

# Optimierung der Landnutzungsinformation als Input-Parameter für die Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellierung

Gernot Klammler<sup>1\*</sup>, Johannes C. Draxler<sup>1</sup>, Johann Fank<sup>1</sup>, Hans Kupfersberger<sup>1</sup> und Gerhard Rock<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Simulationsmodelle für die ungesättigte Bodenzone sind kosten- und zeiteffiziente Werkzeuge, den Wasser- und Stofftransport in das Grundwasser zu berechnen. Je genauer die Input-Parameter zu Boden, Klima und Landnutzung für die Modellierung verfügbar sind, desto besser kann die Realität nachgebildet werden. Es wurde daher in einer Sensitivitätsanalyse mit dem Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodell SIMWASER/STOTRASIM untersucht, wie groß der Einfluss der **Landnutzung** auf das Modellergebnis ist, wenn man die gleichen Landnutzungs-Basisdaten (statistische Kulturenverteilung) mit vier verschiedenen Methoden in der Modellierung berücksichtigt:

- **Modellfruchtfolge:** eine einzige modellhafte Abfolge von Kulturen wird verwendet (d. h. es wird nur eine Kultur pro Jahr berücksichtigt)
- **Fruchtfolge-Rotation:** es werden mehrere verschiedene Kulturen in einem Jahr berücksichtigt
- **Fruchtfolge-Mixer:** es werden mehrere verschiedene *Fruchtfolge-Rotationen* berücksichtigt
- **StotraPGen:** ist ein Software-Tool, das eine automatisierte Anwendung von *Fruchtfolge-Rotation* und *Fruchtfolge-Mixer* für SIMWASER/STOTRASIM ermöglicht

Die Ergebnisse zeigen, dass für eine Modellierung der mittleren Jahressummen von Grundwasserneubildung und Stickstoffaustrag über einen großen Zeitraum die Verwendung einer *Modellfruchtfolge* ausreichend ist. Für eine Betrachtung der Ergebnisse auf kleineren Zeitskalen hingegen bringt die *Modellfruchtfolge* große Unsicherheiten mit sich. Auf Einzeljahresbasis betragen die größten Spannweiten zwischen der Methode *Modellfruchtfolge* und *StotraPGen* 26 mm/a (oder 11 % der mittleren Jahressumme) für die Grundwasserneubildung und 19 kg/ha/a (oder 63 % der mittleren Jahressumme) für den Stickstoffaustrag. Die Spannweiten der Ergebnisse für einen dreimonatigen Zeitraum im Jahr 1999 sind 48 mm bei der Grundwasserneubildung bzw. 14 kg/ha für den Stickstoffaustrag. Ergebnisse auf Tagesbasis, wie sie z. B. für die Definition der oberen Randbedingung eines instationären Grundwasserströmungs- und Transportmodells benötigt werden, weisen Unterschiede bei der Grundwasserneubildung von bis zu 7,7 mm/d

und 1,13 kg/ha/d für den Stickstoffaustrag auf. Diese Abweichungen entsprechen der 11-fachen mittleren Tagessumme der Grundwasserneubildung bzw. der 14-fachen mittleren Tagessumme des Stickstoffaustrags. Für die regionale Modellierung von Bodenwasserhaushalt und Stickstofftransport in der ungesättigten Bodenzone auf Einzeljahres-, Monats- oder Tagesbasis ist daher die Verwendung von *StotraPGen* zu empfehlen.

