown for orientation

schlag oder Temperatur typischerweise im Grundwasserstand wirksam werden. Für die Lufttemperatur, die als Proxy für die Verdunstung dient, wird dabei eine inverse Beziehung berücksichtigt. Im Gegensatz zu anderen Studien (Ebeling et al. 2025; Hellwig und Stahl 2018; Kumar et al. 2016), die Kreuzkorrelationen auf Basis standardisierter Niederschlags- und Dürreindizes (SPI und SPEI) berechnen, welche Anomalien unabhängig von saisonalen Schwankungen vergleichbar machen sollen, wird hier für die Kreuzkorrelationsanalyse bewusst auf saisonale Entkopplung verzichtet. Dies erlaubt eine unmittelbare Erfassung der Wechselwirkungen zwischen meteorologischen

Einflüssen und den beobachteten Grundwasserstandsdynamiken, wobei die Kreuzkorrelation ausschließlich lineare Zusammenhänge abbildet und komplexe, nichtlineare Neubildungs- und Speicherprozesse methodisch nicht explizit abbilden kann. Ergänzend zur Analyse der monatlichen Zeitreihen werden Kreuzkorrelationen zwischen Grundwasserstand und den akkumulierten Zeitreihen von Temperatur- und Niederschlagssignalen über Zeiträume von bis zu fünf Jahren berechnet. Ziel hierbei ist es, mithilfe eines vereinfachten Indikators Messstellen mit schwacher Kopplung an meteorologische Antriebe zu identifizieren und gleichzeitig verzögerte Reaktionsdynamiken zu berücksichtigen.

Tab. 5 Medianwerte der räumlichen und zeitlichen Merkmale der einzelnen Dynamikklassen in der Referenzperiode 1991–2020.**Table 5** Median values of the spatial and temporal characteristics of the individual dynamic classes in the reference period 1991–2020

Merkmal	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Alle Messstellen
Beschreibung	Sehr kurzfristige Reaktion	Saisonal geprägt	Übergangsbereich mit saisonaler Prägung	Langfristig träge Reaktion	–
Autokorrelationslänge	1 Monat	2 Monate	3 bis 6 Monate	≥ 7 Monate	–
Anteil signifikanter Trends [%]	46,3	44,9	36,9	47,1	42,7
Median signifikanter Trends [cm/Jahr]	–0,5 [–0,5]	–0,8 [–0,8]	–1,3 [–1,3]	0,5 [–2]	–0,9 [–1,0]
Median signifikanter Trends [%/Jahr]	–0,28 [–0,3]	–0,48 [–0,48]	–0,71 [–0,73]	0,63 [–1,16]	–0,50 [–0,54]
Grundwasserstand [m unter GOK]	2,1 #	2,1 #	3,9	7,5	3,2
Jahresamplitude [m]	0,7	0,8	0,5	0,3	0,6
Pardé-Saisonalität	0,59	0,68	0,44	0,15	0,49
Distanz zum nächsten Fließgewässer [km]	0,36	0,6	0,81	1,31	0,73
Anzahl Niedrigstandphasen pro Jahr [–]	0,8	0,6	0,4	0,2	0,5
Dauer der Niedrigstandphasen [Monate]	2,2	3	4,6	9,8	3,8
Anzahl Hochstandphasen pro Jahr [–]	1	0,7	0,4	0,2	0,5
Dauer der Hochstandphasen [Monate]	1,7	2,4	4,4	9	3,3
Reaktionszeit des Grundwasserstands auf Niederschlagsignal [Monate]	1	4	7	9	6
Reaktionszeit des Grundwasserstands auf Temperatursignal [Monate]	2 [2]	2 [2]	3 [3]	16 [6]	3 [3]
Kreuzkorrelation Grundwasserstand und Niederschlag [–]	0,32	0,31	0,29	0,18	0,29
Kreuzkorrelation Grundwasserstand und Temperatur [–]	–0,42	–0,55	–0,35	–0,13	–0,39
Höchste Kreuzkorrelation Grundwasserstand und akkumulierten Niederschlag [–]	0,48	0,6	0,67	0,49	0,6
Höchste Kreuzkorrelation Grundwasserstand und akkumulierter Temperatur [–]	–0,44 #	–0,58 #	–0,42	–0,31	–0,45
Anteil MST [%]	9,9	37,9	34,7	17,5	100
Anzahl MST	579	2215	2027	1023	5844
Anteil klimatisch entkoppelter MST [%]	5,3	0,5	1,7	16,2	4,1

Die Unterschiede der Parameter zwischen den Dynamikklassen sind signifikant (Mann-Whitney-U-Test, $p < 0,05$). Nicht signifikante Unterschiede sind mit *Raute* gekennzeichnet. Werte in eckigen Klammern beziehen sich auf die jeweiligen Merkmale exklusive der klimatisch entkoppelten Messstellen.

sichtigen. Dabei wird, analog zu Ebeling et al. (2025), für jede Messstelle der maximale Kreuzkorrelationskoeffizient bestimmt.

Ein Teil der Grundwassermessstellen unterliegt anthropogenen Einflüssen (z. B. Entnahmen zur Trinkwassergewinnung oder landwirtschaftlichen Bewässerung, Grundwasseranreicherung oder Wasserhaltungsmaßnahmen im Tagebau). Je nach Häufigkeit, Dauer und Intensität der Einflüsse entstehen unterschiedliche Ganglinienmuster, die sich aufgrund ihrer vielfältigen und heterogenen Ausprägungen nur eingeschränkt automatisiert erfassen lassen. Die Berechnung von Zeitreihenmerkmalen oder eine Hauptkomponentenanalyse (Lehr und Lischeid 2020; Gomez et al. 2024, Brakenhoff et al. 2022) können erste Hinweise liefern, reichen jedoch häufig nicht aus, um komplexe Nutzungseinflüsse eindeutig zu isolieren.

Diese Arbeit zielt nicht darauf ab, anthropogene Einflüsse vollständig zu erfassen. Jedoch sollen Messstellen identifiziert werden, deren Reaktion auf klimatische Antriebe in der Referenzperiode deutlich vom systemtypischen Reaktionsmuster abweicht, weil sie dadurch die Analyse potenziell verzerren können. Hierfür wird ein heuristischer Ansatz gewählt, der auf der maximalen Kreuzkorrelation zwischen Grundwasserständen und akkumulierten meteorologischen Zeitreihen basiert. Messstellen, deren Kreuzkorrelationen sowohl mit dem Niederschlag (unterstes Dezil, da positiv korreliert, $r < 0,37$) als auch mit der Temperatur (oberstes Dezil, da negativ korreliert, $r > -0,27$) besonders gering ausfallen, werden im Folgenden als „klimatisch entkoppelt“ bezeichnet.

Klassifikation der Grundwasserstandsdynamik

Ein weiterer zentraler Kennwert dieser Studie ist die Autokorrelationslänge. Sie beschreibt die zeitliche Persistenz von Schwankungen des Grundwasserstands und liefert somit Informationen über die Reaktionsdynamik des Systems (u. a. Bloomfield und Marchant 2013; Ebeling et al. 2025; Nygren et al. 2022). Die Autokorrelationsfunktion quantifiziert, in welchem Maß eine Zeitreihe für unterschiedliche zeitliche Verzögerungen mit sich selbst korreliert ist. Je kürzer die Autokorrelationslänge, desto schneller und unmittelbarer reagieren die Grundwasserstände auf externe Antriebe. Hier wird sie als der Zeitraum definiert, nach dem die Autokorrelation unter den Grenzwert von 0,7 fällt. Vergleichbare Grenzwerte zur Erfassung des Übergangs von stark korreliertem zu dynamisch veränderlichem Verhalten der Ganglinie, werden auch in anderen Studien zur Analyse der Grundwasserstandsdynamik verwendet (Bourgault et al. 2019; Collenteur et al. 2025).

Zur weiteren Differenzierung werden die Grundwasserganglinien basierend auf ihrer Autokorrelationslänge in vier Dynamikklassen unterteilt. Die Klassengrenzen basieren auf der Verteilung der Werte und dienen einer heuristischen, aber systematischen Differenzierung der Reaktionsdynamik. Da die Zeitreihen auf monatlicher Basis analysiert werden, liegen die Autokorrelationslängen in ganzen Monatsintervallen vor.

Dynamikklasse 1 repräsentiert Ganglinien mit einer Autokorrelationslänge von einem Monat und umfasst etwa 10 % der Messstellen (Tab. 4). Dynamikklasse 2 stellt mit rund 38 % die größte Gruppe dar und enthält Ganglinien mit Autokorrelationslängen von zwei Monaten. Dynamikklasse 3 beinhaltet etwa 35 % der Messstellen, deren Autokorrelationslängen zwischen drei und sechs Monaten liegen. Dynamikklasse 4 umfasst Zeitreihen (17 %) mit Autokorrelationslängen größer als sechs Monate.

Ergebnisse

Langfristige Entwicklung der Grundwasserstände in der Referenzperiode (1991–2020)

Die langfristige Entwicklung der Grundwasserstände wird durch eine Trendanalyse für den Zeitraum 1991–2020 dargestellt. Abb. 2 zeigt die räumliche Verteilung der absoluten und relativen Trends der Grundwasserganglinien in dieser Periode. An 57 % der insgesamt 5844 Messstellen kann kein statistisch signifikanter Trend festgestellt werden. Von den 43 % der Messstellen mit signifikantem Trend zeigen 73 % einen negativen Trend bzw. fallende Grundwasserspiegel, mit im Median $-0,9 \text{ cm/Jahr}$ (relativ $-0,5 \text{ %/Jahr}$). Nach der verwendeten Klassifikation des relativen Trends (NLWKN

2013) werden 69 % der Messstellen als gleichbleibend eingestuft (siehe Tab. 4). Fallende Trends betreffen 22 % der Messstellen, wobei 8 % als stark fallend klassifiziert werden. Steigende Trends treten an 9 % der Messstellen auf.

Auch wenn die Mehrheit der Messstellen keine signifikante Änderung aufweist, treten Abnahmen der Grundwasserstände räumlich weit verbreitet und in vielen Regionen Deutschlands auf. Besonders ausgeprägt ist dieser Trend in GR1 im Westen Niedersachsens und Teilen Brandenburgs, Nordrhein-Westfalens sowie Mitteldeutschlands (GR5). Einzelne Regionen weisen signifikante Anstiege der Grundwasserstände auf, wie beispielsweise im Hessischen Ried (GR3), im mitteldeutschen Braunkohlerevier (GR1) sowie in Berlin.

Ergänzend zur langfristigen Trendanalyse zeigen die ausgewerteten Daten, dass die Grundwasserstände in der Referenzperiode 1991–2020 einer ausgeprägten räumlichen und zeitlichen Variabilität unterliegen. Dazu zählen Trocken- und Feuchtphasen, deren Intensität regional variiert und die zum Teil ganz Deutschland betreffen. In Abb. 3b lassen sich im betrachteten Zeitraum zwei markante, mindestens zweijährige Trockenperioden erkennen, in denen zeitweise die Hälfte aller Messstellen niedrige Grundwasserstände aufweisen: Trockenperiode 1 (T1) von 1991–1993 und T2 von 2019–2020. Insgesamt werden während T1 bis zu 59 % und während T2 bis zu 75 % der Messstellen den niedrigen Grundwasserstandsklassen zugeordnet: Der Anteil an Messstellen mit extrem niedrigen Grundwasserständen liegt bei maximal 24 % (T1) bzw. maximal 40 % (T2). Die räumliche Verteilung der Trockenheit variiert zwischen den einzelnen Perioden: T1 betrifft hauptsächlich GR1 (Nord- und mitteldeutsches Lockergesteinsgebiet), GR3 (Oberrheingraben mit Mainzer Becken und nordhessischem Tertiär) und GR9 (Südostdeutsches Grundgebirge). Allerdings treten auch regionale Unterschiede auf (Abb. 3a): So sind beispielsweise Teile Brandenburgs im Jahr 1991 sowie Westniedersachsen im Jahr 1993 nicht von ausgeprägt niedrigen Grundwasserständen betroffen. T2 ist besonders markant, da diese Trockenperiode nicht nur eine große Anzahl von Messstellen umfasst, sondern auch räumlich am weitesten ausgedehnt ist und das gesamte Bundesgebiet betrifft.

