

Abschlussbericht für das Vorhaben

Reanalyse/ Vorhersage der Wasserspeicherung in Europa mittels KI (WIKI)

gefördert im Rahmen der Bekanntmachung „Entwicklung und Nutzung von Methoden der künstlichen Intelligenz für den anwendungsorientierten Einsatz in der Satellitenerdbeobachtung“ vom 22.Mai.2020

Zuwendungsempfänger: Universität Bonn

Förderkennzeichen: 50EE2208

**Förderperiode: 01. Januar 2022 – 30. Juni 2025
(gem. 4. Änderungsbescheid vom 13. Mai 2024)**

**Projektleitung:
Prof. Dr. Jürgen Kusche**

**Projektwissenschaftler
Dr. Fupeng Li**

Teil I: Kurzbericht (wird veröffentlicht)

Teil II: Eingehende Darstellung (wird veröffentlicht)

Teil I: Kurzbericht

1.1 Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie Beschreibung des wissenschaftlichen und technischen Standes, an den angeknüpft wurde

Es besteht wissenschaftlicher Konsens dass Dürren und Überflutungsereignisse in Europa nach Häufigkeit und Stärke bereits zugenommen haben, und voraussichtlich in den nächsten Dekaden weiter zunehmen werden. Fernerkundungsdatenprodukte sind zentral für die Quantifizierung von meteorologischen und hydrologischen Dürren, und damit auch für die Beurteilung von Risiken für die landwirtschaftliche Produktion, die Versorgung mit Nahrungsmitteln und die Ernährungssicherheit. Allerdings werden für Dürreanalysen- und vorhersagen bislang überwiegend Niederschlags-, Bodenfeuchte- und Vegetationsdatenprodukte verwendet, während die Daten der GRACE/GRACE-FO Mission, die auch Oberflächen- und Grundwasserspeicher umfassen, praktisch wenig Verwendung finden. Ein wesentlicher Grund dafür ist die mit einigen 100 km vergleichsweise grobe räumliche Auflösung. Selbst bei Assimilierung der GRACE Daten in globale hydrologische Modelle (z.B. <https://droughtmonitor.unl.edu/>, <http://globalcda.de/>) wird eine Auflösung von 50 km in der Regel nicht unterschritten.

So existieren keine saisonalen räumlich detaillierten Vorhersagen der Wasserspeicherung basierend auf GRACE/-FO Daten. In der Gruppe der Antragsteller wurde in den letzten Jahren ein System zur Assimilierung von GRACE-Daten in das hydrologische Modell CLM aufgebaut was letztlich ein Downscaling der monatlichen GRACE-Daten auf etwa zehn km und einen Tag, sowie eine Partitionierung in die Bodenfeuchte in verschiedenen Schichten (z.B. Pflanzenwurzelzone) bewirkt. Im Projekt bestand die Aufgabenstellung darin, KI-Methoden zu nutzen und zu adaptieren, um das bestehende Assimilierungssystem zu optimieren, und – erstmals - um eine Vorhersagekomponente mit einem Zeithorizont von einem Jahr zu ergänzen. Außerdem sollten Bodenfeuchtedaten von Sentinel-1 darin integriert werden. Über die Verknüpfung von Modell und Fernerkundungsdaten durch Datenassimilierungs- und KI-Algorithmen soll ein Produkt generiert werden, das räumlich und zeitlich detaillierte Informationen über Wasserspeicherkomponenten und Wasserflüsse liefert und vorhersagt. Wir erwarten, dass dieses Produkt beispielsweise in Frühwarnsystemen für agronomische Dürren und deren gesellschaftlichen Auswirkungen Verwendung finden wird; also dort wo es Zielsetzung ist die Zeitspanne zwischen Datenerhebung und dem Erkennen des Handlungsdrucks zu verkürzen. Schließlich möchten wir unsere Arbeit und die Ergebnisse, die wir erzielen, der Öffentlichkeit (online) zugänglich machen.

1.2 Ablauf des Vorhabens

Im Projekt sollten folgende Fragen adressiert werden:

- Welche KI-Methoden (in Kombination mit den an der Universität Bonn vorhandenen Datenassimilationssystemen) stellen sich für Vorhersagen der gesamten Wasserspeicherung (TWSA) wie auch des Bodenwassergehaltes (RZSA) bis zu einem Jahr als am geeignetsten heraus?
- Welcher Vorhersage-Skill kann für die neuen Datenprodukte aus dem Projekt erwartet werden?
- Eine sekundäre Frage ist, wie Methoden des Maschinellen Lernens für die Optimierung des Prozessierungssystems durch adaptive Tunings genutzt werden können.

Zusätzlich zu diesen wissenschaftlich-orientierten Fragen möchten wir uns mit den folgenden Fragen beschäftigen: Wie können wir unseren Forschungsinhalt in die Öffentlichkeit bringen und unsere Arbeit somit sichtbarer/transparenter machen? Welche Konzepte können entwickelt werden um die Ergebnisse aus unserer aktuellen Forschung beispielsweise in Schulen unterzubringen?

