

Prognose der Auswirkungen landwirtschaftlicher Maßnahmen und des Klimawandels auf die Grundwasserqualität

Johann Fank^{1*} und Gernot Klammner¹

Zusammenfassung

Die Prognose der Auswirkungen landwirtschaftlicher Maßnahmen und des Klimawandels auf die Grundwasserqualität ist ein intensiv bearbeitetes Forschungsfeld. Üblicherweise werden die Ergebnisse von Untersuchungen des Wasser- und Stickstoffflusses im Boden und in der ungesättigten Zone interpretativ mit den Messergebnissen der Nitratkonzentration im Grundwasser verglichen. Dazu werden unterschiedliche Verfahren zur Erfassung der Belastung aus der Landwirtschaft zusammengefasst. Für das westliche Leibnitzer Feld wurde ein gekoppeltes instationäres Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodell entwickelt, in dem die komplexen Prozesse in der ungesättigten Zone mit den Prozessen und Wechselwirkungen der Grundwasserzone zusammengeführt wurden. Die Ergebnisse zeigen eine sehr detaillierte räumliche Verteilung der Nitratkonzentration im Grundwasser als Ergebnis der flächendifferenzierten Oberflächenbewirtschaftung und der sehr bedeutsamen Wechselwirkung des Grundwassers mit angeschlossenen Oberflächengewässersystemen. Dieses Modell erscheint ein geeignetes Werkzeug zu sein, um die Auswirkungen landwirtschaftlicher Maßnahmen und auch der Effekte des Klimawandels auf die Grundwasserqualität prognostizieren zu können.

Schlagwörter: Landwirtschaft, Modellierung, ungesättigte Zone, Grundwasser, Nitrat

Summary

The prediction of effects of agricultural activities and of climate change on groundwater quality is under intensive investigation. Usually the results of investigation of water and solute transport in soil and unsaturated zone are compared to measured data of groundwater quality. In this paper different approaches to determine the impact of agriculture are summarized. For the aquifer “Westliches Leibnitzer Feld” a coupled transient groundwater flow and nitrate transport model has been developed, where the complex processes in the unsaturated zone were coupled with the processes in the groundwater system. Modelling results show a detailed areal distribution of nitrate concentration in groundwater. This distribution results from different land use (and much differentiated cultivation) and the importance of the interaction between ground water and coupled surface water systems. Such a coupled model seems to be an effective tool to predict the impact of agricultural systems and of the effects of climate change on groundwater quality.

Keywords: agriculture, modelling, unsaturated zone, groundwater, nitrate

Einleitung und Problemstellung

Das österreichische Wasserrecht in Kombination mit der Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser und der Trinkwasserverordnung präzisieren die Mindestanforderungen der Grundwassergüte. Die Porengrundwasserkörper Ostösterreichs bzw. Teilbereiche von diesen, welche zu einem Großteil auch für die regionale und überregionale Wasserversorgung intensiv genutzt werden, erfüllen hinsichtlich der Nitratkonzentration diese Mindeststandards wiederholt nicht, was vor allem von flächenhaften Stickstoffeinträgen aus landwirtschaftlichen Nutzflächen in Form von diffusen Einträgen (BMLFUW 2009) herrührt. Intensive landwirtschaftliche Bewirtschaftungen auf Standorten mit teilweise sehr durchlässigen Böden sind vielfach ausschlaggebend für eine Gefährdung von Grundwasserkörpern durch den Nährstoffparameter Nitrat. Dies ist vor allem im Norden, Osten und Südosten Österreichs der Fall, wo zugleich ge-

ringe Niederschlagsmengen (= geringe Verdünnung) der Regelfall sind (BMLFUW 2013).

Eine Beurteilung des Stickstoffaustrags aus ackerbaulich genutzten Flächen allein auf Basis der Nitratkonzentrationsmessungen im Grundwasser selbst ist nicht zulässig, da in nahezu allen Teilbereichen die Nitratkonzentration des Grundwassers einerseits durch die Wechselwirkung mit Oberflächengewässern (Fließgewässer und Nassbaggerungen), andererseits durch die Sickerwasserbildung unter nicht ackerbaulich genutzten Flächen (Wald, Siedlungen, Verkehrswege etc.) beeinflusst wird (FANK et al. 2010). Das bedeutet im Umkehrschluss, dass eine Beurteilung der Grundwasserqualitätssituation auf Basis der ackerbaulichen Nutzung und dem daraus resultierenden Austrag von Stickstoff in das Grundwasser (z. B. FANK 1999 oder FEICHTINGER et al. 2010) auch nicht umfassend sein wird.

¹ JOANNEUM RESEARCH, RESOURCES - Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit, Elisabethstraße 18/II, A-8010 GRAZ

* Ansprechpartner: Univ.-Doz. Dr. Johann Fank, johann.fank@joanneum.at



Während hinsichtlich der Beurteilung des Stickstoffaustrags aus der Landwirtschaft des Sickerwassers bereits umfangreiche Untersuchungen durchgeführt wurden, ist die Prognose der Auswirkung unterschiedlicher landwirtschaftlicher Maßnahmen hinsichtlich des Austrags von Pestiziden und von anthropogenen Spurenstoffen noch in der Anfangsphase der Untersuchungen. Die Prognose der Auswirkung von Effekten des Klimawandels auf die Grundwasserqualitätssituation ist eng mit den züchterischen Entwicklungen und Erfolgen der agrarischen Nutzpflanzen verbunden. Diesem Bereich wird bis dato wesentlich zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt.

