

ReArMo – Ein Modellverbund zur Abschätzung künftiger Entwicklungen des Grundwassers hinsichtlich Menge und Beschaffenheit

Beate Klöcking, Dieter Wenske, Gerd Knab, Bernd Pfützner, Frank Reinicke, Heiko Ihling,
Andreas Rost, Ulrike Haferkorn

Zusammenfassung

Der Modellverbund ReArMo hat die Abschätzung künftiger Entwicklungen des Grundwassers nach Menge und Beschaffenheit unter geänderten Randbedingungen (Klima, Landnutzung, Bewirtschaftung) zum Ziel. Er besteht aus den Komponenten REPRO, ArcEGMO-PSCN, MODFLOW und MT3D-FL. Pilotstudien mit ReArMo erfolgten in den zwei Sächsischen Trinkwasserschutzgebieten Jahnaue 2 und Diehsa. In Zusammenarbeit mit Landwirten und Wasserversorgern wurden für die beiden Pilotstudiengebiete unterschiedliche Bewirtschaftungsszenarien entwickelt und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit untersucht. Dabei wurde auch die mögliche Klimaentwicklung in der nahen Zukunft durch Nutzung des WETTREG-2010-Klimaszenarios berücksichtigt.

1. Einleitung

Im Ergebnis der Bewertung des Zustandes der Grundwasserkörper (GWK) in Deutschland nach der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) mussten vielerorts GWK wegen hoher Nitratbelastung in den schlechten chemischen Zustand eingestuft werden. Die Ableitung kosteneffizienter Maßnahmen zur Verringerung von Stickstoffbelastungen erfordert das Verständnis der Eintragspfade und der Stickstoffausbreitung in der ungesättigten und gesättigten Zone. Dazu wurde vom Freistaat Sachsen, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) ein Konzept für die gekoppelte Stofftransportmodellierung im Boden und im GWK besonders belasteter Gebiete erstellt (Pfützner et al., 2011). Kern war die Entwicklung des Modellverbundes ReArMo als Werkzeug für die Abschätzung künftiger Entwicklungen von GWK nach Menge und Beschaffenheit unter geänderten Randbedingungen (Klima, Landnutzung, Bewirtschaftung) in besonders belasteten Trinkwassereinzugsgebieten.

2. Der Modellverbund ReArMo

2.1 Struktur

Der Modellverbund ReArMo besteht aus den Komponenten

- REPRO für die Auswertung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsdaten auf Betriebsebene und Bilanzierung der Stickstoffsalden auf Teilschlagebene,
- ArcEGMO-PSCN für die deterministische Simulation der Sickerwasserbildung und des daran geknüpften Stoffaustrags aus der Bodenzone sowie der Abflusskonzentration in den Fließgewässern in Wechselbeziehung mit dem Grundwasser,
- MODFLOW/MT3D-FL für die Abbildung der zeitlichen Entwicklung und räumlichen Verteilung der Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen im Grundwasser.

Das Modell REPRO (Hülsbergen, 2003) ist ein Instrument zur Abbildung eines landwirtschaftlichen Betriebes als Gesamtsystem und zur Bewertung der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktion in Bezug auf die Schutzgüter Boden, Wasser und Luft. Im Mittelpunkt steht die detaillierte Abbildung betrieblicher Stoff- und Energieflüsse auf verschiedenen Ebenen. Die benötigten Produktionsdaten ergeben sich aus den konkreten Betriebsdaten der zu betrachtenden Bereiche des Pflanzenbaus, der Tierhaltung und

der Lagerwirtschaft und umfassen alle zeitlich konkret definierten Bewirtschaftungsmaßnahmen incl. der Abbildung der Mengen (Düngung, Energie, Pflanzenschutz und Ertrag). Im Rahmen der Modellkopplung dient REPRO primär der Bereitstellung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsdaten an das Modell ArcEGMO-PSCN (offline Kopplung) sowie zur Prüfung der simulierten Stickstoff- und Humusbilanzen.

Mit dem GIS-gestützten ökohydrologischen Modell ArcEGMO-PSCN (PFÜTZNER, 2002, Becker et al. 2002, Klöcking, 2009) können räumlich und zeitlich hoch aufgelöst alle wesentlichen Komponenten des Gebietswasser- und C/N-Haushaltes von den Wechselbeziehungen zwischen Atmosphäre-Vegetation-Boden bis hin zu den ober- und unterirdischen Abflusskonzentrationsprozessen bei Berücksichtigung von anthropogenen Steuerungen und natürlichen Störungen beschrieben werden. Innerhalb des Modellverbundes ReArMo übernimmt ArcEGMO-PSCN die Simulation der Wasser-, Wärme-, Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik im System Pflanze-Boden in täglicher Auflösung.

