

Indikator-Factsheet: Terrestrisch gespeichertes Wasser

Verfasser*innen:	Bosch & Partner GmbH (Can Ölmez, Konstanze Schönthaler) i. A. des Umweltbundesamtes / KomPass, FKZ 3720 48 101 0	
Mitwirkung:	Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Referat M2 – Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen (Asta Kunkel, Peter Krahe)	
Letzte Aktualisierung:	15.06.2022	Bosch & Partner GmbH (Can Ölmez): Ersterstellung des Indikators
	21.06.2022	Bosch & Partner GmbH (Can Ölmez): Einarbeitung von Hinweisen aus dem Gespräch mit dem GeoForschungsZentrum (GFZ) (Dr. Eva Börgens)
	12.08.2022	Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler): Einarbeitung von Kommentaren der BfG (Peter Krahe)
	25.10.2022 19.04.2023	Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler): Einarbeitung von Anregungen zur perspektivischen Weiterentwicklung im Rahmen der abschließenden Sitzung der LAWA Kleingruppe Klimaindikatoren am 24.10.2022; Berücksichtigung der Frage des BMDV nach den Möglichkeiten eines Datenlückenschlusses; Einarbeitung weiterer Anmerkungen aus der IMAA-Abstimmung; redaktionelle Anpassungen
	06.11.2023	Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler): Aktualisierung der Links
Nächste Fortschreibung:	bis 2027	Die BfG strebt einen Lückenschluss in der Zeitreihe an. Bis zum Jahr 2017 sollte dies nach Einschätzung der BfG mit den verfügbaren Wasserhaushaltsmodellen gelingen. Nach 2017 machen sich jedoch die starken Rückgänge bei den Seen-Wasserständen (vgl. Indikator WW-I-7) bemerkbar. Es ist vorgesehen, zumindest die größeren Seen künftig in der Wasserhaushaltsmodellierung zu berücksichtigen. Dann ließen sich auch die jüngeren Datenlücken bereinigen. Zur Erfassung der Bodenfeuchte aus Satellitendaten läuft derzeit ein europaweites Vorhaben, dessen Ergebnisse ebenfalls perspektivisch in der Modellierung berücksichtigt werden können.

I Beschreibung

Interne Nr. WW-I-1	Titel: Terrestrisch gespeichertes Wasser
Einheit: mm Abweichung	Kurzbeschreibung des Indikators: Abweichungen der monatlichen terrestrisch gespeicherten Wassermenge vom langjährigen Mittel 2002 bis 2021; dargestellt für ganz Deutschland
	Berechnungsvorschrift: Der Indikator berechnet sich aus den vom GFZ bereitgestellten GRACE-Rasterdaten im netCDF Format. Die Daten müssen für die Fläche der Bundesrepublik zugeschnitten, anschließend akkumuliert und in eine Zeitreihe überführt werden. Die Datenauswertung wird durch das Referat M2 – Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) durchgeführt.

Interpretation des Indikatorwerts:	Je größer der Indikatorwert, desto größer ist die Abweichung der im jeweiligen Monat terrestrisch gespeicherten Wassermenge im Vergleich zum langjährigen Mittel. Ist der Wert Null, entspricht die im jeweiligen Monat terrestrisch gespeicherte Wassermenge dem langjährigen Mittel.
---	--

II Einordnung

Handlungsfeld:	Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft
Themenfeld:	Nicht zuordenbar
Thematischer Teilaspekt:	Nicht zuordenbar
DPSIR:	Impact