1.3 Wesentliche Ergebnisse sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Im Rahmen dieses Projekts wurden umfangreiche Arbeiten durchgeführt, um die Analyse terrestrischer Wasserspeicher auf Basis von GRACE-Daten sowie die hydrologische Vorhersage mithilfe von künstlicher Intelligenz (KI) voranzubringen. Zunächst wurde ein auf zeitlichen Verzögerungen („Lags“) basierendes Machine-Learning-(ML)-Vorhersagemodell entwickelt, mit dem den GRACE-Messungen entsprechende terrestrische Wasserspeicheranomalien bis zu einem Jahr im Voraus auf Grundlage hydrometeorologischer Variablen prognostiziert werden können. Die methodischen Entwicklungen dazu wurden in Li et al. (2024) veröffentlicht. Auf dieser Grundlage wurden ein globaler Hindcast-Datensatz für den Zeitraum 2010–2024 sowie ein regelmäßig aktualisierter, semi-operationaler Vorhersagedatensatz ab 2024 erstellt und öffentlich zugänglich gemacht. Darüber hinaus wurde der ML-basierte Vorhersageansatz für Europa evaluiert, wobei die prognostizierten terrestrischen Wasserspeicheranomalien in das hochauflösende Community Land Model (CLM, 12 km) mittels Datenassimilation integriert wurden (Li et al., 2025). Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung der Modellvorhersagen im Vergleich zu Open-Loop-Simulationen und eine Leistungsfähigkeit, die mit der direkten Assimilation von GRACE-Beobachtungen vergleichbar ist. Diese Befunde zeigen, dass ML-basierte Vorhersagen eine praktikable alternative Datenquelle für die hydrologische Prognose über den Beobachtungszeitraum von GRACE hinaus darstellen können. Abschließend wurde ein Downscaling-Ansatz entwickelt, um die räumliche Auflösung der GRACE-Beobachtungen auf etwa 25 km zu erhöhen (Li et al., 2026). Die Validierung anhand von In-situ-Grundwasserbeobachtungen aus 26.881 Messstellen weltweit zeigt eine deutlich verbesserte Übereinstimmung. Als zentrales Ergebnis des Projekts wurde ein globaler hochauflösender Datensatz der terrestrischen Wasserspeicheranomalien veröffentlicht. Insgesamt wurde im Projekt ein fortgeschrittenes methodisches Framework entwickelt, und es konnten wertvolle Datenprodukte zur Verbesserung der Analyse terrestrischer Wasserspeicher und der hydrologischen Vorhersage auf der regionalen bis globalen Skala abgeleitet und bereitgestellt werden.

Teil II: Eingehende Darstellung

II.1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Teil 1: Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

In diesem Projekt haben wir zunächst eine auf charakteristischen zeitlichen Verzögerungen („Lags“) zwischen verschiedenen Variablen basierende Methode des maschinellen Lernens entwickelt, um die globale GRACE-ähnliche Landwasserspeicherung bis zu einem Jahr im Voraus vorherzusagen. Die Methode und die vorläufigen Ergebnisse zu diesem Teil wurden in Li et al. (2024) veröffentlicht.

Abbildung 1 (Fig. 1 aus Li et al., 2024) zeigt, dass terrestrische Wasserspeicheranomalien (TWSA), die von GRACE beobachtet werden, allen betrachteten hydrometeorologischen Variablen um einige Monate nachlaufen, nachdem lineare Terme und saisonale Effekte entfernt wurden. Wichtig ist, dass die Verzögerungsbeziehung stationär ist – d. h., sie kann aus historischen Daten erlernt werden – und somit ermöglicht, zu verstehen, wie sich die globale Landwasserspeicherung entwickelt, wenn sie durch hydrometeorologische Variablen mit mehreren Monaten Vorlaufzeit kontrolliert wird. Die in dieser Abbildung dargestellte stabile Verzögerungsbeziehung bildet die Grundlage der Forschung zu diesem Teil.

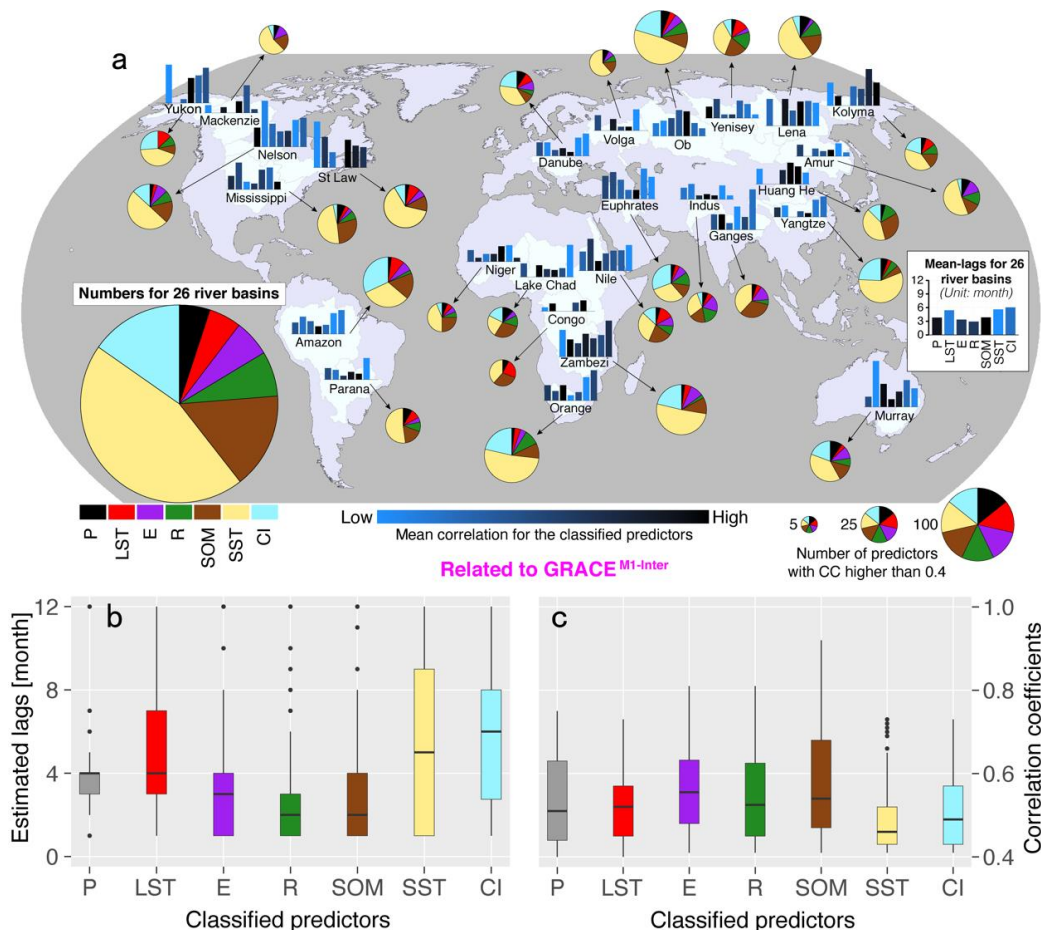


Abb. 1 | Verzögerungen und die entsprechenden Korrelationskoeffizienten zwischen dem interannualen Anteil der ersten dominanten GRACE-Modus-Komponente (GRACE^{M1-Inter}) und den potenziellen Prädiktoren für 26 Flussbecken.