Es sind somit Verfahren zu entwickeln und praktisch anzuwenden, bei denen die Prognose der Auswirkung landwirtschaftlicher Maßnahmen und des Klimawandels auf die Grundwasserqualität direkt auf den Zielparameter abgestimmt ist. Dabei sind die unterschiedlichen Wechselwirkungen in komplexen Systemen zu berücksichtigen.

Daten und Methoden zur Erfassung der Auswirkung landwirtschaftlicher Maßnahmen und des Klimawandels auf die Grundwasserqualität

Zur Erfassung der Auswirkung landwirtschaftlicher Maßnahmen auf die Qualität des Grundwassers existiert aus den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl von Untersuchungen. Allerdings sind diese in den meisten Fällen auf die Untersuchung des Austrages von Nitrat aus dem Boden unterhalb des Wurzelbereiches beschränkt. Die Auswirkung auf die Grundwassersituation wird meist interpretativ bewertet. Untersuchungen zur Auswirkung des Klimawandels auf die Grundwasserqualität sind selten und dann meist auf statistische Auswertungen und deren Projektion auf zukünftige Entwicklungen beschränkt. Dabei haben Prognosemodelle für zu erwartende klimatologische Verhältnisse eine spezifische Bedeutung – wobei diese Prognose meist sehr großräumig und auch nur für wenige meteorologische Parameter zuverlässig durchführbar ist.

Moderne Lysimeter erlauben die detaillierte Untersuchung des Wasserkreislaufes und daran gekoppelter Stoffkreisläufe an ausgewählten punktuellen Standorten. Wenn der Wasserfluss genau bestimmt wird, kann durch die Untersuchung des perkolierenden Sickerwassers für eine definierte Oberfläche der Austrag von Stoffen unter detailliert bekannten

Bewirtschaftungsbedingungen bilanziert werden. Aufgrund des Fehlens der Fließmengen bzw. der nur sehr ungenauen Erfassung dieser, sind Stoffaustragsuntersuchungen mittels Saugkerzenanlagen – hier werden nur die Konzentrationen an Stoffen in der Bodenwasserlösung untersucht – und auch mittels einfacher Lysimeter bzw. Sickerwassersammler sehr kritisch zu verfolgen. Seit einigen Jahren werden in Deutschland im Rahmen des TERRENO – Projektes (ZACHARIAS et al. 2011) moderne Präzisionslysimeter eingesetzt, um die Auswirkungen von Klimawandeleffekten auf das Boden-Pflanze-Wasser-System zu untersuchen. Dazu wurden Lysimeter aus unterschiedlichen Höhenlagen eines Einzugsgebietes mit natürlichen Gradienten hinsichtlich Temperatur und Niederschlag in andere Höhen verbracht, um damit Effekte eines zu erwartenden Klimawandels direkt untersuchen zu können. In zunehmendem Ausmaß werden auch Lysimeterversuche durchgeführt, um die Verlagerung und den Austrag von Pestiziden und deren Metaboliten aus der ungesättigten Zone in Richtung Grundwasser zu untersuchen.

Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung der Auswirkung landwirtschaftlicher Maßnahmen auf die Grundwasserqualität ist die Auswertung und Bilanzierung von pflanzenbaulichen Versuchsanlagen. Unter der Voraussetzung, dass im Rahmen mehrjähriger Versuche der Stickstoffaustrag in Richtung Grundwasser dem Düngebilanzüberschuss über dem Stickstoffzug durch das Erntegut – bei Verbleiben der pflanzlichen Restmasse auf dem Feld – entspricht, kann der Stickstoffaustrag direkt aus den Versuchsdaten abgelesen werden. In *Tabelle 1* sind die Ergebnisse der Bilanzierung von Düngesteigerungsversuchen (AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG 2013) auf den Kleinparzellenversuchsanlagen in Wagna (Periode 2007 – 2012) und in Wagendorf (Periode 2008 – 2012) – beide Anlagen liegen im Leibnitzer Feld in der Südsteiermark, Österreich – zusammengefasst.

Unter unterschiedlichen Bodenverhältnissen – geringmächtige sandig/lehmmige Böden in Wagna, tiefgründige lehmig/tonige Böden in Wagendorf – werden auf diesen Versuchsanlagen Stickstoffdüngesteigerungsversuche durchgeführt, um für die Kulturart Mais unter den jeweils gegebenen Bodenverhältnissen die optimale Stickstoffdüngemenge zu finden. Dabei wird bei bekannter jährlicher Stickstoffdüngemenge der Kornertrag und die Stickstoffabfuhr über den Kornertrag gemessen. Der reduzierte Kornertrag

Tabelle 1: Ergebnisse der Bilanzierung der Düngesteigerungsversuche auf den Kleinparzellenversuchsanlagen in Wagna und in Wagendorf.