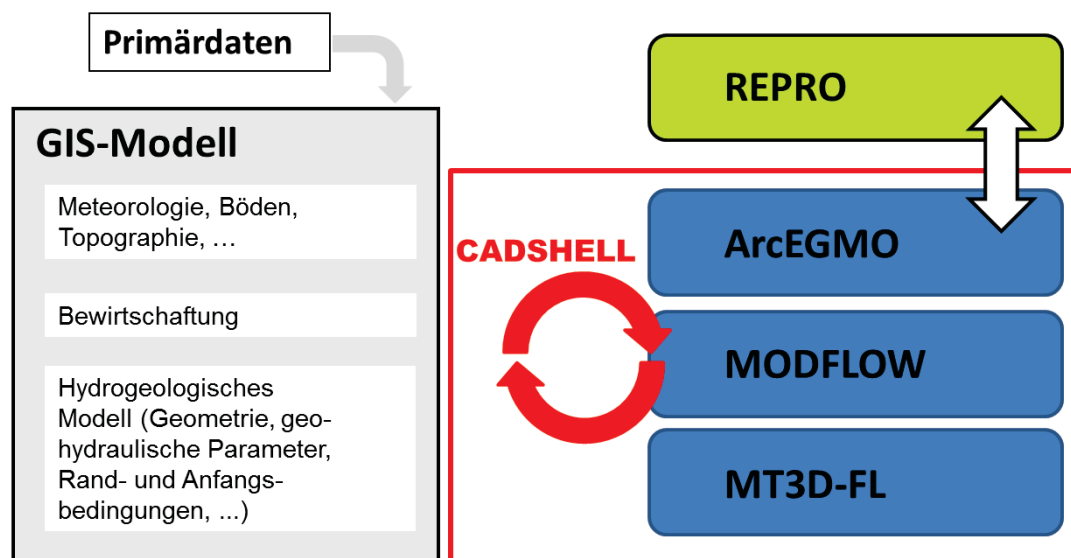


Abb. 1: Schema des Modellverbunds ReArMo

Zur Simulation der 3D-Grundwasserströmung wird das Programmsystem MODFLOW (MC DONALD & HARBAUGH, 1988) eingesetzt. MODFLOW basiert auf der Finite-Differenzen-Methode zur räumlichen Diskretisierung der systembeschreibenden Differentialgleichung. MODFLOW ist das mit Abstand am häufigsten eingesetzte Programmsystem zur Simulation der Grundwasserströmung weltweit und weist einen entsprechend hohen Verifizierungsgrad auf. Die Modellierung des Stofftransports im Grundwasser unter Berücksichtigung der Dispersion, von hydrochemischen Wechselwirkungen sowie Abbau/Zerfall erfolgt mit dem Programm MT3D-FL, welches auf dem Programmcode MT3D (ZHENG, 1992) basiert. Der Programmcode wurde um eine Randbedingung zur Abbildung des Stoffrückhaltes in der ungesättigten Zone (Transitschichten) erweitert. Die Transitschichten verbinden im gekoppelten Modellsystem im Bereich des Grundwasserströmungsmodells die ungesättigten Bodenschichten mit dem Grundwasserleiter. Diese Schichten stellen bezüglich der Wasserbewegung rein vertikale Versickerungsstrecken dar. Die Wasser- und Stoffströme in den obersten Bodenschichten (ca. 2 m Mächtigkeit) werden mit dem Programm ArcEGMO-PSCN u. a. auf Basis der REPRO-

Daten simuliert. Die Ergebnisse dieser Modellberechnungen sind Sickerwasserraten und Stoffkonzentrationen (Nitrat und Ammonium), die in Tagesschrittweiten an die Programme MODFLOW und MT3D-FL übergeben werden. Hier werden diese Volumen- und Stoffströme über Transitschichten bis in den Grundwasserleiter weiterverfolgt. Die Transitschichten im Grundwasserströmungsmodell bewirken, dass die täglichen Sickeraten von ArcEGMO, welche häufig sehr starke Spitzen aufweisen, durch die Transformation stark gedämpft und in ihrer Wirkung auf das Grundwasser zeitlich verzögert werden. Um den Prozess der Stickstoffspeicherung in den unteren Bodenschichten im Programmsystem MODFLOW/MT3D-FL zu erfassen, wurde den Transitschichten ein Stickstoffspeicher zugeordnet und dessen Parameter zur Modellkalibrierung identifiziert. Eine Stoffumwandlung der verschiedenen Stickstoffkomponenten im Grundwasser wird in MT3D-FL nicht berücksichtigt.

Die Kopplung der hydro- bzw. hydrogeologischen Modelle (ArcEGMO, MODFLOW und MT3D-FL) erfolgt online. Der grafische Prä- und Postprozessor CADSHELL (ROST & WENSKE, 2015) integriert die Steuerung der beiden Programmsysteme und kontrolliert gleichzeitig deren gekoppelte Abarbeitung mit ArcEGMO. Die Programme werden innerhalb eines Rechenlaufes abwechselnd aufgerufen und ausgeführt (Abb. 1). Details zu den einzelnen Modellansätzen mit ihren Ein- und Ergebnisgrößen sind in Pfützner et al. (2011) beschrieben.

2.2 Räumliche und zeitliche Auflösung, Eingangsdaten

Die Simulation erfolgt in täglicher Auflösung für einen unbegrenzten Zeitraum (z. B. 10 – 100 Jahre). Die räumliche Auflösung hängt von den räumlichen Gegebenheiten und der Datenverfügbarkeit ab. Die Rastergröße sollte eine Abbildung der Teilschlagkonturen erlauben. In den bisherigen Pilotstudien wurde mit Auflösungen von 9 – 25 m gearbeitet. Für jeden Teilschlag können pro Jahr drei Fruchtarten und maximal zehn Düngergaben berücksichtigt werden.