Abbildung 2 (Fig. 2 aus Li et al., 2024) zeigt die zeitlichen Mittelwerte der vorhergesagten Landwasserspeicherung über ein, drei, sechs und zwölf Monate im Voraus für sechsundzwanzig große Flussbecken weltweit im Vergleich zu den Referenzwerten, d. h. den tatsächlichen GRACE-Beobachtungen. Die saisonbereinigten, basin-weiten Vorhersagen der Landwasserspeicherung für ein- und dreimonatige Vorlaufzeiten stimmen in allen Untersuchungsregionen gut mit den GRACE-Beobachtungen überein (d. h. Korrelation $> 0,5$, siehe rosa und grüne Linien in Abb. 2). Für eine Vorlaufzeit von sechs Monaten stimmt die Vorhersage in den meisten Flussbecken ($\sim 62\%$ bzw. 16/26 mit Korrelation $> 0,5$) gut mit GRACE überein (siehe blaue Linie in Abb. 2). Bei einer Verlängerung der Vorlaufzeit auf zwölf Monate liefert die Vorhersage nur in den größten Regionen ($\sim 50\%$ bzw. 13/26 mit Korrelation $> 0,5$), wie dem Amazonas-, Mississippi- oder Gangesbecken, zufriedenstellende Ergebnisse, was durch die GRACE-Beobachtungen validiert wurde (siehe gelbe Linie in Abb. 2). Die Ergebnisse zeigen also, dass der auf Verzögerungen basierende Vorhersageansatz in den meisten Untersuchungsregionen bis zu einer Vorlaufzeit von sechs Monaten gut funktioniert und in großräumigen Flussbecken auch bis zu zwölf Monate Vorlaufzeit brauchbare Ergebnisse liefert.

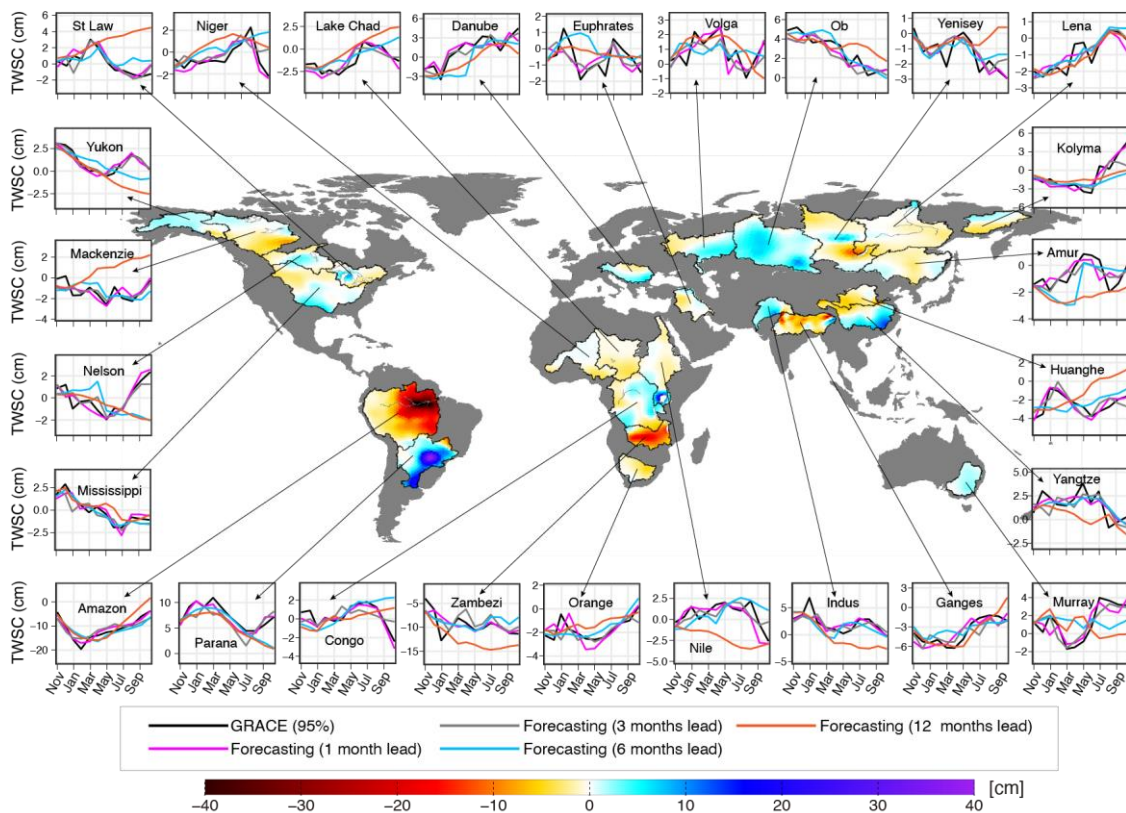


Abb. 2 | Zeitreihen der basin-weiten Mittelwerte (November 2015 – Oktober 2016) der saisonbereinigten Änderung des terrestrischen Wasserspeichers aus den dominanten GRACE-Modi und der Vorhersage für 26 Flussbecken. Karten der Untersuchungsregionen sind überlagert mit der durch die dominanten GRACE-Modi erklärten saisonbereinigten TWSC. TWSC: Änderung des terrestrischen Wasserspeichers.

