

This is the accepted manuscript version of the contribution published as:

Chávez García Silva, R., Reinecke, R., Coptý, N.K., Barry, D.A., Heggy, E., Labat, D., Roggero, P.P., **Borchardt, D.**, **Rode, M.**, Gómez-Hernández, J.J., **Jomaa, S.** (2025): Grundwasserbeobachtungen über mehrere Dekaden zeigen überraschend stabile Werte in Südwesteuropa
KW Korrespondenz Wasserwirtschaft **18** (2), 96 - 108

The publisher's version is available at:

<https://doi.org/10.3243/kwe2025.02.003>

Grundwasserbeobachtungen über mehrere Dekaden zeigen überraschend stabile Werte in Südwesteuropa

Rafael Chávez García Silva¹, Robert Reinecke², Nadim K. Coptý³, David A. Barry⁴, Essam Heggy^{5,6}, David Labat⁷, Pier Paolo Roggero⁸, Dietrich Borchardt¹, Michael Rode^{1,9}, J. Jaime Gómez-Hernández¹⁰, Seifeddine Jomaa^{1,*}

¹Department für Aquatische Ökosystemanalyse und Management, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, Magdeburg, Deutschland (rafael.chavez@ufz.de, dietrich.borchardt@ufz.de, michael.rode@ufz.de, seifeddine.jomaa@ufz.de),

²Institut für Geographie, Universität Mainz, Mainz, Deutschland (reinecke@uni-mainz.de),

³Institut für Umweltwissenschaften, Bogazici-Universität, Istanbul, Türkei (ncopty@boun.edu.tr),

⁴Ökologisches Ingenieurlabor (ECOL), Institut für Umwelttechnik (IIE), Fakultät für Architektur, Bau- und Umweltingenieurwesen (ENAC), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Schweiz (andrew.barry@epfl.ch),

⁵Ming Hsieh Abteilung für Elektro- und Computertechnik, Viterbi School of Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA, USA (heggy@usc.edu),

⁶NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA,

⁷Géosciences Environnement Toulouse (GET), Université Toulouse 3-Géosciences Environnement Toulouse-CNRS-UPS-IRD, Toulouse, Frankreich (david.labat@get.omp.eu),

⁸Fakultät für Agrarwissenschaften, Universität Sassari, Sassari, Italien (pproggero@uniss.it),

⁹Institut für Umweltwissenschaften und Geographie, Universität Potsdam, Potsdam, Deutschland,

¹⁰Institut für Wasser- und Umwelttechnik, Universitat Politècnica de València, Valencia, Spanien (jaime@dihma.upv.es),

* Korrespondierender Autor (seifeddine.jomaa@ufz.de).

Zusammenfassung

Der Klimawandel und menschliche Aktivitäten führen zu Wasserknappheit in Südwesteuropa. Bisher wurde vermutet, dass die Grundwassernutzung in der Region nicht nachhaltig ist, aber es fehlen jedoch regionale Datenanalysen und entsprechende Bewertungen. In vorliegenden Studie haben wir langfristige Trends und Einflussfaktoren auf den Grundwasserspiegel untersucht und eine komplexere Situation festgestellt. Historische Daten (1960-2020) von 12 398 Brunnen in Portugal, Spanien, Frankreich und Italien zeigen, dass 20 % der Grundwasserspiegel ansteigen, 68 % stabil sind und nur 12 % sinken. Der Anstieg der Grundwasserstände in den gemäßigten Klimazonen ist auf die Zunahme der Niederschläge zurückzuführen. Sich erholende Grundwasserstände in semiariden Regionen wurden auf eine verbesserte Grundwasserbewirtschaftung zurückgeführt. Stabile Grundwasserstände befinden sich vor allem in gemäßigten Klimazonen mit ganzjährig hohen Niederschlagsmengen. Brunnen mit rückläufiger Tendenz der Grundwasserstände in semiariden Regionen befinden sich hauptsächlich in der Nähe von landwirtschaftlichen Gebieten. Diese leiden unter einem anhaltenden Verlust an Bodenfeuchtigkeit im Sommer, während in gemäßigten Regionen der Rückgang mit großen städtischen Gebieten in Verbindung gebracht wird. Die Studie hat gezeigt, dass für eine nachhaltige und wissenschaftlich fundierte Bewirtschaftung der Wasserressourcen die systematische Überwachung des Grundwassers und die gemeinsame Nutzung von Daten unerlässlich sind.

Dieses Manuskript ist eine Übersetzung des Original-Forschungsartikels mit dem Titel *Multi-decadal groundwater observations reveal surprisingly stable levels in southwestern Europe*, veröffentlicht in *Communications Earth and Environment* am 18. Juli 2024. Der Originalartikel ist als Open Access unter [URL: <https://www.nature.com/articles/s43247-024-01554-w>] verfügbar. Ergänzende Informationen, auf die im Artikel verwiesen wird, können auf der Website des Herausgebers abgerufen werden.

Einführung

Hitzebedingte Trockenheit, die mit veränderten Niederschlagsmustern einhergeht, ist immer häufiger in ganz Europa verbreitet^{1,2}. Diese Studie konzentriert sich auf Portugal, Spanien, Frankreich und Italien, vier Mittelmeerländer im Südwesten Europas, die für einen großen Teil der Obst-, Gemüse- und Getreideproduktion der Europäischen Union verantwortlich sind^{3,4}. Diese Länder⁵⁻⁷ sind in hohem Maße auf Grundwasser angewiesen, das 30-50 % der Bewässerung und 28-75 % der Trinkwasserversorgung liefert^{5,6,8,9}. Das Untersuchungsgebiet sieht sich bereits mit zunehmenden Dürren, schrumpfenden Gewässernetzen und einer abnehmenden Bodenfeuchtigkeit konfrontiert¹⁰⁻¹³, was die wachsende Bedeutung des Grundwassers als Puffer zum Ausgleich von Wasserstress verdeutlicht. Die prognostizierte Erwärmung im Untersuchungsgebiet wird die globalen Durchschnittswerte um 20 % übersteigen¹⁴ und ein entsprechender Temperaturanstieg um 2°C wird voraussichtlich zu häufigen Hitzewellen führen¹⁵. Da gleichzeitig die Sommerniederschläge um 15-30 % zurückgehen^{16,17}, was sich auf die Verfügbarkeit von Süßwasser und die Produktivität der Ernte auswirkt, kann mit einem erhöhten Bedarf an Bewässerung im Sommer sowie erhöhter Waldbrandgefahr gerechnet werden.^{15,18}

Trotz der großen Bedeutung des Grundwassers in Südwesteuropa gibt es auf regionaler Ebene keine detaillierten Untersuchungen zu seinen Wechselwirkungen mit natürliche und anthropogene Einflüssen. Eine kürzlich durchgeführte Studie unter Verwendung von GRACE-Satellitendaten auf grober Skala deutet auf einen rückläufigen Trend des Grundwasserspiegels in Ostspanien, Nordfrankreich und Norditalien hin¹⁹. Die begrenzte Auflösung der Satellitenbeobachtungen erschwert jedoch die Ermittlung spezifischer natürlicher Faktoren, die den Veränderungen des Grundwasserspiegels zugrunde liegen. Andererseits weisen Untersuchungen auf Aquiferebene auf erhebliche lokale Rückgänge des Grundwasserspiegels in der Region hin, die häufig mit der Bewässerung zusammenhängen²⁰⁻²². Diese räumlich begrenzten Studien liefern jedoch kein umfassendes und vergleichendes regionales Bild vom Zustand dieser Grundwasserressource.

Um diese Wissenslücke zu schließen, werden in dieser Studie die dekadischen Trends des Grundwasserspiegels anhand mehrerer Datenquellen bewertet, darunter ein umfangreicher historischer Datensatz aus 12 398 Brunnen in Portugal, Spanien, Frankreich und Italien, der zwischen 1960 und 2020 erhoben wurde. Diese Datensätze ermöglichen es uns, die Lücke zwischen lokalen, regionalen und großräumigen (satellitengestützten) Untersuchungen zu schließen und die Einflussfaktoren besser zu bewerten, die zu den beobachteten Mustern des Grundwasserspiegels beitragen. Zu diesen Faktoren gehören Klimavariablen wie Niederschläge und anthropogene Einflüsse wie die Nähe zu städtischen und bewässerten Gebieten. Diese vier Länder bieten eine einmalige Gelegenheit, regionale Grundwasserveränderungen und deren Ursachen in unterschiedlichen Klimazonen zu untersuchen, wobei sie von der Verfügbarkeit langfristiger Monitoringdaten und einer gut etablierten internationalen Kooperation profitieren. Diese regionale Untersuchung kann als Referenzstudie für andere Regionen weltweit dienen, die ähnlichen Problemstellungen aufweisen.

Die spezifischen Ziele dieser Studie sind (i) die Ermittlung von Trends der Grundwasserstände, (ii) die räumliche Bündelung dekadischer Grundwasserspiegel-Trends und (iii) die Identifizierung klimatischer und anthropogener Faktoren für diese Trends. Die Ergebnisse verbessern das Verständnis der Veränderungen der Grundwasserstände in Südwesteuropa und liefern Erkenntnisse, die angesichts der sich ändernden klimatischen Bedingungen und des steigenden Wasserbedarfs eine fundierte Entscheidungsfindung für eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung ermöglichen.

Ergebnisse

Gegensätzliche zeitliche Trends bei der Veränderung des Grundwasserstandes

Die Anzahl und Messhäufigkeit der Beobachtungsbrunnen in jedem Land seit 1960 zeigt Abb. 1a. Die überwiegende Anzahl der Brunnen (58 %) weisen mehr als zehn Jahre an Grundwassermessungen auf, nur 8 % verfügen über Zeitreihen von 30 oder mehr Jahren. Bei den Brunnen mit mehr als einem Jahrzehnt an Messungen variiert die Häufigkeit zwischen täglich (23 %), wöchentlich (19 %), monatlich (18 %) und zweimonatlich (40 %). Die Brunnen mit den meisten wöchentlichen und täglichen Messungen befinden sich in Frankreich. In Portugal und Spanien wurden 90 % der Messwerte monatlich oder zweimonatlich erfasst. In Abb. 1a sind die wichtigsten nationalen wasserwirtschaftlichen Instrumente mit der Anzahl der Brunnen überlagert. Im Allgemeinen hat die Umsetzung nationaler Wassergesetze die Überwachungsanstrengungen erhöht, die möglicherweise nach dem Jahr 2000 aufgrund der obligatorischen Grundwasserüberwachung und der Berichterstattungsanforderungen der Wasserrahmenrichtlinie²³ weiter intensiviert wurden.