Variante	N-Düngung [kg/ha]	Körnermaisversuch Wagna 2007 - 2012 Grundwasserneubildung: 318 mm/a					Körnermaisversuch Wagendorf 2008 - 2012 Grundwasserneubildung: 250 mm/a				
		Kornertrag [kg/ha]	reduzierter Kornertrag [kg/ha]	N-Abfuhr [kg/ha]	N-Bilanz [kg/ha]	NO ₃ -Konzentration [mg/l]	Kornertrag [kg/ha]	reduzierter Kornertrag [mg/ha]	N-Abfuhr [kg/ha]	N-Bilanz [kg/ha]	NO ₃ -Konzentration [mg/l]
0	0	5033	4103	44	-44						
A	90	8962	7156	85	5	7	10661	10411	102	-102	
B	115	9848	7856	100	15	21	13818	12701	146	-56	
K	145	10797	8593	123	22	30	14223	12920	154	-39	
L	175	11163	8596	135	40	56	14485	12960	162	-17	
M	210						14634	12731	165	10	18
							14402	12239	168	42	74

wird aus dem gemessenen Korntrag über die Dünge- und Düngeausbringungskosten berechnet. In einer mehrjährigen Versuchsanstellung kann der Stickstoffaustrag in Richtung Grundwasser aus N-Düngung minus N-Abfuhr berechnet werden (N-Bilanz). Bei bekannter mittlerer jährlicher Grundwasserneubildungsrate im Untersuchungszeitraum (beim Versuch Wagna aus begleitenden Lysimetermessungen, beim Versuch Wagendorf aus numerischen Modellberechnungen) kann die mittlere Nitratkonzentration im Sickerwasser nach der Formel

$$\text{NO}_3 \text{ [mg/l]} = \text{N-Bilanz [kg/ha/a]} / \text{Grundwasserneubildung [mm/a]} * 443$$

berechnet werden. Die Ergebnisse zeigen sowohl hinsichtlich des Ertrages als auch hinsichtlich der Nitratbelastung des Grundwassers für den Standort Wagna ein optimales Stickstoffdüngenniveau bei 145 kg N/ha/a, für den Standort Wagendorf liegt dieses bei 175 kg N/ha/a.

Alle bisher angesprochenen Methoden zur Erfassung der Auswirkung landwirtschaftlicher Maßnahmen auf die Grundwasserqualität liefern punktuelle bzw. kleinflächige Ergebnisse. Zur Bewertung der Auswirkung landwirtschaftlicher Maßnahmen auf die Grundwasserqualität in einem regionalen Maßstab oder unter Berücksichtigung unterschiedlicher Boden- bzw. Bewirtschaftungsbedingungen wird in zunehmendem Maße das Instrument der numerischen Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellierung eingesetzt (z.B. FEICHTINGER et al. 2010). Dabei werden mittels numerischer Methoden die Wasserbewegung und der daran gekoppelte Transport von Stoffen in der ungesättigten Zone in Abhängigkeit von Wetter, Bodenprofilaufbau und der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung eindimensional vertikal berechnet. Bodendaten können dabei für standörtliche Untersuchungen aus bodenphysikalischen Messungen gewonnen oder bei der regionalen Modellierung aus vorhandenen Bodenkartierungsergebnissen über Pedotransferfunktionen ermittelt werden. Gerade bei regionalen Untersuchungen ist die Kulturartenführung in Abhängigkeit von den standörtlichen Bodenverhältnissen meist nicht im Detail bekannt (oder aufgrund der Gebietsgröße und des damit verbundenen Aufwandes nicht erfassbar). KLAMMLER et al. (2011) stellen dazu ein Verfahren zur Optimierung der Landnutzungsinformation als Input-Parameter für die Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellierung vor. Dabei wird auch der unterschiedliche Einfluss von jährlich wechselnden Witterungsverhältnissen bei verschiedenen Kulturführungen und Bewirtschaftungsverfahren auf die Grundwasserneubildung und den Stofftransport in der ungesättigten Zone berücksichtigt (KLAMMLER et al. 2012).

Alle bisher vorgestellten Methoden erfassen ausschließlich die Auswirkung landwirtschaftlicher Maßnahmen auf den Bodenwasserhaushalt bzw. den Austrag von Wasser und daran gekoppelten Stoffflüssen aus der ungesättigten Zone. Die Grundwasserqualität wird aber neben den landwirtschaftlichen Stoffausträgen auch entscheidend von den Wasser- und Stoffflüssen aus anderen Landnutzungsformen, wie Wald, Siedlungsgebieten oder auch offenen Wasserflächen sowie auch von der Wechselwirkung des Grundwassers mit Oberflächengewässersystemen kontrolliert. Eine gekoppelte Modellierung von Grundwasserströmung und Stofftransport

in der die Prozesse in Boden und ungesättigter Zone unter unterschiedlichen Landnutzungsformen als obere Randbedingung für das Grundwasser verwendet werden und in der die Wechselwirkung des Grundwassers mit angrenzenden Wasserkörpern berücksichtigt wird, stellen KLAMMLER et al. (2013a) vor. Dieses Modell kann in weiterer Folge auch verwendet werden, um die Auswirkungen von Klimawandeleffekten auf die Grundwasserströmung und die Grundwasserqualitätssituation zu prognostizieren (KLAMMLER et al. 2013b).

