

Gekoppelte Modellierung von ungesättigtem und gesättigtem Wasserfluss und Nitrattransport im Westlichen Leibnitzer Feld

Gernot Klammler^{1*}, Hans Kupfersberger¹, Gerhard Rock¹ und Johann Fank¹

Zusammenfassung

Das Westliche Leibnitzer Feld, Österreich, stellt eine bedeutende Ressource für die Trinkwasserversorgung von mehr als 100.000 Einwohnern dar, bietet jedoch auch beste landwirtschaftliche Anbaubedingungen. Diese Doppelfunktion bringt einen Nutzungskonflikt mit sich, der zum Teil stark durch diffuse Stickstoffeinträge geprägt ist und für eine nachhaltige Koexistenz harmonisiert werden muss. Auf der regionalen Skala sind numerische Simulationsmodelle geeignete Werkzeuge, um das Verhalten von Grundwasserqualität und -quantität abzuschätzen und grundwasserschonende Maßnahmen zu definieren (Decision-Support-Systeme). Während 3-dimensionale und iterativ gekoppelte Modelle Rückkopplungen zwischen der gesättigten und ungesättigten Zone berücksichtigen, erlauben sandige Böden und Grundwasserspiegel unterhalb der Wurzelzone eine sequentielle Kopplung des Bodenwasserhaushaltsmodells *SIMWASER/STOTRASIM* mit dem Grundwasserströmungs- und Transportmodell *FEFLOW*. Unter Berücksichtigung von Stickstoffeinträgen aus der Landwirtschaft, Siedlungsflächen, Wasserflächen, Wald und Rekultivierungsflächen wird die Grundwasserströmung zwar zufriedenstellend nachgebildet, die Nitratverteilung jedoch nahezu durchgehend unterschätzt. Daher hat man in weiteren Szenarien höhere Stickstoffinputs angenommen, um das gemessene Niveau der Nitratkonzentration zu erreichen. Die vorläufigen Ergebnisse zeigen, dass die Stickstoffauswaschung und die Nitratkonzentration im Grundwasser stark von den aufgebracht Stickstoffmengen an der Oberfläche abhängen.

Schlagwörter: regionale Modellierung, Landwirtschaft, Grundwasserneubildung, Stickstoffaustrag, numerisches Simulationsmodell

Summary

The aquifer Westliches Leibnitzer Feld, Austria, is a significant resource for regional and supraregional drinking water supply for more than 100,000 inhabitants, but the region also provides excellent agricultural conditions. This dual use implicates conflicts (e.g. non-point source groundwater pollution by nitrogen leaching), which have to be harmonized for a sustainable coexistence. At the aquifer scale, numerical models are state-of-the-art tools to simulate the behavior of groundwater quantity and quality and serve as decision support system for implementing groundwater protecting measures. While fully and iteratively coupled simulation models consider feedback between the saturated and unsaturated zone, sandy soil conditions and groundwater depths beneath the root zone allow the use of a unidirectional sequential coupling of the unsaturated water flow and nitrate transport model *SIMWASER/STOTRASIM* with *FEFLOW* for the investigation area. Considering separated inputs of water and nitrogen into groundwater out of surface water bodies, agricultural, residential, recultivation and forested areas, first simulation results match observed groundwater tables, but underestimate nitrate concentrations in general. Thus, multiple scenarios assuming higher nitrogen inputs at the surface are simulated to converge with measured nitrate concentrations. Preliminary results indicate that nitrogen input into the groundwater is strongly dominated by applied nitrogen rates at the surface.

Keywords: regional modeling, agriculture, groundwater recharge, nitrogen leaching, numerical simulation model

Einleitung

Das Westliche Leibnitzer Feld, Österreich, beinhaltet Trinkwasservorkommen für die regionale und überregionale Versorgung von mehr als 100.000 Einwohnern und bietet zugleich auch hervorragende Bedingungen für die Landwirtschaft. Daraus resultiert ein Ressourcenkonflikt zwischen Land- und Trinkwasserwirtschaft, welcher für einen nachhaltigen Nutzen dieser beiden harmonisiert werden muss. Zur Quantifizierung diffuser Stickstoffeinträge in das Grundwasser und zur Ableitung von geeigneten

Maßnahmen zur Reduktion solcher Einträge muss daher der gesamte Aquifer betrachtet werden.

Grundwasserquantität und -qualität werden zwar auf regionaler Skala zwar an mehreren Beobachtungspegeln gemessen, können jedoch nicht gänzlich flächenhaft erfasst werden. Für solche großräumige Skalen (z.B. den Grundwasserkörper Westliches Leibnitzer Feld) bieten numerische Simulationsmodelle „State-of-the-Art“-Methoden, um das Verhalten von Grundwasserquantität und -qualität zu beschreiben und können als Decision Support System

¹ Joanneum Research Graz, RESOURCES - Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit, Elisabethstraße 18/II, A-8010 GRAZ

* Ansprechpartner: Mag. Gernot Klammler, gernot.klammler@joanneum.at



zur Ableitung von grundwasserschonenden Bewirtschaftungsmaßnahmen verwendet werden. Dafür ist es jedoch von entscheidender Bedeutung, dass die Grundwasserneubildung (ALVAREZ et al. 2012) sowie die eingebrachte Stickstofffracht in zeitlicher als auch in räumlicher Hinsicht realistisch angenommen ist. Dreidimensionale Simulationsmodelle berücksichtigen zwar gleichzeitig den ungesättigten sowie gesättigten Wasserfluss (z.B. *ParFlow*, KOLLET und MAXWELL 2006); *HydroGeoSphere*, THERRIEN et al. 2012), haben dadurch jedoch vor allem auf der regionalen Skala einen enormen Rechenaufwand zu bewerkstelligen und sind des Weiteren nicht auf eine Anwendung für landwirtschaftliche Flächen spezialisiert. Es wird daher eine Methode beschrieben, in der das Bodenwasserhaushalts- und Stickstofftransportmodell *SIMWASER/STOTRASIM* (STENITZER 1988; FEICHTINGER 1998) mit dem Grundwasserströmungs- und Transportmodell *FEFLOW* (DIERSCH 2009) für die gesättigte Zone sequentiell gekoppelt wird. Dieser Ansatz ist zulässig, wenn – so wie im Fall des Untersuchungsgebietes Westliches Leibnitzer Feld – keine Rückkopplungseffekte der gesättigten Zone auf die ungesättigte Zone (z.B. kapillarer Grundwasseraufstieg) zu erwarten sind.