III Herleitung und Begründung

Referenzen auf andere Indikatorenssysteme:	keine
Begründung:	Der Klimawandel hat, neben steigenden Lufttemperaturen sowie sich verändernden Niederschlagsmengen und -intensitäten, Auswirkungen auf den gesamten Wasserhaushalt. Dies schließt Folgen für die Evapotranspiration, das Sickerwasser, den Oberflächenabfluss, den unterirdischen Zufluss zu Oberflächengewässern und die Speisung des Grundwassers sowie den Bodenwassergehalt mit ein. Die Wasserbilanz summiert alle Komponenten des Wasserhaushalts. Dabei entspricht die Differenz zwischen Niederschlag, Verdunstung und dem Gebietsabfluss der Änderung des (terrestrischen) Wasserspeichers. Dieser umfasst Wasser in verschiedenen Kompartimenten: Grund- und Bodenwasser, Seen und Flüsse, Eis und Schnee sowie Wasserreservoir (Talsperren etc.). Die Satellitenmissionen GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) und GRACE-FO (GRACE Follow-On) beobachten zeitliche Schwankungen des Schwerfelds der Erde, die sich nach Eliminierung des atmosphärischen Wassergehalts über der Landmasse Mitteleuropas den Variationen des gespeicherten Wassers, bezogen auf einen Referenzzeitraum seit Beginn der Mission im Jahr 2002, zuordnen lassen. Die GRACE-Mission ermöglicht damit erstmalig, Änderungen des terrestrisch gespeicherten Wassers quantitativ zu erfassen. Dadurch lassen sich auch die Folgen des Klimawandels auf das an Land gespeicherte Wasser abbilden. Monate und Jahre, in denen die Niederschläge den Wasserverlust durch Verdunstung und Abfluss übersteigen, gehen mit einer positiven Anomalie in die Zeitreihe ein. Monate und Jahre, in denen die Verdunstung überwiegt, zeigen eine negative Anomalie. Die räumliche Auflösung der Satellitendaten beträgt 300 km bzw. $1 \times 1^\circ$ (Grad). In einer nachgeschalteten Daten-Prozessierung werden daraus höher aufgelöste Rasterdaten berechnet (ca. 110 km Länge und 70 km Breite). Die Daten sind damit für die Abbildung des gesamten Bundesgebiets ausreichend detailliert aufgelöst. Dargestellt werden allerdings nur Signale, die von Landflächen ausgehen. Sofern sich der Mittelpunkt eines Rasters nicht mehr auf dem Land befindet, wird dieses aus der Darstellung herausgenommen. An den Küstenflächen kommt es dadurch zu einer Reduktion der Informationsdichte. Gleichzeitig ist die Küstenfläche in Deutschland nicht allzu groß, sodass die Auswertung der Daten für Deutschland nicht zu stark beeinflusst wird. Das GeoForschungsZentrum (GFZ) in Potsdam stellt das fertig prozessierte Produkt frei zur Verfügung. Ohne eine weitere Verarbeitung in hydrologischen

	Modellen, lässt sich bereits einiges interpretieren. Insbesondere die Extremereignisse wie z. B. die Mitteleuropa-weiten Hochwasserereignisse im Mai / Juni 2013 oder die anhaltende Dürre, die im Jahr 2015 einsetzte und sich zwischen 2018 und 2020 in ganz Deutschland nochmals verstärkte, lassen sich in den Daten erkennen. Ebenfalls zeigen die Daten bereits, dass über den GRACE/GRACE-FO Beobachtungszeitraum (2002 bis 2021) die Wasserspeicherung in Deutschland im Mittel um rund 0,76 Gt pro Jahr (2,1 mm pro Jahr) abgenommen hat (Güntner et al. 2023). Im Indikator werden ausgehend von den monatlichen absoluten Größen relative Abweichungen zu einem langjährigen Mittel (aktuell 2002 bis 2021) gebildet.
Einschränkungen:	Ursprünglich wurde die Laufzeit der GRACE-Mission auf fünf Jahre festgelegt. Aufgrund der hohen Relevanz für die Erdsystemforschung wurde der Betrieb der Satelliten fortgeführt, bis die Mission im Oktober 2017 letztendlich aufgrund von Batterieproblemen und ausgehendem Treibstoff beendet wurde. Die Relevanz der Ergebnisse führte dazu, dass GFZ und NASA die Nachfolgemission GRACE-FO realisiert haben, die im Mai 2018 gestartet wurde. Sowohl aufgrund der ab 2015 auftretenden Batterieprobleme an der GRACE-Mission, weshalb die Instrumente zeitweise abgeschaltet wurden, als auch durch die entstandene Datenlücke zwischen der GRACE und der GRACE-FO Mission, sind die Daten zwischen 2015 und 2018 weniger belastbar und müssen bei der Interpretation mit Vorsicht behandelt werden. Gegebenenfalls lassen sich Fehlmonate mit Modellierungen der BfG auffüllen. Für die Fortschreibung des Indikators bedarf es der Fortsetzung der Satellitenmission. Aktuell wird an einer Folgemission für GRACE-FO gearbeitet, die direkt an das Laufzeitende anschließen soll, damit es nicht wieder zu einer Datenlücke kommt. Allerdings ist diese Mission ebenfalls nur auf weitere 10 bis 15 Jahre angelegt. Die weitere Fortsetzung hängt von der finanziellen Förderung des Projekts ab. Die Satelliten der GRACE und der GRACE-FO Mission sind grundsätzlich von gleicher Funktion und zeigen keine Kalibrationsschwierigkeiten und keine systematischen Verschiebungen in der Zeitreihe. Die Zeitreihe von GRACE-FO zeigt allerdings ein erhöhtes Rauschen, was auf die folgenden Ursachen zurückzuführen ist: Eine erhöhte solare Aktivität, die derzeit weiterhin steigt, und damit verbundene stärkere Sonnenwinde erhöhen die Reibung an den Satelliten. Zudem arbeitet ein Beschleunigungsmesser nicht wie erhofft. Dessen größere Verschmutzung führt zu einer höheren Amplitude bei den Messungen. Vor allem bei der Betrachtung kleinerer Einzugsgebiete fallen diese Faktoren ins Gewicht. Die Abweichungen des terrestrisch gespeicherten Wassers beziehen sich auf ein langjähriges Mittel, das mit jeder Veröffentlichung neu berechnet wird. Die bis zur nächsten Veröffentlichung erhobenen Daten werden der Zeitreihe angehängt und beziehen sich auf das bis dahin geltende langjährige Mittel. Sobald der Datensatz mit einer neuen Veröffentlichung neu berechnet wird, ändert sich das langjährige Mittel, da mehr Daten für die Mittelwertbildung einbezogen werden. Die bis dahin angehängten Daten gehen in den neuen Mittelwert mit ein. Die bis dahin beobachteten Abweichungen des terrestrisch gespeicherten Wassers aktualisieren sich entsprechend.
Erläuterungen zur Nutzung von Fernerkundungsdaten:	<u>Hintergründe zur GRACE-Mission:</u> Die Satellitengravimetrie ist die einzige heute verfügbare Fernerkundungstechnik, die quantitative Schätzungen von Veränderungen der Wasserspeicherung auf regionaler bis globaler Ebene liefert. Anders als Radar- und Optische Verfahren kann die Satellitengravimetrie mehr als nur die oberflächennahen Speicherkompartimente bemessen. Sie erfasst sowohl die Änderungen des Wasserspeichers an der Erdoberfläche als auch im tiefen Untergrund.