Aufgrund der verzögerten Reaktion vieler Grundwassersysteme treten Trocken- und Feuchtperioden im Grundwasser zeitlich versetzt zu meteorologischen Trocken- und Feuchtphasen auf. Dies erklärt, weshalb das Jahr 2003 trotz der ausgeprägten meteorologischen Dürre (Rebetez et al. 2006) im Hinblick auf die Grundwasserstände noch als Feuchtperiode eingeordnet wird: Die Grundwasserstände waren infolge vorangegangener feuchter Monate, bezogen auf das gesamte hydrologische Jahr, weiterhin hoch. Ein vergleichbarer Effekt zeigt sich auch für die meteorologische Trockenphase ab 2018 (Hari et al. 2020), die sich

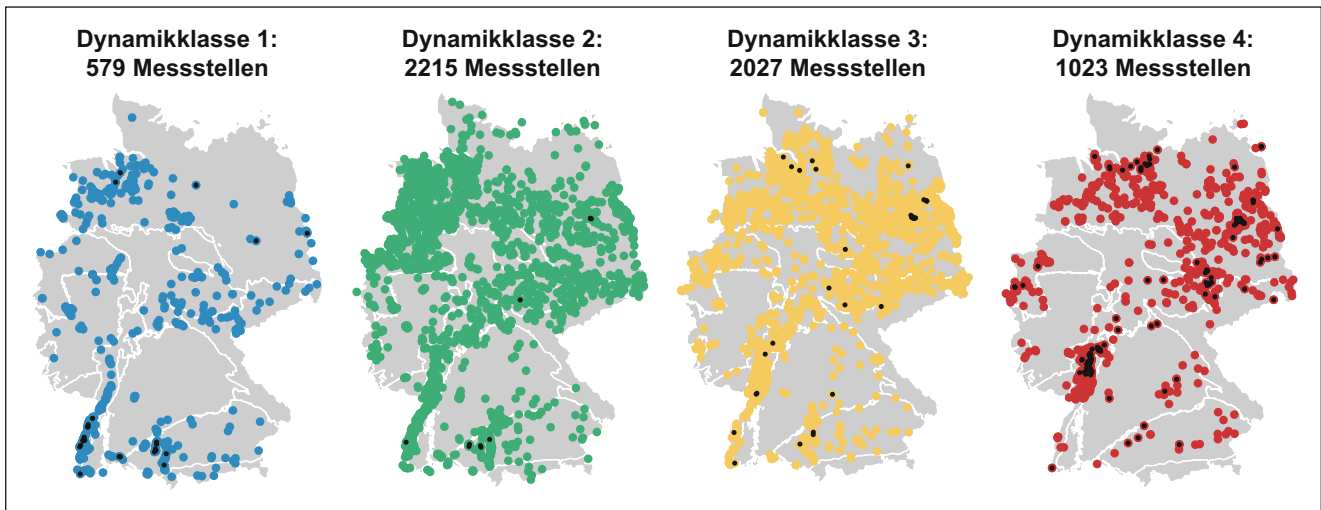


Abb. 5 Räumliche Verteilung der Dynamikklassen (farbige Punkte) sowie Messstellen mit geringer Korrelation zu Temperatur und Niederschlag (schwarz)

Fig. 5 Spatial distribute on of dynamic classes (coloured points) and measuring stations with low correlation to temperature and precipitation (black)

an einigen Messstellen bereits im Verlauf des Jahres 2018 abzeichnet (vgl. Abschnitt: Charakteristische Eigenschaften der Dynamikklassen). In der auf Medianwerten pro hydrologischem Jahr basierenden Analyse wird diese jedoch erst zeitlich verzögert im Jahr 2019 sichtbar.

Neben den Trockenperioden lassen sich auch zwei markante, mindestens zweijährige Feuchtperioden identifizieren, in denen mehr als die Hälfte aller Messstellen hohe bis sehr hohe Grundwasserstände verzeichnen: Feuchtperiode 1 (F1) von 1994–1995 sowie F2 von 1999–2003, wobei F2 vor allem zu Beginn und Ende des Zeitraums durch erhöhte Grundwasserstände auffällt. In diesen Phasen werden an bis zu 66 % (F1) bzw. 67 % (F2) der Messstellen hohe bis extrem hohe Grundwasserstände gemessen, wobei bis zu 23 % bzw. 21 % in die Kategorie „extrem hoch“ fallen. Beide Perioden zeigen eine weiträumige Ausdehnung und betreffen nahezu das gesamte Bundesgebiet.

Abgesehen von diesen deutschlandweit wirksamen Phasen zeigen die Daten eine regional differenzierte Ausprägung von Trocken- und Feuchtperioden. So werden beispielsweise in den Jahren 2010 bis 2013 in weiten Teilen Ostdeutschlands sehr hohe Grundwasserstände beobachtet, während zeitgleich in Niedersachsen überwiegend niedrige Wasserstände vorherrschen.

Charakterisierung und Analyse von Ganglinientypen mit unterschiedlicher Dynamik

Verteilung der Dynamikklassen innerhalb der Hohlraumarten und Anteil klimatisch entkoppelter Messstellen

Der Großteil der untersuchten Messstellen (85 %) befindet sich in Poren-Aquiferen. Messstellen in Kluft-Aquiferen (9 %), Kluft-/Karst-Aquiferen (3 %) und Kluft-/Poren-Aquiferen (2 %) sind dagegen deutlich seltener vertreten. Insgesamt zeigt sich keine eindeutige Dominanz einer bestimmten Dynamikklasse innerhalb der Hohlraumarten und alle Klassen treten in allen Aquifertypen auf (Abb. 4a). Messstellen mit höherer Dynamik (Klassen 1 und 2) sind tendenziell etwas häufiger in Kluft- und Karstaquiferen vertreten. Eine eindeutige Bewertung dieser Unterschiede ist jedoch schwierig, da Porengrundwasserleiter im Datensatz deutlich überrepräsentiert sind.

Abb. 4b zeigt die räumliche Verteilung des Grundwassers unter der Geländeoberkante (m unter GOK) bezogen auf den Median der Jahre 1991–2020. Mit einem Median von 3,19 m unter GOK ist ein großer Teil der Messstellen flachgründig. Dies ist unter anderem auf die bereits genannten hohen Messstellendichten in bestimmten Gebieten zurückzuführen und spiegelt neben den hydrogeologischen Verhältnissen auch monitoringbedingte Schwerpunkte wider. Tiefer liegende Messstellen sind entsprechend seltener. Lediglich ein kleiner Anteil des Datensatzes umfasst Messstellen mit tieferliegenden Grundwasserständen: Das 75. Perzentil liegt bei 6,73 m unter GOK, das 95. Perzentil bei 20,10 m unter GOK.

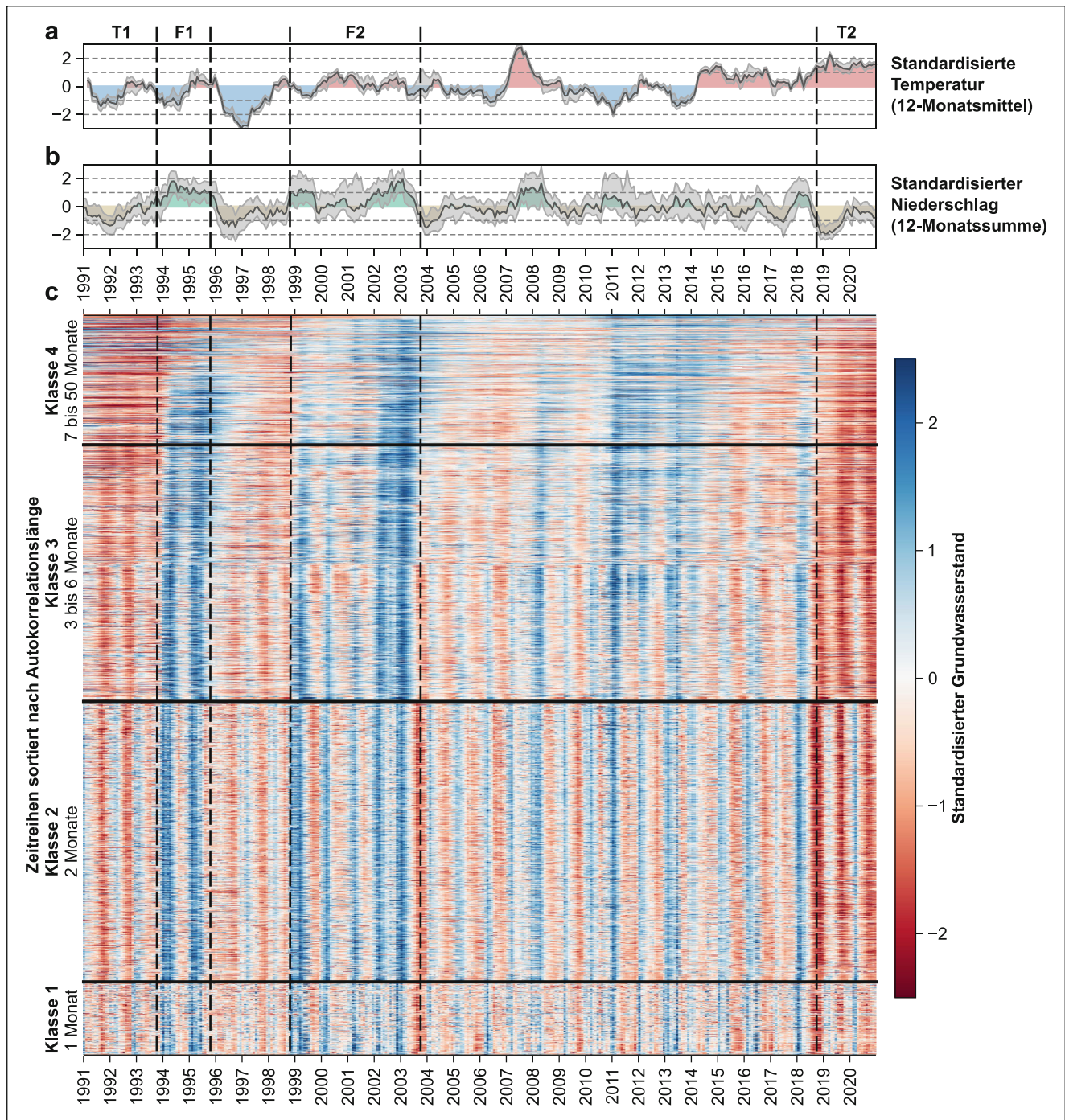


Abb. 6 Zeitliche Entwicklung der standardisierten Lufttemperatur (a) und des standardisierten Niederschlags über alle Grundwassermessstellen (b). Die dargestellten Werte basieren auf gleitenden 12-Monatsmitteln bzw. -summen der jeweils vorangegangenen zwölf Monate. Die Medianwerte sind als Linien dargestellt, die grauen Flächen markieren das 10.–90. Perzentil. Die Heatmap (c) zeigt die standardisierten Grundwasserganglinien in der Referenzperiode 1991–2020. Die Ganglinien sind absteigend nach ihrer Autokorrelationslänge sortiert und in Dynamikklassen 1 bis 4 unterteilt. Bundesweit ausgeprägte Trocken- und Feuchtperioden aus Abb. 3 sind *markiert*

Fig. 6 Temporal development of standardised air temperature (a) and standardised precipitation across all groundwater measuring stations (b). Values are based on 12-month moving averages and sums of the preceding twelve months. The median values are shown as lines, with the grey areas marking the 10th to 90th percentile. The heat map (c) shows the standardised groundwater hydrographs for the reference period 1991–2020. The hydrographs are sorted in descending order according to their autocorrelation length and divided into dynamic classes 1 to 4. Periods of nationwide drought and wet conditions shown in Abb. 3 are *highlighted*