Für die langfristige Trendanalyse wurden 7.155 Grundwassermessstellen mit Daten aus über einem Jahrzehnt herangezogen, die 44 % der Grundwasserkörper in der Untersuchungsregion abdecken. Für die räumliche Abdeckung wurden Gebiete mit mindestens einer Grundwassermessstelle pro 500 km² ausgewertet, die mit dem nationalen Überwachungsnetz für die Grundwassermessstellen in Frankreich²⁴ übereinstimmen (Abb. 1b). Von diesen Messtellen wiesen 15 % eine steigende Tendenz auf, 65 % waren stabil und 20 % zeigten einen Rückgang. Abb. 1b zeigt uneinheitliche Trends in benachbarten Messstellen; eine genauere Betrachtung offenbart unterschiedliche Trends an nahegelegenen Standorten aufgrund unterschiedlicher Messdauern, was auf ein Jahrzehnte langes Verhalten schließen lässt. So zeigen beispielsweise Grundwasserstände in den spanischen Regionen Murcia und Castilla y Leon, die seit über 20 Jahren überwacht werden, einen rückläufigen Trend, während benachbarte Brunnen mit kürzeren Aufzeichnungen von 10-20 Jahren einen steigenden Trend aufweisen. Diese Dynamik, die aus einem anhaltenden Rückgang, gefolgt von einer Stabilisierung oder Erholung des Niveaus, besteht, ist wahrscheinlich auf klimatische Schwankungen oder einer veränderten Wassernutzung zurückzuführen.

Multidekadische Clusterbildung offenbart langfristige Grundwasserveränderungen

Für eine detaillierte Untersuchung der langfristigen Grundwassertrends konzentrierten wir uns auf 1 038 Messtellen und stellten sicher, dass für jedes Jahrzehnt zwischen 1985 und 2014 jährliche Mittelwerte für mindestens sechs von zehn Jahren zur Verfügung stehen. Bemerkenswerterweise wurde der Schwellenwert in der Mehrzahl der Fälle überschritten, 80 % der Brunnen verfügten über vollständige Datensätze für die drei Jahrzehnte. Auf der Grundlage der Trendergebnisse für jedes Jahrzehnt (Abb. S1) wurde eine mehrdekadische Clusteranalyse durchgeführt, aus der neun Cluster auf der Grundlage der Entwicklung der Grundwasserspiegel (GWS) identifiziert wurden: steigende, stabile und sinkende Wasserstände (Abb. 2a-c). Von diesen Clustern wiesen 20 % steigende, 68 % stabile und 12 % sinkende Wasserstände auf. Diese statistischen Ergebnisse aus der Clusterbildung und der mehrdekadischen Analyse unterscheiden sich geringfügig von den im vorherigen Abschnitt dargestellten Ergebnissen, da die Anzahl der Brunnen und die Untersuchungszeiträume unterschiedlich sind (weitere Einzelheiten siehe Methoden).

Steigende Grundwasserspiegel-Cluster (Cluster 1-3, Abb. 2b) sind so definiert, dass sie in mindestens einem der drei Jahrzehnte steigende Trends aufweisen. Cluster 1 umfasst sich erholende Brunnen, die in der ersten Dekade einen rückläufigen Trend aufwiesen, gefolgt von einer Stabilisierung und steigenden (d. h. sich erholenden) Pegeln in den folgenden Jahrzehnten. Trotz des insgesamt steigenden Trends in der letzten Dekade verzeichneten die Grundwassermessstellen in Cluster 1 einen durchschnittlichen dekadischen Rückgang von 2 m, berechnet als arithmetisches Mittel der Differenzen im Median der GWS zwischen der dritten (2005-2014) und der ersten Dekade (1985-1994) über alle Messstellen in dem Cluster. Im Gegensatz dazu wiesen die Cluster 2 und 3 während des gesamten Untersuchungszeitraums (1985-

2014) durchgängig steigende Pegel auf, mit durchschnittlichen dekadischen Anstiegen von etwa 3-4 m (Abb. 2c).

Brunnen in den Clustern 4-6 wiesen nahezu stabile Pegel auf, wobei in den Clustern 5 und 6 während der ersten bzw. dritten Periode leichte Schwankungen beobachtet wurden, während die Brunnen in Cluster 4 keine signifikanten Trends aufwiesen (Abb. 2b). Im Gegensatz zu den anderen Clustern sind die durchschnittlichen dekadischen Pegeländerungen in dieser Gruppe minimal und betragen weniger als 1 m (Abb. 2c).

In den Clustern mit rückläufigen Werten (Cluster 7-9) wiesen alle Brunnen während mindestens einer der drei Dekaden signifikante rückläufige Trends auf. Der stärkste Rückgang bei den Brunnen in Cluster 7 wurde in der dritten Dekade beobachtet, während die Brunnen in Cluster 8 einen Rückgang in der zweiten Dekade (1995-2004) verzeichneten. Die Brunnen in Cluster 9 zeigen eine kontinuierliche Abnahme über den gesamten Zeitraum (1985-2014). Die dekadische Grundwasserstandsänderung war in dieser Gruppe am höchsten, wobei die Brunnen in Cluster 9 einen durchschnittlichen dekadischen Rückgang von 11 m aufwiesen, während die Brunnen in den Clustern 7 und 8 einen dekadischen Rückgang von 3 bzw. 5 m zeigten. Ein beträchtlicher Teil der Brunnen mit rückläufigen Trends befindet sich in bekannten gespannten Grundwasserleitern, die ausgeprägtere und dauerhaftere Grundwasserstandsänderungen aufweisen als ungespannte Grundwasserleiter. Da jedoch nicht für alle Brunnen umfassende Daten vorliegen, ist eine klare Unterscheidung zwischen den verschiedenen Grundwasserleitertypen in dieser Analyse nicht möglich.

Abb. 2a zeigt, dass die identifizierten Cluster über die vier Länder verteilt sind und verschiedene klimatische und hydrologische Bedingungen umfassen. Um den Zusammenhang zu verdeutlichen, zeigen wir einige ausgewählte Gebiete aus den verschiedenen Clustern in den ergänzenden Informationen des Originalartikels (Abb. S2 und Tabelle S1). Ein Beispiel für das Ansteigen/Erholen des Grundwasserspiegels in einem semiariden Klima findet sich in La Mancha Oriental, einem Grundwasserleiter im Einzugsgebiet des Flusses Jucar in Ostspanien (Abb. S2). Die Erholung des Grundwasserspiegels spiegelt die Änderungen in der Bewirtschaftung wider, die in den letzten zwei Jahrzehnten nach einer Periode starker Grundwasserabsenkung vorgenommen wurden. Diese Veränderungen wurden durch die Umsetzung nachhaltiger Bewässerungsmaßnahmen durch die landwirtschaftliche Wassernutzervereinigung möglich²⁵. In Ravenna (Po-Einzugsgebiet, Italien), einem Gebiet mit dichter städtischer und landwirtschaftlicher Bebauung, steigt der Grundwasserspiegel. Die meisten Brunnen in diesem Gebiet gehören zu Cluster 3, der durch einen steilen Anstieg des Grundwasserspiegels im ersten Jahrzehnt gekennzeichnet ist, gefolgt von nahezu stabilen Werten. Im Gegensatz zu La Mancha Oriental sind die steigenden Pegel in Ravenna auf natürliche und anthropogene Bodensenkungen zurückzuführen^{26,27}.

Zu den Regionen mit rückläufigen Clustern gehört Béziers in Südfrankreich, wo 75% der Grundwasserentnahmen auf Trinkwasser entfallen, wobei die Hälfte der Wasserentnahmen für die Deckung des Bedarfs des Sommertourismus bestimmt ist²⁸. Ein weiteres Gebiet mit rückläufiger Tendenz ist Bordeaux, das über wachsende städtische Gebiete verfügt. Seit den 1960er Jahren wurde in diesem Gebiet ein Absinken des Grundwasserspiegels festgestellt, wobei der größte Teil der Entnahmen auf den häuslichen Gebrauch entfällt^{29,30}.

Klimatische und anthropogene Faktoren, die den Grundwasserspiegel verändern

Neben der Entnahme werden langfristige Grundwasserschwankungen auch von Änderungen der Niederschlagsmuster³¹, der Landnutzung³²⁻³⁴ und, falls hydraulisch angeschlossen, von Oberflächenwasser^{35,36} beeinflusst. Es wurde der Einfluss verschiedener Variablen (ergänzende Tabellen S2 und S3) auf die beobachteten geclusterten GWS-Entwicklungen analysiert, die mit klimatischen, hydrogeologischen und anthropogenen Faktoren zusammenhängen (Abb. S2 und S3). Die Auswirkungen dieser Faktoren werden im Folgenden erörtert. Es ist zu beachten, dass die Reaktion des

Grundwasserspiegels auf diese Faktoren teilweise durch Merkmale wie Brunntiefe, Fließbedingungen (begrenzt/unbegrenzt) und Lage des Fließsystems beeinflusst wird.

Klimatische und hydrologische Faktoren

In den verschiedenen Klimaregionen wurden unterschiedliche Muster des Anstiegs, der Stationarität und des Rückgangs beobachtet. Insbesondere sind stabile Grundwasserstände in gemäßigten Klimazonen (72 %) weiter verbreitet als in halbtrockenen Regionen (46 %) (Abb. 2a). Umgekehrt sind Messtellen mit sinkenden/steigenden Pegeln in semiariden Regionen um 12-14 % häufiger als in gemäßigten Klimazonen.

Korrelationen zwischen GWS und Jahresniederschlag zeigten, dass Messstellen in stabilen Clustern (Cluster 4-6) eine deutlich stärkere negative Korrelation (-0,41 bis -0,51) aufwiesen (Abb. 2d). Im Vergleich dazu lag die Korrelation bei den abnehmenden und steigenden Clustern (Cluster 1-3 und 7-9) zwischen -0,13 und -0,33. Bemerkenswert ist, dass die Korrelation für Cluster 9 mit einem Durchschnittswert von -0,13 am schwächsten war. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass andere Faktoren als der Niederschlag, vor allem anthropogene Einflüsse, für die beobachteten Veränderungen verantwortlich sind. In Cluster 1, wo sich die Pegel stabilisierten oder erholten, wurde die stärkste Korrelation zwischen GWS und Jahresniederschlag für Brunnen in gemäßigten Klimazonen festgestellt (mittlere Korrelation von -0,33), während Brunnen in semiariden Klimazonen die schwächste Korrelation aufwiesen (mittlere Korrelation von -0,05). In gemäßigten Klimazonen wird die Erholung neben anderen Faktoren von Niederschlagsschwankungen beeinflusst, während sie in semiariden Klimazonen enger mit der Bewirtschaftung der Grundwasserleiter verbunden ist.