Aufgrund der Tatsache, dass das Untersuchungsgebiet zwar Großteils landwirtschaftlich genutzt, jedoch aber auch Siedlungsgebiet, Wald, offene Wasserflächen und Rekultivierungsflächen vorherrschend sind, kommen für diese verschiedenen Landnutzungen entsprechend geeignete Methoden zur Quantifizierung von Grundwasserneubildung und Stickstoffaustrag zum Einsatz.

Material und Methoden

Untersuchungsgebiet

Das Westliche Leibnitzer Feld (*Abbildung 1*) liegt ca. 30 km südlich von Graz, Österreich, und hat eine Größe von 44 km². Die Grenze des Untersuchungsgebietes wird im Osten und Süden von der Mur, im Westen von Laßnitz und Sulm sowie im Norden vom anstehenden Wildoner Buchkogel gebildet. Der Aquifer ist vorwiegend mit quartären Sanden und Schotter, welche im Schnitt 8 m mächtig sind und auf tertiären, schlecht Wasser leitenden Sedimenten aufliegen, gefüllt (FANK 1999). Die Grundwasserneubildung ist hauptsächlich durch infiltrierende Niederschläge (mittlerer Jährlicher Niederschlag: 908 mm/a) geprägt. Des Weiteren wird das Grundwasser auch durch In- und Exfiltration von Oberflächengewässern (z.B. Mur, Tillmitscher Teiche) quantitativ sowie qualitativ durch Verdünnung der Nitratkonzentration beeinflusst.

Abbildung 1 zeigt auch die räumliche Verteilung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet: 54% Landwirtschaft, 28% Siedlungsgebiet, 14% Wald, 3% Oberflächengewässer und 1% Rekultivierungsflächen von Trockenbaggerungen. Weiters befinden sich 11 öffentliche Trinkwasserbrunnen mit einem Gesamtkonsens von 140 l/s sowie mehrere hundert private Hausbrunnen im WLF. Zum Schutz der Trinkwasserressourcen wurde ein Schongebiet eingerichtet, in welchem durch entsprechende Auflagen zur Sicherung der Trinkwasserqualität beigetragen werden soll.

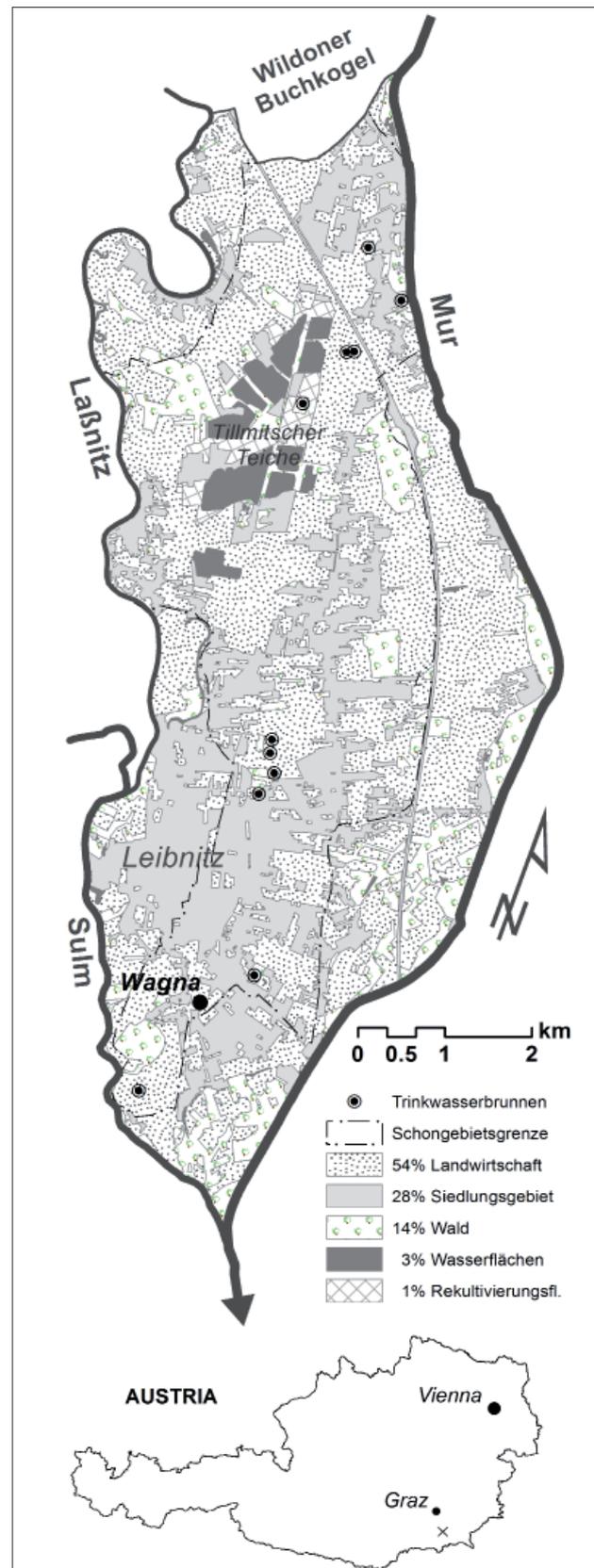


Abbildung 1: Lage des Westlichen Leibnitzer Feldes in Österreich (x) sowie die räumliche Verteilung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet.

Modellierung von ungesättigtem Wasser- und Stickstofffluss

Sickerwasser und Stickstoffauswaschung in das Grundwasser sind stark von der Landnutzung der darüber liegenden Erdoberfläche geprägt. Daher wird das Untersuchungsgebiet in der Simulation für die folgenden verschiedenen Landnutzungen separat behandelt: Wald, Wasserflächen, Landwirtschaft, Siedlungsflächen sowie Rekultivierungsflächen. Die notwendigen Inputparameter hinsichtlich Wetter und Boden für die Modellierung kommen von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) bzw. stammen aus der Österreichischen Bodenkartierung (BMLF 1974). Die nasse atmosphärische N Deposition ist nach SCHNEIDER (1998) mit 4-8 kg N/ha/a festgelegt. Um auch einen gewissen Teil an trockener N Deposition zu berücksichtigen, wurde für die Simulation ein Stickstoffinput von 10 kg N/ha/a angenommen.