2.3 Simulationsergebnisse

Durch ReArMo werden die üblichen Simulationsergebnisse der einzelnen Modelle des Verbundes bereitgestellt (z.B. Verdunstung, Sickerwassermengen mit Stickstofffrachten aus der Bodenzone, Gewässerabflüsse, landwirtschaftliche Erträge, C- und N-Gehalte im Boden- und im Grundwasser, s. Pfützner et al., 2011). Der Schwerpunkt liegt auf den Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen in den einzelnen Grundwasserleitern.

3. Modellentwicklung und -testung

Zur Realisierung der Modellkopplung zwischen ArcEGMO-PSCN und MODFLOW/MT3D-FL waren umfangreiche Änderungen in allen Teilprogrammen notwendig. Insbesondere wurde ein internes Datenmanagement konzipiert und eine Programmsteuerung entwickelt, die einen effektiven Datenaustausch und eine schnelle Berechnung ermöglichen.

Zwischen 2011 und 2017 wurde dieser Modellverbund in zwei Sächsischen Trinkwasserschutzgebieten (WSG), Jahnaue 2 und Diehsa getestet. In beiden WSG erfolgt aufgrund der kritischen Nitratkonzentrationen an den Brunnenstandorten ein intensives Monitoring durch das LfULG (u. a. DILBAT, et al. 2011, DILBAT & IHLING, 2014).

Ein wichtiger Bestandteil des Projektes war die Parametrisierung und Validierung des Bodenmodells anhand der Messdaten der von der BfUL betriebenen Großlysimeteranlage Brandis (LfUG, 2001, Klöcking et al., 2013). Hier wird seit 1980 kontinuierlich der Wasser- und Stoffhaushalt acht regionstypischer Böden in 24 wägbaren Lysimetern beobachtet. Brandis und die Herkunftsflächen der Lysimeterböden liegen in der mitteldeutschen Trockenregion des Norddeutschen Tieflandes (Jahresmitteltemperatur 9.3°C; korrigierter Jahresniederschlag 673 mm/a). Sechs der untersuchten Bodenformen finden sich mit hohem Flächenanteil in den untersuchten WSG.

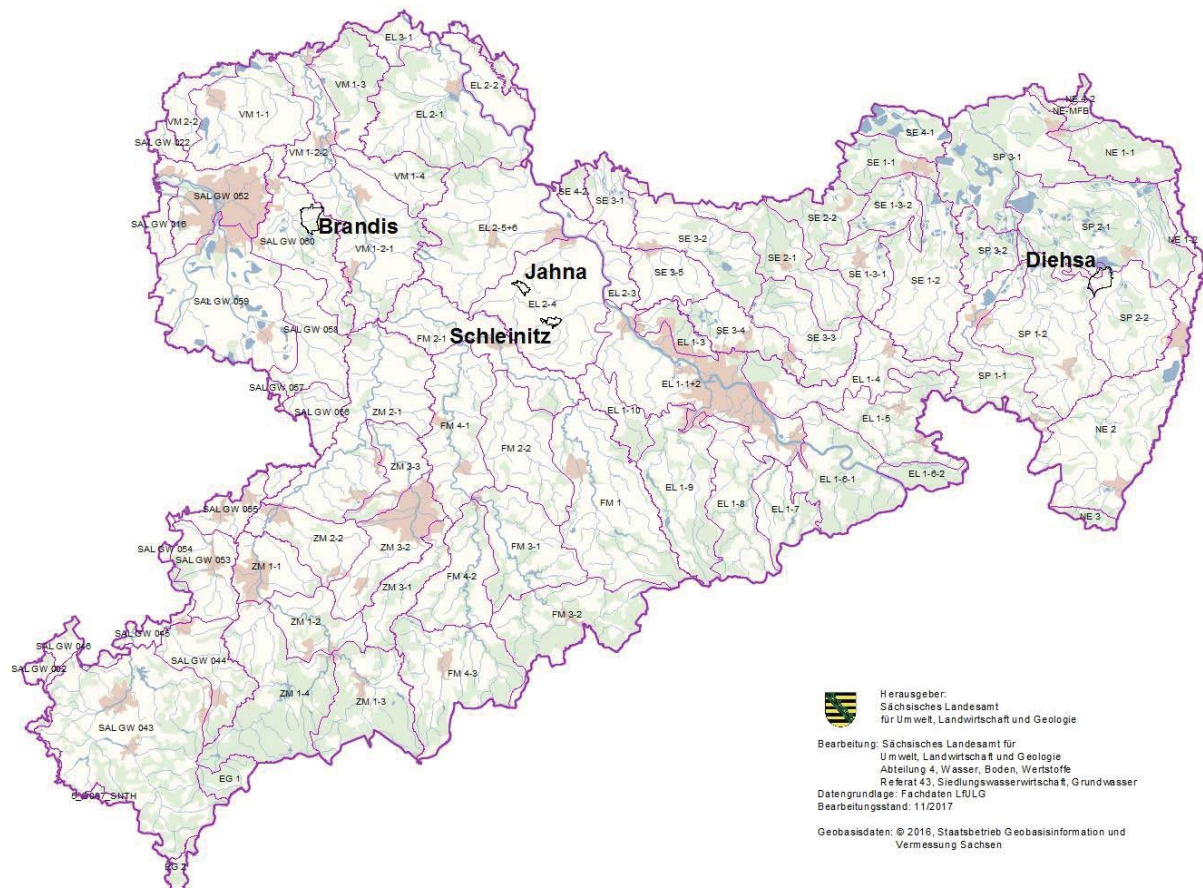


Abb. 2: Freistaat Sachsen mit Grundwasserkörpern und Pilotanwendungen von ReArMo

Unterschiedliche Bewirtschaftungsszenarien wurden in Zusammenarbeit mit den Landwirten und Wasserversorgern für die beiden Pilotstudiengebiete entwickelt und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit untersucht. Dabei wurde auch die mögliche Klimaentwicklung in der nahen Zukunft (2021-2050) durch Nutzung des WETTREG-2010-Klimaszenarios berücksichtigt.