Der Anstieg der Grundwasserspiegel in den gemäßigten Klimazonen hängt mit der Zunahme der Niederschläge zusammen. Obwohl weder in dieser noch in früheren Studien (³⁷) signifikante Trends bei den Jahresniederschlägen im Zeitraum 1985-2014 beobachtet wurden, ist es bemerkenswert, dass das Jahrzehnt 1995-2004 höhere Niederschläge aufwies als 1985-1994. Insbesondere war der mittlere Niederschlag in den Jahren 1995-2004 in allen Clustern um 16-73 mm höher als im vorangegangenen Jahrzehnt. Anschließend wurde die Änderungsrate des Niederschlags über den gesamten 30-jährigen Untersuchungszeitraum analysiert. Brunnen in aufsteigenden Clustern wiesen während des Untersuchungszeitraums eine stärkere Zunahme des Niederschlags auf als die anderen Gruppen (Abb. 2d), mit einer durchschnittlichen Steigerungsrate von 20 mm pro Jahrzehnt. Brunnen mit einem Anstieg von mehr als 20 mm pro Jahrzehnt (47 % von ihnen) befanden sich hauptsächlich in gemäßigten Klimazonen (z. B. Po-Becken und Ostportugal). Im Gegensatz dazu verzeichneten stabile und rückläufige Brunnen einen vergleichsweise geringeren Anstieg der Niederschläge von 10 bzw. 2 mm pro Jahrzehnt.

In Gebieten mit einem in den vergangenen drei Jahrzehnten beobachteten Gesamtanstieg der jährlichen potenziellen Evapotranspiration (PET) war diese oft höher als der Jahresniederschlag (N).

Dies führte zu einer verstärkten Trockenheit, die sich im Niederschlagsdefizit (N-PET) widerspiegelt. Vor allem in Regionen um rückläufige Brunnen ist der negative Trend des N-PET mit durchschnittlich -3,1 mm pro Jahrzehnt ausgeprägter als in Gebieten mit stabilen Brunnen (-1,2 mm pro Jahrzehnt) und in Gebieten mit steigenden Brunnen mit einer durchschnittlichen Zunahme des N-PET (6,7 mm pro Jahrzehnt). Die Zunahme trockenerer Bedingungen trägt zu verringerten Grundwasserneubildungsraten und langfristigen Veränderungen des Grundwasserspiegels bei. Etwa 49 % aller Gebiete in der Nähe von Grundwassermessstellen wiesen negative P-PET-Trends auf (66 % der abnehmenden, 52 % der stabilen und 30 % der steigenden Brunnen).

Die Beziehung zwischen den Veränderungen des Grundwasserspiegels und der sommerlichen Bodenfeuchte wurde im Zeitraum 1951-2012^{38,39} untersucht (Abb. 3). Der größte Teil des Untersuchungsgebiets, insbesondere Nordportugal, Ostspanien, Südfrankreich und Norditalien, wies in

diesem Zeitraum einen stetigen Rückgang der sommerlichen Bodenfeuchte auf, mit einer durchschnittlichen Veränderung von $-1,5 \text{ l m}^{-3}$ pro Jahrzehnt. Vor allem die Cluster 8 und 9 (mit rückläufiger Tendenz) befanden sich in Gebieten mit stärkeren Bodenfeuchteverlusten, im Durchschnitt $-2,3 \text{ l m}^{-3}$ pro Jahrzehnt. Parallel dazu nahm auch die meteorologische Dürrehäufigkeit pro Jahrzehnt (1985-2014) (Tabelle S3) in der Region zu, wobei jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Clustern festgestellt wurden. Dies unterstreicht den Zusammenhang zwischen der Entwicklung des Grundwasserspiegels und dem langfristigen Rückgang der Bodenfeuchte und nicht der saisonalen meteorologischen Dürre.

Auf der Grundlage langfristiger durchschnittlicher Schätzungen der potenziellen Neubildung⁴⁰, die die Niederschläge, die tatsächliche Evapotranspiration und einen Grundwasserneubildungskoeffizienten berücksichtigen, weisen die Gebiete um stabile Brunnen eine durchschnittliche Neubildung von $102 \text{ mm pro Jahr}^{-1}$ auf. Im Vergleich dazu weisen die Gebiete um Brunnen mit sinkender und steigender Tendenz geringere Raten auf, nämlich 61 bzw. $64 \text{ mm pro Jahr}^{-1}$. Dieser Unterschied ist besonders in den gemäßigten Klimazonen bemerkenswert, wo die durchschnittliche potenzielle Neubildung in Cluster 4 (stabil) mit $140 \text{ mm pro Jahr}^{-1}$ am höchsten ist, im Gegensatz zu Cluster 3 (steigend), der mit $78 \text{ mm pro Jahr}^{-1}$ die niedrigste Neubildung aufweist.

Die Entfernung zwischen Brunnen und dem nächstgelegenen Fließgewässer in Einzugsgebieten mit einer Fläche von mehr als 10 km^2 betrug im Durchschnitt 1.039 m , wobei es erhebliche Schwankungen und keine erkennbaren statistischen Unterschiede zwischen den Brunnenclustern gab. Bei Bächen, die von mindestens einem anderen Fließgewässer (Strahler Ordnung 2 oder höher) durchflossen werden, erhöhte sich die durchschnittliche Entfernung auf 2.390 m . Trotz erheblicher Schwankungen blieb die Verteilung der Entfernungen über die Clusterklassifikationen hinweg konsistent (Abb. S5). Da keine Daten über den Austausch zwischen Fließgewässern und Grundwasserleitern vorlagen, beschränkten wir uns auf die Entfernungsanalyse. Ein tieferes Verständnis der Wechselwirkung zwischen Grundwasser und angrenzenden Fließgewässern war daher nicht möglich.

Anthropogene Faktoren

Im Gegensatz zu Brunnen mit stabilen Pegeln befanden sich Brunnen mit sinkenden und steigenden Pegelwerten in größerer Nähe zu landwirtschaftlichen Flächen, die möglicherweise mit Bewässerungsaktivitäten verbunden sind (Abb. 2d). Insbesondere die Cluster 7 und 9 mit sinkenden Pegeln befinden sich überwiegend in semiariden Regionen und wiesen den größten Anteil an Brunnen auf, die sich in einem Umkreis von 1 km um bewässerte Flächen befanden (Abb. 2a). Dies deutet darauf hin, dass Grundwasser in semiariden Regionen vorwiegend für landwirtschaftliche Aktivitäten genutzt wird, um den steigenden Bedarf an Bewässerung zu decken. Es ist zu beachten, dass die Art der Bewässerung einen Einfluss auf den Grundwasserspiegel haben könnte: Die Bewässerung aus Oberflächenwasser könnte einen Anstieg der Grundwasserpegels fördern, während die Bewässerung aus Grundwasser wahrscheinlich zu einem Rückgang der Pegels beitragen würde.

Wir beobachteten ein differenziertes Muster je nach Klima in Bezug auf die Nähe zu städtischen Gebieten. In gemäßigten Klimazonen lagen die Brunnen näher an den Städten als in semiariden Klimazonen. Brunnen in gemäßigtem Klima, die zu Cluster 8 (abnehmend) gehören, lagen mit einer mittleren Entfernung von $1,5 \text{ km}$ am nächsten an den Städten (Abb. 2d). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die meisten Brunnen in Frankreich und Italien in gemäßigten Klimazonen liegen, wo ein großer Teil der Grundwassernutzung auf städtische, häusliche und industrielle Aktivitäten zurückzuführen ist. In den semiariden Regionen hingegen lagen die Brunnen in stabilen Clustern mit einem mittleren Abstand von 25 km am nächsten an städtischen Gebieten. Die mittlere Entfernung zwischen Brunnen und städtischen Gebieten mit mehr als 1.500 ha betrug in allen Klimazonen 14 km .

Diskussion

Eine kürzlich durchgeführte Studie¹⁹, in der GRACE-Satellitendaten zur Analyse der Entwicklung der Grundwasserspeicherung in ganz Europa von 2002 bis 2020 verwendet wurden, ergab sowohl steigende als auch sinkende Trends in allen wichtigen Klimazonen in Südwesteuropa. Unsere Beobachtungen stimmen mit diesen Ergebnissen überein, auch wenn es aufgrund der unterschiedlichen Beobachtungsskalen einige Diskrepanzen gibt. So stellten wir beispielsweise steigende Werte in der unteren Po-Ebene in Italien fest, während in der gesamten Po-Ebene rückläufige Grundwassertrends beobachtet wurden. In ähnlicher Weise fanden wir in Spanien eine Mischung aus rückläufigen, sich erholenden und ansteigenden Grundwasserständen, während die Studie im Iberischen Massiv im Nordwesten der Halbinsel einen positiven Trend ausweist. Im Südosten Spaniens hingegen wurden sinkende Pegel mit Trockenheit und zunehmenden Grundwasserentnahme aufgrund der geringeren Verfügbarkeit von Oberflächenwasser in Verbindung gebracht²². In ähnlicher Weise zeigt die vorliegende Untersuchung eine Kombination aus sinkenden und steigenden Grundwasserspiegeln in Brunnen in dieser Region. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung dichter in-situ Messungen zur Ermittlung detaillierter Muster von Grundwasserstandsschwankungen auf regionaler Ebene, die im Gegensatz zu groben satellitengestützten Erdbeobachtungsdaten die spezifischen Merkmale der Hydrogeologie und Nutzungsmuster auf lokaler Ebene widerspiegeln.

Unsere Feststellung, dass die meisten Brunnen stabile Grundwasserstände aufweisen, bestätigt, dass Grundwassersysteme widerstandsfähiger gegen meteorologische Dürreausbreitung sind als Oberflächengewässer^{41,42}. Es lässt sich jedoch nicht ableiten, ob die stabilen Grundwasserstände angesichts der prognostizierten Dürrebedingungen auch in Zukunft anhalten werden, was die Anfälligkeit des Grundwassers verschärfen könnte^{15,34}. Diese Unsicherheit ist angesichts der potenziellen Auswirkungen von Veränderungen in der Wasserspeicherdynamik wichtig. Solche Veränderungen könnten sich nachteilig auf die biologische Vielfalt grundwasserabhängiger Ökosysteme wie Küstenlagunen und Feuchtgebiete⁴² sowie auf die Landvegetation auswirken.^{44,45}

Unsere Studie unterstreicht das komplizierte Zusammenspiel zwischen anthropogenen Aktivitäten und Klimafaktoren bei der Entwicklung von sinkenden und steigenden Grundwasserpegeln in der gesamten Region. Da es schwierig ist, die lokalen Auswirkungen mit unserer breiteren regionalen Analyse in Einklang zu bringen, werden spezifische Beispiele vorgestellt, wie z. B. die beobachteten Trends in Tarbes (Frankreich) und Medina del Campo (Spanien), wo eine erhebliche Verringerung der Bodenfeuchte mit sinkenden Brunnenpegeln korreliert, insbesondere in Regionen mit Bewässerung (Abb. 3). Diese Beispiele, die durch einen Rückgang der Bodenfeuchtigkeit um 3,3 bzw. 2,8 l m⁻³ pro Jahrzehnt und ein Absinken des Grundwasserspiegels um durchschnittlich 8,6 bzw. 11,1 m zwischen 1985 und 2014 gekennzeichnet sind, verdeutlichen, auf welche unterschiedliche Weise lokale Klimabedingungen und Bewirtschaftungspraktiken die hydrologischen Reaktionen beeinflussen. Auch der Gegensatz zwischen den sinkenden Grundwasserspiegeln in den Aquiferen des Segura-Einzugsgebiets in der Nähe von Hellín (Spanien), die für die Bewässerung von Getreide und Weinbergen genutzt werden, und den nahezu stabilen Pegeln im Beauce-Aquifer in Frankreich verdeutlicht die Variabilität zwischen den Regionen. Diese Unterschiede, die auf unterschiedliche Bewirtschaftungsmaßnahmen zurückzuführen sind, wie z. B. erhöhte Entnahmegenehmigungen in Hellín trotz sinkender Pegel⁴⁶ und periodische Entnahmebeschränkungen in Beauce⁴⁷, spiegeln den lokalen Charakter der Grundwasserdynamik im breiteren Kontext der regionalen Trends wider. Durch die Integration dieser detaillierten Beobachtungen kann ein verbessertes Verständnis für die vielfältigen und komplexen Veränderungen des Grundwasserspiegels auf regionaler Ebene erzielt werden. Dies zeigt, dass Klimaschwankungen zwar eine wichtige Rolle spielen, menschliche Aktivitäten jedoch häufig als Hauptursache für diese Veränderungen in Erscheinung treten, wie auch weltweit zu beobachten ist⁴⁸. Dieser Ansatz ermöglicht es, die inhärente Herausforderung der Integration lokaler

Auswirkungen in eine Analyse auf regionaler Ebene zu integrieren und ein differenzierteres Verständnis der Grundwasserdynamik zu gewinnen.