**Schlagwörter:** ungesättigte Zone, Grundwasserneubildung, Nitrataustrag, Stickstoff, Landnutzung

## Abstract

Soil water and solute transport models for the vadose zone are cost and time-effective tools for determining groundwater recharge and nitrogen leaching. The better input parameters (e. g., soil data, climate data and land-use data) are available, the better reality can be simulated. For this reason, a sensitivity analysis using the soil water and solute transport model SIMWASER/STOTRASIM is done and the influence of land-use on modeling results is researched. Therefore, following four methods, each of them is based on the same land-use dataset, are compared:

- *Exemplary crop rotation:* only one single sequence of crops is used (i. e., only one crop is cultivated in one year)
- *Variations of crop rotations:* several different crops are considered in one year
- *Mix of crop rotation variations:* several different *variations of crop rotations* are considered
- *StotraPGen:* a software-tool, which includes the methods *variations of crop rotations* and *mix of crop rotations variations* for an automated use

Results show, that for modeling long-term mean annual sums of groundwater recharge and nitrogen leaching the method using an *exemplary crop rotation* is sufficient. But for smaller time steps this method entails uncertainties. Between the methods *exemplary crop rotation* and *StotraPGen*, total annual groundwater recharge and nitrogen leaching for single years range around 26 mm/a (or 11 % of mean annual sum of 245 mm) and 19 kg/ha/a (or 63 % of mean annual sum of 29 kg/ha), respectively. For a period of three months, there are also significant

<sup>1</sup> Joanneum Research Graz, Resources - Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit, Wasser Ressourcen Management, Elisabethstraße 16/II, A-8010 GRAZ

\* Ansprechpartner: Mag. Gernot Klammler, [gernot.klammler@joanneum.at](mailto:gernot.klammler@joanneum.at)

ranges: 48 mm for groundwater recharge and 14 kg/ha for nitrogen leaching. Results on daily basis, as it is necessary to define the upper boundary of groundwater flow and transport models, range up to 7.7 mm/d for groundwater recharge and 1.13 kg/ha/d for nitrogen leaching between the exemplary crop rotation and *StotraPGen*. This range is about 11 times higher than the mean daily sum of groundwater recharge and about 14 times higher than the mean daily sum of nitrogen leaching. Thus, for the simulation of groundwater recharge and nitrogen leaching on yearly, monthly and daily basis the application of *StotraPGen* is recommended.

**Keywords:** vadose/unsaturated zone, groundwater recharge, nitrate/nitrogen leaching, land-use, modeling

## Einleitung

Qualität und Quantität von Grundwasser werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Vor allem die Anwendung von stickstoffhaltigen Düngemitteln auf landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen führt oft zu einer Beeinträchtigung des Grundwassers durch Nitrat. Bodenwasserhaushalts- (z. B. SIMWASER, STENITZER 1988) und Stofftransportmodelle (z. B. STOTRASIM, FEICHTINGER 1998) für die ungesättigte Zone bieten eine gute Möglichkeit, den Einfluss der Landwirtschaft auf das Grundwasser für regionale Skalen zu simulieren und, im Sinne eines integrierten Wasserressourcenmanagements, grundwasserschonende ackerbauliche Bewirtschaftungsstrategien zu definieren. Für die Modellierung von Grundwasserneubildung und Stickstoffauswaschung mit dem Modellverbund SIMWASER/STOTRASIM, welcher speziell für die Anwendung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen ausgelegt ist, ist neben Boden- und Klimainformationen die Landnutzung als Input-Parameter von wesentlicher Bedeutung.

Die Verwendung des Input-Parameters Landnutzung mit SIMWASER/STOTRASIM kann je nach Datenbasis und Anwendungsskala verschieden sein. Während auf Punkt- und Feldskala in gewissen Fällen feldstückbezogene Aufzeichnungen über Kulturführung (Saat- und Erntezeitpunkte, Bodenbearbeitung, etc.) von Kulturen über den gesamten Modellzeitraum vorliegen (z. B. für das landwirtschaftliche Versuchsfeld Wagna/Steiermark), so sind auf regionaler Ebene nur statistische Kulturenver-

teilungen auf Katastralgemeindenebene verfügbar (z. B. aus dem Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem INVEKOS der EU). Obwohl aus diesen statistischen Kulturenverteilungen weder die feldstückbezogene Lage von Kulturen innerhalb einer Katastralgemeinde, noch die korrekte zeitliche Aufeinanderfolge der Kulturen abgeleitet werden können, ist dies die bestmögliche Datenbasis, die für die Modellierung von Grundwasserneubildung und Stickstoffauswaschung auf regionaler Skala zur Verfügung steht. Satellitenbilddatenauswertungen der Landnutzung in einer Region über mehrere Jahre sind zwar technisch möglich und würden sogar feldstückbezogene Informationen über die zeitliche Verteilung der Kulturen innerhalb von Katastralgemeinden mit sich bringen, sind jedoch sehr zeit- und kostenintensiv.