4. Beispiel Wasserschutzgebiet Diehsa

4.1 Naturräumliche und hydrogeologische Verhältnisse

Das WSG Diehsa liegt im Osten Sachsens in der Oberlausitzer Heide- und Teichlandschaft. Regionalgeologisch gehört das Gebiet zum Lausitzer Granodiorit-Massiv an der Grenze zum Görlitzer Schiefergebirge (Ihling et al., 2009). Trockenheitsanfällige, wenig fruchtbare Sandflächen aber auch vernässte und vermoorte Mulden sind bestimmende Naturmerkmale. Die

Forstwirtschaft stellt mit 68 % die Hauptlandnutzungsform im Einzugsgebiet dar (Kiefernreinbestände, Kiefern-Eichenmischbestände), gefolgt von den landwirtschaftlichen Flächen (28 %), Feuchtwiesen (3 %) und Siedlungsflächen (1 %).

Geomorphologisch wird das Einzugsgebiet im Nordwesten durch den Höhenzug der Grundgebirgsauftragung Hohe-Dubrau sowie Kollmer-Dubrau (Grauwacke der proterozoischen Wüsteberg-Folge), östlich durch den Biotitgranit der Königshainer Berge und südlich durch die oberflächennah anstehende Grauwackehochlage des Eichberges begrenzt. Zwischen den Grundgebirgsauftragungen erstreckt sich eine präpleistozän angelegte Schmelzwasserrinne. Hydrogeologisch relevant sind im Einzugsgebiet bzw. WSG Diehsa in erster Linie die quartären Lockergesteine, welche von gering durchlässigen tertiären Lockergesteinen und Festgesteinen unterlagert werden. Eine detaillierte Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten im WSG Diehsa wird durch Dilbat & Ihling (2014) gegeben. Die NO_3^- Konzentrationen liegen vor allem im obersten Grundwasserleiter im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Flächen und im Brunnen 1 teilweise über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung.

4.2 Modellaufbau

Das 3,53 km² große Modellgebiet wurde in 200x200 Modellelemente auf 6 Schichten unterteilt. Die horizontale Elementabmessung beträgt einheitlich 15.8x9.3 m. Das Modellgebiet schließt das gesamte Einzugsgebiet des im Gebiet liegenden Flussabschnittes des Diehsaer Wassers ein.

Das GIS-Datenmodell ReArMo – WSG Diehsa enthält alle Eingangsdaten für die Modellierung in der erforderlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung. Das sind im Einzelnen:

- Standortdaten,
 - Topographie (Basis: Digitales Höhenmodell 2 m),
 - Bodeneigenschaften (Bodenkarte des Freistaates Sachsen 1 : 25 000),
 - Landnutzung (BTLNK: Biotoptypen- und Landnutzungskartierung 1 : 50 000, Teilschlaggliederung),
 - Witterungsdaten und atmosphärische N-Einträge (Deposition);
- Bewirtschaftungsdaten der landwirtschaftlich genutzten Flächen,
 - Fruchtfolge mit Saat- und Ernteterminen,
 - N-Düngung (Art, Termin und N-Menge),
 - Verbleib der Erntereste;
- Bestandescharakteristik der forstlich genutzten Flächen,
- Fließgewässer mit ihren oberirdischen Einzugsgebieten,
- Hydrogeologie (Grundwasserströmung und Stofftransport)
 - Geometrie der Schichten (Oberkanten, Unterkanten, Mächtigkeiten),
 - geohydraulische Parameter (Durchlässigkeitsbeiwerte, Porositäten, Speicherkoeffizienten),
 - hydraulische Randbedingungen (Fließgewässer, Brunnen),
 - Anfangsbedingungen (Startwerte der Grundwasserstände),
 - Parameter Stofftransport (Dispersivitäten, Porositäten, Retardationfaktoren),

- Randbedingungen Stofftransport (Konzentrationen Fließgewässer, Brunnen),
- Anfangsbedingungen Stofftransport (Startwerte der Konzentrationen).

Alle Modellparameter wurden diskretisiert und den jeweiligen Modellelementen zugewiesen.

4.3 Modellkalibrierung

Im Rahmen der Modellkalibrierung wurden die relevanten Wasserstandsmessungen von 24 Messstellen verwendet. Ausgehend von der vorgegebenen Parameterverteilung für das WSG Diehsa wurde durch Variation der Durchlässigkeitsbeiwerte (horizontale und vertikale Richtung) die Modellkalibrierung anhand der Grundwasserstände durchgeführt. Der ausgewiesene Wert des relativen Modellfehlers von 3,1 % unterschreitet den angestrebten Zielwert des Modellfehlers von 5 % deutlich. Es konnte insgesamt eine gute Abbildung der Messdaten durch die Modellergebnisse erreicht werden. Die Genauigkeit des Modells der Grundwasserströmung ist für die Durchführung der weiteren Berechnungen als gut einzustufen. Die erzielte Modellanpassung ist hinreichend genau, um die Strömungsrichtungen und –gradienten abzubilden und damit die Grundwasserdynamik sowie die strömenden Grundwassermengen zu erfassen.