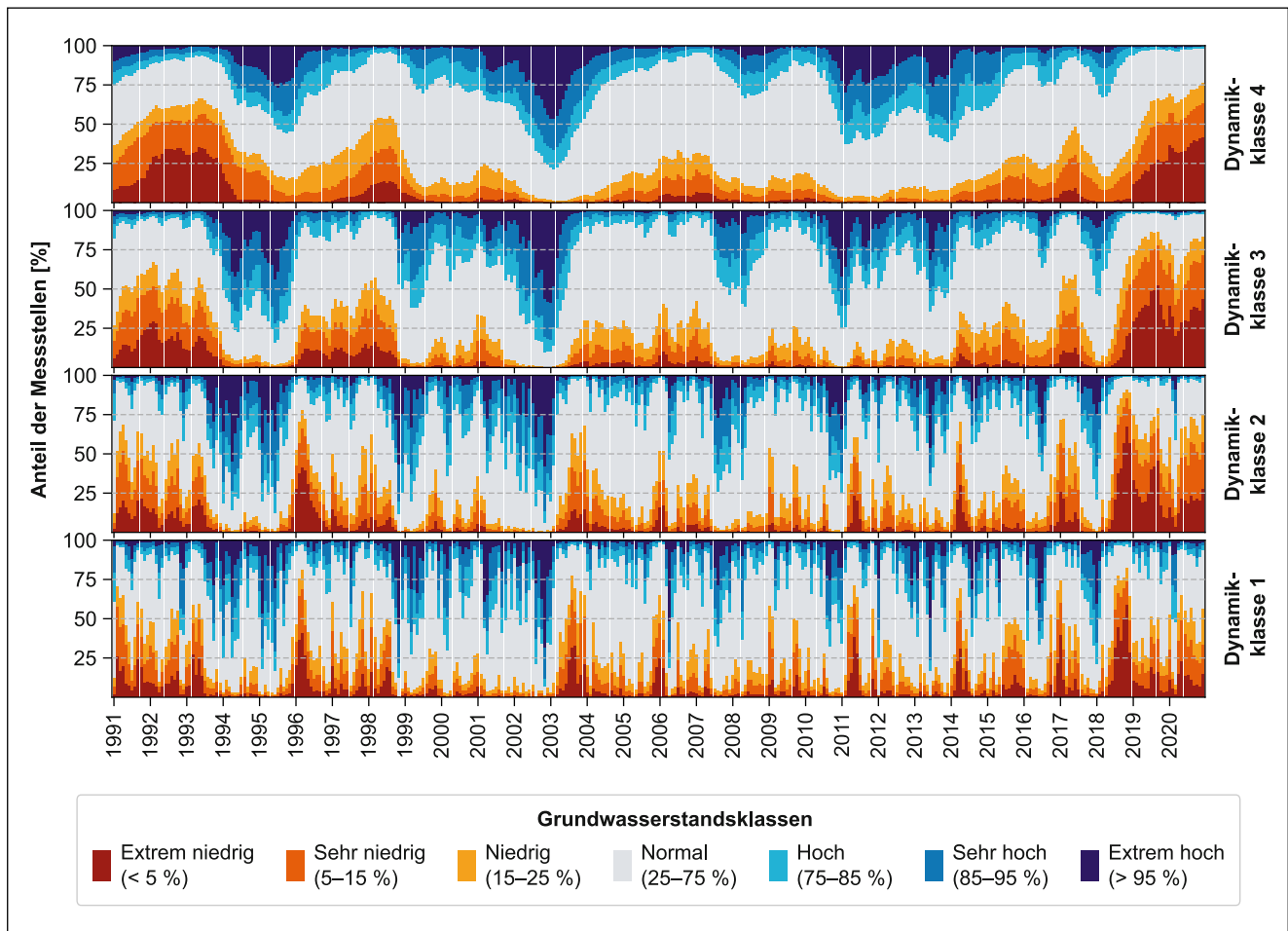


Abb. 7 Monatliche Entwicklung der Grundwasserstandsklassen pro Dynamikkategorie verdeutlicht Unterschiede in der Reaktionsgeschwindigkeit und Systemträgheit

Fig. 7 Monthly development of groundwater level classes per dynamic class illustrates differences in reaction speed and system inertia

Insgesamt werden 242 Messstellen (4,1 % aller Messstellen) als klimatisch entkoppelt identifiziert, da sie eine geringe Kreuzkorrelation sowohl mit dem akkumulierten Temperatur- als auch dem Niederschlagssignal aufweisen. Diese Messstellen sind in allen Dynamikklassen vorhanden, wobei der größte Anteil mit 166 Messstellen (16,2 % aller Messstellen der Klasse) in der Dynamikkategorie 4 zu finden ist (Tab. 5). Die räumliche Verteilung der klimatisch entkoppelten Messstellen innerhalb der Dynamikklassen ist in Abb. 5 dargestellt. Deutlich wird eine räumliche Häufung insbesondere im Bereich des Mainzer Beckens, in der mitteldeutschen und Lausitzer Braunkohleregion sowie im Berliner Raum. Diese Messstellen könnten die Analyse von Trends sowie die Bestimmung der zeitlichen Verzögerung zwischen meteorologischen Antrieben und Grundwasserreaktionen und damit potenziell die Ergebnisse verzerren. In Tab. 5 werden daher für die davon betroffenen Parameter sowohl die Medianwerte mit und ohne Berücksichtigung klimatisch entkoppelter Messstellen dargestellt.

Charakteristische Eigenschaften der Dynamikklassen

Neben den langfristigen Trends und den bundesweit identifizierten Trocken- und Feuchtperioden ist auch die Reaktionsdynamik auf klimatische Schwankungen ein zentraler Aspekt zur Charakterisierung von Grundwasserganglinien. Abb. 6 zeigt die Entwicklung der 5844 Grundwasserganglinien in der Referenzperiode, sortiert nach ihrer jeweiligen Autokorrelationslänge. Zur vergleichbaren Darstellung der zeitlichen Dynamik wurden die Ganglinien standardisiert (Mittelwert=0, Standardabweichung=1). Die für Grundwasserganglinien typischen saisonalen Schwankungen werden ebenso deutlich wie die genannten überregional geprägten Trockenperioden (T1: 1991–1993, T2: 2019–2020) und Feuchtperioden (F1: 1994–1995, F2: 1999–2003). Zudem wird visuell bereits erkennbar, dass Häufigkeit und Ausprägung von Niedrig- und Hochstandphasen maßgeblich von der Reaktionsdynamik bzw. der Autokorrelationslänge der jeweiligen Ganglinien abhängen. Die charakteristischen Unterschiede in der Reaktionsdynamik sowie standortspe-

Tab. 6 Spearman-Korrelationskoeffizienten der zeitlichen und räumlichen Merkmale mit Autokorrelationslänge sowie Kreuzkorrelationen zu Niederschlags- und Temperatursignalen**Table 6** Spearman correlation coefficients of temporal and spatial characteristics with autocorrelation length as well as cross-correlations with accumulated precipitation and temperature signals

Merkmal	r^{Spearman}		
	Autokorrelationslänge	Höchste Kreuzkorrelation Grundwasserstand und akkumuliertem Niederschlagssignal	Höchste Kreuzkorrelation Grundwasserstand und akkumuliertem Temperatursignal
Relativer Trend (ausschließlich signifikante Trends)	-0,1	-0,31	0,26
Grundwasserstand unter Geländehöhe	0,47	0,04	0,41
Jahresamplitude	-0,5	0,14	-0,48
Pardé-Saisonalität	-0,68	0,25	-0,76
Distanz zum nächsten Fließgewässer	0,28	0,13	0,11
Anzahl Hochstandphasen pro Jahr	-0,88	-0,17	-0,5
Anzahl Niedrigstandphasen pro Jahr	-0,86	-0,07	-0,54
Reaktionszeit des Grundwasserstands auf Niederschlagssignal	0,66	-0,05	0,31
Reaktionszeit des Grundwasserstands auf Temperatursignal	0,49	0	0,64

zifischen Eigenschaften werden nachfolgend für die vier definierten Dynamikklassen dargestellt.

Die Ganglinien der Dynamikklasse 1 zeigen hochdynamische, impulsartige Verläufe. Der Grundwasserstand reagiert nahezu unmittelbar auf einzelne Niederschlagsereignisse, mit einer typischen Reaktionszeit von rund einem Monat (Median). Ein ausgeprägtes saisonales Muster (Pardé-Saisonalität: 0,59) sowie hohe zeitliche Variabilität mit schnellen Wechseln zwischen Grundwasserstandsklassen (Abb. 7) kennzeichnen diese Klasse. Dementsprechend treten Niedrig- und Hochstandphasen mit 0,8 bzw. 1 Ereignissen pro Jahr am häufigsten auf, dauern jedoch mit durchschnittlich 2,2 bzw. 1,7 Monaten vergleichsweise kurz an (Tab. 5). Aufgrund des geringen Puffervermögens reagieren diese Messstellen sehr früh auf meteorologische Extreme. Sie zeigen aber auch eine rasche Regeneration innerhalb weniger Monate, selbst nach der extremen Dürrephase 2018. Im November 2018 wiesen 83 % der Messstellen in Dynamikklasse 1 niedrige bis extrem niedrige Grundwasserstände auf, bereits zwei Monate später waren es nur noch 34 % (Abb. 7). Die flachgründigen Messstellen (Median Grundwasserstand unter GOK 2,1 m) weisen im Vergleich zu den übrigen Dynamikklassen die geringste Distanz zum nächstgelegenen Fließgewässer auf (Median 360 m).

Die Ganglinien der Dynamikklasse 2 sind durch eine besonders ausgeprägte Saisonalität gekennzeichnet, erkennbar durch die höchste Pardé-Saisonalität (0,68) sowie die größte mediane Jahresamplitude (0,8 m) aller Klassen. Entsprechend weisen sie die stärkste Kreuzkorrelation aller Klassen

zum Temperaturverlauf auf ($r = -0,55$), was auf den dominanten Einfluss temperaturgesteuerter Prozesse (insbesondere der Evapotranspiration) zurückzuführen ist. Die niedrigsten Grundwasserstände treten typischerweise mit einer Verzögerung von etwa zwei Monaten nach dem jährlichen Temperaturmaximum auf. Kurzfristige Niederschlagssignale in Dynamikklasse 2 wirken sich nicht mehr unmittelbar aus, sondern sind zeitlich verzögert. Die Reaktionszeit auf das Niederschlagssignal beträgt vier Monate. Die Zahl der Niedrig- und Hochstandphasen pro Jahr ist mit durchschnittlich 0,6 bzw. 0,7 signifikant geringer als in Dynamikklasse 1, dafür dauern sie mit 3 bzw. 2,4 Monaten länger an. Dementsprechend verläuft die Regeneration nach Trockenperioden verzögert: Im Extremjahr 2018 lagen die Grundwasserstände zwischen Oktober und Dezember bei über 90 % der Messstellen im Bereich der niedrigen Klassen. Eine leichte Regeneration stellte sich erst im Juni 2019 ein, wobei trotzdem noch 57 % der Messstellen in niedrige Grundwasserstandsklassen fielen (Abb. 7). Auch Dynamikklasse 2 ist durch oberflächennahe Grundwasserstände geprägt (Median: 2,1 m unter GOK). Allerdings ist die Distanz zum nächsten Fließgewässer mit 600 m (Median) höher als in Klasse 1.