Ergebnisse für den Grundwasserleiter „Westliches Leibnitzer Feld“

Für den Grundwasserleiter des westlichen Leibnitzer Feldes, ein Teil des Murtales der im Norden vom Wildoner Buchkogel, im Osten von der Mur und im Westen und Süden von Lassnitz und Sulm begrenzt wird, wurde ein gekoppeltes numerisches Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodell für den Zeitraum 1993 bis 2009 erstellt. Für die ackerbaulich genutzten Flächen wurden die Grundwasserneubildung und der Stickstoffaustrag mit Hilfe eines Bodenwasserhaushalts- und Stickstofftransportmodells auf Tagesbasis berechnet. Im Untersuchungsgebiet werden aufgrund der vorliegenden hydrogeologischen Verhältnisse in den verteilten Siedlungsräumen die Dachwässer und Wässer aus versiegelten Flächen meist auf eigenem Grund und Boden versickert. Dadurch kann angenommen werden, dass für einen großen Teil der Parzellenfläche (Dachflächen und versiegelte Flächen) praktisch keine Verdunstung zur Wirkung kommt, sondern diese Wässer direkt in den Untergrund abgeleitet werden. Für den restlichen Teil der Parzelle wird die Grundwasserneubildung mittels des Bodenwasserhaushaltsmodells auf der Basis einer mehrschichtigen Rasenfläche berechnet. Als Stickstoffinput für diese Berechnung der Grünlandflächen wird den Empfehlungen der Düngemittelhersteller für die Rasendüngung entsprochen. Die Verdunstung von Waldstandorten ist grundsätzlich komplex. Für die Bewertung der Grundwasserneubildung in Waldgebieten wird auf das Verfahren von ALLEN et al. (1998) zurückgegriffen. Dabei wird für einen Bestand mit einer definierten Baumart die Verdunstung aus den Wetterdaten berechnet und die klimatische Wasserbilanz auf Tagesbasis unter Berücksichtigung der Bodenwasservorratsverhältnisse im Sinne eines kapazitiven Ansatzes berechnet. Hinsichtlich des Stickstoffs wird eine Austragskonzentration im Sickerwasser von 10 mg/l Nitrat angenommen. Die Grundwasserneubildung auf offenen Wasserflächen wird aus der klimatischen Wasserbilanz „Niederschlag minus potentielle Evaporation“ auf Tagesbasis berechnet. Aus diesem Bereich erfolgt kein Stickstoffeintrag.

In *Abbildung 1* (links) sind die Ergebnisse der regional berechneten mittleren Nitrat-Austragskonzentrationen für das Untersuchungsgebiet dargestellt. Im Vergleich dazu ist rechts die im Grundwasser gemessene mittlere Nitratkonzentration an den diversen Grundwassermessstellen und deren Verteilung aufgrund einer geostatistischen Interpolation als Mittelwert für den Zeitraum 2000 bis 2010 dargestellt. Auf den ersten Blick ersichtlich sind die Unterschiede in den beiden Darstellungen: die Austragskonzentration aus