Wasser und Waldflächen

Grundwasserneubildung für Wasser- und Waldflächen wird über die klimatische Wasserbilanz $G_{WNB} = N - ET_0 - \Delta S$ (Grundwasserneubildung = Niederschlag – Verdunstung – Speicheränderung) berechnet. Während ΔS für Wasserflächen gleich Null entspricht, wird es bei Waldflächen über ein zusätzliches Wasserbilanzmodell, welches den Wasserentzug über die Wurzeln und Pflanzen (Transpiration) sowie Verdunstung über die Bodenoberfläche (Evaporation) berücksichtigt.

Stickstoffeinträge für Waldflächen ergeben sich aus der atmosphärischen Deposition (10 kg N/ha/a). In Oberflächengewässer wird zwar auch Stickstoff eingetragen, dieser wird jedoch wie es am Beispiel der Tillmitscher Teiche der Fall ist (FANK et al. 2003) durch Makrophyten abgebaut und daher als Null angenommen.

Landwirtschaftliche Flächen

Die Modellierung von Grundwasserneubildung und Stickstoffaustrag von landwirtschaftlich genutzten Flächen erfolgt mit dem Modellverbund *SIMWASER/STOTRASIM*. Während *SIMWASER* (STENITZER 1988) den eindimensionalen, vertikalen Wasserfluss sowie das Pflanzenwachstum berechnet, wird mit Hilfe von *STOTRASIM* (FEICHTINGER 1998) der Stickstoffkreislauf und die darin enthaltene Stickstoffauswaschung in das Grundwasser

simuliert. Das Modell wurde mit Hilfe von Lysimeterdaten der Forschungsstation Wagna kalibriert (KLAMMLER et al. 2012b).

Auf regionaler Skala wird *SIMWASER/STOTRASIM* für sogenannte Hydrotope, das sind Flächen mit gleichen Eigenschaften hinsichtlich Boden, Wetter und Landnutzung, angewendet. Während Wetter- und Bodendaten über die ZAMG bzw. die Österreichische Bodenkartierung erhältlich sind, ist die genaue räumliche Verteilung der landwirtschaftlichen Kulturen nicht detailliert, sondern nur als Prozentsätze der Kulturen auf Katastralgemeindenebene verfügbar. Aus diesem Grund wurde ein stochastisches Fruchtfolge-Rotationstool entwickelt, welches ortstypische Fruchtfolgen berücksichtigt und über Optimierungsverfahren diese Informationslücke sehr gut kompensieren kann (KLAMMLER et al. 2012a). Diese repräsentativen Fruchtfolgen sowie Art und Zeitpunkt von Bewirtschaftungsmaßnahmen wurden mit Unterstützung der Landwirtschaftlichen Umweltberatung Steiermark erstellt. Die Annahmen zu den aufgebrachten Düngermengen basieren auf den gesetzlichen Vorschriften (Aktionsprogramm Nitrat, BMLF 2008; Schongebietsverordnung, SGV 2005) und sind in *Tabelle 1* und *2* dargestellt. Die Schongebietsverordnung (SGV 2005) beinhaltet auch Einschränkungen der maximalen Düngermenge basierend auf der Bodenart. Daher ist die landwirtschaftlich genutzte Fläche in vier Bewirtschaftungsklassen eingeteilt: BK1 innerhalb des Schongebiets mit Bodenart 1 (seichte, sandige Böden), BK2 innerhalb Schongebiet mit Bodenart 2 (mittel- bis tiefgründige lehmige Sande und sandige Lehme), BK3 innerhalb Schongebiet mit Bodenart 3 (Ton- und Lehmböden) und BK4 außerhalb Schongebiet (unabhängig von der Bodenart).

Siedlungsflächen

Bei Siedlungsflächen spielt der Grad der Versiegelung eine entscheidende Rolle, da darauf fallender Niederschlag meist in Sickerschächten direkt dem Grundwasser zugeführt wird. Die nicht versiegelte Fläche wird mit *SIMWASER/STOTRASIM* (Grasbewuchs; zwischen März und Oktober alle 2 Wochen gemäht) modelliert.

Rekultivierungsflächen

Rekultivierungsflächen werden mit *SIMWASER/STOTRASIM* unter der Annahme eines geringmächtigen Bodens

Tabelle 1: Maximal erlaubte N-Düngemengen für die Hauptkulturen im Westlichen Leibnitzer Feld nach Aktionsprogramm Nitrat 2008 (BMLF 2008) und für Ölkürbis auf Basis von Empfehlungen der Landwirtschaftlichen Umweltberatung Steiermark.

Kultur	Ertragslage "niedrig"		Ertragslage "mittel"		Ertragslage "hoch 1"		Ertragslage "hoch 2"		Ertragslage "hoch 3"	
	Ertrag [t/ha]	max. N [kg/ha]	Ertrag [t/ha]	max. N [kg/ha]	Ertrag [t/ha]	max. N [kg/ha]	Ertrag [t/ha]	max. N [kg/ha]	Ertrag [t/ha]	max. N [kg/ha]
Körnermais	< 6.0	115	6.0-10.0	155	10.0-11.5	180	11.5-13.0	195	> 13.0	210
Silomais	< 40.0	130	40.0-50.0	175	50.0-57.5	210	57.5-65.0	225	> 65.0	240
Sommergerste	< 3.5	80	3.5-5.5	110	5.5-7.0	130	7.0-8.5	140	> 8.5	150
Wintergerste	< 3.5	95	3.5-6.0	130	6.0-7.5	155	7.5-9.0	170	> 9.0	180
Winterraps	< 2.0	115	2.0-3.0	155	3.0-4.0	180	4.0-5.0	195	> 5.0	210
Winterweizen	< 3.5	105	3.5-6.0	145	6.0-7.5	170	7.5-9.0	180	> 9.0	195
Ölkürbis	-	-	< 0.4	65	0.4-0.7	80	> 0.7	100	-	-

Tabelle 2: Übersicht über die verwendete landwirtschaftliche Bewirtschaftung zur Modellierung von Grundwasserneubildung und Stickstoffaustrag mit SIMWASER/STOTRASIM.