Messstellen der Dynamikklasse 3 weisen eine gedämpfte saisonale Dynamik auf. Zwar ist ein saisonaler Jahresgang erkennbar (Pardé-Saisonalität: 0,44), jedoch weniger stark ausgeprägt als in den Klassen 1 und 2. Dies spiegelt sich auch in einer geringeren medianen Jahresamplitude von 0,5 m wider. Der Grundwasserstand wird überwiegend durch länger andauernde Witterungsperioden geprägt. Die

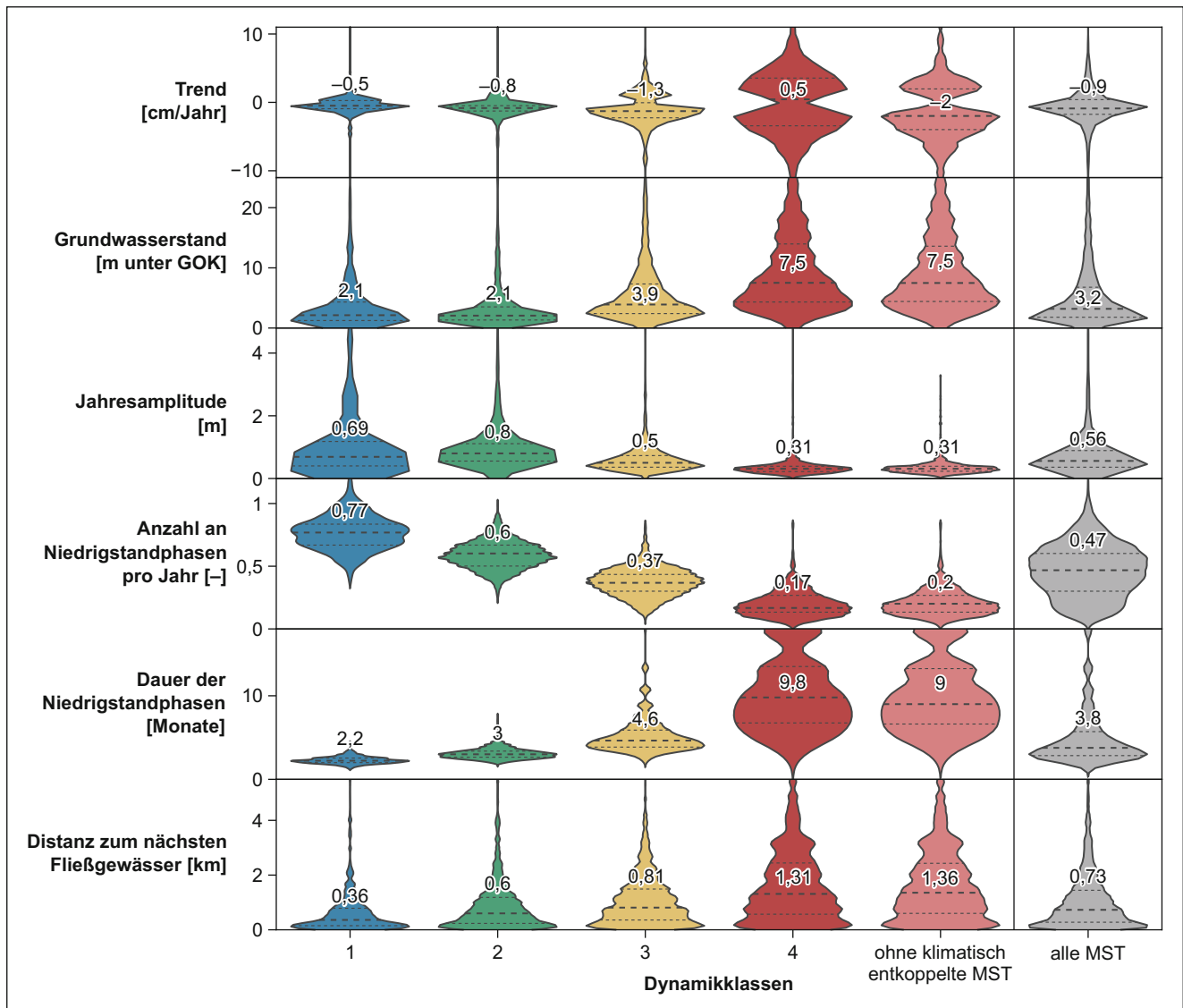


Abb. 8 Vergleich ausgewählter zeitlicher und räumlicher Merkmale zwischen den Dynamikklassen auf Basis von Violinendiagrammen (bezogen auf Referenzperiode 1991–2020) (gestrichelte Linie: Median; gepunktete Linie: Quartile; Zahlen repräsentieren die Medianwerte)

Fig. 8 Comparison of selected temporal and spatial characteristics between dynamic classes based on violin plots (referenced to the period 1991–2020) (dashed line: median; dotted line: quartiles; numbers represent median values)

stärkere Dämpfung meteorologischer Einflüsse zeigt sich in einer verlängerten Reaktionszeit auf das Niederschlagssignal (Median: sieben Monate) sowie in einer deutlich geringeren Zahl von Hoch- und Niedrigstandphasen im Vergleich zu den Klassen 1 und 2 (je 0,40 pro Jahr). Diese Phasen dauern allerdings mit durchschnittlich 4,6 bzw. 4,4 Monaten deutlich länger an. Die anhaltende Trockenheit 2018 führte in dieser Klasse erst mit deutlicher Verzögerung zu sinkenden Grundwasserständen, wobei der Höhepunkt im darauffolgenden Herbst erreicht wurde: Im September 2019 wiesen 87 % der Messstellen der Dynamikkategorie 3 niedrige bis extrem niedrige Grundwasserstände auf. Die beobachtete Trägheit in der Reaktion auf klimatische Einflüsse ist unter anderem auf das größere Dämpfungsvermögen durch

eine größere Tiefe bis zur Grundwasseroberfläche (Median: 3,9 m) und größere Entfernungen zum nächstgelegenen Fließgewässer (Median: 810 m) zurückzuführen.

Dynamikkategorie 4 zeigt die stärkste Dämpfung in der Reaktionsdynamik, wobei der Grad der Dämpfung zwischen den Messstellen deutlich variiert: Die Autokorrelationslängen reichen in Einzelfällen bis zu 50 Monaten (Abb. 6). Ganglinien der Dynamikkategorie 4 reagieren nicht mehr auf einzelne meteorologische Ereignisse, sondern auf länger andauernde klimatische Bedingungen. Saisonale Schwankungen sind nur noch gering ausgeprägt: sowohl die Pardé-Saisonalität (0,15) als auch die jährliche Schwankungsbreite (0,3 m) sind signifikant niedriger als in den übrigen Klassen. Dementsprechend treten Niedrig- und Hochstandpha-

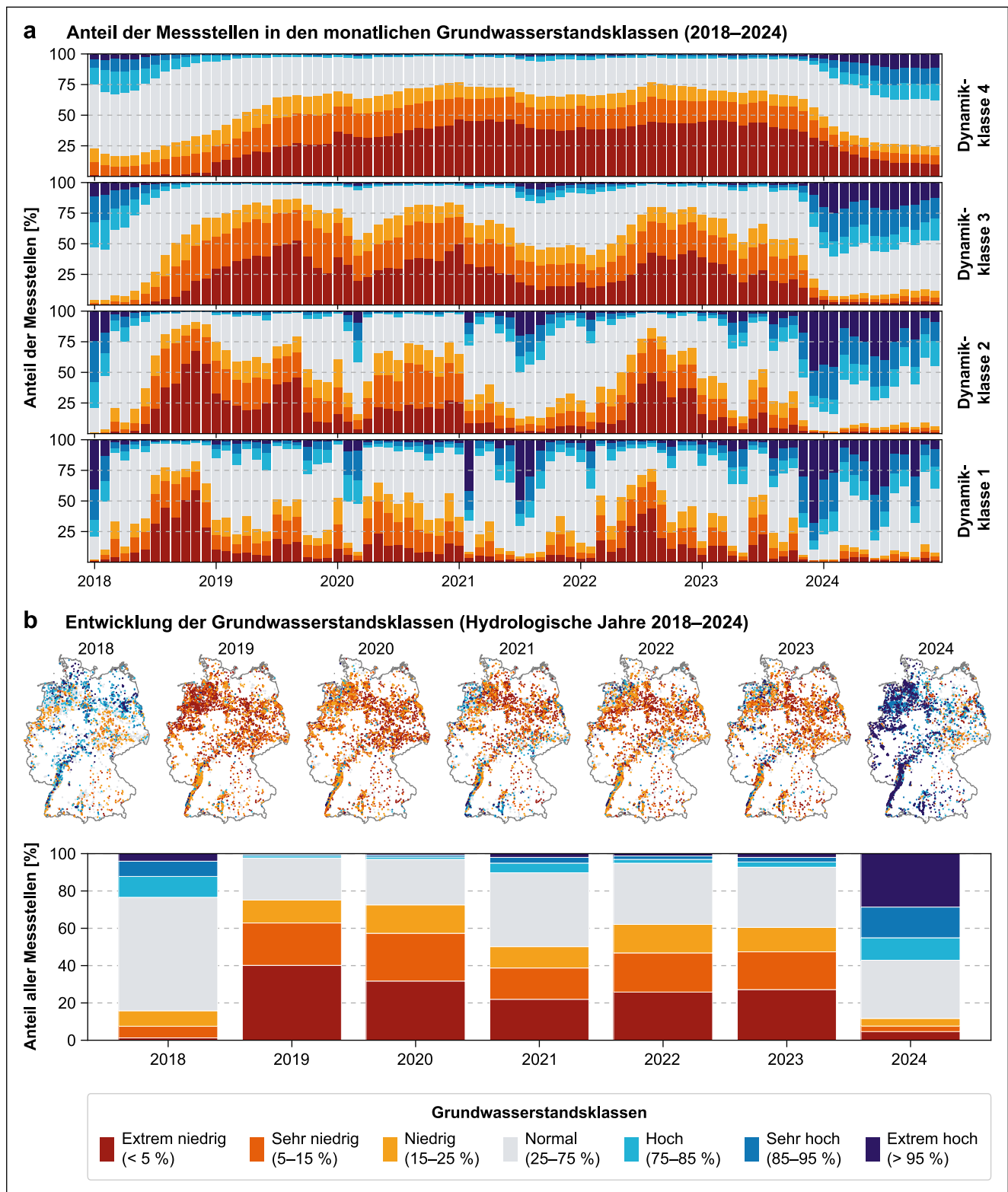


Abb. 9 **a** Monatliche Entwicklung der Grundwasserstandsklassen pro Dynamikkategorie (2018–2024) veranschaulicht Unterschiede in Reaktionszeit und Persistenz von Trockenphasen unter Anwendung der Perzentilgrenzen der Referenzperiode 1991–2020. **b** Räumliche und zeitliche Entwicklung der Grundwasserstandsklassen in der Trockenperiode (2018–2024) basierend auf den Jahresmittelwerten je hydrologisches Jahr

Fig. 9 **a** Monthly development of groundwater level classes per dynamic class (2018–2024) illustrates differences in response time and persistence of dry periods using the percentile limits of the reference period 1991–2020. **b** Spatial and temporal development of groundwater level classes during the dry period (2018–2024) based on annual averages per hydrological year

sen nur selten auf (jeweils 0,2 Ereignisse pro Jahr), dauern dafür aber mit durchschnittlich 9,8 bzw. 9 Monaten mehr als viermal so lang wie bei hochdynamischen Ganglinien. Die Auswirkungen der Trockenphase 2018 zeigen sich in dieser Klasse erst deutlich im September des darauffolgenden Jahres. Der Anteil der Messstellen mit niedrigen Grundwasserständen steigt noch bis zum Ende der Referenzperiode auf 76% an (Abb. 7). Die Ganglinien dieser Klasse bilden somit langfristige Entwicklungen ab, die sich über mehrere Jahre hinweg aufbauen. Sie sind typischerweise durch tieferliegende Grundwasserstände (Median: 7,5 m) sowie eine besonders große Entfernung zum nächstgelegenen Fließgewässer gekennzeichnet (Median: 1,31 km).

Räumliche Verteilung der Dynamikklassen und Korrelationen mit Systemmerkmalen

Die Dynamikklassen sind insgesamt breit über das Bundesgebiet verteilt (Abb. 5), insbesondere die Klassen 2 und 3, welche eine große Anzahl an Messstellen umfassen. In weiten Teilen weisen die Klassen eine ähnliche räumliche Verteilung wie die Gesamtheit der Messstellen auf. Dennoch zeigen sich zwischen den einzelnen Klassen in bestimmten Regionen Unterschiede in der räumlichen Häufung. Dynamikkategorie 1 zeigt eine erhöhte Dichte entlang des südlichen Oberrheingraben, während sie in Nordostdeutschland nur vereinzelt vertreten ist. Dynamikkategorie 2 weist ein hohes Vorkommen in Nordwestdeutschland auf, während Dynamikkategorie 3 gehäuft vor allem im Osten Deutschlands verbreitet ist.

Bezüglich der meteorologischen Steuerung zeigen die Ganglinien der Dynamikklassen 1 bis 3 höhere Kreuzkorrelationen mit der Lufttemperatur als mit dem Niederschlag (Tab. 5). Typisch ist eine Verzögerung von etwa zwei bis drei Monaten zwischen dem sommerlichen Temperaturmaximum und dem Eintreten der niedrigsten Grundwasserstände. Das spiegelt den indirekten Einfluss der temperaturabhängigen Evapotranspiration auf die Grundwasserneubildung wider und prägt das saisonale Verhalten vieler Ganglinien. Werden meteorologische Signale jedoch über mehrere Monate bis hin zu mehrjährigen Zeiträumen akkumuliert und mittels Kreuzkorrelation ausgewertet, kehrt sich das Bild um: Dann überwiegt in allen Klassen der Zusammenhang mit dem akkumulierten Niederschlag leicht (Tab. 5). Die Aggregation glättet die kurzfristige Niederschlagsvariabilität und betont längerfristige Feucht- und Trockenphasen, die die Grundwasserstandsentwicklung maßgeblich steuern.