Anthropogene Einflüsse auf die Grundwassernutzung waren auch in städtischen Gebieten zu beobachten. So wurde beispielsweise in der Umgebung von Städten mit 200-500 Tausend Einwohnern in gemäßigten Klimazonen wie Bordeaux, Lyon, Nizza und Modena ein rückläufiger Trend bei den Wasserständen beobachtet. Umgekehrt stiegen die Grundwasserspiegel in gemäßigten Klimazonen, in denen die Niederschläge in den betrachteten Jahrzehnten zugenommen haben, in Gebieten an, in denen das Grundwasser nur eine begrenzte Rolle bei der Bewässerung spielt, z. B. im oberen Po-Becken, in der friaulischen Hochebene im Nordosten Italiens und in der Mata Nacional do Urso an der Nordwestküste Portugals.

Die Entwicklung der Bodenfeuchte in der Vergangenheit zeigt, dass trotz stabiler Niederschlagsmuster die steigenden Temperaturen und die zunehmende Evapotranspiration für eine deutliche Verschiebung hin zu trockeneren Bedingungen verantwortlich sind¹¹. Für die Zukunft wird prognostiziert, dass Dürren in der Landwirtschaft häufiger, länger und intensiver werden⁴⁹, was sich aufgrund der geringeren Infiltration und des erhöhten Bewässerungsbedarfs zur Aufrechterhaltung der Ernteerträge tiefgreifend auf den Grundwasserspiegel auswirken wird. Diese Auswirkung ist besonders für Sommerkulturen wie Mais, Olivenbäume, Obst und Tomaten^{18,50} relevant. Dies könnte zu einer erhöhten Wasserentnahme in Gebieten führen, in denen der Grundwasserspiegel derzeit entweder sinkt oder stabil ist. Die Analyse zeigt, dass etwa 21 % der Brunnen, die derzeit als stabil eingestuft werden, in Gebieten liegen, in denen das Risiko eines klimabedingten Rückgangs besteht. Sie können definiert werden als bewässerte Gebiete mit trockenen Bedingungen, d. h. Gebiete, die einen erheblichen Rückgang der Bodenfeuchtigkeit aufweisen, mit Verlusten von mehr als $2,5 \text{ l m}^{-3}$ pro Jahrzehnt, oder durch einen Rückgang des N-PET, der zu einem Defizit von mehr als 1,7 mm pro Jahrzehnt beiträgt. Diese Zahlen stellen die Medianwerte dar, die bei rückläufigen Brunnen in bewässerten Gebieten beobachtet wurden (Abb. 3).

Obwohl die vier untersuchten Länder robuste Überwachungssysteme unterhalten, gibt es erhebliche Lücken bei der Verfügbarkeit kontinuierlicher, langfristiger Grundwasserstandsdaten für ganze Einzugsgebiete. Datendefizite sind besonders in Grundwasserkörpern innerhalb von Einzugsgebieten zu verzeichnen, die durch einen hohen Entnahmedruck und eine geringe Messdichte gekennzeichnet sind. Darüber hinaus sind wichtige Informationen über die Charakteristik der Grundwasserleiter - wie Grundwasserleitertyp, Brunnentiefe und Position innerhalb der Fließsysteme -, die für das Verständnis ihrer Reaktion auf Klima und vom Menschen verursachte Veränderungen wichtig sind, oft unvollständig oder fehlen. Diese Einschränkungen erschweren nicht nur das Verständnis der Grundwasserleiterrhythmik (ergänzende Diskussion), sondern können auch zu falschen Entscheidungen über die Zuweisung und Nutzung von Grundwasser führen. Künftig würden das Wassermanagement sowie Forschungsarbeiten, die dieser Studie ähneln, von hydrogeologischen Datenbanken profitieren, die vorhandene, aber derzeit noch nicht zusammengeführte Daten zu Schlüsselvariablen wie der Durchlässigkeit, die Speicher- und die Transporteigenschaften der Grundwasserleiter zusammenfassen und auf regionaler Ebene zugänglich machen.

Darüber hinaus sind genauere Informationen über die Menge und die Muster der Grundwasserförderung von wesentlicher Bedeutung für ein besseres Verständnis der Grundwassersysteme, insbesondere bei einer fragmentierten Überwachung der steuernden Faktoren^{51,52}. Der Grundwasserleiter Mancha Oriental ist ein Beispiel für die dringende Notwendigkeit einer umfassenden Überwachung der Grundwassernutzung. Um dem erheblichen Rückgang des Grundwasserspiegels³⁵ entgegenzuwirken, gründeten die örtlichen Landwirte eine Wassernutzervereinigung, die die Grundwasserspeicher mit Hilfe von Fernerkundung und individuellen landwirtschaftlichen Anbauplänen^{25,53} erfolgreich wiederherstellte.

Dieser Fall unterstreicht die entscheidende Rolle des Datenzugangs und der Überwachung für eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung und bietet ein Modell für ähnliche Regionen.

Der Schwerpunkt der Studie liegt auf Südwesteuropa, einer Region, die eine einzigartige Kombination aus steigendem Wasserbedarf, langfristiger Datenverfügbarkeit, fortgeschrittenem wissenschaftlich fundiertem Wissen und effektiver internationaler Steuerung darstellt und somit eine ideale Referenz für andere Regionen der Welt ist, die vor ähnlichen Herausforderungen im Bereich des Grundwassers stehen, aber nur über begrenzte langfristige Daten verfügen und denen es an einem effektiven Management und einer gut entwickelten Verwaltungsstruktur mangelt. Für ein besseres Verständnis der Grundwassersysteme ist es erforderlich, dass die Forschung und die breite Öffentlichkeit ungehinderten Zugang zu umfangreichen räumlichen und zeitlichen Langzeitdaten von In-situ- und Erdbeobachtungsstationen über politische Grenzen hinweg haben.

Unsere Analyse stellt die vorherrschende Vorstellung von sinkenden Grundwasserspiegeln in Südwesteuropa in Frage. Stattdessen haben wir eine nuancierte Situation aufgezeigt, in der rückläufige Trends nicht weit verbreitet sind; vielmehr gibt es eine Vielfalt von Grundwasserspiegelentwicklungen. Bei fast einem Drittel der untersuchten Brunnen wurden signifikante Veränderungen festgestellt, darunter eine kontinuierliche Absenkung, ein Anstieg und sogar eine Erholung nach einer Absenkung. Bei mehr als zwei Dritteln der Brunnen gab es keine signifikanten Veränderungen des Grundwasserspiegels. Dennoch sind 30 % der stabilen Brunnen von einem potenziellen Rückgang bedroht, da die prognostizierten Dürrebedingungen, wie z. B. der Verlust von Bodenfeuchtigkeit und ein verstärktes Niederschlagsdefizit, den Bewässerungsbedarf erhöhen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, den Grundwasserspiegeln und der Überwachung der Wassernutzung erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen, und zwar nicht nur in traditionell wasserarmen Gebieten, sondern auch in Regionen, in denen die anhaltende Trockenheit den Bedarf an Grundwassernutzung verschärfen könnte. Eine weit verbreitete Abnahme des Grundwassers in diesen Gebieten könnte die Nahrungsmittelproduktion stark beeinträchtigen, mit weitreichenden Folgen für die gesamte Europäische Union und darüber hinaus.

Erkenntnisse für Deutschland

Deutschland ist zwar ein wasserreiches Gebiet, aber die heißen und trockenen Sommer der letzten Zeit, insbesondere im Zeitraum 2018-2020⁵⁴, führten zu intensiven Dürren. Es ist davon auszugehen, dass vergleichbare zweijährige Dürren in Zukunft bis zu sieben mal so häufig auftreten können⁵⁵. In dieser Trockenperiode zeigten sich die Auswirkungen auf das Grundwasser bereits in stark sinkenden Grundwasserspiegeln aufgrund einer verringerten Grundwasserneubildung und einer erhöhten Gebietsverdunstung im Sommer. Besorgniserregende Trends und sinkende Pegelstände wurden insbesondere in weiten Teilen des Norddeutschen Tieflandes während dieser Dürrephasen⁵⁶ beobachtet. Dies ist für ganz Deutschland besonders bedeutsam, da fast 70 % des Trinkwassers aus Grundwasserquellen stammen.⁵⁷

Die südwesteuropäische Studie bietet Deutschland wertvolle Lehren für die Bewirtschaftung des Grundwassers unter zunehmendem Klimadruck. Eine wichtige Erkenntnis der Studie ist die Betonung der kombinierten Auswirkungen menschlicher Aktivitäten und natürlicher Faktoren bei der Gestaltung von Grundwassertrends. In Südwesteuropa zeigte das Zusammenspiel von Bewässerungspraktiken, städtischer Wassernutzung und klimatischen Veränderungen, wie Bewirtschaftungsentscheidungen den Grundwasserstress verstärken oder abmildern können. Deutschland könnte einen ähnlichen Ansatz verfolgen, indem es die Auswirkungen seiner eigenen landwirtschaftlichen und städtischen Wassernutzung genau untersucht, insbesondere angesichts von Trends wie denen der extremen Trockenjahre, bei denen die Grundwasserspiegel bereits sehr stark zurückgingen. Die Bewertung des Gleichgewichts zwischen Grundwasserdargebot und -entnahme könnte als Grundlage für Anpassungsstrategien dienen, wie z. B. die Anpassung von Entnahmegenehmigungen auf der Grundlage saisonaler und jährlicher Trends sowie

die Erkundung alternativer Wasserbereitstellungen, um die Abhängigkeit vom Grundwasser in Spitzenbedarfszeiten zu verringern.