	Periode 1										Periode 2				Periode 3			
	1987	1988	1989	1990	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
BK 1	Düngermenge ^a :		basierend auf Ertragslage "mittel"								Dünger ^a :	"mittel"		Dünger:	"mittel" + BA 1			
	Zwischenfrucht ^b :		nach Kürbis								Zw.frucht. ^b :	immer		Zw.frucht.:	immer			
	Bodenbearbeitung:		Pflug (25 cm Tiefe)								Bodenb.:	Grubber (10 cm)		Bodenb.:	Grubber (10 cm)			
BK 2											Dünger:	"hoch 1"		Dünger:	"hoch 1" + BA 2			
											Zw.frucht.:	immer		Zw.frucht.:	immer			
											Bodenb.:	Grubber (15 cm)		Bodenb.:	Grubber (15 cm)			
BK 3	Düngermenge:		basierend auf Ertragslage "hoch 1"								Dünger:	"hoch 1"		Dünger:	"hoch 1" + BA 3			
	Zwischenfrucht:		nach Kürbis								Zw.frucht.:	immer		Zw.frucht.:	immer			
	Bodenbearbeitung:		Pflug (25 cm Tiefe)								Bodenb.:	Grubber (20 cm)		Bodenb.:	Grubber (20 cm)			
BK 4											Dünger:	"hoch 1"		Dünger:	"hoch 1"			
											Zw.frucht.:	nach Kürbis		Zw.frucht.:	nach Kürbis			
											Bodenb.:	Pflug (25 cm)		Bodenb.:	Pflug (25 cm)			

^a) Ertragslage "mittel" und "hoch 1" nach Aktionsprogramm Nitrat 2008

^b) Zwischenfrucht: Raygras nach Kürbis, Grünschnittroggen nach Mais, Sojabohne, Winterraps und Perko nach Winterweizen, Wintergerste

BK: Bewirtschaftungsklasse (1...innerhalb Schongebiet (SG) mit BA 1; 2...innerhalb SG mit BA 2; 3...innerhalb SG mit BA 3; 4...außerhalb SG)

BA 1,2,3: Einschränkungen für Bodenarten (BA) 1, 2 und 3 basierend auf der Schongebietsverordnung (SGV 2005)

Tabelle 3: Mittlere Jahreswerte für Grundwasserneubildung, Stickstoffaustrag und Nitratkonzentration im Sickerwasser nach Landnutzung.

Landnutzung	GWNB [mm/a]	NO ₃ -N-Ausw. [kg/ha/a]	cNO ₃ [mg/l]
Landwirtschaft	345	57	73
Siedlungsgebiet	629	6	4
Wald	214	10 ^a	21
Wasserflächen	200	0 ^b	0
Rekultivierungsfl.	548	8	6
WLF ^c	407	33	36

^a) N-Austrag von 10 kg/ha/a basierend auf atmosphärischer N-Deposition angenommen.

^b) N-Austrag 0 kg/ha/a angenommen wegen N-Reduktion durch Pflanzen.

^c) WLF...flächengewichtetes Mittel für das Westliche Leibnitzer Feld

mit 10 cm Tiefe unter Grasbewuchs (1 Schnitt pro Jahr; Mulchbetrieb; kein Düngereinsatz) berechnet.

Modellierung von gesättigtem Wasserfluss und Nitratverteilung

Die Modellierung von gesättigtem Wasserfluss und der Nitratverteilung im Grundwasser erfolgt mit dem sequentiell an SIMWASER/STOTRASIM gekoppelten Modell FEFLOW (DIERSCH 2009). Das heißt, die Ergebnisse aus der ungesättigten Zone werden als obere Randbedingung der gesättigten Zone Modellierung herangezogen. Die seitlichen Randbedingungen sind im Osten, Süden und Westen als Leakage-Randbedingung ausgeführt, wo der Wasserstand der Flüsse als Inputgröße vorgegeben werden muss. Die Nitratkonzentration in den Flüssen, die bei einer Infiltration in den Grundwasserkörper eine entscheidende Rolle spielt, ist auf Basis von Messungen mit 2 mg/l angenommen. Der nördliche Rand ist als Flow-Randbedingung definiert, da durch infiltrierende Niederschläge vom

Wildoner Buchkogel her ein gewisser unterirdischer Wasserfluss erwartet wird. Dieser Wasserfluss sowie die darin enthaltene Nitratkonzentration werden über eine separate Simulation mit SIMWASER/STOTRASIM abgeschätzt, indem man den einströmenden Wasserfluss der berechneten Grundwasserneubildung gleichsetzt. Des Weiteren sind alle mengenmäßig bedeutenden Wasserentnahmen (z.B. Trinkwasserbrunnen) im Modell berücksichtigt. Die Mächtigkeit des Aquifers – und damit die Lage des Grundwasserstauers als untere Randbedingung – wurde basierend auf mehreren Bohrlochanalysen von einem Geologen definiert. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde zwischen $1 \cdot 10^{-4}$ – $7 \cdot 10^{-3}$ m/s, das dränbare Porenvolumen zwischen 8 und 14% angenommen.

Ergebnisse

Tabelle 3 zeigt die durchschnittlichen Jahreswerte für Grundwasserneubildung, Stickstoffaustrag und Nitratkonzentration im Sickerwasser unterschieden nach Landnutzungsart. Es ist ersichtlich, dass die höchsten Grundwasserneubildungsraten mit über 600 mm/a in Siedlungsgebieten vorkommen, wo in der Modellannahme Wasser von versiegelten Flächen über Sickerbrunnen direkt dem Grundwasser zugeführt werden. Mit knapp unter 600 mm/a Grundwasserneubildung ist auf Rekultivierungsflächen mit einer nur geringmächtigen Bodenaufgabe zu rechnen. Geringe Neubildungen von ca. 200 mm/a sind bedingt durch hohe Verdunstungsraten für offene Wasserflächen und Waldgebiete zu erwarten. Landwirtschaftliche Flächen haben eine mittlere Grundwasserneubildung von 345 mm/a. Während die Stickstoffeinträge aus Siedlungsgebieten, Wald, Wasserflächen und Rekultivierungsfläche eher gering sind, ist die Stickstoffauswaschung von landwirtschaftlichen Flächen mit 57 kg N/ha/a am höchsten.