In einfachen Modellansätzen wird aus der statistischen Kulturenverteilung nur eine einzige sog. *Modellfruchtfolge* generiert und für den gesamten Modellzeitraum verwendet. Diese Modellfruchtfolge spiegelt zwar die statistische Kulturenverteilung einer Katastralgemeinde wider, jedoch wird mit diesem Ansatz immer nur eine einzige Kultur pro Jahr berücksichtigt. In der Realität kommen jedoch in landwirtschaftlich genutzten Regionen immer mehrere verschiedene Kulturen nebeneinander in einem Jahr vor. Aus diesem Grund wurde nach Methoden gesucht, die diese Unsicherheiten in den Modellergebnissen minimieren.

## Material und Methoden

Mögliche Methoden zur Minimierung von Modellunsicherheiten, welche auf den Input-Parameter Landnutzung zurückzuführen sind, sind die sog. *Fruchtfolge-Rotation (FF-Rotation)*, sowie das Zusammenmischen mehrerer verschiedener Fruchtfolgen (*FF-Mixer*) anstatt der Verwendung von nur einer *Modellfruchtfolge*. Des Weiteren wurde auch ein Software-Tool (*StotraPGen*) entwickelt, das eine kombinierte, optimierte und automatisierte Anwendung der beiden Methoden *FF-Rotation* und *FF-Mixer* ermöglicht. Im Folgenden werden die vier Methoden *Modellfruchtfolge*, *FF-Rotation*, *FF-Mixer* und *StotraPGen* beschrieben und am Beispiel der statistischen Kulturenverteilung der Katastralgemeinde Obergralla (Leibnitzer Feld, Steiermark) miteinander verglichen. In *Tabelle 1* ist die statistische Kulturenverteilung aus den

**Tabelle 1: Übersicht über die statistische Kulturenverteilung (INVEKOS) der Katastralgemeinde Obergralla von 1996 - 2010.**

KG Obergralla Kulturen	Flächenanteile [%]															Mittelwert Obergralla	Mittelwert WLF*
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010		
Körnermais	68	59	52	57	60	59	53	49	52	51	46	50	47	52	50	54	50
Ölkürbis	9	19	15	9	10	10	14	15	9	9	15	15	21	18	21	14	13
Dauergrünland**	8	8	9	10	8	8	9	10	10	12	13	10	10	8	8	9	12
Wintergerste	3	5	6	10	6	9	5	5	5	3	7	2	6	6	6	6	6
Silomais	3	3	3	3	3	4	5	4	6	7	6	6	8	7	9	5	2
Sojabohne	2	2	11	3	2	4	5	4	5	5	6	6	2	6	1	4	2
Winterweizen	2	1	1	3	4	3	6	9	2	4	4	5	5	2	4	4	4
Senf-winterhart***	0	1	0	3	6	2	1	1	8	3	2	0	0	0	0	2	2
Sommergerste***	5	3	2	1	1	1	0	1	0	4	0	2	0	0	0	1	2
Winterraps***	1	1	0	1	1	0	1	2	2	0	2	2	0	0	0	1	1
Gras-Luzerngemisch***	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1

\* ) WLF...Westliches Leibnitzer Feld, \*\* ) nicht in einer Fruchtfolge integriert, \*\*\* ) in der Modellrechnung nicht berücksichtigt (Mittelwert < 4 %)

**Tabelle 2: Übersicht über die verwendeten Düngermengen in der Modellrechnung (nach BMLFUW 2006, S. 24 und BMLFUW 2008, S. 12).**