Insgesamt lässt sich beobachten, dass mit abnehmender Dynamik der Ganglinien und entsprechend zunehmender Autokorrelationslänge, Niedrig- und Hochstandphasen verzögert einsetzen und über längere Zeiträume andauern. Zur Quantifizierung dieser Zusammenhänge wurde der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient verwendet, der auch mo-

notone, nichtlineare Zusammenhänge erfasst. Dabei zeigen sich deutliche Korrelationen (Tab. 6) der Autokorrelationslänge mit der Anzahl von Niedrig- und Hochstandphasen ($r=-0,86$ und $r=-0,88$) sowie der Reaktionszeit des Grundwasserstands auf Temperatur- und Niederschlagssignale ($r=0,49$ und $r=0,66$). Auch das saisonale Verhalten ist mit zunehmendem Dämpfungsgrad weniger ausgeprägt ($r=-0,68$). Diese gedämpfte Reaktion auf meteorologische Einflüsse ist charakteristisch für stärker gepufferte Grundwassersysteme und steht grundsätzlich im Zusammenhang mit standortspezifischen Faktoren. In diesem Kontext zeigt sich eine positive Korrelation zwischen der Autokorrelationslänge und dem Grundwasserstand unter Geländehöhe ($r=0,47$), während der Zusammenhang mit der Entfernung zum nächstgelegenen Fließgewässer geringer ausfällt ($r=0,28$). Beide Standortparameter sind untereinander nur schwach korreliert ($r=0,19$).

Innerhalb der Dynamikklassen treten für die meisten Merkmale nur geringe Unterschiede auf, wenn klimatisch entkoppelte Messstellen gezielt ausgeschlossen werden. Deutliche Abweichungen bestehen jedoch in der Reaktionsverzögerung auf Niederschlag und Temperatur sowie in der Trendentwicklung, insbesondere in Dynamikkategorie 4. Der dort beobachtete positive Trend (Tab. 5; Abb. 8) ist im Wesentlichen auf die 166 klimatisch entkoppelten Messstellen zurückzuführen, die im Median einen Grundwasseranstieg von 4,7 cm/Jahr (1,7 %/Jahr) aufweisen. Für die Bewertung der klassenspezifischen Trends werden daher ausschließlich Messstellen ohne klimatische Entkopplung und mit signifikanten Trends berücksichtigt (Tab. 5). Somit nimmt die Trendstärke in der Referenzperiode 1991–2020 mit abnehmender Dynamik zu: von $-0,5$ cm/Jahr ($-0,3$ %/Jahr) in Klasse 1 bis -2 cm/Jahr ($-1,16$ %/Jahr) in Klasse 4.

Eine klare systematische Beziehung zwischen der Autokorrelationslänge als Proxy für die Reaktionsdynamik und der relativen Trendstärke besteht nicht ($r=-0,1$; Tab. 6). Da viele der steigenden Trends zum Teil klar auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen sind (siehe Abschnitt Diskussion) und langfristige Effekte häufig auch mit größeren Autokorrelationslängen einhergehen, ist dieser Zusammenhang allerdings nur eingeschränkt aussagekräftig. Sinnvoller ist es, die Kreuzkorrelation als Maß für die Kopplung des Grundwasserstands an klimatische Einflüsse heranzuziehen, also dafür, wie stark die Ganglinie dem akkumuliertem Niederschlags- bzw. Temperatursignal folgt. Setzt man diese in Beziehung zum relativen Trend, zeigen sich erkennbare Zusammenhänge: Zwischen Trend und Niederschlagskopplung besteht eine negative Korrelation ($r=-0,31$), während zur Temperaturkopplung eine positive Beziehung vorliegt ($r=0,26$). Das heißt, Messstellen, die stärker an Temperatur- und Niederschlagssignalen gekoppelt sind, weisen tendenziell größere Trendstärken fallender Grundwasserstände auf.

Entwicklung der Grundwasserstände in den letzten Jahren (2018–2024)

Die Auswertung der vergangenen Jahre bis Ende 2024 erfolgt vor dem Hintergrund zunehmender klimatischer Extremereignisse, insbesondere anhaltender Trockenheit und steigender Temperaturen, die seit dem Dürrejahr 2018 die Grundwasserverhältnisse in vielen Regionen Deutschlands nachhaltig geprägt haben. Trotz der formalen Zugehörigkeit zur Referenzperiode markiert das Jahr 2018 den Beginn einer außergewöhnlichen Entwicklung, weshalb der Zeitraum zusammenhängend analysiert wird, um die zeitliche Persistenz der Auswirkungen zu erfassen.

Aufgrund der verzögerten Reaktion vieler Grundwassersysteme sind in den Jahren 2019 und 2020 ein Großteil der Messstellen bundesweit von niedrigen bis extrem niedrigen Grundwasserständen betroffen (bis zu 75 %). Nach einer leichten Regeneration im Jahr 2021 verschärft sich die Lage in den Jahren 2022 und 2023 erneut: Bei etwa 62 % aller Messstellen werden niedrige bis extrem niedrige Grundwasserstände registriert (Abb. 9). Erst mit dem feuchten Winter 2023/24 setzt eine Erholung ein. In vielen Regionen, insbesondere in Süd- und Westdeutschland, steigen die in den Messstellen beobachteten Grundwasserstände deutlich an und liegen im hydrologischen Jahr 2024 bei rund 48 % der Messstellen im hohen bis extrem hohen Bereich.

Unterschiedliche Speicher- und Dämpfungskapazitäten führen zu deutlichen Unterschieden in der Ausprägung und Regeneration während der Dürreperiode: Schnell reagierende Ganglinien der Grundwassermessstellen der Dynamikklasse 1 sprechen deutlich auf einzelne klimatische Extremereignisse an, sodass mehrere Phasen mit niedrigen bis sehr niedrigen Grundwasserverhältnissen klar voneinander abgegrenzt werden können und im Sommer 2021 bereits wieder bis zu 70 % der Messstellen hohe bis extrem hohe Grundwasserstände aufweisen (Abb. 9). Mit zunehmender Systemträgheit verliert sich die zeitliche Differenzierbarkeit der Grundwasserreaktion, und Dürrephasen treten deutlich persistenter auf. In der Dynamikklasse 3 liegt der Anteil hoher bis extrem hoher Grundwasserstände im Jahr 2021 beispielsweise lediglich bei rund 17 %. Noch ausgeprägter zeigt sich diese Trägheit in der Dynamikklasse 4: Hier dominiert fast über den gesamten Zeitraum eine durchgehende Phase mit Grundwasserniedrigständen. Im Zeitraum 2019–2023 befinden sich im Mittel rund 60 % der Messstellen dieser Klasse durchgehend im niedrigen bis extrem niedrigen Bereich, zeitweise liegt der Anteil sogar bei 76 % (August 2022). Dabei erreichen bis zu 29 % (20 % im Mittel) der Messstellen der Dynamikklasse 4 im betrachteten Zeitraum neue Niedrigstände (unterhalb der Minimalwerte der Referenzperiode 1991–2020). In den Dynamikklassen 3

und 2 betreffen diese Unterschreitungen zeitweise bis zu 14 % und 10 % der Messstellen (4 % und 1 % im Mittel).

Im Zeitraum 2018–2024 lag der Grundwasserstand unter Geländehöhe (Median) um 4 cm (Klasse 1), 10 cm (Klasse 2), 30 cm (Klasse 3) und bis zu 42 cm (Klasse 4) niedriger als im Referenzzeitraum 1991–2020. Auch die Anzahl der Niedrigstandphasen pro Jahr nahm deutlich zu: Im Median stieg sie von 0,77 auf 0,86 in Klasse 1 und von 0,20 auf 0,29 in Klasse 4. Gleichzeitig verlängerte sich deren Dauer: in Dynamikklasse 4 hielten Niedrigstandphasen im Median bis zu 11,5 Monate an, verglichen mit 9 Monaten in der Referenzperiode.

Diskussion

Messstellendichte und Repräsentativität des Messnetzes

Die Aussagekraft flächendeckender Analysen zur Grundwasserentwicklung hängt maßgeblich von der Repräsentativität der zugrundeliegenden Messstellen für das Untersuchungsgebiet ab, sowohl im Hinblick auf die geografische Abdeckung als auch auf ihre unterschiedlichen Reaktionsdynamiken gegenüber externen Antrieben. Die räumliche Dichte der Messstellen variiert dabei erheblich, was unter anderem zu einer vergleichsweise starken Datenbasis in Regionen wie dem Oberrheingraben oder dem Berliner Raum führt, während andere Gebiete, etwa Teile der Mittelgebirge oder Bayerns, in dieser Analyse unterrepräsentiert sind. Diese Unterschiede spiegeln jedoch nicht nur die jeweiligen Monitoringschwerpunkte in den Bundesländern wider, sondern resultieren auch aus hydrogeologischen Gegebenheiten und Nutzungsprioritäten. In großräumigen, ergiebigen Grundwasserleitern, wie sie etwa im Oberrheingraben vorkommen, besteht ein höherer Bedarf an systematischer Überwachung. Dabei sind Porengrundwasserleiter aufgrund ihrer weiten Verbreitung und besseren Erschließbarkeit im Messnetz deutlich überrepräsentiert. In kleinräumigen, weniger ergiebigen Grundwasservorkommen, wie sie typischerweise in Mittelgebirgsregionen anzutreffen sind, ist der Aufwand eines engmaschigen Monitorings hingegen oft nicht verhältnismäßig oder wird durch Quellsstellen ergänzt, die hier nicht berücksichtigt sind. Darüber hinaus weisen Regionen mit salinar beeinflussten Grundwasserleitern, die nur eingeschränkt nutzbar sind, eine entsprechend geringere Messnetzdichte auf. Hinzu kommt, dass sich die Messstellen teils erheblich in ihrer Tiefe und den hydrogeologischen Standortbedingungen unterscheiden, was teilweise durch die unterschiedlichen Dynamikklassen abgebildet wird. Diese vertikale und horizontale Heterogenität erschwert eine einheitliche Interpretation der Ergebnisse und beeinflusst die Vergleichbarkeit zwischen Standorten,

wodurch es zu Verzerrungen in der Gesamtaussage zugunsten überrepräsentierter Regionen kommen kann.

Zudem spielt die Datenqualität eine zentrale Rolle: Für die Analyse wurden ausschließlich Messstellen mit hinreichend langen und konsistenten Zeitreihen berücksichtigt. Dadurch entfällt zwar mehr als die Hälfte der ursprünglich verfügbaren Messstellen, die verbleibende Datengrundlage gewährleistet jedoch eine hohe Verlässlichkeit der Ergebnisse und ermöglicht belastbare Aussagen zu überregionalen Mustern.

Eine flächendeckende Generalisierung der Ergebnisse ist daher nur bedingt möglich und sollte stets im Kontext der tatsächlichen räumlichen Abdeckung des Messnetzes interpretiert werden. Künftige Analysen sollten gezielt an der Repräsentativität der Datengrundlage ansetzen, weniger durch den Neubau von Messstellen, sondern vor allem durch die Verbesserung der Datenqualität und die gezielte Auswahl standorttypischer, aussagekräftiger Messstellen. Angesichts der hohen bodenkundlichen und hydrogeologischen Heterogenität ist dies zwar anspruchsvoll, aber notwendig, um belastbare Aussagen über großräumige Entwicklungen zu ermöglichen.