Neben dem Vergleich der gemessenen und berechneten Grundwasserstände wurden die Nitrat-Konzentrationen für die Modellkalibrierung des Stofftransportmodells herangezogen. Tendenziell entsprechen die auf Basis der gekoppelten Modellierung berechneten Nitrat-Konzentrationen in ihrer Gesamtheit den beobachteten Werten.

4.4 Modellergebnisse und Prognosen

Die Erarbeitung praxisorientierter, optimaler Bewirtschaftungsszenarien erfolgte auf der Basis des umfangreichen Datenpools der Dauertestflächen (DTF) des Sächsischen LfULG (Reinicke & Wurbs 2012). Im Ergebnis standen für konventionelle Anbausysteme jeweils eine viehlose und eine viehhaltende Fruchtfolge zur Verfügung. Für den ökologischen Landbau wurde nur eine viehhaltende Fruchtfolge abgeleitet. Es wurden folgende Varianten über einen Zeitraum von 1994 bis Ende 2014 untersucht:

- Grundvariante basierend auf der gegenwärtigen Bewirtschaftung,
- Prognosevariante einer konventionellen optimierten Landbewirtschaftung mit viehloser Fruchtfolge (Variante FF1),
- Prognosevariante einer konventionellen optimierten Landbewirtschaftung mit viehhaltender Fruchtfolge (Variante FF2),
- Prognosevariante für den ökologischen Landbau mit nur einer viehhaltenden Fruchtfolge (Variante „Ökologisch“).

Das Ergebnis der Modellrechnungen zeigt mit Ausnahme des viehlosen Szenarios FF1 eine deutliche Reduzierung der Stickstoff-Auswaschung (Abb. 3).

Die von ArcEGMO-PSCN berechneten Neubildungsraten betragen im Mittel 3.01 l/(s km²). Die Ganglinie der Grundwasserneubildungsraten zeigt starke zeitliche Schwankungen (Abb. 4).

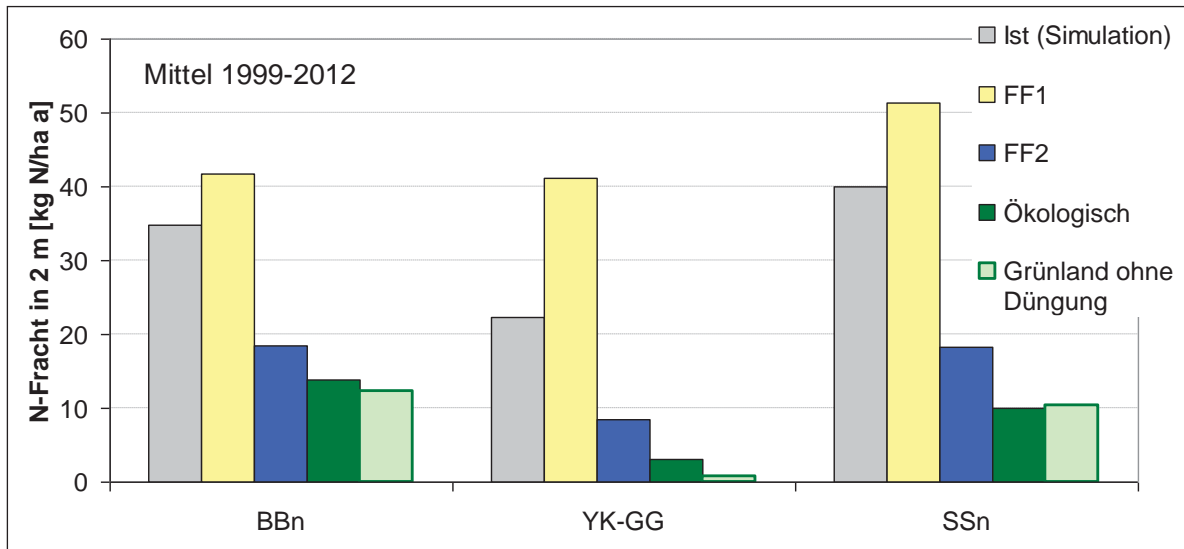


Abb. 3: Simulierte N-Frachten differenziert nach den dominierenden Böden (BBn: Braunerde, YK-GG: Kolluvisol-Gley, SSn: Pseudogley)