Der zweite Teil dieses Projekts bestand darin, die Vorhersagefähigkeit speziell für die Untersuchungsregion (d. h. Europa) zu testen und die prognostizierte GRACE-artige Landwasserspeicherung in hochaufgelöste Landoberflächenmodelle (12 km), z. B. das Community Land Model (CLM), zu assimilieren. Ziel dieses Teils ist es, die Machbarkeit der Integration der

durch maschinelles Lernen vorhergesagten terrestrischen Wasserspeicherung in Landoberflächenmodelle mittels Datenassimilation zu untersuchen, um deren Vorhersagefähigkeiten sowohl für TWSA als auch für spezifische Wasserspeicherkompartimente wie Grundwasser, Oberflächenwasser usw. zu verbessern. Die Inhalte dieses Teils wurden in Li et al. (2025) veröffentlicht.

Abbildung 3 (Fig. 4 aus Li et al., 2025) zeigt die räumlich gemittelten Zeitreihen der TWSA, die bis zu 12 Monate im Voraus für fünf Initialisierungszeitpunkte (Jan 2015, Apr 2015, Jul 2015, Okt 2015 und Jan 2016) prognostiziert wurden und über drei große Becken Europas – Iberische Halbinsel, Donau und Wolga, wie in Abb. 3a markiert – gemittelt sind, im Vergleich zu den GRACE-Beobachtungen in fünf unterschiedlichen Rückprognosezeiträumen (Jan 2015–Dez 2015, Apr 2015–Mär 2016, Jul 2015–Jun 2016, Okt 2015–Sep 2016 und Jan 2016–Dez 2016) (Abb. 3d–3i). Die Ergebnisse zeigen eine hohe Übereinstimmung zwischen den prognostizierten TWSA und den GRACE-Beobachtungen in jedem ausgewählten Becken, mit einer durchschnittlichen Korrelation von über 0,91 und einem mittleren RMSE von unter 30 mm über die fünf Rückprognosezeiträume.

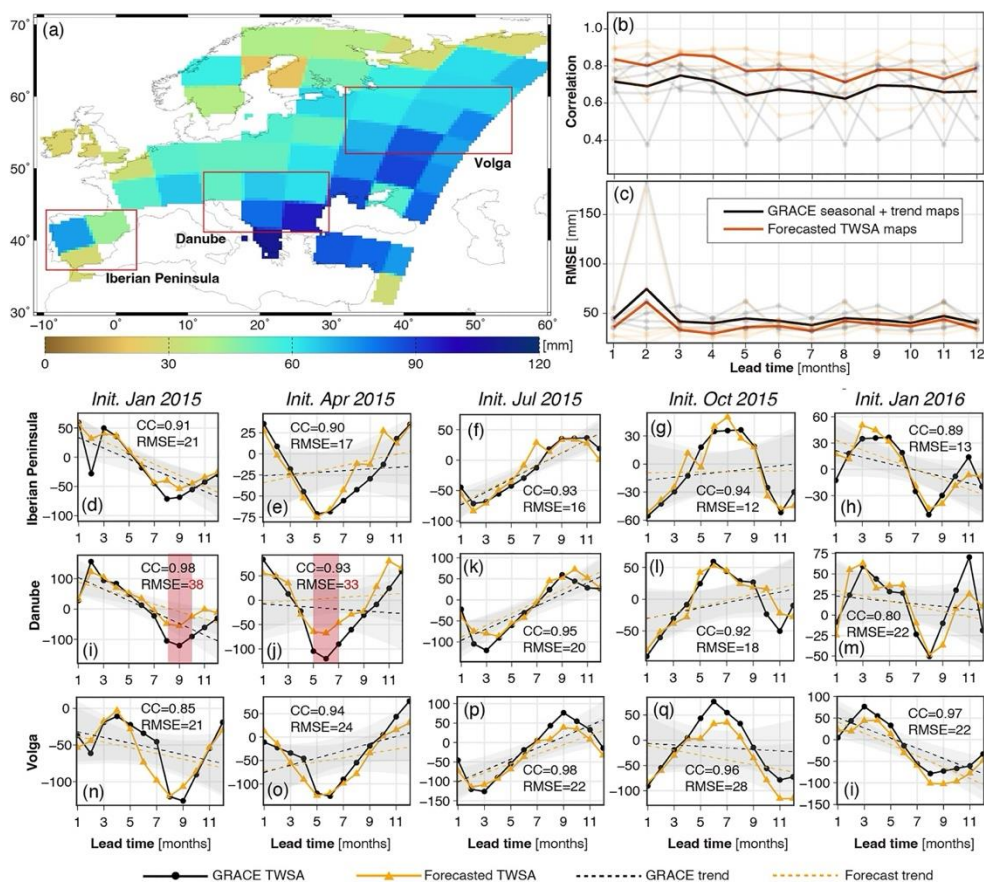


Abb. 3 | (a) Karte der 4-Grad-Gitter, auf denen die TWSA-Vorhersage implementiert wurde, überlagert mit dem Root-Mean-Square der GRACE-TWSA für 2003–2016. (b) Mittlere Korrelationskoeffizienten und (c) mittlerer Root-Mean-Square-Fehler (RMSE) der prognostizierten TWSA (gesamtes Signal) sowie der angenommenen stabilen GRACE-Saison- und Trendanteile, gemittelt über fünf Rückprognosezeiträume und validiert anhand der GRACE-Beobachtungen. Vergleich der prognostizierten TWSA mit den GRACE-TWSA-Zeitreihen gemittelt über (d)–(h) Iberische Halbinsel, (i)–(m) Donaubecken und (n)–(r) Wolgabecken für die fünf Rückprognosezeiträume (Einheit: mm). Hinweis: Helle Linien in den Panels (a) und (b) stellen die CC/RMSE für jedes einzelne Rückprognose-Experiment dar, während dicke Linien die über die fünf Rückprognosezeiträume gemittelten Werte zeigen. Die hier dargestellte basin-weite Mittelung der TWSA-Zeitreihen erfolgte über alle vollständigen 4-Grad-Kacheln, die sich hauptsächlich innerhalb des jeweiligen Beckens befinden.