Eine weitere Lehre für Deutschland besteht darin, wie in Südwesteuropa lokale Wassernutzerverbände für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Grundwassers eingesetzt werden. Die Studie hebt Fälle hervor, in denen lokale Wassernutzervereinigungen, die Zugang zu Grundlagendaten haben und Wasserentnahmerechte flexibel gestalten können, in der Lage waren, die Übernutzung des Grundwassers wirksam einzudämmen. In Deutschland könnte die Förderung der Bildung lokaler Wasserverbände in Gebieten, in denen die Grundwasserknappeheit ein Problem darstellt, die Gemeinden in die Lage versetzen, sich für die Bewirtschaftung des Grundwassers zu engagieren und nachhaltige Managementmaßnahmen zu fördern, die auf die lokalen Bedürfnisse und Bedingungen zugeschnitten sind. Die Verbände könnten beispielsweise dazu beitragen, das Grundwasser in landwirtschaftlichen Regionen effizienter zu bewirtschaften oder Pläne zur Reduzierung des Wasserverbrauchs in Dürreperioden zu entwickeln.

Darüber hinaus unterstreicht die südwesteuropäische Studie die Notwendigkeit konsistenter und verfügbarer Daten über Bodenfeuchte, Gebietsverdunstung und Niederschlagsdefizite, um das Risiko eines Grundwasserrückgangs frühzeitig zu erkennen. Für Deutschland könnte die Einbeziehung der Bodenfeuchte und der Gebietsverdunstung in die Überlegungen zur Grundwasserbewirtschaftung die Prognosen und die Planung von Gegenmaßnahmen verbessern, zumal Modelle zum Klimawandel vorhersagen, dass künftige Dürren häufiger und intensiver werden (siehe oben). Dieser Ansatz könnte Deutschland dabei helfen, sich auf Verschiebungen in der Bewässerungsnachfrage für wichtige Nutzpflanzen wie Mais und Kartoffeln vorzubereiten und es den politischen Entscheidungsträgern ermöglichen, präventiv Maßnahmen wie Fruchtwechsel, reduzierte Bewässerung oder die Förderung dürreresistenterer Nutzpflanzen einzuführen.

Schließlich könnte die Grundwasserbewirtschaftung in Deutschland von einer verbesserten Datenzugänglichkeit und Koordinierung über Verwaltungsgrenzen hinweg profitieren, wie in der südwesteuropäischen Studie hervorgehoben wurde. Da Grundwasser zunehmend als gemeinsame und gefährdete Ressource erkannt wird, sind mehr Transparenz und Zusammenarbeit unerlässlich. Durch die Verbesserung der Mechanismen für den Datenaustausch und die Angleichung der Wasserbewirtschaftungsansätze zwischen Ländern und Gemeinden könnte Deutschland einen stärker integrierten Ansatz für die Grundwasserbewirtschaftung fördern. Dies wäre besonders wichtig für die Entwicklung anpassungsfähiger Reaktionen auf den weit verbreiteten Wasserstress, den der Klimawandel voraussichtlich mit sich bringen wird.

Methoden

Datenerhebung und -verarbeitung

Grundwasserspiegel

Die Studie konzentriert sich auf Zeitreihendaten des Grundwasserspiegels, die von öffentlichen Überwachungsnetzen in Südwesteuropa gesammelt wurden. Die Daten aus Frankreich, Portugal und Spanien wurden durch Massendownloads und Skripte von zentralisierten Überwachungsplattformen (<https://ades.eaufrance.fr/>, <https://snirh.apambiente.pt/>, <https://sig.mapama.gob.es/redes-seguimiento/index.html?herramienta=Piezometros>) gewonnen. Die Zeitreihen aus Italien wurden durch Anfragen bei subnationalen Behörden gewonnen und deckten hauptsächlich den nördlichen Teil des Landes ab. Nach der Erhebung der Daten wurden Ausreißer entfernt und die Daten zusammengestellt. Aufgrund von Datenlücken wurden jährliche statt monatliche Daten verwendet, wobei der Schwerpunkt eher auf dekadischen Veränderungen als auf saisonalen Mustern lag. Der Zeitraum 1985-2014 wurde aufgrund der Vollständigkeit der Daten ausgewählt. Zum Zeitpunkt der Zusammenstellung der Datensätze (Januar 2020) waren Daten aus Spanien nur bis zum Jahr 2017 verfügbar. Historisch gesehen hat die Datendichte nach den 1980er Jahren zugenommen (Abb. 1b).

In dieser Studie wurde die bisher umfangreichste Langzeit-Grundwasserstandsdatenbank (12.398 Brunnen) in den vier südwesteuropäischen Ländern (Portugal, Spanien, Frankreich und Italien) zusammengestellt. Bei der Analyse wurde in erster Linie die Tiefe des Grundwasserspiegels (GWS) und nicht die Höhe über dem mittleren Meeresspiegel für die praktische Grundwasserbewertung herangezogen. In Fällen, in denen es sich um gespannte Grundwasserleiter handelt, wurden die relevanten Daten anhand der piezometrischen Pegel und nicht anhand der GWS interpretiert.

Bei der Prüfung der Vollständigkeit des Datensatzes wurde festgestellt, dass 80 % der für die Trendclusterung verwendeten Beobachtungsbrunnen über die drei fraglichen Jahrzehnte (1985-2014) vollständige Datensätze besaßen, wobei durchschnittlich 96 % der jährlichen Aufzeichnungen vorlagen. Um die Wahrscheinlichkeit zu bewerten, dass saisonale Datenlücken die jährlichen Grundwasserspiegel-Trends beeinflussen, analysierten wir die Vollständigkeit der monatlichen Daten für denselben Zeitraum. Wir fanden heraus, dass 62 % der Brunnen eine monatliche Datenabdeckung von mindestens 70 % aufwiesen, wobei nur 3 % saisonale Lücken aufwiesen, vor allem im Frühjahr und Herbst. Bei den 28 % der Brunnen mit einer monatlichen Datenabdeckung von weniger als 70 % traten Lücken häufiger auf und waren in der Regel von längerer Dauer. Trotzdem wurde eine saisonale Verzerrung der Datenlücken nur bei 2 % dieser Brunnen beobachtet, wodurch das Risiko einer saisonalen Verzerrung mit Auswirkungen auf die jährliche Trendanalyse verringert wird.

Ergänzende Daten

Zu den Zusatzdaten, die in dieser Studie verwendet wurden, um zusätzlichen Kontext und Informationen zu liefern, gehören verschiedene Variablen aus unterschiedlichen Quellen. Niederschlagsdaten aus dem E-OBS-Datensatz (<https://doi.org/10.24381/cds.151d3ec6>) wurden verwendet, um Veränderungen der Grundwasserneubildung zu bewerten und das Vorhandensein von Trockenheit abzuschätzen. Potenzielle und tatsächliche Evapotranspirationszeitreihen, die aus dem Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM v3.7a) gewonnen wurden, trugen zum Verständnis der Veränderungen des Verdunstungsbedarfs bei, die sich auf die Anreicherung und das Auftreten von Dürre auswirken. Der CORINE Land Cover 2018-Datensatz wurde stellvertretend für die anthropogene Belastung des Grundwassers verwendet, da es sich um Landbedeckungen handelt, die mit bewässerter Landwirtschaft und städtischer Wassernutzung verbunden sind. Die Köppen-Geiger-Klimaklassifikationskarten wurden zur Unterscheidung von Temperatur- und Niederschlagsregimen verwendet. Der IHME1500-Datensatz lieferte neben nationalen

geologischen Erhebungen Informationen zur Hydrogeologie, die für das Verständnis von Grundwasserfluss und -speicherung von entscheidender Bedeutung sind. Die Europäische Bewässerungskarte für das Jahr 2010 (EIM2010) wurde zur Schätzung der bewässerten Flächen und zur Bewertung der Bewässerungsintensität herangezogen. Der Datensatz zur potenziellen Grundwasseranreicherung von EuroGeoSurveys lieferte Schätzungen zum Zufluss von Wasser in Grundwasserspeicher. Die Entwicklung der sommerlichen Bodenfeuchte in Europa^{35,36} diente als Indikator für die dekadische Veränderung der Grundwasseranreicherung. Diese ergänzenden Datensätze wurden vorverarbeitet, um die Beobachtungsbrunnen anhand ihrer räumlichen Lage zuzuordnen, was eine umfassende Analyse und Interpretation des Grundwassersystems ermöglicht. Weitere Einzelheiten sind in den ergänzenden Informationen zu finden.

Trenderkennung und Clustering

Wir verwendeten die Mann-Kendall-Hamed Rao-Modifikation, um Trends in den Grundwasserstandszeitreihen⁵⁸ für Brunnen mit mindestens zehnjährigen Messungen ($n = 7.155$ Brunnen) mit dem Python-Paket pyMannKendall⁵⁹ zu ermitteln. Dekadische Trends (1985-1994, 1995-2004, 2005-2014) wurden ebenfalls für Brunnen mit mindestens 30 Jahren Beobachtungen ($n = 1.038$) berechnet. Die Ergebnisse der Trenderkennung sowie die Größe des Trends, gemessen als Sen Slope, dienten als Input für die k-means-Clustering, bei der die Brunnen auf der Grundlage ähnlicher GWS-Entwicklungen gruppiert wurden. Die Anzahl der Cluster wurde durch den Vergleich der Ellbogenmethode und des Silhouettenkoeffizienten⁶⁰ bestimmt.

Analyse der steuernden Faktoren

Die Beziehung zwischen anthropogenen und klimatischen Variablen wurde für jeden Brunnen untersucht. Insgesamt wurden 33 Variablen analysiert, um ihre potenziellen Auswirkungen auf den Grundwasserspiegel zu bewerten (ergänzende Tabellen 2 und 3, Abb. S3-S7). Diese Variablen umfassten zahlreiche Faktoren wie Durchschnittswerte, Trends und dekadische Veränderungen des Niederschlags, der potenziellen Evapotranspiration und der tatsächlichen Evapotranspiration. Darüber hinaus wurden die nassen Tage pro Jahr, die Kreuzkorrelation zwischen Jahresniederschlag und GWS, die Klimaklassifikation, die potenzielle Neubildung, die Höhenlage, die Hydrogeologie, die Häufigkeit von Trockenheit und Sommertrockenheit sowie die Entfernungen zu verschiedenen Landnutzungen, einschließlich städtischer Gebiete und potenziell bewässerter Felder, berücksichtigt. Darüber hinaus wurden die Flächen berücksichtigt, die für die Bewässerung bestimmter Kulturen wie Weinberge, Getreide, Reis, Zitrusfrüchte und Oliven bestimmt sind. Um die wichtigsten Faktoren zu ermitteln, die die identifizierten Cluster unterscheiden, wurde eine Random-Forest-Analyse durchgeführt (Abb. S4), um die wichtigsten Variablen für die weitere Analyse zu priorisieren.