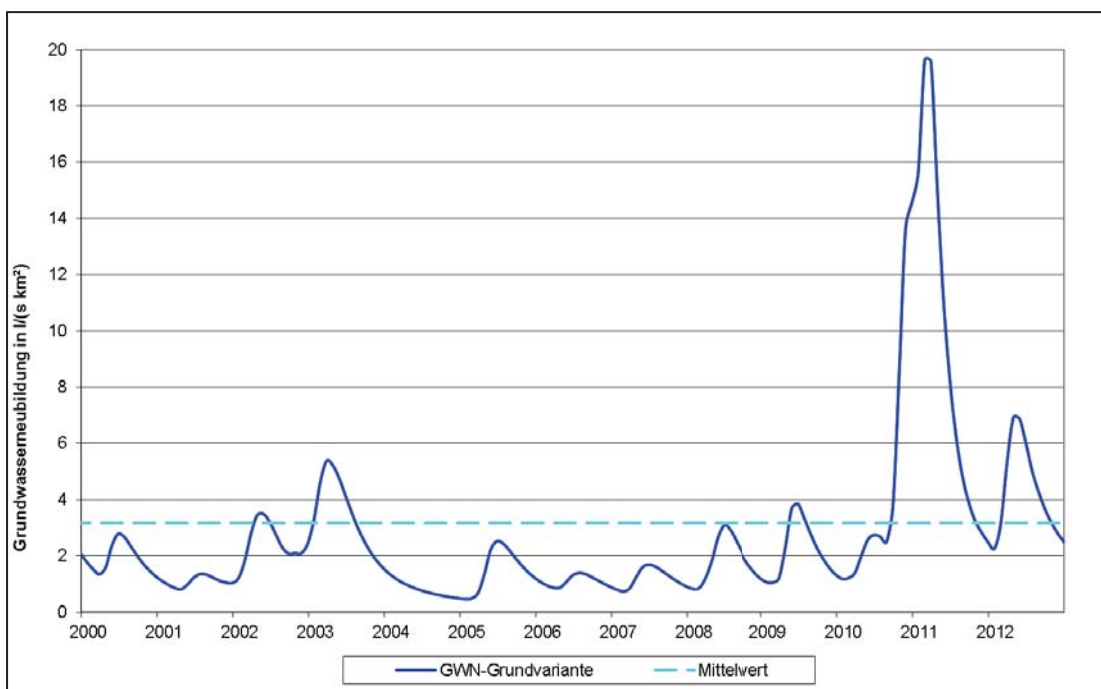


Abb. 4: Mittlere Grundwasserneubildungsraten für das Gesamtgebiet Diehsa

Die Strömungs- und Stofftransportmodellierung liefert die räumlich-zeitlichen Veränderungen der NO_3 -Konzentrationen in den Grundwasserleitern. Damit ist es möglich, verschiedene Standortbedingungen, wie veränderte Landwirtschaften oder Klimaveränderungen, mit dem gekoppelten Modellsystem zu simulieren und zu bewerten.

Für die Beurteilung der Auswirkungen der Stickstoffverbindungen im Grundwasser sind in erster Linie deren Konzentrationen relevant. Generell sind zwei inhaltliche Komplexe wichtig:

- Darstellung der räumlichen Verteilung der Stoffkonzentration im Grundwasser zu einem ausgewählten Zeitpunkt,
- Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Stoffkonzentration im Grundwasser an einem ausgewählten Ortspunkt.

Die Darstellung der räumlichen Verteilung der simulierten Stoffkonzentration im Grundwasser zu einem ausgewählten Zeitpunkt kann, basierend auf der Gitter- bzw. Elementstruktur des MODFLOW-Modells (analog zur ArcEGMO-Struktur) als Matrixdarstellung, d. h. als Konzentrationswert pro Modellzelle oder auch in Form von Isolinien der Konzentration erfolgen. Zum Beispiel können an Brunnenstandorten Ganglinien erstellt werden (Abb. 5), die die Auswirkungen der verschiedenen Bewirtschaftungsvarianten auf die Qualität der Brunnenwässer anzeigen.

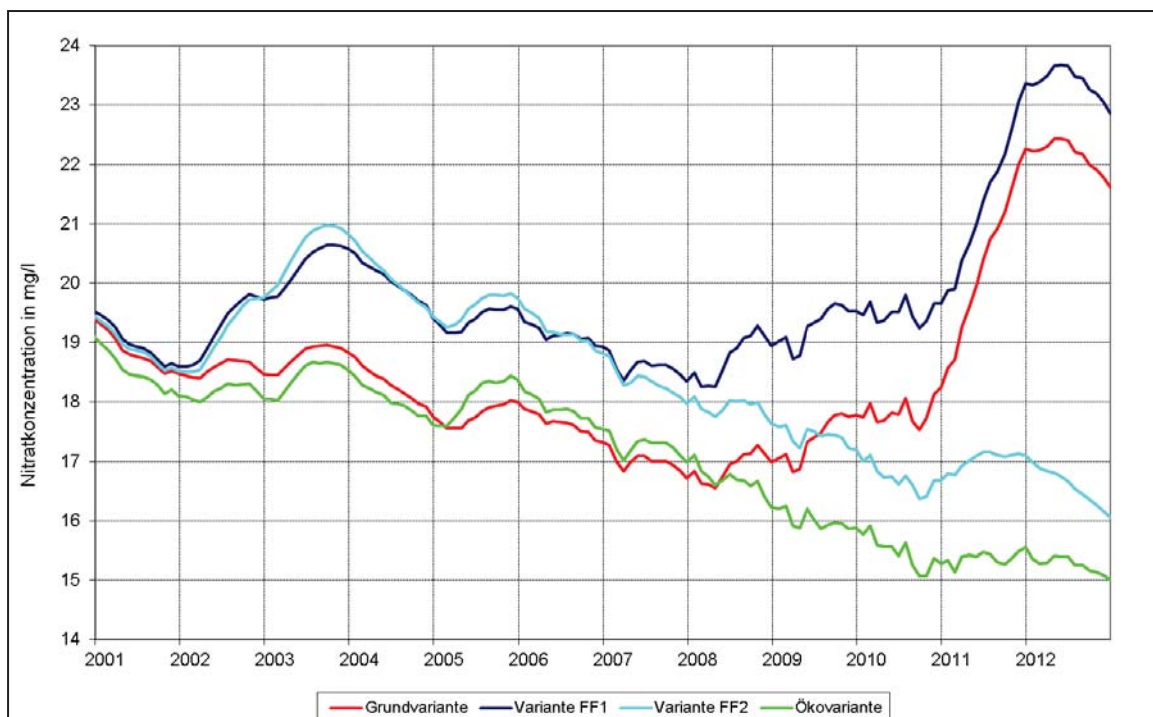


Abb. 5: Ganglinien der NO_3 -Konzentration am Standort Brunnen 2

Einen Vergleich anhand der NO_3 -Konzentrationsverteilungen zwischen dem Ist-Zustand und einem Szenarium mit ökologischem Landbau zeigt Abb. 6.