Abbildung 4 (Fig. 7 aus Li et al., 2025) zeigt die räumlich gemittelten Zeitreihen des prognostizierten gesamten Wasserspeichers sowie der einzelnen Kompartimente über Europa aus der open-loop CLM-Vorhersage (CLM - OLF), der CLM-Vorhersage mit Assimilation der durch ML prognostizierten TWSA (CLM - MDAF) und der CLM-Vorhersage mit Assimilation der GRACE-TWSA (CLM - GDAF) im Vergleich zu den Standard-CLM-Reanalyseprodukten mit Assimilation der GRACE-TWSA (CLM - DA). Für einen umfassenderen Vergleich und zur Analyse werden in Abb. 4 auch die Ergebnisse aus der open-loop CLM-Reanalyseprodukte ohne Datenassimilation (CLM - OL) gezeigt. Wie zu erkennen ist, zeigen der prognostizierte Gesamtspeicher und alle Kompartimente mit Ausnahme des (sehr geringen) Vegetationswasseranteils deutliche Verbesserungen von OLF zu MDAF, bewertet anhand der Reanalyseprodukte. Der Vegetationswasserspeicher zeigt über Europa ein nur geringe Variationen, was vermutlich der Grund dafür ist, dass die Datenassimilation erwartungsgemäß kaum Einfluss darauf hatte (Abb. 4d). Zusätzlich wird in Abb. 4a die räumlich gemittelte GRACE-TWS-Zeitreihe auf monatlicher Skala über Europa dargestellt, wobei zu erkennen ist, dass die TWS aus CLM - MDAF besser zu GRACE passt als die aus CLM - OLF. Sowohl die TWS als auch ihre Kompartimente aus CLM - GDAF stimmen sehr gut mit denen aus CLM - MDAF überein (siehe blaue und violette Linien in Abb. 4), was darauf hindeutet, dass die durch ML prognostizierte TWSA eine praktikable Alternative zu GRACE-Beobachtungen für die Datenassimilation in hydrologischen Vorhersagen über den GRACE-Zeitraum hinaus (d. h. für die Zukunft) darstellt, da die prognostizierten TWSA den GRACE-Beobachtungen sehr nahekommen.

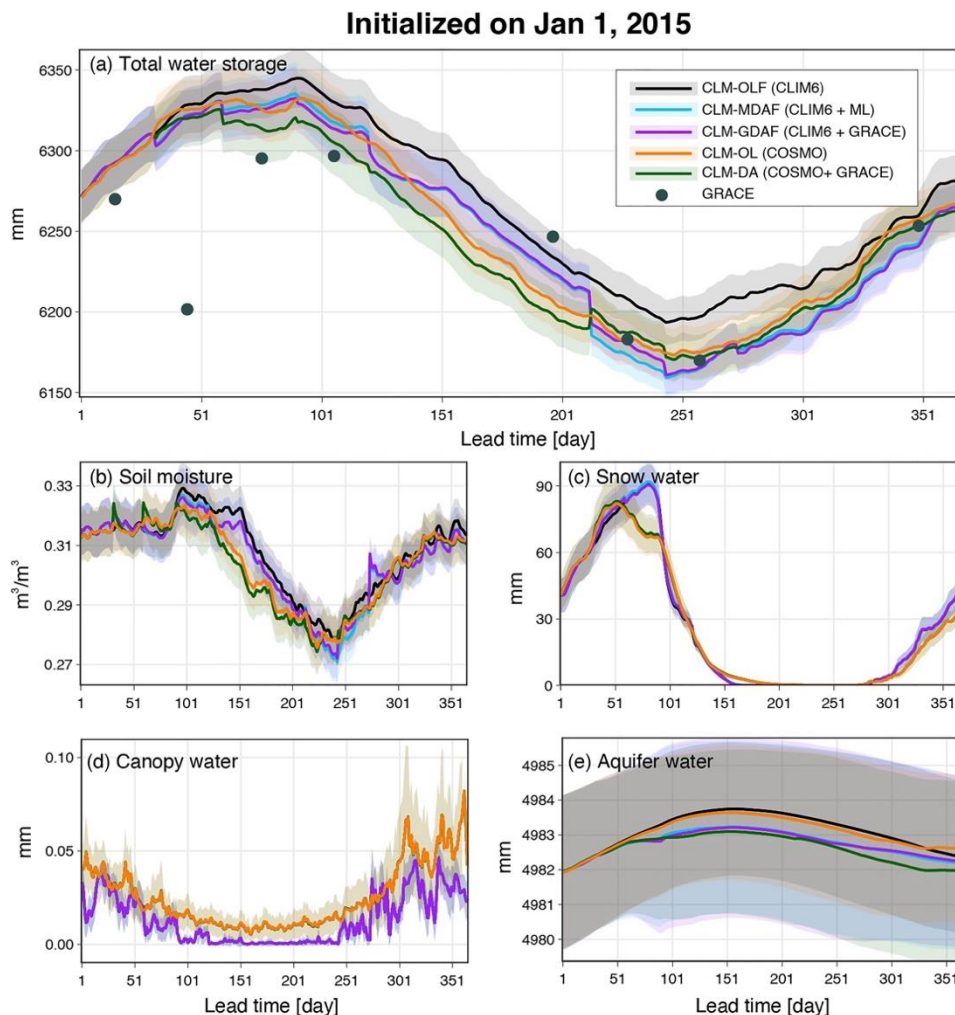


Abb. 4 | Räumlich gemittelte Zeitreihen des prognostizierten täglichen gesamten Wasserspeichers und seiner Kompartimente bis zu einem Jahr im Voraus (Initialisierung am 1. Jan. 2015) über Europa aus dem Community Land Model (CLM) Open-Loop-Forecast (CLM - OLF) mit CLIM6-Antrieb (schwarze Linien), CLM-Vorhersage mit CLIM6-Antrieb und ML-Datenassimilation (CLM - MDAF) (violette Linien) sowie CLM-Vorhersage mit CLIM6-Antrieb und GRACE-Datenassimilation (CLM - GDAF) (blaue Linien) im Vergleich zu Simulationen aus der CLM-Reanalyse mit COSMO-Antrieb und GRACE-Datenassimilation (CLM - DA) (grüne Linien) und CLM-Reanalyse Open-Loop (CLM - OL) (orange Linien). Die monatlichen GRACE-Beobachtungen sind in Panel (a) als Punkte dargestellt. Der Schatten um jede Zeitreihe zeigt die zugehörige Ensemble-Streuung.