Abbildung 2 zeigt das Ergebnis der Grundwasserströmungsmodellierung für das Westliche Leibnitzer Feld. Auf der linken Seite sind die Grundwasserisolinien für einen

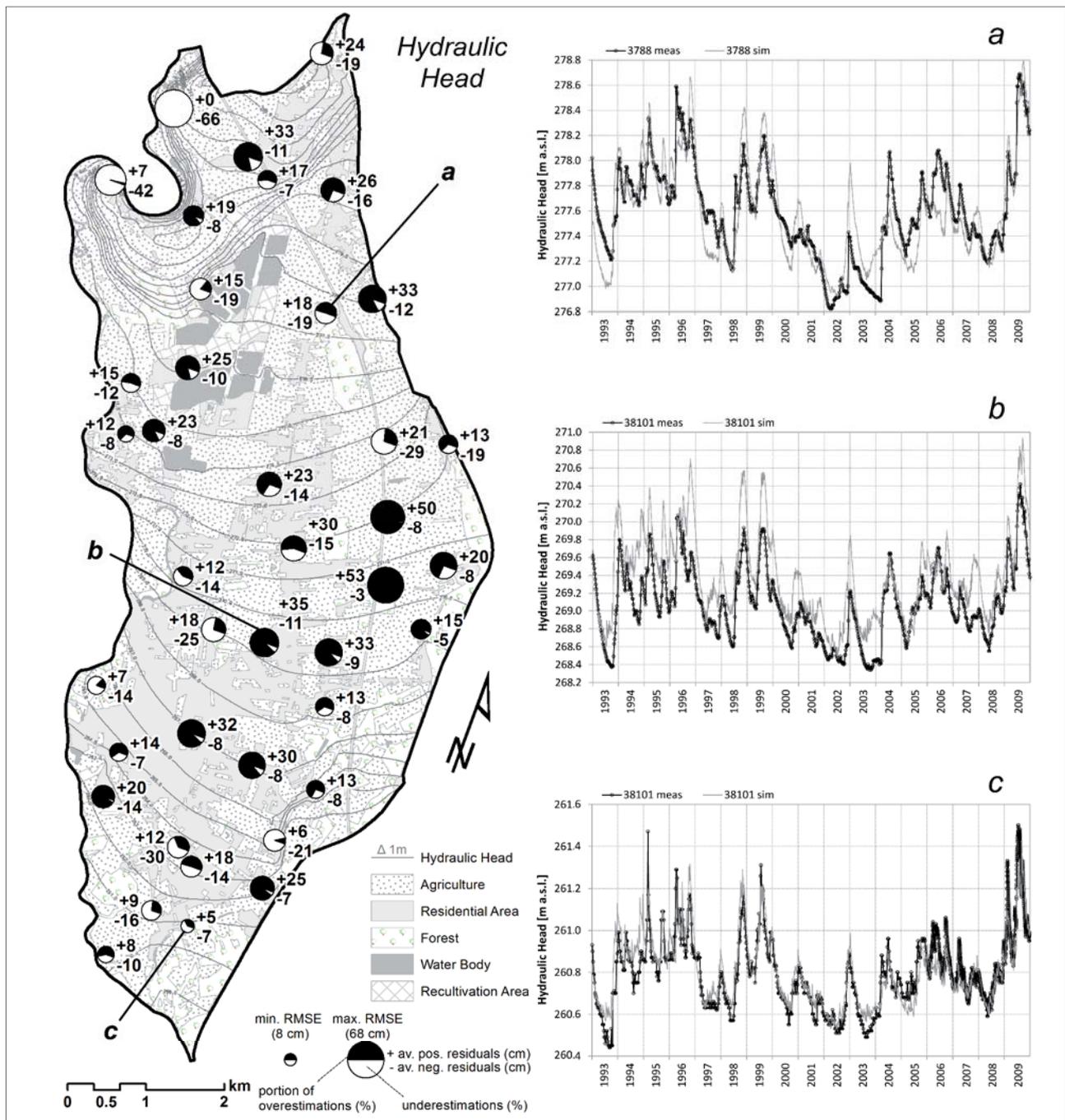


Abbildung 2: Simulierte mittlere Grundwasserspiegellage, Root Mean Square Error (RMSE), durchschnittliche positive/negative Residuen und zeitlicher Anteil an Über- bzw. Unterschätzungen (links) und Ganglinien der simulierten und gemessenen Grundwasserstände für ausgewählte Beobachtungspiegel (rechts).

mittleren Zustand sowie statistische Angaben zur Güte der Simulation angeführt. Des Weiteren sind für drei ausgewählte Beobachtungspiegel die Zeitreihen von gemessenen und simulierten Grundwasserständen auf der rechten Seite der Abbildung gegenübergestellt. Der Beobachtungspiegel (a) repräsentiert einen Ackerstandort und ist sehr stark von der Mur beeinflusst, (b) wird von Ackerflächen her ohne Einfluss von Oberflächengewässern angeströmt und (c) ist von Siedlungsgebiet beeinflusst. Es ist ersichtlich, dass das generelle Verhalten des Grundwasserspiegels über die Zeit

sehr gut simuliert wird. Ganz besonders der Beobachtungspiegel (c), der stark von der Berechnungsmethode im Siedlungsgebiet geprägt ist, wird hervorragend nachgebildet.

Die räumliche Verteilung der Nitratkonzentration sowie der zeitliche Verlauf für die drei Beobachtungspiegel sind in *Abbildung 3* dargestellt. Man kann erkennen, dass die Simulation der Nitratkonzentrationen fast ausschließlich unter den gemessenen Konzentrationen liegt. Ausnahmen bilden hier von Oberflächengewässern beeinflusste Standorte