Langfristige Trends und Einflussfaktoren

In der Referenzperiode 1991–2020 blieb der Grundwasserstand an rund 57 % der Messstellen ohne signifikanten Trend, was auf weitgehend stabile Verhältnisse hinweist. An den übrigen 43 % der Messstellen treten dagegen signifikante Veränderungen auf, die auf eine Veränderung der klimatischen und anthropogenen Steuerungsgrößen schließen lassen. Dabei dominiert in weiten Teilen Deutschlands eine Abnahme der Grundwasserstände (Median: $-0,9$ cm pro Jahr). Auch wenn im Rahmen dieser Arbeit keine explizite Analyse der Ursachen durchgeführt wird, deutet die großräumige Verbreitung sinkender Grundwasserstände auf einen dominierenden Einfluss klimatischer Prozesse hin. Auch die Korrelationen zwischen der Trendstärke und der Kopplung der Grundwasserstände an Temperatur- und Niederschlagssignale sprechen für eine systematische Abhängigkeit von klimatischen Steuerungsgrößen. Abnehmende Grundwasserstände lassen sich somit nicht allgemeingültig auf eine Zunahme der Wasserentnahmen zurückführen: Die gesamte Wassergewinnung aus Grund- und Quellwasser in Deutschland ist zwischen 1991 und 2022 von 7,7 Mrd. m³ auf 6 Mrd. m³ zurückgegangen und damit um rund 23 % gesunken (DESTATIS 2024, 2025). Dabei entfielen rund 63 % der Entnahmen auf die öffentliche Wasserversorgung. Der spezifische Wasserverbrauch in der öffentlichen Versorgung sank in diesem Zeitraum von 144 auf 126 l pro Kopf und Tag (DESTATIS 2024). Gleichfalls sind in einzelnen Wirtschaftszweigen auch gegenteilige Entwicklungen zu beobachten: Bundesweit haben sich die Grundwasserentnahmen

aus der Land- und Forstwirtschaft zwischen 2010 und 2022 nahezu verdoppelt. In Mecklenburg-Vorpommern verzweifachten sich die Entnahmen für die landwirtschaftliche Beregnung zwischen 2007 und 2016 sogar (LAIv MV 2022; 2016). Trotz dieser Zuwächse beträgt der Anteil der Land- und Forstwirtschaft an den gesamten Wassergewinnung aus dem Grundwasser 2022 nur rund 6 % (DESTATIS 2025).

Der Einfluss anthropogener Wasserentnahmen ist vor allem in den Trendmustern auf lokaler Skala relevant und kann klimatisch bedingte Entwicklungen zusätzlich verstärken. Darüber hinaus zeigen Messstellen mit geringer Korrelation zu klimatischen Einflussgrößen häufig steigende Grundwasserstände, was ebenfalls auf anthropogene Eingriffe zurückzuführen ist. Ein Beispiel hierfür ist das Hessische Ried, wo seit den 1990er-Jahren Anlagen zur künstlichen Grundwasseranreicherung in Betrieb sind und wesentlich zum Anstieg der Grundwasserstände, die in 1970er-Jahren stark abgesenkt worden waren, beitragen (Staude 2023). Im Lausitzer, mitteldeutschen (hier nördlich von Leipzig) und rheinischen Braunkohlerevier ist ein Anstieg der Grundwasserstände infolge des Endes langjähriger Sumpfungmaßnahmen in ehemaligen Tagebauen zu beobachten (Uhlmann et al. 2023; LANUV 2023; LMBV 2016). Auch in Berlin lassen sich die Auswirkungen veränderter Entnahmepraktiken erkennen: Ein Rückgang der Grundwasserentnahmen um rund 40 % im Zeitraum 1989 bis 2000 führte hier zu einem Anstieg der Grundwasserstände und entsprechend positiven Trends im Referenzzeitraum 1991–2020 (Schafhauser 2014), allerdings ist das System sehr dynamisch, so stiegen seit 2015 die Entnahmen wieder an (Frommen und Moss 2021).

Die vorliegende Trendanalyse erfolgt wie die CORRECTIV-Studie (Joeres et al. 2022) für einen großen bundesweiten Datensatz mit einer ähnlichen Anzahl von Messstellen (5844 gegenüber 6677) über einen vergleichbaren Zeitraum (1991–2020 gegenüber 1990–2021), unterscheidet sich jedoch in der methodischen Umsetzung. Während Joeres et al. (2022) zur Reduktion serieller Abhängigkeiten die Trend-Free Pre-Whitening-Methode einsetzt, wird hier der modifizierte Mann-Kendall-Test nach Hamed und Rao (1998) verwendet, der die Autokorrelation direkt in der Varianzschätzung berücksichtigt. Die Ergebnisse der Trendanalyse sind weitestgehend vergleichbar. Allerdings identifiziert die CORRECTIV-Studie etwas mehr Messstellen mit fallenden Trends (24 % im Vergleich zu 22 %) sowie einen größeren Anteil an steigenden Trends (15 % im Vergleich zu 9 %). Diese Abweichungen sind vermutlich auf Unterschiede in der methodischen Vorgehensweise sowie in der Datengrundlage zurückzuführen. Darüber hinaus werden in der vorliegenden Studie regionale Trendursachen benannt und bundesweit quantifiziert, wobei unterschiedliche Reaktionsdynamiken von Grundwassersystemen berücksichtigt werden.

Insgesamt deutet die großräumige Abnahme von Grundwasserständen bei gleichzeitiger Abnahme von Grundwasserentnahmen darauf hin, dass klimatische Prozesse eine zentrale Rolle bei der langfristigen Entwicklung der Grundwasserstände spielen, während anthropogene Einflüsse vorrangig auf lokalen bis regionalen Ebenen wirksam sind. Diese können klimatische Effekte sowohl verstärken als auch überlagern, wie anhand einzelner Regionen mit stark positiven Trends deutlich wird.

Reaktionsverhalten von Grundwassersystemen und ihre Vulnerabilität gegenüber meteorologischen Extremen

Die Analyse zeigt eine ausgeprägte räumliche und zeitliche Differenzierung des Reaktionsverhaltens von Grundwassersystemen gegenüber meteorologischen Antrieben. Die Einteilung in Dynamikklassen verdeutlicht, dass selbst unter vergleichbaren klimatischen Bedingungen innerhalb einer Region stark unterschiedliche Reaktionsmuster auftreten. Dies lässt sich insbesondere durch standortspezifische bodenkundliche und hydrogeologische Eigenschaften wie die Mächtigkeit der ungesättigten Zone und in geringerem Maße durch die Distanz zu Fließgewässern erklären, wobei zwischen beiden Merkmalen im betrachteten Datensatz lediglich eine schwache Korrelation besteht.

Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit Ebeling et al. (2025), die ebenfalls eine hohe intra-regionale Variabilität der Grundwasserreaktionen feststellen. Dort wurde neben einer clusterbasierten Gruppierung zur Identifikation charakteristischer Zeitreihenmuster auch eine Klassifizierung der Vulnerabilität gegenüber meteorologischen Dürren vorgenommen. Die Einteilung erfolgte perzentilbasiert anhand der Reaktionszeiten zwischen dem standardisierten Grundwasserindex und dem standardisierten Niederschlags-Evapotranspirationsindex, wobei schnell (35 %), mittel (32 %) und langsam (33 %) reagierende Systeme unterschieden wurden. Trotz der methodisch unterschiedlichen Herangehensweise ergeben sich konzeptionell vergleichbare Kernaussagen hinsichtlich der Bedeutung der Systempersistenz und der Vulnerabilität gegenüber klimatischen Extremereignissen.

Die hier angewandte Dynamikklassifikation basiert auf einer explizit definierten Kenngröße, der Autokorrelationslänge, und liefert damit eine transparente und vergleichsweise leicht übertragbare Systematik zur Kategorisierung des Reaktionsverhaltens von Grundwasserganglinien. Da die Autokorrelationslänge ein kontinuierliches Maß ist, beeinflusst der gewählte Grenzwert allerdings sowohl die berechneten Werte als auch die Klassenzuordnung. Die grundlegenden Zusammenhänge und zentralen Ergebnisse dieser Studie erweisen sich im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse jedoch als robust gegenüber moderaten Variationen die-

ses Grenzwerts (0,6 bis 0,8). Eine clusterbasierte Analyse der Autokorrelationsreihen selbst (Haaf und Barthel 2018) könnte potenziell zu einer ähnlichen Einteilung führen, dabei jedoch die Form und den Verlauf der Autokorrelationen stärker berücksichtigen und dadurch zusätzliche strukturelle Unterschiede zwischen Dynamiktypen identifizieren.

Grundwassersysteme mit kurzer Reaktionszeit, wie sie für Dynamikklasse 1 und 2 charakteristisch sind, reagieren besonders sensibel auf kurzfristige meteorologische Ereignisse. Gleichzeitig zeigen sie eine vergleichsweise rasche Erholung bei einer Rückkehr zu normalen Bedingungen (Dauer der Niedrigstandphasen < drei Monate). Vor dem Hintergrund künftig vermehrt auftretender Trockenphasen kann sich die Dynamik dieser Systeme weiter verstärken. Dies führt zu häufigen, wenn auch nur kurzzeitigen Niedrigständen, die lokal ökologische Beeinträchtigungen oder Nutzungskonflikte verursachen können, etwa im Bereich der öffentlichen Wasserversorgung, der landwirtschaftlichen Bewässerung oder im Zusammenhang mit grundwasserabhängigen Ökosystemen.

Im Gegensatz dazu können Grundwassersysteme mit stark verzögerter Reaktion (Dynamikklasse 4) kurzfristige meteorologische Extreme deutlich besser abpuffern und dadurch vorübergehende Trockenphasen überbrücken. Niedrigstände treten hier meist erst nach mehrmonatigen oder sogar mehrjährigen Trockenperioden auf, während die Erholung entsprechend langsamer verläuft. Dadurch können die Auswirkungen klimatischer oder anthropogener Belastungen noch lange nachwirken. Grundwasserstände fallen teilweise weiter, selbst wenn sich die meteorologischen Bedingungen bereits wieder normalisiert haben. Im Zuge des Klimawandels, mit einer erwarteten Zunahme von mehrjährigen und wiederholten Dürren (Hari et al. 2020; IPCC 2021), gelten Grundwassersysteme mit stark verzögerter Reaktion daher als besonders vulnerabel.

Ein fundiertes Verständnis der standortspezifischen Reaktionsverzögerung bildet eine wesentliche Grundlage, um Frühwarnsysteme, Risikobewertungen und Anpassungsstrategien differenziert an die Dynamik verschiedener Grundwassersysteme anzupassen und ihre Resilienz gegenüber klimatischen Extremen gezielt zu stärken, und bildet zugleich eine wichtige Grundlage für die gezielte Weiterentwicklung von Messnetzen sowie für eine langfristig tragfähige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen. Gleichwohl beziehen sich die Auswertungen ausschließlich auf Grundwasserstände und deren zeitliche Entwicklung. Sie erlauben daher keine Rückschlüsse auf das tatsächlich vorhandene Wasservolumen, da eine gleich große Änderung des Wasserstands je nach Gesteins- und Porenraumverhältnissen sehr unterschiedliche Wassermengen betrifft. Selbst geringe Schwankungen können jedoch in flurnahen Bereichen erhebliche ökologische Folgen haben, etwa wenn Feuchtgebiete oder kleine Gewässer austrocknen.

Schlussfolgerungen

Mit knapp 6000 analysierten Messstellen bietet die Studie einen systematischen Überblick über die langfristige Entwicklung der Grundwasserstände in Deutschland im klimatologischen Referenzzeitraum 1991–2020 sowie deren jüngste Entwicklung im Kontext der Trockenjahre ab 2018. Trotz regionaler Ungleichgewichte in der Messstellendichte ermöglicht der große Datenumfang eine belastbare Einschätzung überregionaler Muster der Grundwasserstands-entwicklung in Deutschland. Die Ergebnisse unterstreichen zugleich die Bedeutung eines qualitativ hochwertigen und repräsentativen Messnetzes für zukünftige bundesweite Bewertungen. Dabei stellt insbesondere die gezielte Weiterentwicklung des bestehenden Messnetzes durch eine Verbesserung der Datenqualität einen wirksamen und effizienten Hebel dar.

Die Trendanalyse zeigt, dass an 43 % der Messstellen signifikante Veränderungen auftreten, überwiegend in Form sinkender Grundwasserstände. Diese Entwicklung ist bundesweit zu beobachten, unterscheidet sich jedoch regional deutlich in ihrer Intensität. Die starke Kopplung vieler Grundwasserstände an meteorologische Signale und der gleichzeitige Rückgang der Entnahmen deuten auf vorwiegend klimatische Einflüsse hin, während anthropogene Ursachen vor allem lokal und regional wirksam sind.

Während der Referenzperiode zeigen die Grundwasserstände insgesamt eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität. Es treten zwei ausgeprägte mehrjährige Trocken- und Feuchtperioden auf, die deutschlandweit zu teils extrem niedrigen bzw. hohen Grundwasserständen führen. Besonders die Trockenphase 2019–2023 sticht durch ihre bundesweite Ausdehnung und Intensität hervor.