Dieses Ergebnis legt nahe, dass saisonale Prognosen („Forecasts“) der beispielsweise für die Landwirtschaft wichtigen Bodenfeuchte aus der Assimilation von prognostizierten TWSA-Daten gewonnen werden können. Dies sollte in Zukunft umfassend evaluiert werden.

Abschließend wurde in diesem Projekt versucht, die grob aufgelösten GRACE-Beobachtungen auf feinere räumliche Skalen (~25 km) herunter zu skalieren, mit dem Ziel, die räumliche Auflösung von GRACE-bezogenen Studien zu verbessern, z. B. die räumliche Auflösung unserer TWSA-Vorhersage. Dieser Teil wurde kürzlich in Li und Kusche (2026) veröffentlicht.

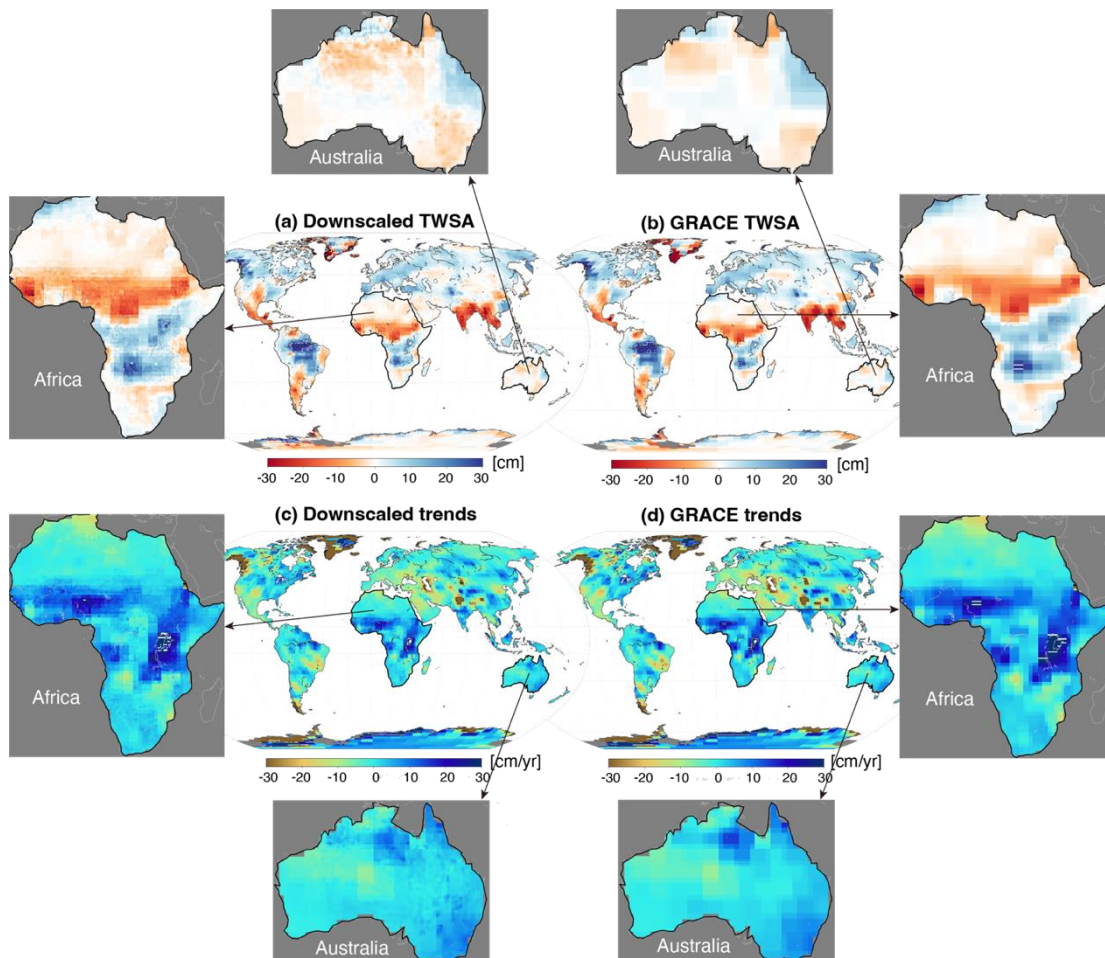


Abb. 5 | (a, b) Herunterskalierte und GRACE-TWSA-Karten für Mai 2013; (c, d) entsprechende TWSA-Trends von April 2002 bis März 2025.

Abbildung 5 (Fig. 1 aus Li und Kusche, 2026) zeigt den Vergleich der herunterskalierten TWSA mit den GRACE-Beobachtungen für jede 0,25°-Gitterzelle über dem globalen Festland für einen repräsentativen Monat (Mai 2013) sowie für die langfristigen Trends zwischen April 2002 und März 2025. Die herunterskalierte TWSA offenbart feinere räumliche Details im Vergleich zu den GRACE-Beobachtungen, während die ursprünglichen GRACE-Signale sowohl im Wasserspeicher (Abb. 5a–5b) als auch in den Wasserspeichertrends (Abb. 5c–5d) weitgehend erhalten bleiben.