Während die Nachrechnung der gemessenen Grundwasserstände meist gut gelingt, ist dies für die Konzentrationswerte oft nur eingeschränkt möglich. Dies liegt schon allein in den starken zeitlichen Schwankungen der Ergebnisse von Konzentrationsmessungen begründet, die vielfältige natürliche und technische (Probenahme, Analytik) Ursachen haben können. Der Vergleich Messwerte – Modellergebnisse ist somit anhand von Stoffbilanzen wesentlich aussagekräftiger möglich. Durch die hierbei realisierte integrale Bewertung können kurzfristige Schwankungen der Messwerte hinsichtlich ihres Einflusses nivelliert werden. Möglichkeiten der Bewertung über Stoffbilanzen bestehen z. B. durch kumulative Erfassung der dem Grundwasser zugetretenen Stickstofffrachten und der ausgetragenen Stoffmengen an den Randbedingungen (Brunnen, Oberflächengewässer).

Die Ergebnisse der Bearbeitung zeigten, dass mit der gekoppelten Modellierung eine detaillierte modelltechnische Abbildung der komplexen Prozesse der Stickstoffbilanz und des Nitrattransports mit der Sicker- und Grundwasserströmung möglich ist. Die Qualität der Abbildung der realen Vorgänge durch die eingesetzten Modelltools hängt naturgemäß stark von der Qualität der zur Verfügung stehenden Daten ab. Hier werden in der Zukunft die Bemühungen noch weiter intensiviert, um noch bestehende Kenntnislücken zu schließen.