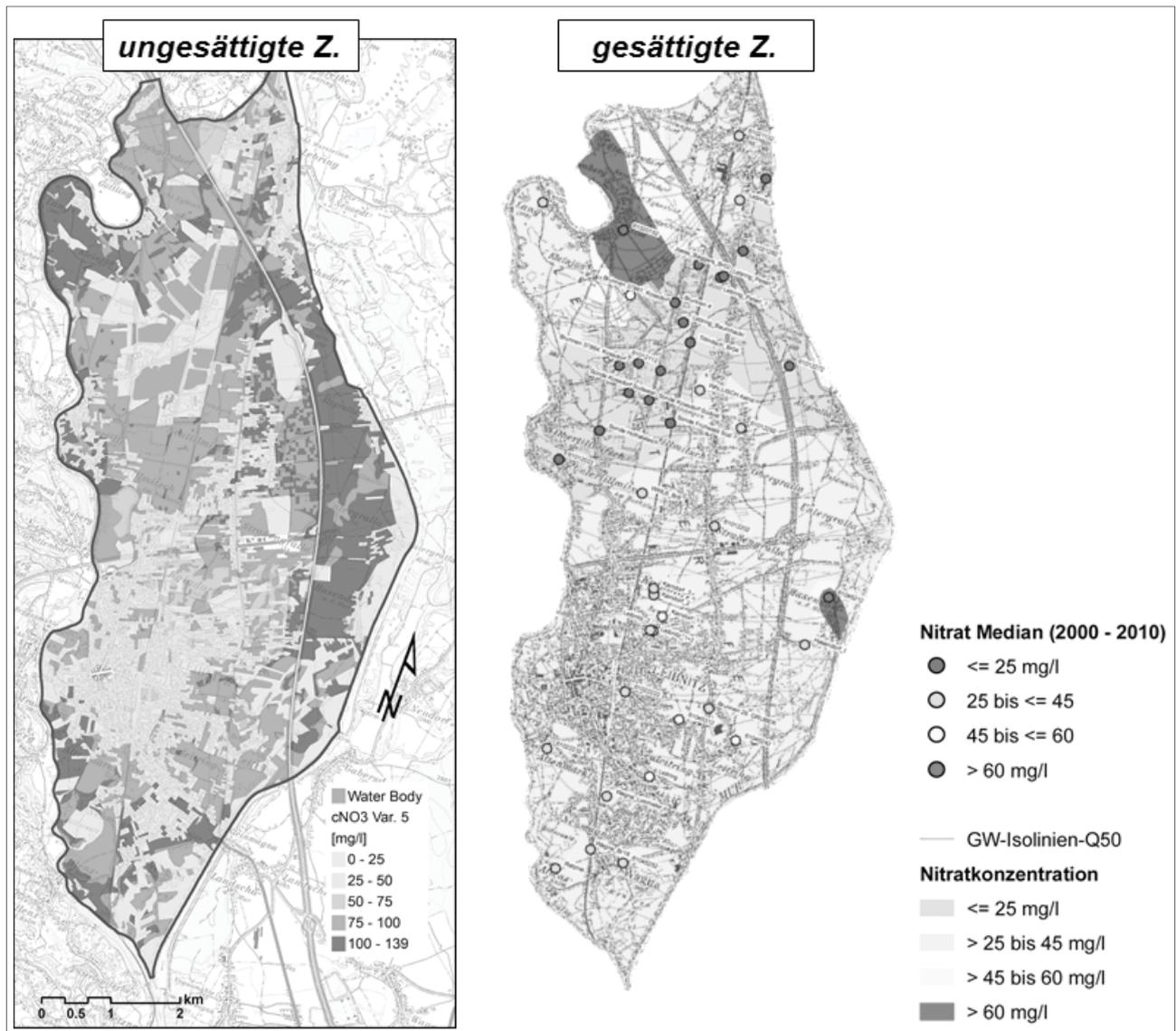


Abbildung 1: Vergleich der Ergebnisse der Berechnungen der Nitrat-Austragskonzentration aus der ungesättigten Zone (links) und den Messungen der Nitratkonzentration im Grundwasser sowie deren geostatistische Interpolation (rechts) für das westliche Leibnitzer Feld.

der ungesättigten Zone ist signifikant höher als die Messwerte im Grundwasser, die Flächendifferenzierung bei den interpolierten Grundwasserwerten ist deutlich geringer. Vor allem im östlichen Teilbereich werden die durch das Modell berechneten Konzentrationen im Grundwasser auch nicht annähernd durch die Grundwassermessungen wiedergegeben, was einerseits auf fehlende Grundwassermessstellen und andererseits auf völlig unterschiedliche Prozesse in der Entwicklung zurückzuführen ist.

Für den gesättigten Teil des Grundwasserleiters wurde ein instationäres Grundwasserströmungs- und Stickstofftransportmodell auf Basis der Finite-Elemente Diskretisierung entwickelt, in dem die Randbedingungen entlang der Oberflächengewässer mit einer Randbedingung der 3. Art (Leakage Randbedingung) abgebildet wurden. Die untere Randbedingung wird durch den Grundwasserstauer – als Oberfläche des Neogen – dargestellt. Die Grundwasserneubildung wird

als instationäre Flußrandbedingung (Randbedingung 2. Art) auf Tagesbasis - räumlich durch die Hydrotope der landwirtschaftlichen Nutzflächen diskretisiert – abgebildet. Für das Stofftransportmodell wurden die Nitratkonzentrationen in den Oberflächengewässern auf Basis der Daten, die im Rahmen der Gewässergütererhebung gewonnen werden, geschätzt. Die Stickstoffzuflüsse aus der ungesättigten Zone wurden aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell bzw. aus den oben beschriebenen Ansätzungen übernommen. Der Nordwestteil des Untersuchungsgebietes musste aufgrund numerischer Artefakte aus der Stofftransportmodellierung herausgenommen werden und eine Konzentrationsrandbedingung im Bereich der Tillmischer Teiche auf der Basis von Messdaten im Grundwasser angesetzt werden.

Ergebnis der gekoppelten numerischen Modellierung ist eine räumlich (je Finitem Element) und zeitlich (auf Tagesbasis) diskretisierte Verteilung der Grundwasserspiegellage und der