Eine Kreuzkorrelationsanalyse mit einem gleitenden Zeitrahmen von maximal 3 Jahren wurde durchgeführt, um die Korrelation zwischen den jährlichen Grundwasserstandszeitreihen und den jährlichen Niederschlagsdaten aus dem nächstgelegenen E-OBS-Gitterdatensatz⁶¹ zu ermitteln. Unter Verwendung desselben Datensatzes extrahierten wir Informationen über die Anzahl der nassen Tage pro Jahr, definiert als Tage mit mehr als 0,1 mm Niederschlag⁶², um die durchschnittliche Anzahl der nassen Tage sowie die Veränderungsraten während des Zeitraums 1985-2014 zu berechnen.

Der meteorologische Einfluss der Trockenheit wurde durch eine Analyse der Verteilung der Brunnen in Bezug auf die Trockenheitsereignisse pro Dekade unter Verwendung der SPEI-3 Monate¹⁰ (Tabelle S3) bewertet.

Die Trends der Bodenfeuchte wurden anhand des Bodenfeuchtebilanzmodells in den oberen Bodenhorizonten für die Sommer (Juni-August) zwischen 1951 und 2012 ermittelt. Die Bodenfeuchtebilanz

wurde zuvor mit gemessenen Bodenfeuchten zwischen 5 und 90 cm Tiefe validiert^{36,37}. Dieser Datensatz wurde aufgrund seiner umfassenden zeitlichen Abdeckung und der Validierung anhand von In-situ-Messungen ausgewählt, was eine robuste Analyse langfristiger Einflüsse auf den Grundwasserspiegel im Untersuchungszeitraum von 1985-2014 ermöglicht.

Die euklidische Entfernung von jedem Brunnen zum nächstgelegenen städtischen Gebiet oder Bewässerungsgebiet wurde mit dem QGIS-Plugin NN Join⁶³ berechnet. Städtische Gebiete wurden definiert als Gebiete mit mindestens 1.500 ha zusammenhängender Pixel, die in der CORINE-Datenbank⁶⁴ als zusammenhängende städtische Struktur, diskontinuierliche städtische Struktur, Industrie- oder Gewerbeeinheiten klassifiziert wurden. In der selben Datenbank wurden bewässerte Gebiete als mindestens 1.000 ha zusammenhängende Pixel definiert, die in CORINE als dauerhaft bewässert, Reisfelder, Weinberge, Obstbäume, Beerenplantagen, einjährige Kulturen in Verbindung mit Dauerkulturen und komplexe Anbaumuster klassifiziert wurden.

In ähnlicher Weise wurde die Entfernung von jedem Brunnen zum nächstgelegenen Fluss mit Hilfe des globalen Flussnetzes HydroRivers⁶⁵ geschätzt. Zunächst wurden die Entfernungen unter Berücksichtigung aller Flüsse berechnet, um eine Basisentfernung zu ermitteln. Um die Bedeutung größerer Flüsse hervorzuheben, wurde die Flussdatenbank anschließend so verfeinert, dass sie nur Flüsse mit einer Strahler-Ordnung größer als 1 enthält.

Verfügbarkeit von Daten

Die Daten aus Frankreich, Portugal und Spanien, die die Ergebnisse dieser Studie untermauern, sind in den folgenden Repositories verfügbar: <https://ades.eaufrance.fr/>, <https://snirh.apambiente.pt/> bzw. <https://sig.mapama.gob.es/redes-seguimiento/index.html?herramienta=Piezometros>. Die Daten aus Italien werden nicht zur Verfügung gestellt, da die Datenvereinbarung die öffentliche Weitergabe der Daten verhindert.

Danksagungen

Diese Arbeit wurde im Rahmen des InTheMED-Projekts entwickelt. InTheMED ist Teil des PRIMA-Programms, das durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizont 2020 der Europäischen Union unter der Fördervereinbarung Nr. 1923 unterstützt wird. Die Studie wurde auch teilweise durch das OurMED PRIMA Programmprojekt unterstützt, das durch das Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen Union unter der Zuschussvereinbarung Nr. 2222 finanziert wird.

Wir danken den Herausgebern Rahim Barzegar und Joe Aslin sowie den Gutachtern Steffen Birk, Eric Rosa und einem anonymen Gutachter für ihre wertvollen Kommentare und Vorschläge zur Verbesserung des Manuskripts. Wir danken dem E-OBS-Datensatz aus dem EU-FP6-Projekt UERRA (<http://www.uerra.eu>) und dem Copernicus Climate Change Service sowie den Datenlieferanten im ECA&D-Projekt (<https://www.ecad.eu>). Diese Veröffentlichung wurde unter Verwendung der Informationen des Copernicus Land Monitoring Service der Europäischen Union erstellt; <https://doi.org/10.2909/960998c1-1870-4e82-8051-6485205ebbac>.

Beiträge der Autoren

Konzeption der Arbeit: RCGS, JJGH, und SJ. Beschaffung der Daten: RCGS, JJGH und SJ. Planung der Analyse, Datenanalyse und Erstellung der Abbildungen: RCGS, RR, EH, JJGH und SJ. Diskussion der Ergebnisse: Alle Autoren. RCGS schrieb das erste Manuskript. Redigieren: RCGS, RR, NKC, DAB, MR, JJGH und SJ. Alle Autoren lasen, verbesserten und genehmigten das endgültige Manuskript.

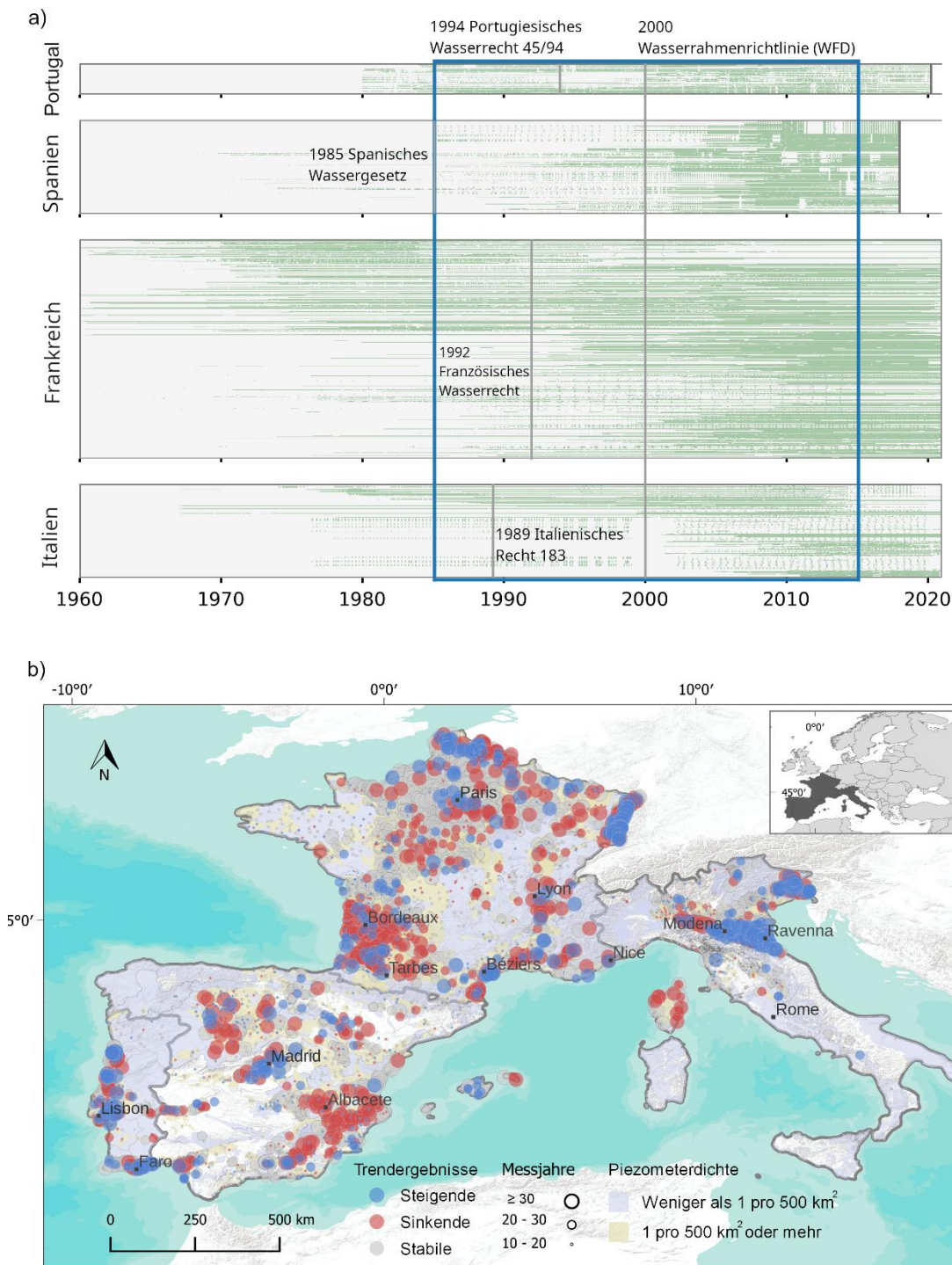


Abb. 1. Messungen des Grundwasserspiegels und Trends in verschiedenen Zeiträumen. a. Wärmekarten, die die Überwachung des Grundwasserspiegels von 1960 bis 2020 und wichtige nationale und regionale wasserpolitische Instrumente für Portugal, Spanien, Frankreich und Italien darstellen. Jede Zeile ist ein Beobachtungsbrunnen des jeweiligen Landes; graue und grüne Farben zeigen das Fehlen bzw. Vorhandensein von Messungen an. Der blaue Kasten

571 umrahmt den Zeitraum, der für die mehrdekadische Trendanalyse verwendet wurde (1985-2014).
572 **b.** Durch Trenderkennung ermittelte Hotspots der Grundwasserveränderung für 7.155 Brunnen
573 für den gesamten 30-Jahres-Zeitraum (mehr als zehn Jahre Daten, blau für steigende, rot für
574 sinkende, grau für stabile Werte). Die in den einzelnen Brunnen gemessenen Jahre spiegeln sich
575 in der Größe der Kreise wider. Braun sind die Grundwasserkörper mit einer Brunnendichte von
576 mindestens 1 pro 500 km². Hintergrundbilder von
577 <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=c61ad8ab017d49e1a82f580ee1298931>.