Die systematische Einteilung der Messstellen in Dynamikklassen erlaubt es, unterschiedliche Reaktionsmuster auf meteorologische Antriebe zu erfassen und zu vergleichen. Diese Differenzierung bietet wertvolle Anknüpfungspunkte für Frühwarnsysteme und Risikoabschätzungen. Ein fundiertes Verständnis der standortspezifischen Dynamik trägt wesentlich zur Entwicklung resilienter Anpassungsstrategien bei und unterstützt die gezielte Weiterentwicklung von Monitoringnetzen sowie eine nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen.

Darüber hinaus bietet die hier vorgestellte Systematisierung auch konkrete Anwendungsmöglichkeiten. Auf Basis der identifizierten Dynamikklassen lassen sich standortspezifisch Grundwassersysteme mit höherer oder geringerer Resilienz gegenüber meteorologischen Extremen abgrenzen und so Vulnerabilitäten räumlich differenziert bewerten. Die charakteristischen Reaktionsmuster können zudem als Referenz dienen, um Analogieschlüsse für Messstellen mit kürzeren oder lückenhaften Zeitreihen zu ziehen. Damit steht ein Instrument zur Verfügung, das sowohl das

Verständnis regionaler Grundwasserreaktionen vertieft als auch eine praxisnahe Grundlage für die Weiterentwicklung wasserwirtschaftlicher Bewertungs- und Managementansätze schafft. Nicht zuletzt bildet diese Auswertung eine wichtige Grundlage für die fortlaufende Bewertung der Grundwasserstandsentwicklung in Deutschland.

Danksagung Wir danken Ezra Haaf und den beiden anonymen Gutachtern herzlich für die Zeit, die sie sich für die Begutachtung unseres Beitrags genommen haben. Ihre konstruktiven Kommentare waren äußerst hilfreich und haben wesentlich zur Verbesserung des Manuskripts beigetragen.

Förderung Für die Erstellung dieses Manuskripts wurden keine Mittel bereitgestellt.

Author Contribution Alle Autor*innen haben zur Konzeption und Planung der Studie beigetragen. Die Datenerhebung wurde von den Landesbehörden durchgeführt. Die Datenaufbereitung wurde von KIT und BGR durchgeführt. Die Datenanalyse wurde von Maria Wetzel und Mariana Gomez-Ospina durchgeführt. Der erste Entwurf des Manuskripts wurde von Maria Wetzel und Stefan Broda verfasst und alle Autor*innen haben frühere Versionen des Manuskripts kommentiert. Alle Autor*innen haben das finale Manuskript gelesen und freigegeben. Die Idee für den Artikel hatte Stefan Broda.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Datenverfügbarkeit Die in dieser Studie verwendeten Grundwasserstandsdaten wurden von den zuständigen Umweltbehörden und Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesländer bereitgestellt. Die Nutzungs- und Veröffentlichungsrechte für die Daten liegen bei den jeweiligen Bundesländern und sind länderspezifisch geregelt. Eine zentrale Veröffentlichung des vollständigen Datensatzes durch die Autorinnen und Autoren ist daher derzeit nicht möglich. Für zahlreiche Bundesländer sind Grundwasserstandsdaten über die jeweiligen Datenportale der zuständigen Landesbehörden verfügbar (siehe Tabelle 1).

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt M. Wetzel, S. Broda, M. Gomez, M. Zaepke, P. Clos, S. Kunz, T. Liesch, M. Ohmer, B. Habel, M. Wingerling, B. Pitschka, A. Roucka, T. Spörlein, H. Scholz, J. Neumann, S. Zeilfelder, L.-K. Schmidt-Rudolph, A. Hermsdorf, T. Treucker, L. Meyer, J. Pikelke, B. Panteleit, M. Schröder, L. Moosmann, T. Frommen, M. Hergesell, G. Barth, H. Handke, G. Wriedt, J. Elbracht, S. Bergmann, C. Weidner, B. Wörtler, H. Schuster, F. Bitzer, S. Sauer, D. Duthmann, P. Börke, A. Schorling, W. Wiermann, P. Balaske, J. Schrey, L. Lagmöller, C. Lehmann, B. König, A. Peters und K. Lehmann geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht. Die Autor*innen haben keine relevanten finanziellen oder nicht-finanziellen Interessen zu deklarieren.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Crea-

tive Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Bloomfield JP, Marchant BP (2013) Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrol Earth Syst Sci* 17(12):4769–4787. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013>
- Boergens E, Güntner A, Dobslaw H, Dahle C (2020) Quantifying the central European droughts in 2018 and 2019 with GRACE Follow-On. *Geophys Res Lett*. <https://doi.org/10.1029/2020GL087285>
- Bourgault MA, Larocque M, Garneau M (2019) How do hydrogeological setting and meteorological conditions influence water table depth and fluctuations in ombrotrophic peatlands? *J Hydrol X* 4:100032. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100032>
- Brakenhoff DA, Vonk MA, Collenteur RA, van Baar M, Bakker M (2022) Application of time series analysis to estimate drawdown from multiple well fields. *Front Earth Sci* 10:907609. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.907609>
- BGR und SGD - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Staatliche geologische Dienste (2015) Hydrogeologische Raumgliederung von Deutschland (HYRAUM): Digitale Karten-daten v3.2. BGR SGD, Hannover
- BGR und SGD - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Staatliche geologische Dienste (2019) Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland 1:250.000 (HÜK250), Digitaler Datenbestand Version 1.0.3. BGR SGD, Hannover
- Chávez García Silva R, Reinecke R, Coptý NK, Barry DA, Heggy E, Labat D, Jomaa S (2024) Multi-decadal groundwater observations reveal surprisingly stable levels in southwestern Europe. *Commun Earth Environ* 5:387. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01554-w>
- Collenteur RA, Bakker M, Caljé R, Klop SA, Schaars F (2019) Pastas: open source software for the analysis of groundwater time series. *Groundwater* 57(6):877–885. <https://doi.org/10.1111/gwat.12925>
- Collenteur RA, Vonk MA, Haaf E (2025) Quantification and analysis of hydrograph behavior using groundwater signatures. *Groundwater*. <https://doi.org/10.1111/gwat.13486>
- Conradt T, Engelhardt H, Menz C, Vicente-Serrano SM, Farizo BA, Peña-Angulo D, López-Moreno JJ (2023) Cross-sectoral impacts of the 2018–2019 Central European drought and climate resilience in the German part of the Elbe River basin. *Reg Environ Change* 23(1):32. <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02032-3>
- DESTATIS – Statistisches Bundesamt (2024) Statistischer Bericht – Erhebung der öffentlichen Wasserversorgung 2022. EVAS-Nummer 32211. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/statistischer-bericht-wasser-oeffentlich-2190211229005.xlsx?__blob=publicationFile&v=7. Zugegriffen: 18. Nov. 2025
- DESTATIS – Statistisches Bundesamt (2025) Statistischer Bericht – Erhebung der nichtöffentlichen Wasserversorgung und Abwasserversorgung Berichtszeitraum 2022. EVAS-Nummer 32221. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/statistischer-bericht-wasser-abwasser-nichtoeffentlich-2190220229005.xlsx?__blob=publicationFile&v=5. Zugegriffen: 18. Nov. 2025
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2022) Nationaler Klimareport. Klima – Gestern, Heute und in der Zukunft, 6. Aufl. Offenbach am Main (https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report.pdf). Zugegriffen: 11.11.2025
- Ebeling P, Musolf A, Kumar R, Hartmann A, Fleckenstein JH (2025) Groundwater head responses to droughts across Germany. *Hydrol Earth Syst Sci* 29(13):2925–2950. <https://doi.org/10.5194/hess-29-2925-2025>
- Fieger S, Track T (2025) Groundwater in Germany: challenges, solutions, and the BMBF funding measure LURCH. *Environ Sci Eur* 37:70. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01109-6>
- Fiorillo F, Doglioni A (2010) The relation between karst spring discharge and rainfall by cross-correlation analysis (Campania, southern Italy). *Hydrogeol J* 18(8):1881–1895. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0666-1>
- Frommen T, Moss T (2021) Past and presents of urban socio-hydrogeology: groundwater levels in Berlin, 1870–2020. *Water* 13:2261. <https://doi.org/10.3390/w13162261>
- Gomez M, Nölscher M, Hartmann A, Broda S (2024) Assessing groundwater level modelling using a 1-D convolutional neural network (CNN): linking model performances to geospatial and time series features. *Hydrol Earth Syst Sci* 28:4407–4425. <https://doi.org/10.5194/hess-28-4407-2024>
- Haaf E, Barthel R (2018) An inter-comparison of similarity-based methods for organisation and classification of groundwater hydrographs. *J Hydrol Reg Stud* 559:222–237. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.035>
- Haaf E, Giese M, Heudorfer B, Stahl K, Barthel R (2020) Physiographic and climatic controls on regional groundwater dynamics. *Water Resour Res*. <https://doi.org/10.1029/2019WR026545>
- Hamed KH, Rao AR (1998) A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data. *J Hydrol Reg Stud* 204(1–4):182–196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Hari V, Rakovec O, Markonis Y, Hanel M, Kumar R (2020) Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Sci Rep* 10:12207. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68872-9>
- Hellwig J, Stahl K (2018) An assessment of trends and potential future changes in groundwater-baseflow drought based on catchment response times. *Hydrol Earth Syst Sci* 22(12):6209–6224. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6209-2018>
- Hellwig J, de Graaf IEM, Weiler M, Stahl K (2020) Large-scale assessment of delayed groundwater responses to drought. *Water Resour Res*. <https://doi.org/10.1029/2019WR025441>
- Heudorfer B, Haaf E, Stahl K, Barthel R (2019) Index-based characterization and quantification of groundwater dynamics. *Water Resour Res* 55(7):5575–5592. <https://doi.org/10.1029/2018WR024418>
- HLNUG – Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2025) Wasserwirtschaftlicher Monatsbericht Hessen. Wiesbaden, Deutschland, 21 S. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/wasser/monatsberichte/2025/HLNUG_WaWi_Monatsbericht_Juni_2025.pdf. Zugegriffen: 22. Juli 2025
- Hussain M, Mahmud I (2019) pyMannKendall: a Python package for non-parametric Mann–Kendall family of trend tests. *JOSS* 4(39):1556. <https://doi.org/10.21105/joss.01556>
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2021) Climate change 2021: the physical science basis. Cambridge University Press, URL (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>). Zugegriffen: 18.10.2025
- Joeres A, Steeger G, Huth K, Donheiser M, Wöpel S (2022) Wo in Deutschland das Grundwasser sinkt. <https://correctiv.org/aktuelles/kampf-um-wasser/2022/10/25/klimawandel-grundwasser-in-deutschland-sinkt/>. Zugegriffen: 18. Okt. 2025
- Kaspar F, Imbery F, Friedrich K (2021) Nutzung klimatologischer Referenzperioden ab 2021. Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report.pdf