	Die im Jahr 2002 gestartete GRACE-Satellitenmission (2002 bis 2017) sowie ihre Folgemission GRACE-FO (2018 bis 2023) ermöglichen über Schwerfeldmessungen die Quantifizierung der Speicheränderung des Gesamtwasserspeichers. Damit wurde erstmalig die Möglichkeit geschaffen, die in hydrologischen Modellen berechnete terrestrisch gespeicherte Wassermenge mit direkten Messungen zu vergleichen. Die GRACE-Daten werden und wurden bereits vielfältig in der Hydrologie angewendet, z. B. zur Quantifizierung der Beiträge der kontinentalen Eisschilde zum Anstieg des Meeresspiegels, der Grundwasseränderungen, der Wasserspeicherkapazität und des Überschwemmungspotenzials oder der Auswirkungen von Dürren. Weiterhin finden sie Anwendung in hydrologischen Modellen, zu Validierungs-, Kalibrierungs- oder Assimilationszwecken. Aktuell wird an einer zweiten Folgemission gearbeitet. Diese soll vor Einstellung der GRACE-FO Mission starten, sodass eine weitere Datenlücke vermieden wird. <u>Datengrundlage:</u> Das Messprinzip basiert auf einer Abstandsmessung zweier in Tandemformation fliegender GRACE-Zwillingssatelliten, die sich gegenseitig in einer polaren Umlaufbahn in sehr geringer Höhe (ca. 450 bis 500 km) verfolgen. Dabei beobachtet GRACE mit GPS die eigene Bahn und den Abstand zwischen den Satelliten. Änderungen des Abstands zwischen den Satelliten können in eine Änderung des Schwerkraftpotenzials und weiter in eine Massenänderung umgewandelt werden, die in der Regel als Gesamtänderung der Wasserspeicherung pro Fläche ausgedrückt wird. Die Abstandsmessungen haben eine Genauigkeit von wenigen Mikrometer. Nach etwa 30 Tagen weisen die GRACE/GRACE-FO eine annähernd homogene globale Abdeckung auf, sodass ein globales Schwerfeld bestimmt werden kann. Das fertige Produkt wird in einer dreistufigen Prozessierung vom GFZ aufbereitet und steht als netCDF (Raster-) Datei zum freien Download auf einem FTP-Server zur Verfügung. <u>Validierungsarbeiten mit Modellergebnissen und Grundwassermessstellen:</u> Zur Validierung der Abweichungen des terrestrisch gespeicherten Wassers vom Langzeitmittel werden die Ergebnisse mit den bundesweiten Wasserhaushaltsmodellen der Bundesanstalt für Gewässerkunde verglichen, die im Rahmen des Niedrigwasserberichts zur Niedrigwassersequenz 2015 bis 2018 (BfG 2021) erstellt wurden.
Rechtsgrundlagen, Strategien:	• Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel 2008 (DAS) • Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 12 des Gesetzes vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1237) geändert worden ist
In der DAS beschriebene Klimawandelfolgen	DAS, Kap. 3.2.3: Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt zeigen sich in langfristigen Trends (z. B. in den Grundwasserständen, der Änderung alpiner Abflussregime [...]) wie auch im häufigeren Auftreten von Extremereignissen (z. B. Hochwasser, Sturmfluten und Dürren). Die Wahrscheinlichkeit für Hochwasser durch häufigere und intensivere Starkniederschläge wird steigen. Durch wärmere Winter wird der Anteil von Schnee am Gesamtniederschlag abnehmen; es reduziert sich die zeitliche Speicherung als Schnee, sodass Niederschlag zu unmittelbarem Abfluss führt. Die winterliche Hochwassergefahr steigt. Häufigeres Auftreten von Niedrigwasserperioden durch meist sommerliche Trockenzeiten mit Auswirkungen auf die Kühlwasserentnahmen und die ökologische Situation.