[kg N/ha]	Anbaudüngung (Gülle)	2. Düngergabe (Mineraldünger)	3. Düngergabe (Mineraldünger)	Summe pro Kultur
Körnermais	50	90	-	140
Silomais	60	100	-	160
Ölkürbis	30	50	-	80
Winterweizen	30	50	50	130
Wintergerste	30	40	50	120
Sojabohne	-	-	-	-

**Tabelle 3: Ermittlung der Anzahl an Schlägen einer jeweiligen Kultur für die Modellfruchtfolge.**

Kultur	Flächenanteil [%]	Anzahl Schläge	Schläge gerundet
Körnermais	54 / 4 =	13,5	14
Ölkürbis	14 / 4 =	3,5	4
Wintergerste	6 / 4 =	1,5	2
Silomais	5 / 4 =	1,25	1
Sojabohne	4 / 4 =	1	1
Winterweizen	4 / 4 =	1	1
87		Anzahl Schläge gesamt: 23	

INVEKOS-Aufzeichnungen seit 1996 für Obergralla aufgelistet. Aus dieser Tabelle kann auch zusätzlich abgelesen werden, dass die mittlere Kulturenverteilung für den Zeitraum 1996-2010 in Obergralla nicht wesentlich von der Kulturenverteilung des gesamten Westlichen Leibnitzer Feldes (WLF) abweicht und somit als repräsentativ für dieses Gebiet angesehen werden kann. Kulturen unter einem mittleren Flächenanteil von 4 % werden in dieser Modellierung nicht berücksichtigt. Alle in der Sensitivitätsanalyse verglichenen Methoden basieren auf den gleichen statistischen Landnutzungsdaten (Tabelle 1) und den gleichen kulturspezifischen Düngermengen. Die Düngermengen wurden anhand der Richtlinien für die Sachgerechte Düngung (BMLFUW 2006, S. 24), bzw. für Ölkürbis auf Basis der Richtlinie für die Sachgerechte Düngung im Garten- und Feldgemüsebau (BMLFUW 2008, S. 12) für eine mittlere Ertragserwartung der Kulturen definiert und sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Für die Modellberechnungen wurde nur eine repräsentative Bodenform (Kartierungsbereich 20, Bodenform 15 der Österreichischen Bodenkartierung) herangezogen, welche im Wesentlichen aus lehmigem Sand, zum Teil aus sandigem Lehm besteht und mittel- bis hochwertiges Ackerland darstellt. Der Modellzeitraum ist von 1987 bis Ende 2009 definiert, wobei die Jahre 1981 bis Ende 1986 als Vorlaufzeit mitgerechnet, aber nicht ausgewertet werden. Alle der im Folgenden vorkommenden Fruchtfolgen werden im Modell in Kombination mit winterharten Gründecken bewirtschaftet.