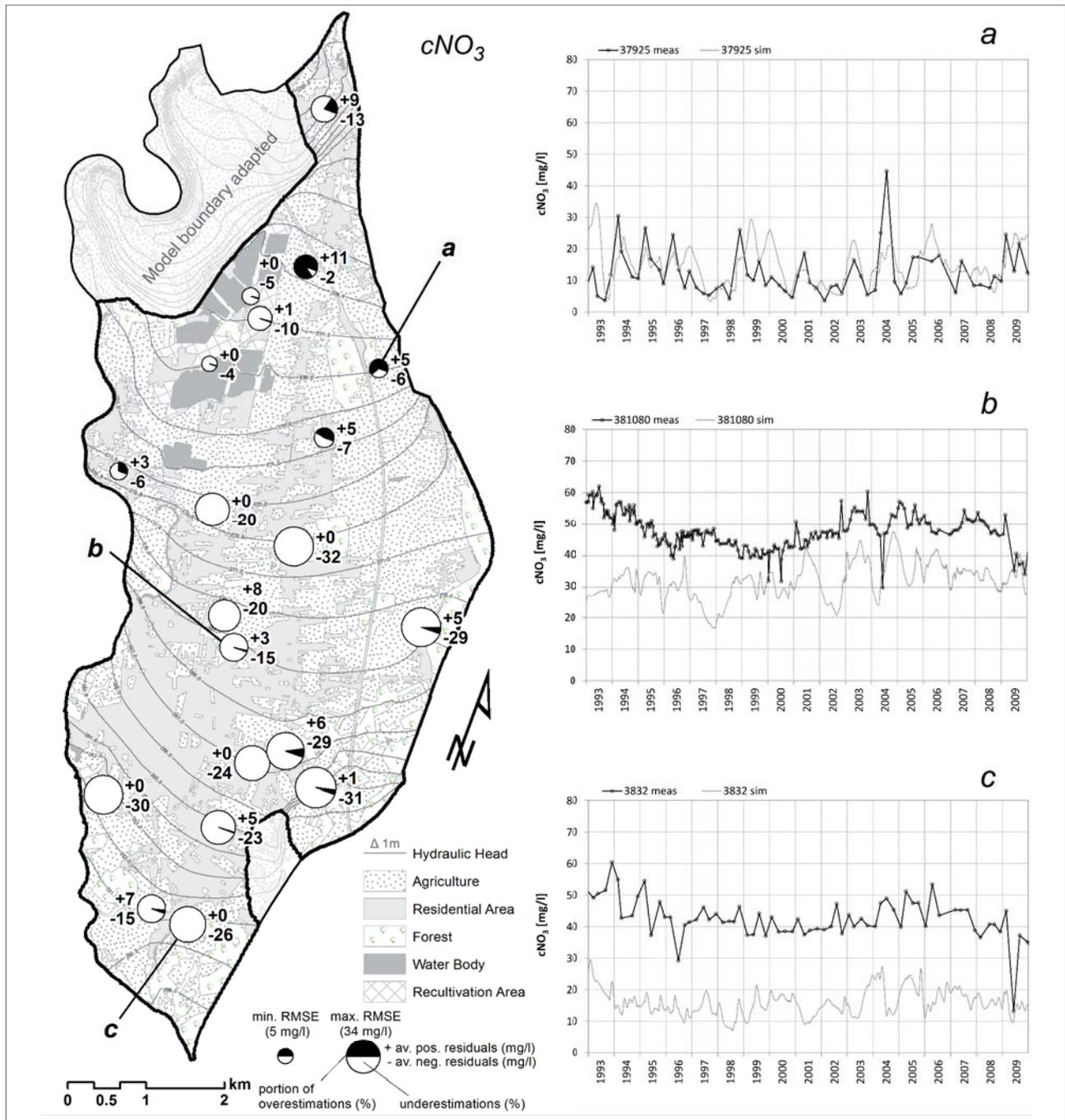


Abbildung 3: Root Mean Square Error (RMSE), durchschnittliche positive/negative Residuen und zeitlicher Anteil an Über- bzw. Unterschätzungen für die Nitratkonzentrationen (links) und Ganglinien der simulierten und gemessenen Nitratkonzentrationen für ausgewählte Beobachtungspegel (rechts).

wie (a), wo die Nitratkonzentrationen generell niedrig sind und auch gut nachgebildet werden.

Diskussion

Eine mittlere Simulierte Grundwasserneubildung von 345 mm/a verglichen mit Lysimetermessungen von 318 mm/a in Wagna, Österreich, erscheint sehr plausibel und bildet eine gute Grundlage für die darauf basierende Grundwasserströmungs- und Stickstofftransportmodellierung. Während

die Grundwasserströmungsmodellierung zufriedenstellende Ergebnisse liefert, liegen die Simulationsergebnisse für Nitratkonzentrationen teilweise stark unter den gemessenen Werten. Ein wesentlicher Punkt in diesem Zusammenhang ist die Menge des Stickstoffeintrags an der Erdoberfläche, welche als zu gering angenommen sein könnte. Es wurden daher folgende weitere Simulationsvarianten mit höheren Stickstoffinputs an der Oberfläche gerechnet:

- Variante 2: Annahme, dass die Grünflächen in Siedlungsgebieten mit 3 x 45 kg N/ha/a gedüngt werden

Tabelle 4: Erhöhung der Stickstoffinputs durch aufgebrauchte Dünger für Variante 3.

Kultur	N-Erhöhung [kg/ha/a]		
	Periode 1a 1987-1992	Periode 1b 1993-1998	Periode 1c 1999-2002
Körnermais	+ 70	+ 30 ^c	+ 15 ^b
Silomais	+ 50	+ 30 ^c	+ 15 ^b
Ölkürbis	+ 20 ^b	+ 20 ^b	+ 0 ^a

^a) entspricht Ertragslage "hoch 1" nach Aktionsprogramm-Nitrat

^b) entspricht Ertragslage "hoch 2" nach Aktionsprogramm-Nitrat

^c) entspricht Ertragslage "hoch 3" nach Aktionsprogramm-Nitrat

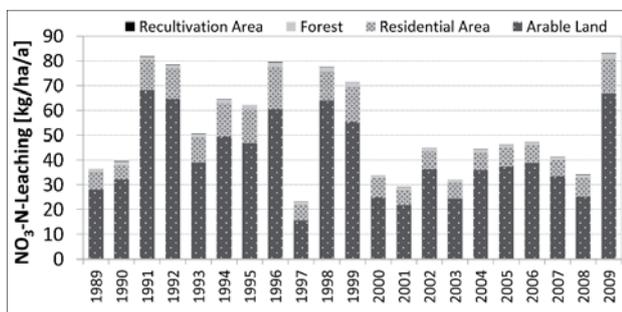


Abbildung 4: Jahressummen der simulierten Stickstoffauswaschung im Westlichen Leibnitzer Feld nach Landnutzung.