	Sommer-niedrige Wasserstände in Oberflächengewässern [...] (können) einen erhöhten Aufwand für die Trinkwasseraufbereitung bedeuten. Häufigeres Auftreten von Trockenperioden in den Sommermonaten führen zu verstärkter Austrocknung der Feuchtgebiete und Moore.
Ziele:	DAS, Kap. 3.2.14: Sinken Grundwasserneubildungsraten aufgrund klimatischer Auswirkungen, erfordern regionale Wasserknappheiten eine verstärkte raumordnerische Sicherung von Wasserressourcen und ein planerisches Hinwirken auf angepasste Nutzungen. Wasserhaushaltsgesetz: § 27 Bewirtschaftungsziele für oberirdische Gewässer (1) Oberirdische Gewässer sind, soweit sie nicht nach § 28 als künstlich oder erheblich verändert eingestuft werden, so zu bewirtschaften, dass 1. eine Verschlechterung ihres ökologischen und ihres chemischen Zustands vermieden wird und 2. ein guter ökologischer und ein guter chemischer Zustand erhalten oder erreicht werden. § 47 Bewirtschaftungsziele für das Grundwasser Das Grundwasser ist so zu bewirtschaften, dass 1. eine Verschlechterung seines mengenmäßigen und seines chemischen Zustands vermieden wird [...], 3. ein guter mengenmäßiger und ein guter chemischer Zustand erhalten oder erreicht werden; zu einem guten mengenmäßigen Zustand gehört insbesondere ein Gleichgewicht zwischen Grundwasserentnahme und Grundwasserneubildung.
Berichtspflichten:	Erreichen der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie und des Wasserhaushaltsgesetzes

IV Technische Informationen

Datenquelle:	Information System and Data Center (ISDC): Gravity Information Service (GravIS); GeoForschungsZentrum (GFZ)	
Räumliche Auflösung:	flächenhaft	NUTS 0
Geographische Abdeckung:	ganz Deutschland	
Zeitliche Auflösung:	monatlich (Terminwerte), sei April 2002 Hinweis: Das langjährige Mittel bezieht sich im aktuellen Release (RL06) auf den Zeitraum April 2002 bis April 2020. Die nach April 2020 erhobenen Daten werden an die Zeitreihe angehängt. Mit der Veröffentlichung eines neuen Releases wird die gesamte Zeitreihe, bezogen auf ein neu berechnetes langjähriges Mittel, aktualisiert.	
Beschränkungen:	Von Juni 2017 bis Mai 2018 sind aufgrund des Endes der ersten GRACE Mission keine Satellitendaten vorhanden.	
Verweis auf Daten-Factsheets:	WW-I-1_Daten_Terrestrisch_gespeichertes_Wasser.xlsx	