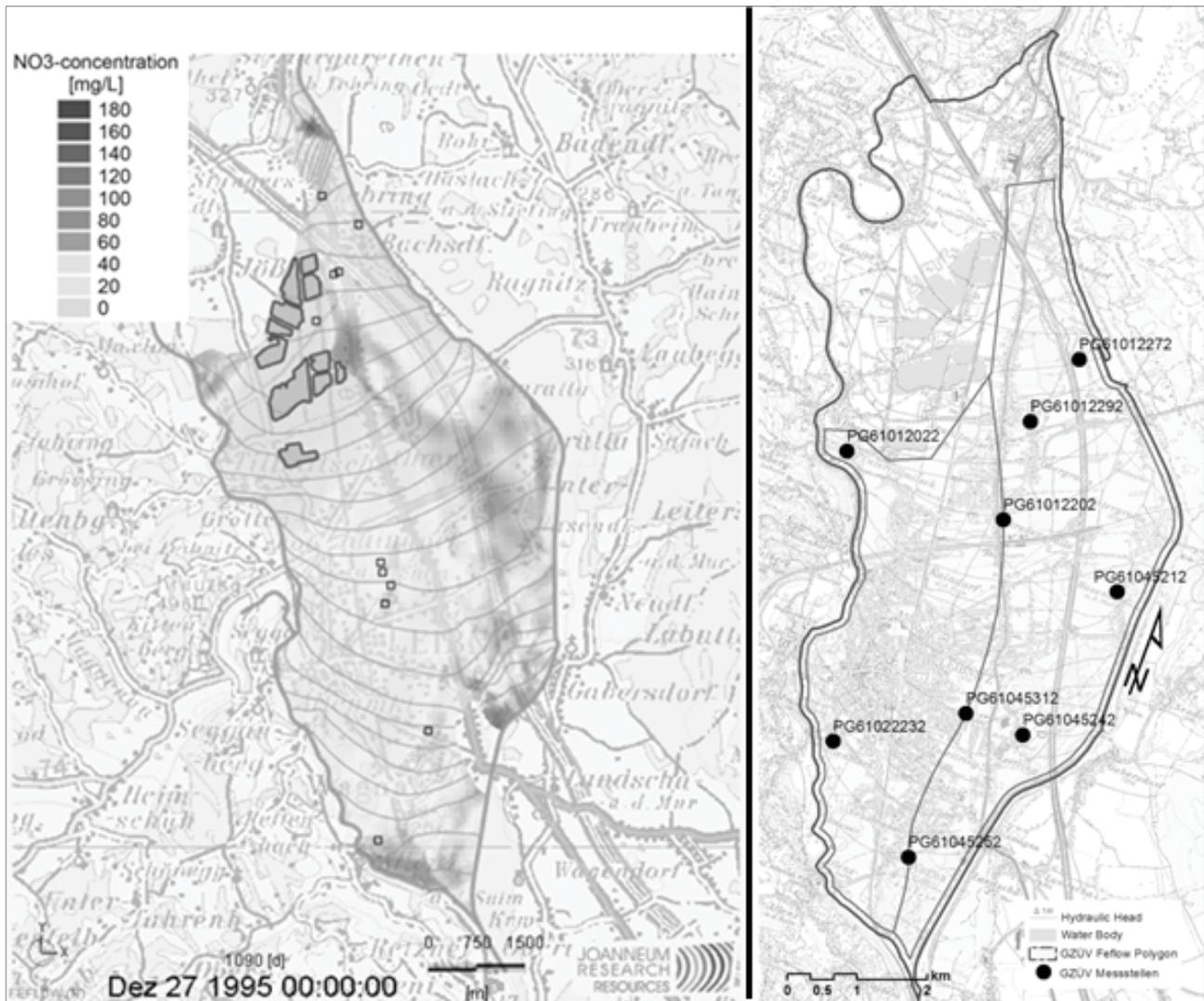


Abbildung 2: Verteilung der Nitratkonzentration für 27.12.1995 als Ergebnis der gekoppelten numerischen Modellierung von Nitrataustrag aus der ungesättigten Zone, der Grundwasserströmung und des Nitrattransportes im Grundwasser (links) und Grundwassermessstellen im Rahmen der GZÜV (rechts) im westlichen Leibnitzer Feld.

Nitratkonzentration. Durch diese Diskretisierung kann ein sehr detailliertes Video für die Verteilung der Nitratkonzentration im Grundwasserkörper erstellt werden. Die Ergebnisse für den 27.12.1995 sind exemplarisch in *Abbildung 2* (links) dargestellt. Auffällig sind die hohen Konzentrationen im Ostteil, was im Einklang mit den Ergebnissen der Bodenwasserhaushaltsmodellierung steht. Im Bereich des KW Lebring und unterstrom der Tillmitscher Teiche sowie partiell im Nahbereich zur Sulm ist durch die Wechselwirkung des Grundwassers mit den Oberflächengewässern eine deutliche Abminderung der Nitratkonzentration festzustellen.

In der Bewertung der Nitratentwicklung eines Grundwasserfeldes werden üblicherweise die gemittelten Nitratkonzentrationswerte an den Messstellen der GZÜV über die Zeit dargestellt. Zu diesem Zweck sind in *Abbildung 2* diese Messstellen im westlichen Leibnitzer Feld bezogen auf das Modellgebiet und gesplittet in einen West- und Ostteil dargestellt. Diese Trennlinie wurde so gewählt, dass die drei Messstellen auf der Linie sowohl für die Mittelung des West-

als auch des Ostteils herangezogen werden können. Für die Auswertung des gekoppelten Nitrattransportmodells können nun die Nitratkonzentrationswerte aller Finiten Elemente eines ausgewählten Bereiches des Untersuchungsgebietes für jeden Zeitschritt (in diesem Fall 1 Tag) des Modells gemittelt und über den zeitlichen Verlauf dargestellt werden. Der Vergleich dieser beiden Darstellungsarten zeigt sodann den Unterschied zwischen der Mittelung einiger weniger Messstellen und den Gebietsmittelwerten aus der räumlichen Diskretisierung des Modells.

Für das gesamte Modellgebiet zeigt dieser Vergleich eine deutlich geringere Amplitude der Nitratkonzentration im Vergleich zu den gemessenen Daten, wobei die absolute Höhe der Nitratkonzentration mit einem gemessenen Mittelwert von 39 mg/l zu dem berechneten Mittelwert von 36 g/l gut vergleichbar ist. Der lineare Trend weist in beiden Fällen fallende Werte auf, wobei die Steigung aus den Messwerten etwa 4 mal so hoch ist wie aus den Modellrechnungsergebnissen.