(Düngemenge laut Packungsbeschreibung verschiedener Anbieter)

- Variante 3: Annahme von höheren Düngemengen für Mais und Kürbis in Simulationsperiode 1 (1987-2002) dargestellt in *Tabelle 4*
- Variante 4: Annahme einer höheren atmosphärischen Deposition von 30 kg N/ha/a
- Variante 5: Annahme der Kombination aus Variante 2, 3 und 4

Erst die Kombination aus Variante 2, 3 und 4 nähert die simulierte Nitratkonzentration an das gemessene Niveau an. Während sich bei der Grundwasserneubildung zwischen den Varianten nichts Wesentliches ändert, bringt Variante 5 eine Erhöhung des Stickstoffaustrages von ungefähr 20 kg N/ha/a von landwirtschaftlichen Flächen und ca. 30 kg N/ha/a von Siedlungsflächen mit sich. Die durchschnittliche Stickstoffauswaschung über die Zeit in Variante 5 ist in *Abbildung 4* gezeigt. Die Auswirkung dieser Erhöhung auf die simulierte Nitratkonzentration ist in *Abbildung 5* dargestellt. Die räumliche Verteilung der Nitratkonzentration ist eine Momentangabe und bezieht sich auf den 1.6.2008, wo in den drei davorliegenden Monaten die Niederschlagsverteilung der mittleren langjährigen Niederschlagsverteilung stark ähnlich ist. Diese Grafik bringt auch den Einfluss der Grundwasserströmung auf die Nitratverteilung sehr gut zum Ausdruck (z.B. die Nitrat reduzierende Wirkung der Tillmischer Teiche und deren Auswirkung in Strömungsrichtung). Grundsätzlich kann gesagt werden, dass Variante 5 viel besser an die gemessenen Werte herankommt. Für die Zeitreihe (a) ändert sich jedoch nicht wesentlich viel. Dieser Standort weist trotz landwirtschaftlicher Nutzung und Düngererhöhung in Variante 5 generell eine eher niedere Nitratkonzentration auf, da das Grundwasser dort durch

infiltrierendes Murwasser verdünnt wird. Für Beobachtungspegel (b) der auf einem Ackerstandort steht und nicht von Oberflächengewässern beeinflusst wird, sind jedoch die Erhöhungen der Stickstoffinputs in den Boden sehr deutlich erkennbar und lässt die mittlere Nitratkonzentration dort um 15 mg/l steigen. Noch stärker ist der Anstieg in (c), wo sich die Düngeraufbringung in Siedlungsgebieten stark auswirkt und die Nitratkonzentrationen annähernd auf das gemessene Niveau angehoben werden.

Schlussfolgerungen

Die sequentielle Kopplung des ungesättigte Zone Modelles *SIMWASER/STOTRASIM* mit dem Grundwasserströmungs- und Stickstofftransportmodelles *FEFLOW* kann als geeignete Methode für die Modellierung des Westlichen Leibnitzer Feldes angesehen werden. Vor allem die Ergebnisse des gesättigten Wasserflusses belegen, dass Rückkopplungseffekte der gesättigten auf die ungesättigte Zone (z.B. kapillarer Aufstieg in die Wurzelzone) vernachlässigt werden können und daher ein sequentieller Ansatz ausreichend ist. Die stochastische Methode für den ungesättigten Wasser- und Stickstofffluss landwirtschaftlicher Flächen erlaubt es auch, die Methode relativ einfach auf andere Untersuchungsgebiete zu übertragen (sofern eine sequentielle Kopplung für dieses Gebiet zulässig ist).

Da Grundwasserneubildung und Stickstoffaustrag stark von der darüber liegenden Landnutzung abhängen, werden die unterschiedlichen Landnutzungen im Untersuchungsgebiet mit entsprechend unterschiedlichen Methoden modelliert. Daher kann die räumliche Verteilung von Wasser- und Stickstoffimport in der Simulation sehr detailliert berücksichtigt werden.

Obwohl die angebauten Kulturen mit Hilfe des stochastischen Ansatzes so gut wie möglich wiedergegeben werden, bleiben gewisse Unsicherheiten hinsichtlich der Bewirtschaftung bestehen. So sind z.B. die Zeitpunkte und Mengen der Düngegaben sowie Art und Tiefe der Bodenbearbeitung auf der regionalen Skala nicht bekannt, haben jedoch großen Einfluss auf die Stickstoffauswaschung. Des Weiteren ist auch der genaue Stickstoffeintrag aus der atmosphärischen Deposition nicht bekannt für das Untersuchungsgebiet. Es wird jedoch zukünftig Messungen geben, welche die atmosphärische Stickstoffdeposition für den Standort Wagna bestimmt. Außerdem wird man zukünftig versuchen, die Unsicherheiten der angenommenen Stickstoffinputs an der Erdoberfläche zu minimieren, um somit die Simulation der Nitratkonzentrationen im Grundwasser weiter zu verbessern. Unabhängig von diesen zukünftig geplanten Arbeiten kann jetzt jedoch schon gesagt werden, dass der Stickstoffinput an der Erdoberfläche eine wesentliche Einflussgröße der Nitratkonzentration im Sickerwasser ist und man daher eine Möglichkeit hat, durch Reduktion dieses Inputs bei Bedarf lenkend in die Verbesserung der Grundwasserqualität einzugreifen.

Danksagung

The work was carried out as part of the GENESIS project on groundwater systems (<http://www.thegenesisproject.eu>) financed by the European Commission 7FP contract 226536.