V Zusatz-Informationen

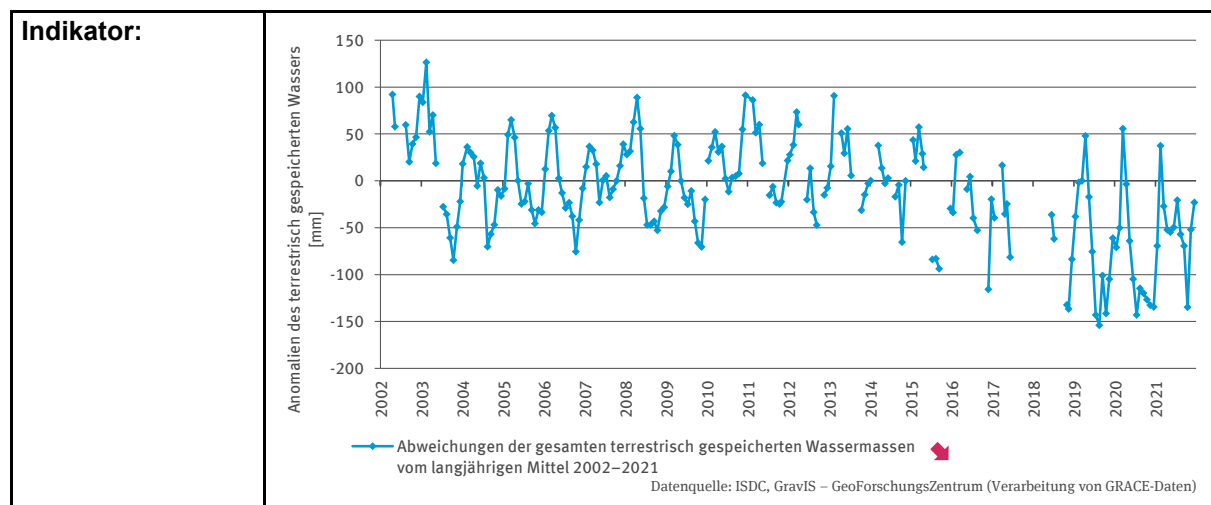
Glossar:	-
Weiterführende Informationen:	BfG – Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.) 2021: Die Niedrigwassersequenz der Jahre 2015 bis 2018 in Deutschland – Analyse, Einordnung und Auswirkungen. Mitteilungen Nr. 35, Bundesanstalt für Gewässerkunde,

	Koblenz, 412 S. www.bafg.de/DE/05_Wissen/04_Pub/02_Mitteilungen/BfG-Mitteilungen35.html Boergens E., Dobsław H., Dill R. 2019: GFZ GravIS RL06 Continental Water Storage Anomalies. V. 0004. GFZ Data Services. doi: 10.5880/GFZ.GRAVIS_06_L3_TWS Boergens E., Dobsław H., Dill R., Thomas M., Dahle C., Murböck M., Flechtner F. 2020: Modelling spatial covariances for terrestrial water storage variations verified with synthetic GRACE-FO data International Journal on Geomathematics 11, 24. doi: 10.1007/s13137-020-00160-0 Boergens E., Güntner A., Dobsław H., Dahle C. 2020: Quantifying the Central European Droughts in 2018 and 2019 with GRACE follow-on Geophysical Research Letters, 47 (14), p. 1672. doi: 10.1029/2020GL087285 Eicker A., Jensen L., Wöhnke V. et al. 2020: Daily GRACE satellite data evaluate short-term hydro-meteorological fluxes from global atmospheric reanalyses. Sci Rep 10, 4504. doi: 10.1038/s41598-020-61166-0 GFZ 2022: GRACE Products. www.gfz-potsdam.de/en/section/global-geomonitoring-and-gravity-field/projects/grace/grace-products Güntner A., Gerdener H., Boergens E., Kusche J., Kollet S., Dobsław H., Hartick C., Sharifi E., Flechtner F. 2023: Veränderungen der Wasserspeicherung in Deutschland seit 2002 aus Beobachtungen der Satellitengravimetrie. HW 67. 2023, H.2: 74-89. doi: 10.5675/HyWa_2023.2_1 Springer A., Kusche J., Hartung K., Ohlwein C., Longuevergne L. 2014: New Estimates of Variations in Water Flux and Storage over Europe Based on Regional (Re)Analyses and Multisensor Observations, Journal of Hydrometeorology, 15(6), 2397-2417. doi: 10.1175/JHM-D-14-0050.1
--	---