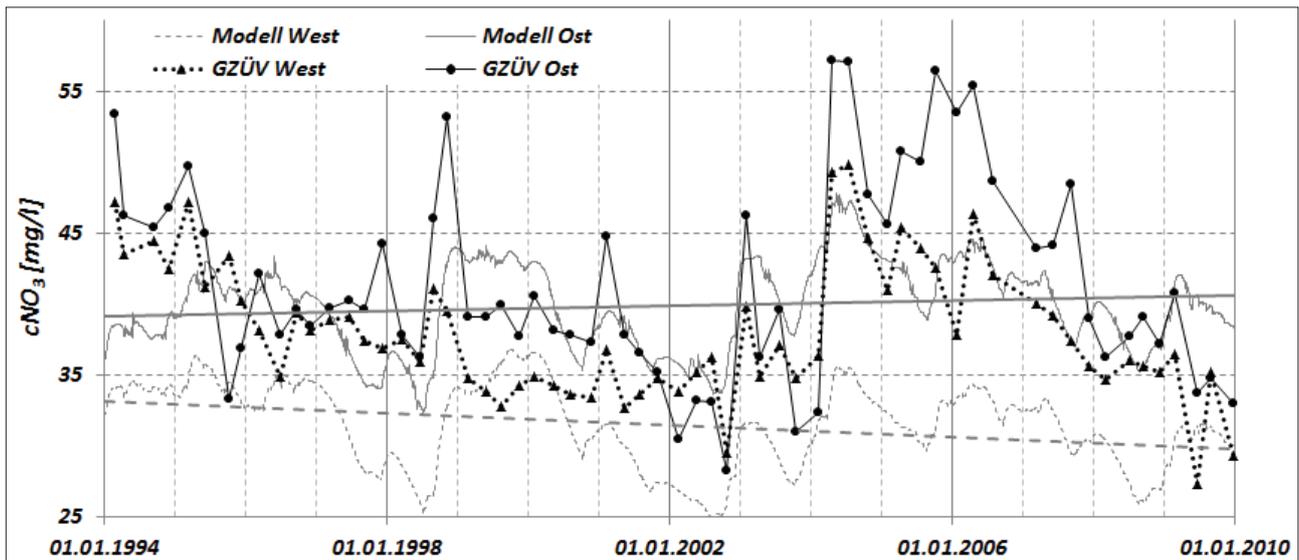


Abbildung 3: Ganglinien der Mittelwerte der Nitratkonzentration im Grundwasser an den GZÜV – Messstellen im westlichen und östlichen Teil des Leibnitzer Feldes (Lage der Messstellen siehe Abbildung 2 – rechts) im Vergleich zu den mittleren berechneten Nitrat-Konzentrationsganglinien für die beiden Teilbereiche sowie der daraus ermittelten Trendgeraden.

In *Abbildung 3* sind die Ganglinien der Mittelwerte der Nitratkonzentration im Grundwasser an den GZÜV – Messstellen im westlichen und östlichen Teil des Leibnitzer Feldes (Lage der Messstellen siehe *Abbildung 2* – rechts) im Vergleich zu den mittleren berechneten Nitrat-Konzentrationsganglinien für die beiden Teilbereiche sowie der daraus ermittelten Trendgeraden dargestellt. Deutlich erkennbar ist dabei, dass die gemessenen Nitratkonzentrationen an den Messstellen im Westteil deutlich über den berechneten Werten für dieses Teilgebiet liegen. Ursache dafür ist die Lage der Messstellen in den stärker agrarisch genutzten Bereichen, sodass die Wirkung der Schutzgebiete für die Brunnenanlagen, die Wirkung der Tillmitscher Teiche und die Wirkung des Siedlungsgebietes von Leibnitz nur untergeordnet repräsentiert werden. Im Ostteil des Untersuchungsgebietes liegen die berechneten Werte im Bereich der gemessenen Werte – hier liegt in erster Linie ackerbauliche Nutzung vor – allerdings auf deutlich höherem Niveau als im Ostteil. Auffällig ist die Trendlinie: während im Westteil ein deutlich fallender Trend ersichtlich ist, ist im verstärkt agrarisch genutzten Bereich sogar ein steigender Trend der Nitratkonzentration im Grundwasser erkennbar.

Deutlich erkennbar ist in den modellierten Ganglinien der Nitratkonzentration für die beiden ausgewählten Teilbereiche, dass kurzfristige Trends in der Entwicklung der Nitratwerte aufgrund des großen Einflusses der meteorologischen Entwicklung keinesfalls abgeleitet werden dürfen. Alleine die Trendberechnung über einen Zeitraum von 15 Jahren scheint eine gewisse Aussagekraft über die zeitliche Entwicklung der Nitratkonzentration zu haben.