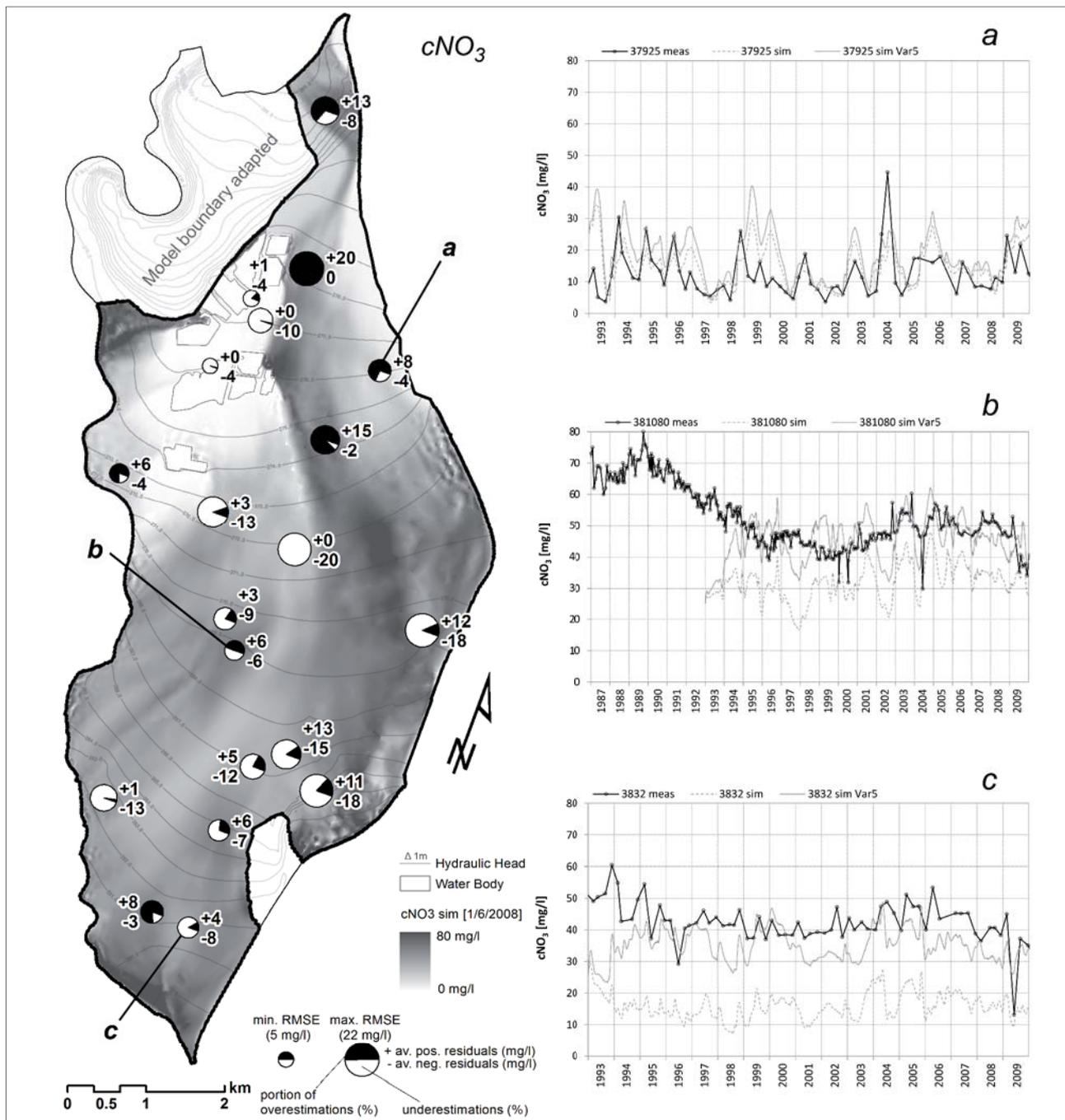


Abbildung 5: Root Mean Square Error (RMSE), durchschnittliche positive/negative Residuen und zeitlicher Anteil an Über- bzw. Unterschätzungen für die Nitratkonzentrationen (links) und Ganglinien der simulierten und gemessenen Nitratkonzentrationen für ausgewählte Beobachtungspiegel (rechts).

Literatur

- ALVAREZ, M.P., M.M. TROVATTO, M.A. HERNÁNDEZ and N. GONZÁLEZ, 2012: Groundwater flow model, recharge estimation and sustainability in an arid region of Patagonia, Argentina. *Environ Earth Sci* (66)7:2097:2108. doi: 10.1007/s12665-011-1435-8.
- BMLF, 1974: Österreichische Bodenkartierung – Erläuterungen zur Bodenkarte 1:25.000 (Kartierungsbereich Leibnitz, Steiermark). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Vienna, Austria.
- BMLF, 2008: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über das Aktionsprogramm

- 2008 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, CELEX Nr. 391L0676, Vienna, Austria.
- DIERSCH, H.J.G., 2009: FEFLOW Reference Manual, DHI-WASY GmbH, Berlin.
- FANK J., 1999: Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbefruchtung des Grundwassers in quartären Lockersediment-Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Feldes (Steiermark, Österreich). *Beiträge zur Hydrogeologie* 49/50:101-388, Graz, Austria.

- FANK, J., G. ROCK, P. PARTL, T. WEISSE, M. FIGL, M. LUGER, K. PALL, U. SCHEFFL, W. SIEGL und J. WANZENBÖCK, 2003: Erfassung des gegenwärtigen Zustandes und Prognose zukünftiger Entwicklungen der Baggerseen im Westlichen Leibnitzer Feld aus hydrologischer, limnologischer und fischereibiologischer Sicht unter Berücksichtigung möglicher nachhaltiger aber auch ökonomischer Nachnutzungsformen. Unveröffentlichter Bericht. Institut für WasserressourcenManagement – Hydrologie und Geophysik, Joanneum Research Graz, Austria.
- FEICHTINGER, F., 1998: STOTRASIM – Ein Modell zur Simulation der Stickstoffdynamik in der ungesättigten Zone eines Ackerstandortes. In: Modelle für die gesättigte und ungesättigte Bodenzone. Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft 7:14-41, Vienna, Austria.
- KLAMMLER, G., G. ROCK, J. FANK and H. KUPFERSBERGER, 2012a: Generating land use information to derive diffuse water and nitrate transfer as input for groundwater modelling at the aquifer scale. – Models – Repositories of Knowledge, Proceedings ModelCARE2011 held at Leipzig, Germany, in September 2011, IAHS Publ. 355, 237-242.
- KLAMMLER, G., H. KUPFERSBERGER, G. ROCK and J. FANK, 2012b: Modeling coupled unsaturated and saturated nitrate distribution of the aquifer Westliches Leibnitzer Feld, Austria. – Environ. Earth Sci. (accepted).
- KOLLET, S.J. and R.M. MAXWELL, 2006: Integrated surface-groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. *Adv Water Resour* (29):945-958.
- SCHNEIDER, J., 1998: Kartierung der nassen Deposition in Österreich. Bericht des Umweltbundesamts BE-104. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Vienna, Austria.
- SGV, 2005: Verordnung des Landeshauptmannes von Steiermark vom 21. November 1990, mit der ein Grundwasserschongebiet zum Schutz der Wasserversorgungsanlagen der Leibnitzerfeld Wasserversorgung GmbH., der Marktgemeinde Lebring St. Margarethen und der Gemeinde Retznei bestimmt wird. Stammfassung: LGBl. Nr. 86/1990, Novelle: LGBl. Nr. 48/2006, Graz, Austria.
- STENITZER, E., 1988: SIMWASER – Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. Mitteilungen der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt 31:1-118, Petzenkirchen, Austria.
- THERRIEN, R., R.G. MCLAREN, E.A. SUDICKY and S.M. PANDAY, 2012: HydroGeoSphere. A threedimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. User's Guide, Waterloo.