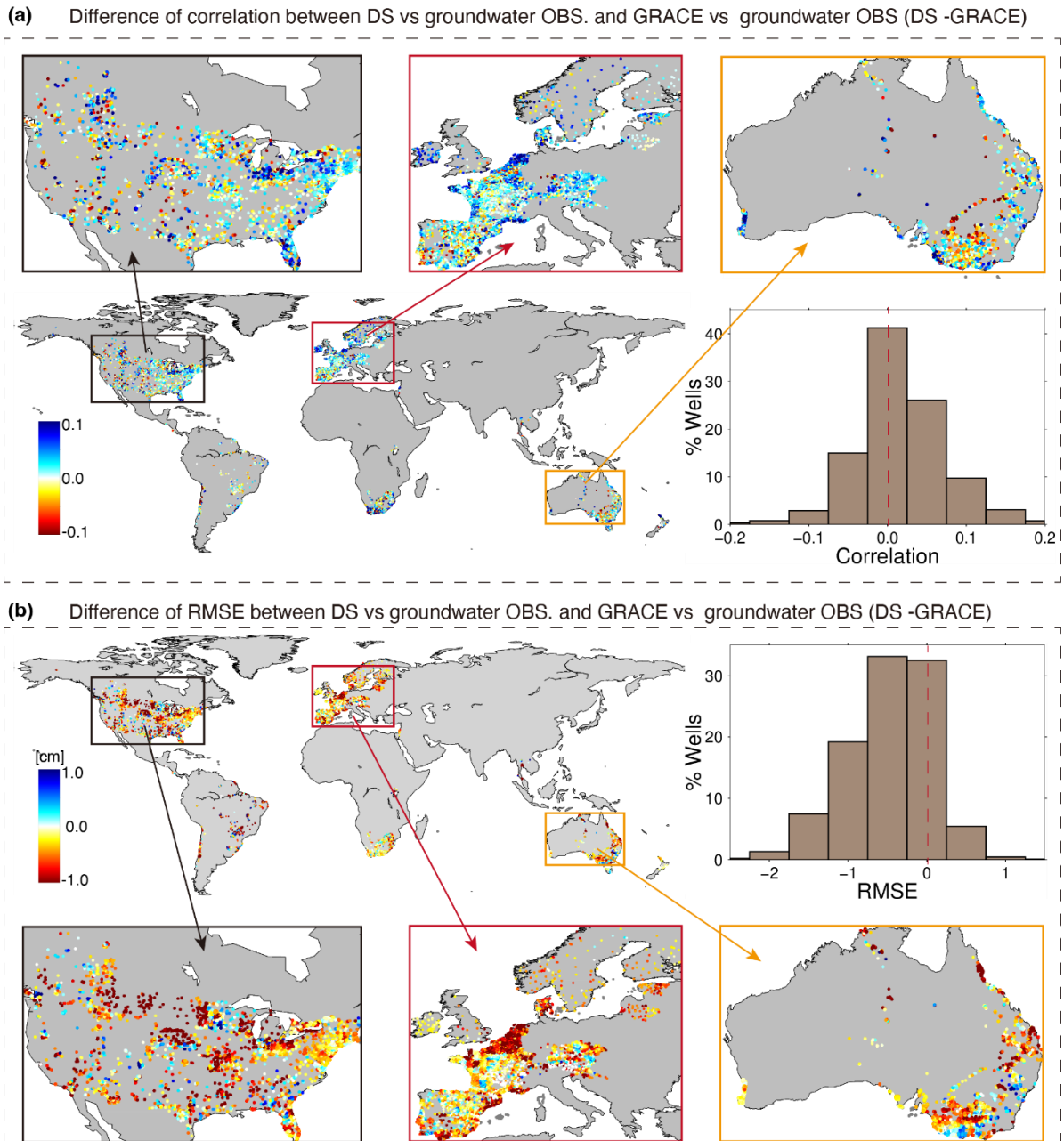


Abb. 6 | Unterschiede in (a) der Korrelation und (b) dem RMSE beim Vergleich der herunterskalierten TWSA mit Grundwasserbeobachtungen aus 26 881 Messbrunnen weltweit im Vergleich zum Ansatz JPL-Mascon versus Grundwasserbeobachtungen sowie die zugehörigen Histogramme der Unterschiede. DS: herunterskalierte TWSA; OBS.: Beobachtungen. Kühle Farben in Abbildung (a) und warme Farben in Abbildung (b) kennzeichnen eine durch die Herunterskalierung erzielte Verbesserung.

Abbildung 6 (Fig. 4 aus Li und Kusche, 2026) zeigt die Validierung sowohl der GRACE- als auch der herunterskalierten TWSA anhand von In-situ-Grundwasserbeobachtungen aus 26 881 Messbrunnen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Herunterskalierung die Übereinstimmung der GRACE-TWSA mit der lokalen Grundwasservariabilität verbessert: An über 63 % der Messstellen steigt die Korrelation, und an mehr als 83 % der Messstellen verringert sich der RMSE.

Darüber hinaus ist in Zusammenarbeit mit der Gruppe von Prof. Xiaoxiang Zhu (TU München) eine gemeinsame Veröffentlichung in Vorbereitung (Steidl et al., Using a Graph Neural Network to forecast terrestrial water storage (TWSA) for up to 6 months) in Vorbereitung.

Teil 2: Andere wesentliche Ereignisse

Die bereits erwähnten Vorhersagen des Gesamtwasserspeicherung bis zu einem Jahr werden auf der Webseite unserer Arbeitsgruppe zum Download zur Verfügung gestellt, um sowohl Evaluierung durch andere Gruppen wie auch erste Anwendungen zu stimulieren.

<https://www.igg.uni-bonn.de/apmg/de/data-and-models/land-twsa-forecasting>

Ferner hatten wir einen Online-Workshop mit internationalen Teilnehmern im Berichtszeitraum vorbereitet, der dann am 18./19. Januar 2024 stattgefunden hat. An diesem Workshop haben insgesamt 13 Sprecher von verschiedenen Einrichtungen (NASA Goddard, Universitäten Bonn, Stuttgart, Aalborg, Newcastle, Asian Institute of Technology) projektrelevante Ergebnisse ausgetauscht. Er wurde organisiert von Prof. Gabrielle de Lannoy (Leuven), Dr. Matt Rodell (Goddard), Dr. Li Fupeng und Prof. Jürgen Kusche (Uni Bonn). Als direktes Ergebnis des Workshops wurde dann ein gemeinsamer Review-Artikel verfasst (Springer et al., akzeptiert) in dem auch auf das Anwendungspotential von KI-Verfahren in der Assimilation von GRACE Daten eingegangen wird. Der Preprint wie auch die Reviews können auf

<https://egusphere.copernicus.org/preprints/2025/egusphere-2025-2058/>

eingesehen werden, die Veröffentlichung wird in Kürze im Journal *Hydrology and Earth System Science (HESS)* erfolgen.