### Modellfruchtfolge

Der Begriff *Modellfruchtfolge* beschreibt eine einfache Methode, aus der statistischen Kulturenverteilung (Tabelle 1) eine modellhafte Abfolge von Früchten zu definieren, die als Input-Parameter für die Modellierung von Grundwasserneubildung und Stickstoffauswaschung herangezogen wird. Vernachlässigt man alle Kulturen kleiner 4 % Flächenanteil und berücksichtigt, dass Dauergrünland nicht in einer Fruchtfolge mit anderen Kulturen vorkommt, bleiben noch sechs Kulturen übrig: Körnermais (KM), Ölkürbis (KÜ), Wintergerste (WG), Silomais (SM), Sojabohne (SJ) und Winterweizen (WW). Um nun herauszufinden, wie oft jede dieser Kulturen in der Modellfruchtfolge vorkommen muss, um der mittleren statistischen Kulturenverteilung zu entsprechen (und sodass die flächenmäßig kleinste berücksichtigte Kultur zumindest einmal in der Modellfruchtfolge vorkommt), dividiert man die Flächenanteile jeder einzelnen Kultur durch den Flächenanteil der kleinsten berücksichtigten Kultur und erhält die Anzahl der Schläge jeder Kultur innerhalb der Modellfruchtfolge. Im Fall der Katastralgemeinde Obergralla sind (nach dem Weglassen der Kulturen < 4 %) die flächenmäßig kleinsten Kulturen Sojabohne und Winterweizen zu je 4 %. Der Vorgang zur Ermittlung der Schlaganzahl einer Kultur ist in Tabelle 3 dokumentiert. Die Gesamtanzahl der Schläge innerhalb der Modellfruchtfolge für Obergralla beträgt 23 und füllt somit den gesamten Modellzeitraum von 1987 bis 2009 aus. In Tabelle 4 ist die definierte Modellfruchtfolge für Obergralla dargestellt. Die Vorlaufzeit von 1981 bis Ende 1986 wurde mit den Kulturen von 2004 bis 2009 ergänzt. Die Aufeinanderfolge der Kulturen ist zwar aus ackerbaulicher Sicht aufeinander abgestimmt, jedoch entspricht die Zuweisung der einzelnen Kulturen zu einem bestimmten Jahr nicht der Realität, da jedem Jahr genau nur eine Kultur zugewiesen wird. Des Weiteren ist die Kultur, mit der die Modellfruchtfolge begonnen wird, sehr willkürlich gewählt. Daher sind die Modellergebnisse für Grundwasserneubildung und Stickstofffracht sehr stark von der Position der verschiedenen Kulturen in der Modellfruchtfolge abhängig. Um diesen Einfluss zu korrigieren, bedient man sich der im Anschluss beschriebenen *Fruchtfolge-Rotation*.

**Tabelle 4: Definierte Modellfruchtfolge für die Katastralgemeinde Obergralla.**

Vorlaufzeit							Modellzeitraum (Auswertung)																						
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	
WG	KÜ	KM	KM	KM	WW	KÜ	KM	KM	KM	SJ	SM	KM	KM	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WW	
Schläge: 1							2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	

### FF-Rotation

Die *FF-Rotation* verhindert, dass wie bei der *Modellfruchtfolge* nur jeweils eine Kultur in einem Jahr berücksichtigt wird. Da man auf Basis der statistischen Kulturenverteilung sagen kann, zu welchen Prozentsätzen die einzelnen Kulturen in einer Katastralgemeinde nebeneinander vorkommen, wird bei der *FF-Rotation* (gezeigt am Beispiel der vorhin erstellten Modellfruchtfolge) wie folgt vorgegangen:

- Durch Verschieben der Startkultur in der Modellfruchtfolge um jeweils ein Jahr nach hinten (der letzte Schlag der

Modellfruchtfolge wird an den Beginn gesetzt) werden mehrere Varianten der gleichen Modellfruchtfolge generiert. Die Anzahl der so generierten Varianten entspricht der Anzahl der Glieder in der Modellfruchtfolge, d. h. am Beispiel Obergralla erhält man 23 Varianten der Modellfruchtfolge (Tabelle 5). Betrachtet man nun alle 23 Varianten, so wird die statistische Kulturenverteilung sogar in den Einzeljahren widerspiegelt.

- Mit Hilfe von SIMWASER/STOTRASIM werden Grundwasserneubildung und Stickstofffracht für alle 23 Varianten auf Tagesbasis berechnet.

Tabelle 5: Übersicht über die berücksichtigten Varianten bei der FF-Rotation der Modellfruchtfolge von Obergralla.