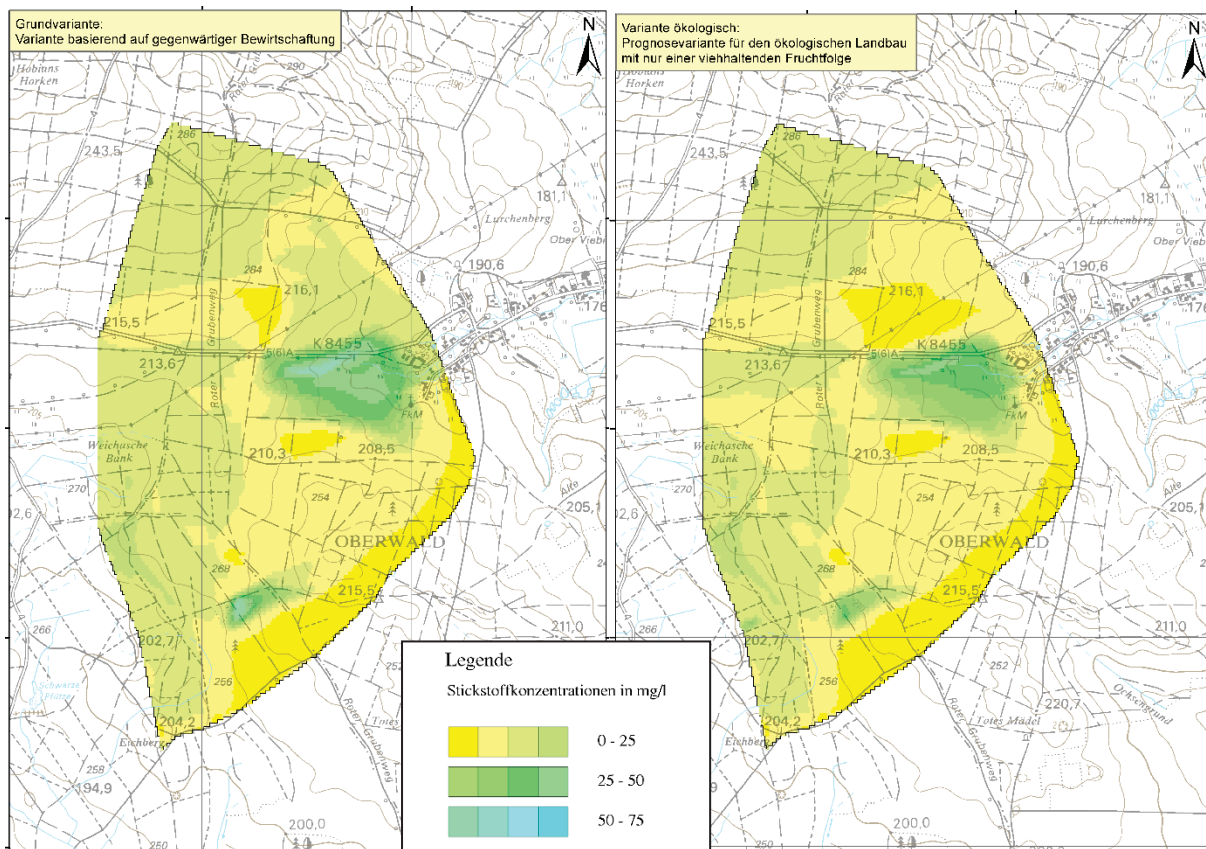


Abb. 6: Variantenvergleich auf Basis der NO_3 -Konzentrationsverteilungen

5. Ausblick

Auf Grundlage der Ergebnisse der gekoppelten Modellsimulationen können Empfehlungen zur umweltgerechten landwirtschaftlichen Bewirtschaftung abgeleitet werden. Geplant sind für die WSG Diehsa und Jahnaue 2 weitere Prognoserechnungen mit den an realen Bewirtschaftungsänderungen auf den Ackerschlägen oder Teilflächen angepassten Szenarien.

Ein weiteres Ziel ist die Erstellung eines gekoppelten Modells für das WSG „Quellfassung Schleinitz“. Dieses Projekt dient der Verifizierung der Modellgrundlagen und stellt eine weitere Möglichkeit zum umfangreichen Test des gekoppelten Programmsystems dar. Schwerpunkte sind dabei die Prognosevarianten und die Speicherfunktion in der Transitschicht.

Danksagung

Das Projekt ReArMo wird vom Freistaat Sachsen, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie finanziert. Besonders soll auch den Landwirtschaftsbetrieben in den

untersuchten Gebieten und den zuständigen Wasserversorgern (OEWA Döbeln und Trinkwasserzweckverband „Neiße-Schöps“) für die Bereitstellung der benötigten Daten und ihre konstruktive Mitarbeit bei der Projektbearbeitung gedankt werden.

Literatur

- Becker, A., Klöcking, B., Lahmer, W., Pfützner, B., 2002. The Hydrological Modelling System ArcEGMO. In: Mathematical Models of Large Watershed Hydrology (Eds.: Singh, V.P. and Frevert, D.K.). Water Resources Publications, Littleton/Colorado, 321-384. ISBN 1-887201-34.
- Boy, S., Haefner, F., 1998. Dokumentation zum Teilprogramm MT3DFL des Strömungs- und Stofftransport-Simulationsmodells MODFLOW, MT3D - Lösung des Transportproblems durch FRONT-LIMITATION. - Unveröff. Bericht, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg. 1998.
- Dilbat, M., Knöller, K., Ihling, H., 2011. Hydrochemische und isopenhydrologische Untersuchungen zur Klärung der Ursachen der hohen Nitratbelastung des Grundwassers im Einzugsgebiet der Wasserfassung Jahnaue 2. „Grundwasser – Altlasten – Boden aktuell“, Schriftenreihe des LfULG, Heft 45/2011, 38-51.
- Dilbat, M., Ihling, H., 2014. Nitratbelastung des Grundwassers im Einzugsgebiet der Wasserfassung Diehsa im Landkreis Görlitz, „Grundwasser – Altlasten – Boden aktuell“, Schriftenreihe des LfULG, Heft 38/2014, 5-17.
- Hülsbergen, K.J., 2003. Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Habilitation. shaker Verlag, Aachen.
- Ihling, H.; Knöller, K., Dilbat, M., 1999. Hydrochemische und isopenhydrologische Untersuchungen zur Klärung der Ursachen der hohen Nitratbelastung des Grundwassers im Einzugsgebiet der Wasserfassung Diehsa / Niederschlesischer Oberlausitzkreis. Grundwasser – Altlasten – aktuell. LfULG. 1-16.
- Klöcking, B. (Hrsg.), 2009. Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebietsmodells ArcEGMO, 53 S., [online verfügbar: <http://www.arcegmo.de/PSCN.pdf>].
- Klöcking, B., Haferkorn, U., Reinicke, F., Ihling, H., 2013. Abschätzung künftiger Entwicklungen des Grundwassers hinsichtlich Menge und Beschaffenheit - Modellierung und Lysimeterbeobachtungen, 15. Gumpensteiner Lysimetertagung, ISBN-13: 978-3-902559-90-6.
- LfUG, 2001. Bodenmonitoring in Sachsen, Materialien zum Bodenschutz 2001, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden, S. 58-72.
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W., 1988. MODFLOW - A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. - U.S. Geological Survey.
- Pfützner, B. (Hrsg.), 2002. Dokumentation ArcEGMO. Online 2002. ISBN 3-00-011190-5.
- Pfützner, B., Klöcking, B., Knab, G., Wenske, D., Rost, A., Wagner, B., Steininger, M., Ihling, H., Kuhn, K., 2011. Konzept zur Erstellung eines gekoppelten Stofftransportmodells als Prognoseinstrumentarium für die Beschaffenheitsentwicklung im Grundwasser, Schriftenreihe des LfULG, Heft 41/2011 (<http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/52971.pdf>).

- Reinicke, F., Wurbs, D., 2012. Nitratausträge landwirtschaftlich genutzter Flächen, Schriftenreihe des LfULG (Hrsg), Heft 40/2012.
- Rost, A., Wenske, D., 2015. Cadshell - Ein grafischer Post- und Präprozessor für MODFLOW und MT3D-FL- Programmbeschreibung: IHU-GmbH Nordhausen
- Zheng, C., 1993. A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems. - S.S.Papadopoulos & Associates Inc., Maryland.