Das gekoppelte Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodell des westlichen Leibnitzer Feldes wurde auch zur Bewertung der Auswirkungen von Effekten des Klimawandels auf die Grundwasserspiegellagenentwicklung und auf die Nitratkonzentration im Grundwasser genutzt (KLAMMLER et al. 2013b). Dabei zeigten sich einerseits hohe Unsicherheiten in der regionalen Ableitung meteorolo-

gischer Parameter aus den Klimaszenarien, andererseits die große Bedeutung der Einbeziehung zu erwartender pflanzenbaulich-züchterischer Entwicklungen. Als Ergebnis konnten für das kommende Jahrhundert keine gravierenden Auswirkungen von prognostizierten Klimawandeleffekten auf Grundwassermenge und Nitratkonzentration im Grundwasser des westlichen Leibnitzer Feldes erkannt werden.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Prognose der Auswirkungen landwirtschaftlicher Maßnahmen und des Klimawandels auf die Grundwasserqualität ist ein intensiv bearbeitetes Forschungsfeld. Üblicherweise werden bis dato die Ergebnisse von Untersuchungen und Modellberechnungen aus Boden und ungesättigter Zone in Relation zu Messdaten der Grundwasserqualität gestellt und die Unterschiede interpretativ bewertet.

Für den Grundwasserleiter des westlichen Leibnitzer Feldes wurde ein gekoppeltes regionales instationäres Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodell entwickelt, das die Prozesse der ungesättigten Zone mit den Prozessen in der gesättigten Zone gemeinsam betrachtet.

Die Ergebnisse zeigen eine sehr detaillierte räumliche Verteilung der Nitratkonzentration im Grundwasser als Ergebnis der flächendifferenzierten Oberflächenbewirtschaftung und der sehr bedeutsamen Wechselwirkung des Grundwassers mit angeschlossenen Oberflächengewässersystemen.

Aus derzeitiger Sicht erscheint die gekoppelte numerische Modellierung von Grundwasserströmung und Nitrattransport die einzige Möglichkeit zu sein, die Auswirkungen landwirtschaftlicher Aktivitäten realitätsnah bewerten zu können, weil in einem derartigen Modell die komplexen Wechselwirkungen der unterschiedlichen Kompartimente Berücksichtigung finden können.

Bei der Verwendung des Modells zur Bewertung der Auswirkung von Klimawandeleffekten auf das Grundwasser zeigten sich einerseits hohe Unsicherheiten in der regionalen

Ableitung meteorologischer Parameter aus den Klimaszenarien, andererseits die große Bedeutung der Einbeziehung zu erwartender pflanzenbaulich-züchterischer Entwicklungen.

Literatur

- ALLEN, R.G., L.S. PEREIRA, D. RAES and M. SMITH, 1998: Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 300 S.
- AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG, 2013: Versuchsbericht 2012 der Versuchstätigkeit der steirischen Landwirtschaftsschulen. Hatzendorf, 71 S.
- BMLFUW, 2009: Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2009 – NGP 2009. Wien, 225 S.
- BMLFUW, 2013: Wassergüte in Österreich. Jahresbericht 2012, Wien, 130 S.
- 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.
- FANK, J., G. DERSCH, F. FEICHTINGER und J. ROBIER, 2010: Erforderliche Maßnahmen und Umsetzungsoptionen für eine grundwassertragfähige Landwirtschaft im Murtal-Grundwasserleiter. Bericht zum 2. Umweltökologischen Symposium „Boden- und Gewässerschutz in der Landwirtschaft“ am 02. und 03.03.2010 in Raumberg- Gumpenstein, 43-50.
- FEICHTINGER, F., G. DERSCH, J. FANK und J. ROBIER, 2010: Stickstoffflüsse auf Ackerland des Murtales in Hinblick auf grundwassertragfähige Bewirtschaftung. 2. Umweltökologisches Symposium „Boden- und Gewässerschutz in der Landwirtschaft“. 02.-03.03.2010 Gumpenstein, 37-42.
- KLAMMLER, G., J.C. DRAXLER, J. FANK, H. KUPFERSBERGER und G. ROCK, 2011: Optimierung der Landnutzungsinformation als Input-Parameter für die Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellierung. Bericht zur 14. Gumpensteiner Lysimetertagung 2011: Lysimeter in der Klimaforschung und Wasserwirtschaft. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Irndning, 127-135.
- KLAMMLER, G., G. ROCK, J. FANK and H. KUPFERSBERGER, 2012: Generating land use information to derive diffuse water and nitrate transfer as input for groundwater modelling at the aquifer scale. IAHS Publ. 355:237-242.
- KLAMMLER, G., H. KUPFERSBERGER, G. ROCK and J. FANK, 2013a: Modeling coupled unsaturated and saturated nitrate distribution of the aquifer Westliches Leibnitzer Feld, Austria. Environ. Earth Sci. 69(2), 663-678.
- KLAMMLER, G., H. KUPFERSBERGER and G. ROCK, 2013b: Investigating the impact of conceptual model uncertainty and diverging climate change scenarios on ground-water nitrate concentration predictions. IAHS Publ. 359, 364-370.
- ZACHARIAS, S., H.R. BOGENA, L. SAMANIEGO, M. MAUDER, R. FU, T. PÜTZ, M. FRENZEL, M. SCHWANK, C. BAESSLER, K. BUTTERBACH-BAHL, O. BENS, E. BORG, A. BRAUER, P. DIETRICH, I. HAJNSEK, G. HELLE, R. KIESE, H. KUNSTMANN, S. KLOTZ, J.C. MUNCH, H. PAPEN, E. PRIESACK, H.P. SCHMID, R. STEINBRECHER, U. ROSENBAUM, G. TEUTSCH and H. VERECKEN, 2011: „A Network of Terrestrial Environmental Observatories in Germany“. In: Vadose Zone Journal 10.3, 955-973.