- www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/verschiedenes/20210119_neue_referenzperiode.pdf. Zugegriffen: 23. Juni 2025
- Killick R, Fearnhead P, Eckley IA (2012) Optimal detection of change-points with a linear computational cost. *J Am Stat Assoc* 107(500):1590–1598. <https://doi.org/10.1080/01621459.2012.737745>
- Kumar R, Musuza JL, Van Loon AF, Teuling AJ, Barthel R, Ten Broek J, Attinger S (2016) Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator. *Hydrol Earth Syst Sci* 20(3):1117–1131. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1117-2016>
- LAiV MV – Landesamt für innere Verwaltung Mecklenburg-Vorpommern (2016) Statistisches Jahrbuch 2016. <https://www.laiv-mv.de/Statistik/Ver%C3%B6ffentlichungen/Jahrbuecher/>. Zugegriffen: 30. Okt. 2025
- LAiV MV – Landesamt für innere Verwaltung Mecklenburg-Vorpommern (2022) Statistisches Jahrbuch 2022. <https://www.laiv-mv.de/Statistik/Ver%C3%B6ffentlichungen/Jahrbuecher/>. Zugegriffen: 30. Okt. 2025
- LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (2023) Flurabstandsprognose für das Rheinische Braunkohlenrevier – Ermittlung von Gebieten mit potenziellen Geländeveränderungen in der Nachbergbauphase. LANUV-Fachbericht 146
- LMBV – Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft (2016) Flutungs-, Wasserbehandlungs- und Nachsorgekonzept Mitteldeutschland. https://www.dgfs.de/fileadmin/daten/dgfs/Publikationen/Flutungs_Wasserbehandlungs_Nachsorgekonzept_MD_2016.pdf. Zugegriffen: 18. Okt. 2025
- Lehr C, Lischeid G (2020) Efficient screening of groundwater head monitoring data for anthropogenic effects and measurement errors. *Hydrol Earth Syst Sci* 24(2):501–513. <https://doi.org/10.5194/hess-24-501-2020>
- Lischeid G, Dannowski R, Kaiser K, Nützman G, Steidl J, Stüve P (2021) Inconsistent hydrological trends do not necessarily imply spatially heterogeneous drivers. *J Hydrol Reg Stud* 596:126096. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126096>
- López Moreira Mazacotte GA, Tetzlaff D, Soulsby C (2025) Urban hydrological connectivity and response patterns across Timescales: an integrated time-frequency domain analysis. *Hydrol Process* 39(7):e70190. <https://doi.org/10.1002/hyp.70190>
- Lütke-meier R, Kuhn D (2025) Grundwasserstress in Deutschland. Überblicksstudie: Struktureller und akuter Grundwasserstress durch öffentliche und nichtöffentliche Entnahmen auf Ebene der Landkreise. Frankfurt am Main (https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/fluessig/grundwasserstress-deutschland-studie-wasser-analyse-strukturell-entnahme-landkreise-bund-isoe-2025.pdf) Zugegriffen: 18.10.2025
- MacKay DJC (1992) Bayesian interpolation. *Neural Comput* 4:415–447. <https://doi.org/10.1162/neco.1992.4.3.415>
- Mirabbasi R, Dinpashoh Y, Jhajharia D (2020) Comparison of different trend tests for the analysis of rainfall data: a case study of north-western Iran. *Hydrol Res* 51(6):1455–1477. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.041>
- MLUK – Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz Brandenburg (2022) Wasserversorgungsplanung Brandenburg Sachlicher Teilabschnitt mengenmäßige Grundwasserbewirtschaftung. https://lfu.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Wasserversorgungsplan_barrierefrei.pdf. Zugegriffen: 5. Okt. 2025
- Moock C, Schulz S (2025) Eine Übersicht über die Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser in Deutschland und der Schweiz. *Grundwasser*. <https://doi.org/10.1007/s00767-025-00594-z>
- Naumann G, Cammalleri C, Mentaschi L, Feyen L (2021) Increased economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. *Nat Clim Chang* 11(6):485–491. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01044-3>
- NLWKN – Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2013) Leitfaden für die Bewertung des mengenmäßigen Zustands der Grundwasserkörper in Niedersachsen und Bremen nach EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/92700/Leitfaden_Grundwassermenge.pdf. Zugegriffen: 9. Febr. 2026
- NLWKN – Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2022) Grundwasserbericht Niedersachsen – Sonderausgabe Grundwasserstandsentwicklung 2022. NLWKN Publikationsreihe Grundwasser, Bd 58
- Nölscher M, Mutz M, Broda S (2022) Multiorder hydrologic position for Europe—a set of features for machine learning and analysis in hydrology. *Sci Data* 9(1):662. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01787-4>
- Nygren M, Barthel R, Allen DM, Giese M (2022) Exploring groundwater drought responsiveness in lowland post-glacial environments. *Hydrogeol J* 30(7):1937–1961. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02521-5>
- Ohmer M, Liesch T, Habbel B, Heudorfer B, Gomez M, Clos P, Nölscher M, Broda S (2026) GEMS-GER: a machine learning benchmark dataset of long-term groundwater levels in Germany with meteorological forcings and site-specific environmental features. *Earth Syst Sci Data* 18(1):77–95. <https://doi.org/10.5194/essd-18-77-2026>
- Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, Duchesnay É (2011) Scikit-learn: machine learning in Python. *J Mach Learn Res* 12:2825–2830
- Pohle I, Zeilfelder S, Birner J, Creutzfeldt B (2025) The 2018–2023 drought in Berlin: impacts and analysis of the perspective of water resources management. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 25:1293–1313. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-1293-2025>
- Rakovec O, Samaniego L, Hari V, Markonis Y, Moravec V, Thober S, Kumar R (2022) The 2018–2020 multi-year drought sets a new benchmark in Europe. *Earth's Future* 10:e2021EF002394. <https://doi.org/10.1029/2021EF002394>
- Rauthe M, Brömser A, Ziese M, Knerr I, Friedrich K, Deutschländer T, Kaspar F (2025) Klimatologische Einordnung der Trockenphase 1. Februar 2025–31. Mai 2025 in Deutschland. https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/wasserwirtschaft/klimatologischeseeinordnung_trockenphase_deutschland_februar_mai_2025_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3. Zugegriffen: 18. Okt. 2025
- Razafimaharo C, Krähenmann S, Höpp S, Rauthe M, Deutschländer T (2020) New high-resolution gridded dataset for Central Europe (HYRAS). *Theor Appl Climatol* 142:1531–1553. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03388-w>
- Rebetez M, Mayer H, Dupont O, Schindler D, Gartner K, Kropp JP, Menzel A (2006) Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Ann For Sci* 63(6):569–577. <https://doi.org/10.1051/forest/2006043>
- Rickert B, Görnt A, Vogelsang L, Ruhl AS (2022) Indications of climate impacts on private wells for drinking water in Germany: a review of press articles. *J Water Health* 20(1):167–175. <https://doi.org/10.2166/wh.2021.312>
- Rousi E, Fink AH, Andersen LS, Becker FN, Beobide-Arsuaga G, Breil M, Xoplaki E (2023) The extremely hot and dry 2018 summer in central and northern Europe from a multi-faceted weather and climate perspective. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 23(5):1699–1718. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1699-2023>
- Schaffhauser M (2014) Grundwasseranstieg in Berlin: Ursachen, Wirkungen, Lösungsansätze. Universitätsverlag der TU Berlin <https://doi.org/10.14279/depositonce-4155>
- Schwandt D, Helms M, Hübner G, Belz JU, Wiechmann W (2022) Das extreme Niedrigwasser des Jahres 1921 in den großen Flüssen Deutschlands im Vergleich zum Niedrigwasser 2018. *Hydrol*

- Wasserbewirtschaft 66:225–243. https://doi.org/10.5675/HyWa_2022.5_1
- Seabold S, Perktold J (2010) Statsmodels: Econometric and statistical modeling with Python. SciPy 7(1):92–96. <https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-011>
- Sen PK (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. J Am Stat Assoc 63(324):1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Shyrokaya A, Messori G, Pechlivanidis I, Pappenberger F, Cloke HL, Di Baldassarre G (2023) Significant relationships between drought indicators and impacts for the 2018–2019 drought in Germany. Environ Res Lett 19(1):14037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad10d9>
- Staude N (2023) Nachhaltige Wasserversorgung – integrierte Grundwasserbewirtschaftung im Hessischen Ried. Énerg | Wasser-praxis 08/2023:72–76
- Theil H (1950) A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. Proc Royal Neth Acad Sci 53:386–1412. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2546-8_20
- Tipping ME (2001) Sparse Bayesian learning and the relevance vector machine. J Mach Learn Res
- Toreti A, Belward A, Perez-Dominguez I, Naumann G, Luterbacher J, Cronie O, Zampieri M (2019) The exceptional 2018 European water seesaw calls for action on adaptation. Earths Future 7(6):652–663. <https://doi.org/10.1029/2019EF001170>
- Tröltzsch J, Stein U, Vidaurre R, Schmitt H, Bueb B, Reineke J, Flörke M, Uschan T, Herrmann F, Kollet S, Wagner N, McNamara I, Guggenberger T, Barjenbruch M, Dworak T, Schmidt G (2024) Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit-Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland. WasserWirtschaft 111:44–48
- Truong C, Oudre L, Vayatis N (2018) ruptures: change point detection in Python. arXiv preprint arXiv:1801.00826
- Uhlmann W, Zimmermann K, Kaltofen M, Gerstgraser Ch, Grosser F, Schützel C (2023) Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz. UBA Texte 90/2023. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/90_2023_texte_wasserwirtschaftliche_folgen.pdf. Zugriffen: 11. Nov. 2025
- UBA – Umweltbundesamt (2023) Monitoringbericht 2023 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/das-monitoringbericht_2023_bf_korr.pdf. Zugriffen: 18. Okt. 2025
- Van Buuren S, Groothuis-Oudshoorn K (2011) mice: Multivariate imputation by chained equations in R. J Stat Soft 45:1–67
- Vogel MM, Zscheischler J, Wartenburger R, Dee D, Seneviratne SI (2019) Concurrent 2018 hot extremes across Northern Hemisphere due to human-induced climate change. Earths Future 7(7):692–703. <https://doi.org/10.1029/2019EF001189>
- Wendel S, Pöhler H, Scherzer J (2012) Hochwassersituation im Grundwasser 2010/2011. LfULG Schriftenreihe Heft 28/2012 (<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/15092/documents/18130> Zugriffen: 18.10.2025)
- WMO – World Meteorological Organization (2017) Guidelines on the calculation of climate normals (WMO-no. 1203). <https://library.wmo.int/idurl/4/55797>. Zugriffen: 18. Okt. 2025
- Wunsch A, Liesch T (2020) Entwicklung und Anwendung von Algorithmen zur Berechnung von Grundwasserständen an Referenzmessstellen auf Basis der Methode Künstlicher Neuronaler Netze: Abschlussbericht <https://doi.org/10.5445/ir/1000136522>

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.

Affiliations

Maria Wetzel¹  · Stefan Broda¹  · Mariana Gomez¹  · Markus Zaepke¹ · Patrick Clos¹ · Stefan Kunz¹  ·
 Tanja Liesch²  · Marc Ohmer²  · Bastian Habbel²  · Michel Wingerling³ · Bernhard Pitschka⁴ · Antje Roucka⁴ ·
 Timo Spörlein⁴ · Helen Scholz⁴ · Jörg Neumann⁴ · Sarah Zeilfelder⁵ · Lena-Katharina Schmidt-Rudolph⁶  ·
 Angela Hermsdorf⁶ · Tina Treucker⁶ · Lucas Meyer⁷ · Jasmin Pikelke⁷ · Björn Panteleit⁸  · Michael Schröder⁹ ·
 Lothar Moosmann⁹ · Theresa Frommen¹⁰  · Mario Hergesell¹⁰ · Gregor Barth¹¹ · Heike Handke¹¹ ·
 Gunter Wriedt¹² · Jörg Elbracht¹³  · Sabine Bergmann¹⁴ · Christoph Weidner¹⁴ · Bastian Wörtler¹⁴ ·
 Hannsjörg Schuster¹⁵ · Frank Bitzer¹⁶  · Stephan Sauer¹⁷ · Doris Dühmann¹⁷  · Peter Börke¹⁸ ·
 Anke Schorling¹⁹ · Wolfgang Wiermann¹⁹ · Peter Balaske²⁰ · Jürgen Schrey²¹ · Luisa Lagmöller²¹ ·
 Christopher Lehmann²¹ · Bernd König²¹ · Annett Peters²² · Katharina Lehmann²²

¹ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin, Deutschland

² Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland

³ Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Karlsruhe, Deutschland

⁴ Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU BY), Hof, Deutschland

⁵ Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt Berlin (SenMVKU), Berlin, Deutschland

⁶ Landesamt für Umwelt Brandenburg (LfU BB), Potsdam – Ortsteil Groß Glienicke, Deutschland

⁷ Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR BB), Cottbus, Deutschland

⁸ Geologischer Dienst für Bremen (GDfB), Bremen, Deutschland

⁹ Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft Hamburg (BUKEA), Hamburg, Deutschland

¹⁰ Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Wiesbaden, Deutschland

¹¹ Geologischer Dienst (LUNG M-V, GD), Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow, Deutschland

¹² Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Cloppenburg, Deutschland

¹³ Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG), Hannover, Deutschland

¹⁴ Landesamt für Natur, Umwelt und Klima Nordrhein-Westfalen (LANUK), Duisburg, Deutschland

¹⁵ Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen (GD NRW), Krefeld, Deutschland

¹⁶ Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB RP), Mainz, Deutschland

¹⁷ Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU RP), Mainz, Deutschland

¹⁸ Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Dresden, Deutschland

¹⁹ Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW), Halle, Deutschland

²⁰ Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt (LGB), Halle, Deutschland

²¹ Landesamt für Umwelt Schleswig-Holstein (LfU SH), Flintbek, Deutschland

²² Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN), Weimar, Deutschland