Jahr:	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Variante 1	KÜ	KM	KM	KM	SJ	SM	KM	KM	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WW
Variante 2	WW	KÜ	KM	KM	KM	SJ	SM	KM	KM	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM
Variante 3	KM	WW	KÜ	KM	KM	KM	SJ	SM	KM	KM	KÜ	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM
Variante 4	KM	KM	WW	KÜ	KM	KM	KM	SJ	SM	KM	KM	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM
Variante 5	KM	KM	KM	WW	KÜ	KM	KM	KM	SJ	SM	KM	KM	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ
...																							
Variante 21	KM	SJ	SM	KM	KM	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WW	KÜ	KM	KM
Variante 22	KM	KM	SJ	SM	KM	KM	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WW	KÜ	KM
Variante 23	KM	KM	KM	SJ	SM	KM	KM	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WG	KÜ	KM	KM	KM	WW	KÜ
Modellergebnis:	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$	$\chi_6$	$\chi_7$	$\chi_8$	$\chi_9$	$\chi_{10}$	$\chi_{11}$	$\chi_{12}$	$\chi_{13}$	$\chi_{14}$	$\chi_{15}$	$\chi_{16}$	$\chi_{17}$	$\chi_{18}$	$\chi_{19}$	$\chi_{20}$	$\chi_{21}$	$\chi_{22}$	$\chi_{23}$

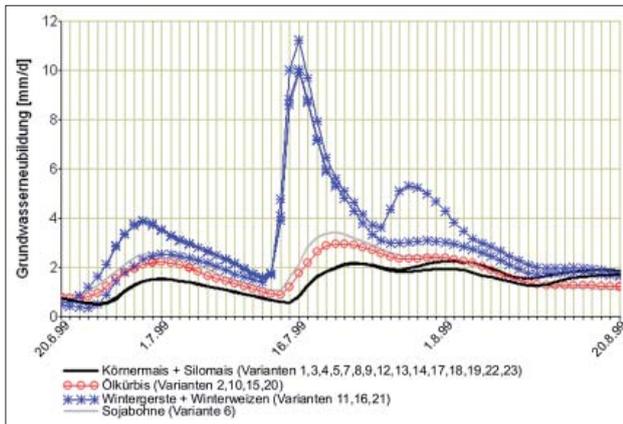


Abbildung 1: Tagessummen der Grundwasserneubildungen aller 23 Varianten der FF-Rotation für den Zeitraum 20.6.1999 bis 20.8.1999.

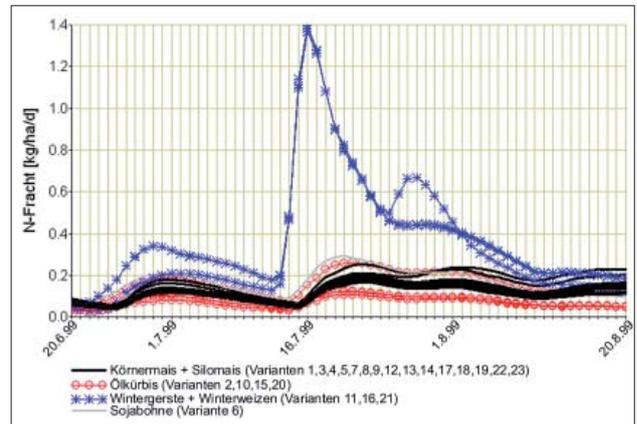


Abbildung 2: Tagessummen der Stickstofffrachten aller 23 Varianten der FF-Rotation für den Zeitraum 20.6.1999 bis 20.8.1999.

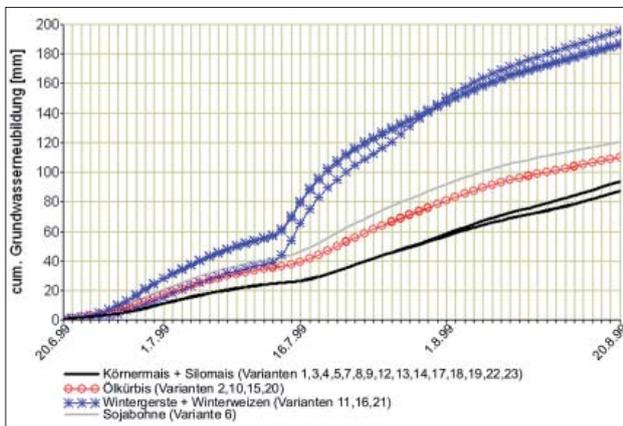


Abbildung 3: Summenkurven der Grundwasserneubildungen aller 23 Varianten der FF-Rotation für den Zeitraum 20.6.1999 bis 20.8.1999.