II.2 Erläuterungen zu den wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen beinhalten die Gehälter des im Projekt beschäftigten wissenschaftlichen Mitarbeiters. Die inhaltlichen Beiträge sind in II.1 aufgeführt.

Dr. Fupeng Li, wissenschaftlicher Mitarbeiter (WMA) war vom 1.6. 2022 bis zum 30.12.2024 im Projekt beschäftigt..

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Projektarbeiten waren zur Erreichung des Projektzieles uneingeschränkt notwendig. Zu Projektbeginn existierten kaum publizierte Ansätze für die Anwendung von ML-Verfahren auf TWSA-Datensätze der GRACE- oder GRACE-FO Satellitenmissionen.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Erfindingen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte:

Keine

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende:

Eine direkte wirtschaftliche Verwertung wurde in diesem Teilprojekt nicht angestrebt, und als Universitätsinstitut sehen wir hier auch nicht unsere primäre Rolle

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende:

Durch unsere Arbeiten erwarten wir Nutzen für verschiedene öffentliche und private Nutzer, insbesondere auf dem Gebiet der hydrologischen und Klimasimulation, aber auch in Geodäsie, Geophysik und Navigation.

Eine konkrete Zusammenarbeit unserer Arbeitsgruppe besteht mit dem WWF Deutschland, der den von uns generierten globalen Datensatz der Grundwasserspeicheränderung inzwischen in seine „Water Risk Filter“ und „Biodiversity Risk Filter“ Tools integriert hat. Diese Werkzeuge werden durch Finanzinstitutionen und Industrie für die Bewertung von physischen Wasserrisiken verwendet. Wir erwarten, dass Produkte dieses Projektes hier in Zukunft beitragen können.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

II.6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Peer-reviewed Journals:

a) Publiziert

Li, F., & Kusche, J. (2026). Reproducing GRACE total water storage change at finer spatial scales. *Geophysical Research Letters*, 53, e2025GL119881. <https://doi.org/10.1029/2025GL119881>.

Li, F., Springer, A., Kusche, J., Gutknecht, B. D., & Ewerdwalbesloh, Y. (2025). Reanalysis and forecasting of total water storage and hydrological states by combining machine learning with CLM model simulations and GRACE data assimilation. *Water Resources Research*, 61(2), e2024WR037926. <https://doi.org/10.1029/2024WR037926>.

Li, F., Kusche, J., Sneeuw, N., Siebert, S., Gerdener, H., Wang, Z., ... & Tian, K. (2024). Forecasting next year's global land water storage using GRACE data. *Geophysical Research Letters*, 51(17), e2024GL109101. <https://doi.org/10.1029/2024GL109101>.

b) Eingereicht/Akzeptiert

Springer A., De Lannoy G., Rodell M., Ewerdwalbesloh Y., Gerdener H., Khaki M., Li B., Li F., Schumacher M., Tangdamrongsab N., Tourian M., Nie W., and J. Kusche, A Review of Current Best Practices and Future Directions in Assimilating GRACE/-FO Terrestrial Water Storage Data into Numerical Models, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2058>, accepted at *Hydrol. Earth. Syst. Sci.*

Li, F., & Kusche, J. (2026). Observation-Driven Forecast of Global Terrestrial Water Storage and Evaluation for 2010–2024. Doi 10.1029/2025WR041710, accepted at *Water Resources Research*.

c) In Vorbereitung

Li, F., Kusche, J. et al. Growing human fingerprints in observation-constrained freshwater unpredictability under intensifying droughts.

Steidl V., Zhao S, Li F., Kusche J., Zhu X. Graph Neural Networks for Forecasting Water Storage Anomalies.

Publizierte Datensätze

Li, F. (2025): A Global Dataset for Seasonal to Annual Forecasts of GRACE-like Gridded Terrestrial Water Storage (2010-2024) [dataset]. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.973113>.

Li, F. (2025). Global high-resolution (0.25x0.25) total water storage anomaly dataset derived by reproducing GRACE data [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17265162>.

Li, F. (2025). Land TWSA forecasting. Available at <https://www.igg.uni-bonn.de/apmq/de/data-and-models/land-twsa-forecasting>.

Präsentation von Projektergebnissen anlässlich von wissenschaftlichen Veranstaltungen

Li, F. & Kusche, J.: How machine learning can improve satellite estimates of water storage changes, ML4Earth Workshop Bonn 2025, organized by DLR, Bonn, 24-25 Sep, 2025. **(On-site presentation)**.

Li, F. & Kusche, J.: Global long-lead forecast of total water storage and evaluation for 2010-2024, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-19735, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-19735>, 2025. **(On-site presentation)**.

Li, F. & Kusche, J.: Reanalysis/Forecast of Water Storage over Europe with Machine Learning, ML4Earth Project Meeting, organized by TUM, Munich, 23 April, 2024. **(On-site presentation)**.

Li, F., & Kusche, J. (2023). Forecast/Reanalysis of Water Storage over Europe with Machine Learning, 4th Symposium „Neue Perspektiven der Erdbeobachtung“, organized by DLR, Bonn, 26-28 Jun, 2023. **(On-site presentation)**.

Li, F., Kusche, J., Sneeuw, N., Siebert, S., Gerdener, H., Wang, Z., Chao, N., Chen, G., & Tian, K. (2022): Forecasting Global Land Water Storage using GRACE data, GRACE/GRACE-FO Science Team Meeting 2022, GFZ Potsdam, Germany, 18–20 Oct 2022, <https://doi.org/10.5194/gstm2022-19>. **(On-site presentation)**.

Outreach Aktivitäten 2022 – 2025

Kusche, J. (2025): Contribution to „The Water Resources Podcast“ https://www.youtube.com/channel/UCkx8lwI9pNzDA_KEpHyA2vw/videos