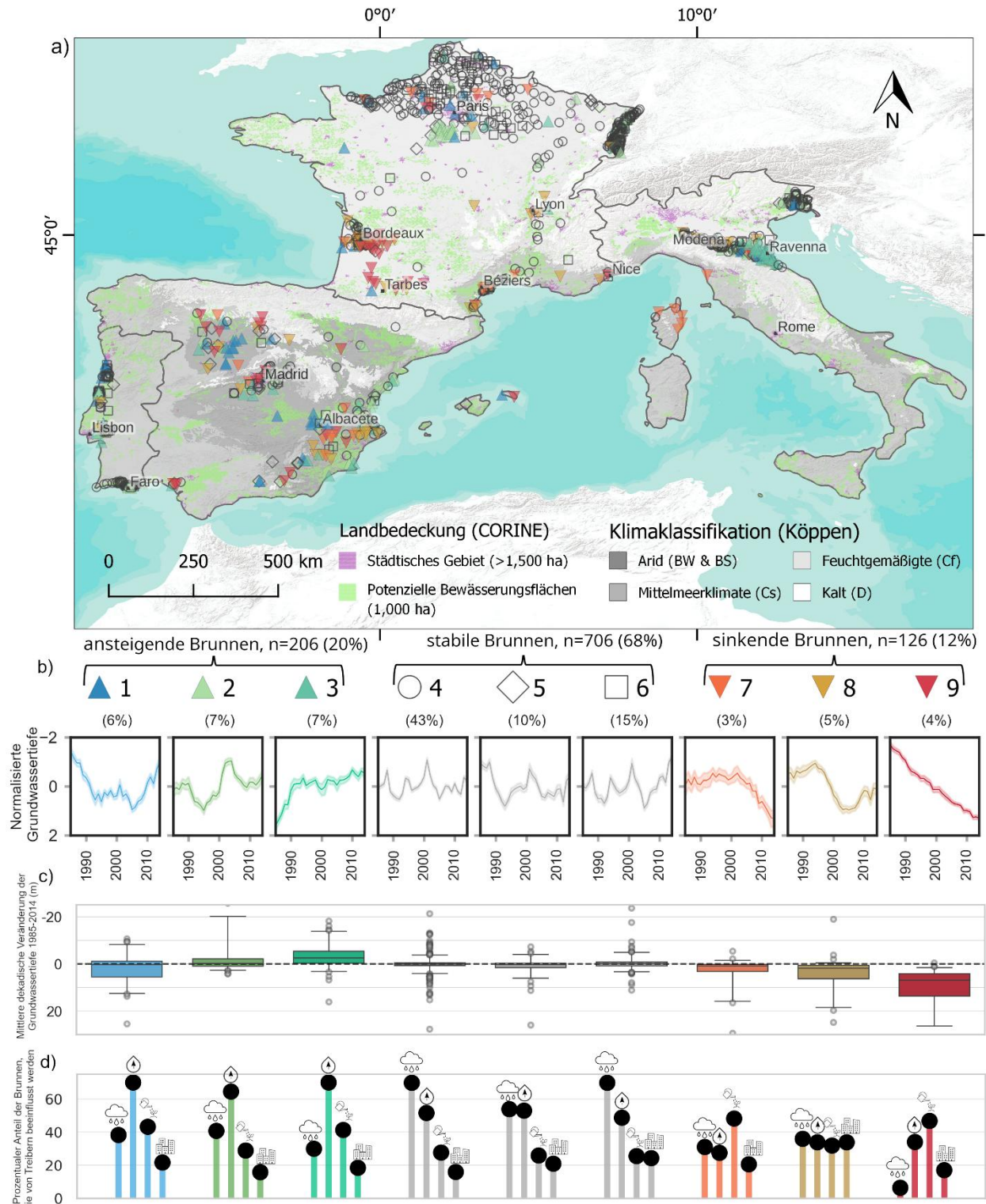


Abb. 2. Cluster-Verteilung und Charakterisierung der Grundwassertiefe (WTD). a. Räumliche Verteilung der WTD-Entwicklungscluster in den Klimaklassifikationen (Symbole in b). b. Verhalten der GWS-Cluster im Zeitraum 1985-2014 auf der Grundlage des normalisierten GWS-Mittelwerts des jeweiligen Clusters. c. Interquartilsverteilung (IQR) der Medianunterschiede bei den GWS-Veränderungen zwischen 1985-1994 und 2005-2014, IQR innerhalb der Box-Grenzen und der Median als Mittellinie. Die

583 Whisker reichen bis zum 1,5-fachen des IQR, und Ausreißer werden als Punkte außerhalb der Whisker
584 dargestellt. d. Prozentsatz der Beobachtungen mit starkem Einfluss der einzelnen Treiber. Kreuzkorrelation
585 von mehr als -0,45 zwischen Jahresniederschlag und jährlicher GWS (Wolkensymbol).
586 Niederschlagszunahme von mehr als 10 mm pro Jahrzehnt (Tropfen mit Pfeilsymbol). Potenzielle
587 Bewässerung: Brunnen in einem Umkreis von 2 km um eine große landwirtschaftliche Fläche (1.000 ha)
588 mit potenzieller Bewässerung (Gießkannensymbol). Städtisches Gebiet: Brunnen im Umkreis von 4 km um
589 städtische Gebiete (mehr als 1.500 ha) (Symbol für Gebäude). Hintergrundbilder von
590 <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=c61ad8ab017d49e1a82f580ee1298931>.

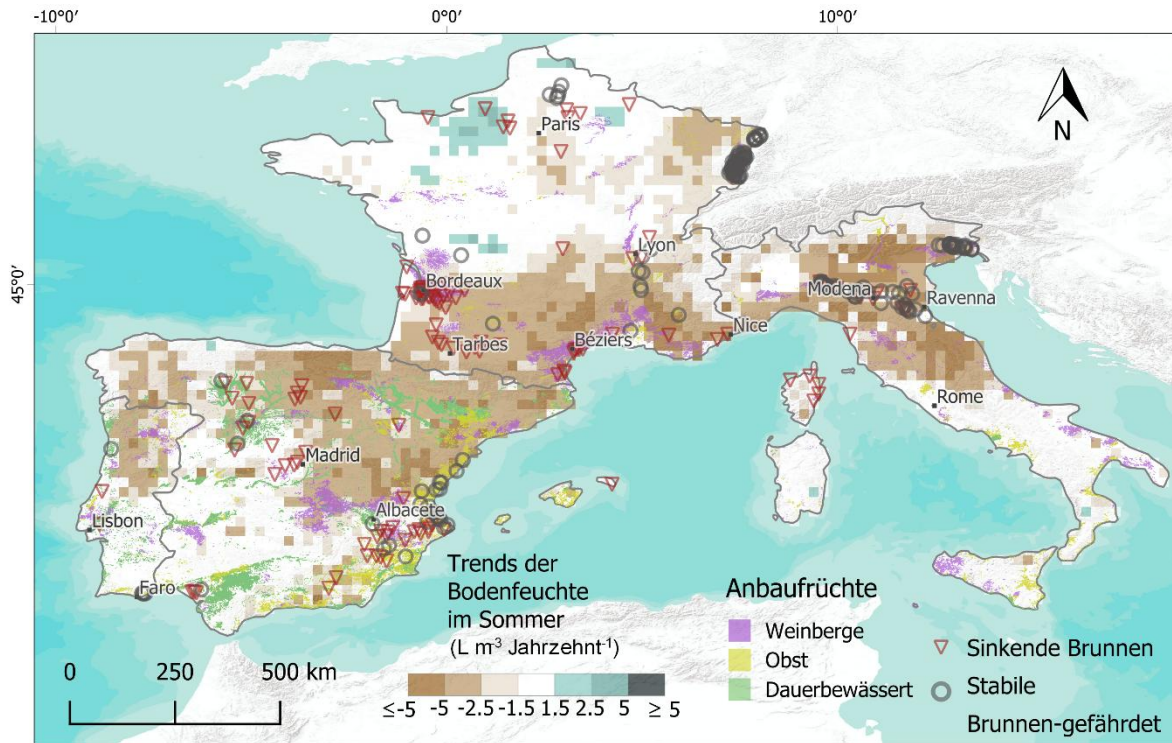


Abb. 3. Rolle der Bodenfeuchtigkeit und der Kulturen. Die in roten Dreiecken markierten Brunnen mit sinkenden Wasserständen (Cluster 7-9) befinden sich in der Regel in Gebieten, in denen die Bodenfeuchte in der gesamten Region zwischen 1950 und 2012 stärker abgenommen hat (Kurnik et al., 2014; Kurnik et al., 2015)^{35,36} und überschneiden sich in einigen Fällen mit Weinbergen und Obstplantagen. Bis zu 30 % der stabilen Brunnen (markiert als graue, abgerundete Quadrate) in bewässerten Gebieten, die eine Verringerung der Bodenfeuchtigkeit um mehr als 1,5 l m⁻³ Dekade⁻¹ oder eine Abnahme des Niederschlagsdefizits um 10 mm Dekade⁻¹ erfahren, gelten als gefährdet durch klimabedingte Rückgänge. Hintergrundbilder von <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=c61ad8ab017d49e1a82f580ee1298931>.

Referenzen

1. Seneviratne, S. I., Lüthi, D., Litschi, M. & Schär, C. Land–atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* **443**, 205–209 (2006).
2. Diffenbaugh, N. S., Pal, J. S., Giorgi, F. & Gao, X. Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot. *Geophys. Res. Lett.* **34**, 11706 (2007).
3. De Cicco, A. The fruit and vegetable sector in the EU - a statistical overview. *Eurostat Statistics Explained* https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=The_fruit_and_vegetable_sector_in_the_EU_-_a_statistical_overview#Where_are_fruit_and_vegetables_grown_in_the_EU.3F_By_how_many_farms.3F_Over_what_area.3F (2019).
4. European Commission. Spain: agriculture statistical factsheet. 18 https://agriculture.ec.europa.eu/cap-my-country/performance-agricultural-policy/agriculture-country/eu-country-factsheets_en (2021).
5. De Stefano, L., Fornés, J. M., López-Geta, J. A. & Villarroya, F. Groundwater use in Spain: an overview in light of the EU Water Framework Directive. *Int. J. Water Resour. Dev.* **31**, 640–656 (2015).
6. Maréchal, J.-C. & Rouillard, J. Groundwater in France: Resources, Use and Management Issues. in *Sustainable Groundwater Management A Comparative Analysis of French and Australian Policies and Implications to Other Countries* (eds. Rinaudo, J.-D., Holley, C., Barnett, S. & Montginoul, M.) 17–45 (Springer, 2020). doi:10.1007/978-3-030-32766-8_2.
7. OECD. *Drying Wells, Rising Stakes*. https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/drying-wells-rising-stakes_9789264238701-en (2015) doi:10.1787/9789264238701-en.
8. Civita, M., Massarutto, A. & Seminara, G. *Groundwater in the Southern Member States of the European Union: an assessment of current knowledge and future prospects. Country report for Italy*. https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Italy_Groundwater_country_report.pdf (2010).
9. do Rosário de Jesus, M. *Groundwater Protection for Public Water-Supply in Portugal*. <https://unece.org/fileadmin/DAM/env/water/meetings/groundwater01/portugal.pdf> (2001).
10. Spinoni, J., Naumann, G. & Vogt, J. V. Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. *Glob. Planet. Change* **148**, 113–130 (2017).
11. Almendra-Martín, L. *et al.* Analysis of soil moisture trends in Europe using rank-based and empirical decomposition approaches. *Glob. Planet. Change* **215**, 103868 (2022).
12. Masseroni, D. *et al.* The 63-year changes in annual streamflow volumes across Europe with a focus on the Mediterranean basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **25**, 5589–5601 (2021).
13. Caloiero, T., Veltri, S., Caloiero, P. & Frustaci, F. Drought Analysis in Europe and in the Mediterranean Basin Using the Standardized Precipitation Index. *Water* **10**, 1043 (2018).