VI Umsetzung – Aufwand und Verantwortlichkeiten

Aufwands-schätzung:	Daten-beschaffung:	1	Eine datenhaltende Organisation, Daten können frei heruntergeladen werden
	Datenverar-beitung:	3	Zur Darstellung des Indikators müssen die im NetCFD Format gespeicherten Rasterdaten extrahiert, auf die Fläche Deutschlands zugeschnitten und Zeitreihen erstellt werden.
	<u>Erläuterung:</u> Die Datenauswertung wird in Zusammenarbeit mit dem Referat M2 – Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen des BfG durchgeführt. Das BfG liefert die Rohdaten, die weiterverarbeitet und in das Daten-Factsheet eingepflegt werden. Der Zeitaufwand für die Berechnung und Plausibilisierung des Indikators wird auf ca. drei Arbeitstage (BfG) geschätzt. Die Übernahme der Daten in das Indikator-Factsheet nimmt 2 Stunden in Anspruch.		
Datenkosten:	keine		
Zuständigkeit:	Bundesanstalt für Gewässerkunde (Peter Krahe)		
	<u>Erläuterung:</u> keine		

VII Darstellungsvorschlag



VIII Anlagen

Anlage 1 – Technischer Hintergrund zur GRACE Mission

Alle GRACE-Produkte werden von einem gemeinsamen Science Data System verarbeitet und archiviert. Dieses besteht aus dem Jet Propulsion Laboratory der NASA, dem University of Texas Center for Space Research sowie dem Deutschen GeoForschungsZentrum (GFZ). Die Verarbeitung erfolgt von dem Rohdatenlevel Level-0 bis Level-2. Die berechneten Level-2-Daten werden anschließend mit verschiedenen Algorithmen zu einem Level-3-Endprodukt weiterverarbeitet, das Informationen zur Änderung des Wasserspeichers enthält (unter anderem verfügbar beim ISDC des GFZ). Die Hintergrundmodelle, die in den unterschiedlichen Analysezentren (z. B. GFZ, COST-G) verwendet werden, sind weitestgehend einheitlich. Mit der regelmäßigen Überarbeitung der Datenprozessierung nähern sich die Datenprodukte der unterschiedlichen Analysezentren immer weiter an. Für die Anwendung der Daten im Bundesgebiet eignet sich das Produkt des GFZ aus Potsdam am besten.

Die aktuellen Daten sind aus dem Release 06. Monatlich wird das aktuelle Release um den Datensatz des vorherigen Monats erweitert. Die Daten stehen, bis das neue Release herauskommt, online zum Herunterladen zur Verfügung. Mit der Veröffentlichung eines neuen Releases werden alle – bis dahin verfügbaren – Daten neu aufbereitet.

Level-0: Die Level-0-Daten sind das Ergebnis des Empfangs, der Sammlung und der Freigabe der Daten durch das Raw Data Center (RDC) des Mission Operation System (MOS) in Neustrelitz/Deutschland.

Level-1: Die Level-1 Datenprodukte sind das Ergebnis einer nicht-destruktiven Verarbeitung (A) bzw. einer möglicherweise destruktiven oder irreversiblen Verarbeitung (B) der Level-0-Daten. Die Sensorkalibrierungsfaktoren werden angewendet, um die binär kodierten Messungen in technische Einheiten umzuwandeln. Die Daten werden korrekt mit Zeitmarken versehen und die Abtastrate der Daten ist gegenüber den höheren Raten der vorherigen Ebenen (Level-0) reduziert.

Level-2: Level-2-Daten umfassen das kurzfristige (monatliche und wöchentliche) und statische Schwerefeld, das aus kalibrierten und validierten GRACE Level-1B-Datenprodukten abgeleitet wird. Diese Ebene umfasst auch zusätzliche Datensätze (z. B. mittlere atmosphärische und ozeanische Massenschwankungen), die zur Interpretation der zeitlichen Variabilität der Schwerefeldlösungen erforderlich sind. Die Level-2-Prozessierungssoftware wurde von allen drei Prozessierungszentren unabhängig voneinander entwickelt. Die routinemäßige Verarbeitung erfolgt am UTCSR und GFZ, während das JPL Level-2-Produkte zu Verifikationszwecken erzeugt.

Level-3: Das Level-3 Produkt der Änderungen des terrestrisch gespeicherten Wassers enthält das im GFZ-Webportal GravIS visualisierte und im GFZ-Datenarchiv ISDC bereitgestellte Endprodukt der GRACE- und GRACE-FO Daten.