- 637 14. Lionello, P. & Scarascia, L. The relation between climate change in the Mediterranean
638 region and global warming. *Reg. Environ. Chang.* **18**, 1481–1493 (2018).
- 639 15. Cramer, W. *et al.* Climate change and interconnected risks to sustainable development in
640 the Mediterranean. *Nat. Clim. Chang.* **8**, 972–980 (2018).
- 641 16. Forzieri, G. *et al.* Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. *Hydrol.*
642 *Earth Syst. Sci.* **18**, 85–108 (2014).
- 643 17. Vautard, R. *et al.* The European climate under a 2 °C global warming. *Environ. Res. Lett.*
644 **9**, 034006 (2014).
- 645 18. Giannakopoulos, C. *et al.* Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean
646 resulting from a 2 °C global warming. *Glob. Planet. Change* **68**, 209–224 (2009).
- 647 19. Xanke, J. & Liesch, T. Quantification and possible causes of declining groundwater
648 resources in the Euro-Mediterranean region from 2003 to 2020. *Hydrogeol. J.* **30**, 379–
649 400 (2022).
- 650 20. Petit, O. *et al.* Les économies agricoles reposant sur l'eau souterraine peuvent-elles
651 s'effondrer ? Une enquête sur les trajectoires de quatre économies basées sur l'eau
652 souterraine menacées. *Hydrogeol. J.* **25**, 1549–1564 (2017).
- 653 21. Figureau, A. G., Montginoul, M. & Rinaudo, J. D. Policy instruments for decentralized
654 management of agricultural groundwater abstraction: A participatory evaluation. *Ecol.*
655 *Econ.* **119**, 147–157 (2015).
- 656 22. Martín-Rosales, W. *et al.* Hydrological implications of desertification in southeastern
657 Spain. *Hydrol. Sci. J.* **52**, 1146–1161 (2007).
- 658 23. Grath, J., Ward, R., Scheidleder, A. & Quevauviller, P. Report on EU guidance on
659 groundwater monitoring developed under the common implementation strategy of the
660 water framework directive. *J. Environ. Monit.* **9**, 1162 (2007).
- 661 24. IGRAC. *Groundwater monitoring programmes: A global overview of quantitative*
662 *groundwater monitoring networks.* (2020).
- 663 25. López-Gunn, E. Groundwater governance and social capital. *Geoforum* **43**, 1140–1151
664 (2012).
- 665 26. Soboyejo, L. A., Giambastiani, B. M. S., Molducci, M. & Antonellini, M. Different
666 processes affecting long-term Ravenna coastal drainage basins (Italy): implications for
667 water management. *Environ. Earth Sci.* **80**, 493 (2021).
- 668 27. Antonellini, M., Allen, D. M., Mollema, P. N., Capo, D. & Greggio, N. Groundwater
669 freshening following coastal progradation and land reclamation of the Po Plain, Italy.
670 *Hydrogeol. J.* **23**, 1009–1026 (2015).
- 671 28. Global Water Partnership. *FRANCE – MANAGEMENT PLAN FOR THE ASTIAN*
672 *AQUIFER CASE #20.* [https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/case-](https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/case-studies/europe/france.-management-plan-for-the-astian-aquifer-20.pdf)
673 [studies/europe/france.-management-plan-for-the-astian-aquifer-20.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/case-studies/europe/france.-management-plan-for-the-astian-aquifer-20.pdf) (2013).
- 674 29. Corbier, P. *et al.* *Que retenir de l'évolution de l'état des nappes de Gironde en 2012 ?*

(BRGM, 2014) doi:BRGM/RP-63375-FR.

30. Lapuyade, F., Saltel, M. & de Grissac, B. Setting Sustainable Abstraction Limits in Confined Aquifers: Example from Deep Confined Aquifers in the Bordeaux Region, France. in *Sustainable Groundwater Management A Comparative Analysis of French and Australian Policies and Implications to Other Countries* (eds. Rinaudo, J. D., Holley, C., Barnett, S. & Montginoul, M.) 229–251 (2020). doi:10.1007/978-3-030-32766-8_12.
31. Asoka, A., Gleeson, T., Wada, Y. & Mishra, V. Relative contribution of monsoon precipitation and pumping to changes in groundwater storage in India. *Nat. Geosci.* **10**, 109–117 (2017).
32. Ruybal, C. J., Hogue, T. S. & McCray, J. E. Assessment of Groundwater Depletion and Implications for Management in the Denver Basin Aquifer System. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* **55**, 1130–1148 (2019).
33. Thomas, B. F. & Famiglietti, J. S. Identifying Climate-Induced Groundwater Depletion in GRACE Observations. *Sci. Rep.* **9**, 4124 (2019).
34. Pulido-Velazquez, D., Collados-Lara, A. J. & Alcalá, F. J. Assessing impacts of future potential climate change scenarios on aquifer recharge in continental Spain. *J. Hydrol.* **567**, 803–819 (2018).
35. Sanz, D. *et al.* Modeling aquifer-river interactions under the influence of groundwater abstraction in the Mancha Oriental System (SE Spain). *Hydrogeol. J.* **19**, 475–487 (2011).
36. Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y. & Kirchner, J. W. Widespread potential loss of streamflow into underlying aquifers across the USA. *Nature* **591**, 391–395 (2021).
37. Peña-Angulo, D. *et al.* Long-term precipitation in Southwestern Europe reveals no clear trend attributable to anthropogenic forcing. *Environ. Res. Lett.* **15**, 094070 (2020).
38. Kurnik, B., Louwagie, G., Erhard, M., Ceglar, A. & Bogataj Kajfež, L. Analysing Seasonal Differences between a Soil Water Balance Model and in Situ Soil Moisture Measurements at Nine Locations Across Europe. *Environ. Model. Assess.* **19**, 19–34 (2014).
39. Kurnik, B., Kajfež-Bogataj, L. & Horion, S. An assessment of actual evapotranspiration and soil water deficit in agricultural regions in Europe. *Int. J. Climatol.* **35**, 2451–2471 (2015).
40. Martinsen, G. *et al.* Developing a pan-European high-resolution groundwater recharge map – Combining satellite data and national survey data using machine learning. *Sci. Total Environ.* **822**, 153464 (2022).
41. Liu, Y., Shan, F., Yue, H., Wang, X. & Fan, Y. Global analysis of the correlation and propagation among meteorological, agricultural, surface water, and groundwater droughts. *J. Environ. Manage.* **333**, 117460 (2023).
42. Bloomfield, J. P., Marchant, B. P., Bricker, S. H. & Morgan, R. B. Regional analysis of groundwater droughts using hydrograph classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **19**, 4327–

4344 (2015).

43. Erostate, M. *et al.* Groundwater dependent ecosystems in coastal Mediterranean regions: Characterization, challenges and management for their protection. *Water Res.* **172**, 115461 (2020).
44. Evaristo, J. & McDonnell, J. J. Prevalence and magnitude of groundwater use by vegetation: A global stable isotope meta-analysis. *Sci. Rep.* **7**, 1–12 (2017).
45. Glanville, K., Sheldon, F., Butler, D. & Capon, S. Effects and significance of groundwater for vegetation: A systematic review. *Sci. Total Environ.* **875**, 162577 (2023).
46. Rupérez-Moreno, C., Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J. & del Pilar Flores-Asenjo, M. The economic value of conjoint local management in water resources: Results from a contingent valuation in the Boquerón aquifer (Albacete, SE Spain). *Sci. Total Environ.* **532**, 255–264 (2015).
47. Eau Seine Normandie & Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Prélèvements en eau souterraine. *Système d'information pour la gestion des eaux souterraines en Seine-Normandie* <https://sigessn.brgm.fr/spip.php?article169> (2014).
48. Scanlon, B. R. *et al.* Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nat. Rev. Earth Environ.* **4**, 87–101 (2023).
49. Jiménez-Donaire, M. del P., Giráldez, J. V. & Vanwalleghem, T. Impact of Climate Change on Agricultural Droughts in Spain. *Water* **12**, 3214 (2020).
50. Capa-Morocho, M. *et al.* Crop yield outlooks in the Iberian Peninsula: Connecting seasonal climate forecasts with crop simulation models. *Agric. Syst.* **149**, 75–87 (2016).
51. Leduc, C., Pulido-Bosch, A. & Remini, B. Anthropization of groundwater resources in the Mediterranean region: processes and challenges. *Hydrogeol. J.* **25**, 1529–1547 (2017).
52. Deines, J. M., Kendall, A. D., Butler, J. J. & Hyndman, D. W. Quantifying irrigation adaptation strategies in response to stakeholder-driven groundwater management in the US High Plains Aquifer. *Environ. Res. Lett.* **14**, 044014 (2019).
53. Esteban, E. & Albiac, J. The problem of sustainable groundwater management: the case of La Mancha aquifers, Spain. *Hydrogeol. J.* **20**, 851–863 (2012).
54. UFZ. UFZ Dürremonitor Deutschland. <https://www.ufz.de/index.php?de=37937> (2021).
55. Hari, V., Rakovec, O., Markonis, Y., Hanel, M. & Kumar, R. Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Sci. Rep.* **10**, 12207 (2020).
56. Wriedt, G. Grundwasserbericht Niedersachsen: Sonderausgabe zur Grundwasserstandssituation in den Trockenjahren 2018 und 2019. (2020).
57. Destatis. Wassergewinnung: Bundesländer, Jahre, Wasserarten. GENESIS-Online <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=32211-0002&bypass=true&levelindex=0&levelid=1611589342283#abreadcrumb> (2021).
58. Hamed, K. H. & Ramachandra Rao, A. A modified Mann-Kendall trend test for

- autocorrelated data. *J. Hydrol.* **204**, 182–196 (1998).
59. Hussain, M. & Mahmud, I. pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. *J. Open Source Softw.* **4**, 1556 (2019).
 60. Teimoori, S., Olya, M. H. & Miller, C. J. Groundwater level monitoring network design with machine learning methods. *J. Hydrol.* **625**, 130145 (2023).
 61. Cornes, R. C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E. J. M. & Jones, P. D. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *J. Geophys. Res. Atmos.* **123**, 9391–9409 (2018).
 62. Martin-Vide, J. & Gomez, L. Regionalization of Peninsular Spain basen on the length of dry spells. *Int. J. Climatol.* **19**, 537–555 (1999).
 63. Tveite, H. The QGIS NNJoin Plugin. (QGIS Python Plugins Repository, 2014).
 64. European Environment Agency. CORINE Land Cover 2018 (raster 100 m), Europe, 6-yearly. (2019) doi:10.2909/960998C1-1870-4E82-8051-6485205EBBAC.
 65. Lehner, B. & Grill, G. Global river hydrography and network routing: Baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrol. Process.* **27**, 2171–2186 (2013).