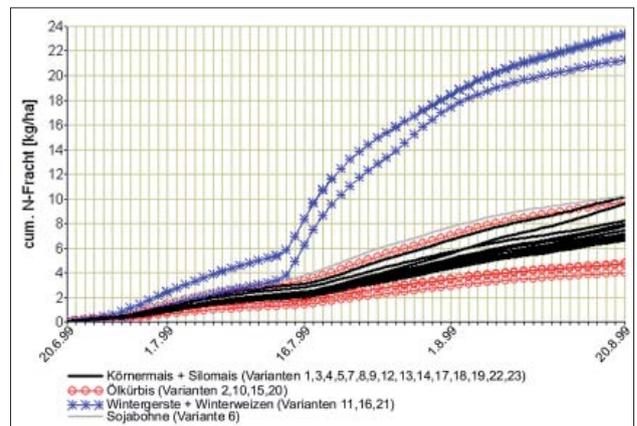


Abbildung 4: Summenkurven der Stickstofffrachten aller 23 Varianten der FF-Rotation für den Zeitraum 20.6.1999 bis 20.8.1999.

- Das Modellergebnis der FF-Rotation ergibt sich aus dem Mittelwert aller Varianten am jeweiligen Tag.

Das manuelle Erstellen der Input-Files für SIMWASER/STOTRASIM dieser 23 Varianten ist eine sehr zeitaufwändige Prozedur. Jedoch wird mit Hilfe der FF-Rotation verhindert, dass sich vegetationsabhängige Extremwerte, d. h. sehr hohe oder niedrige Grundwasserneubildungen oder Stickstofffrachten, die auf nur eine bestimmte Kultur zurückzuführen sind, zu stark ausprägen. Die Wichtigkeit der FF-Rotation auf Tages- und Monatsbasis soll hier anhand der Streuung der einzelnen Varianten für den Zeitraum 20.06.1999 bis 20.08.1999 kurz dargestellt werden. In *Abbildung 1* sind die Variantenunterschiede der Grundwasserneubildung auf Tagesbasis zu sehen, wo die maximale Spannweite am 16.07.1999 von 10,4 mm/d zwischen Winterweizen und Körnermais auftritt. Die Stickstofffracht in *Abbildung 2* unterscheidet sich an diesem Tag um 1,34 kg/ha/d zwischen den Minimalwerten (Ölkürbis, Mais) und Maximalwerten (Winterweizen, Wintergerste). Wie in *Abbildung 3* und *Abbildung 4* zu sehen ist, kumulieren sich die Unterschiede über den Zeitraum dieser zwei Monate auf ca. 110 mm Grundwasserneubildung (zwischen Winterweizen und Körnermais) und ca. 20 kg/ha Stickstofffracht (zwischen Wintergerste und Ölkürbis). Diese Werte zeigen, dass bei einer Betrachtung der Ergebnisse auf Tages- und Monatsbasis eine FF-Rotation unbedingt anzustreben ist. Auch beim Vergleich von Einzeljahressummen zeigen sich noch sehr große Unterschiede. Die maximalen Spannweiten zwischen den einzelnen Varianten betragen bei der Grundwasserneubildung 76,3 mm/a (Jahr 1998) und bei der Stickstofffracht 53,4 kg/ha/a (Jahr 1994). Lediglich bei der Betrachtung von mittleren Jahressummen werden die Spannweiten zwischen den verschiedenen Varianten vernachlässigbar klein (Spannweite Grundwasserneubildung: 12,3 mm/a; Spannweite Stickstofffracht: 5,6 kg/ha/a), was eine FF-Rotation für diese Aussage nicht notwendig macht.

### FF-Mixer

Das Mixen von Fruchtfolgen beschreibt das Zusammenführen von mehreren verwendeten FF-Rotationen zu einem Gesamtergebnis, indem jede berücksichtigte FF-Rotation zu einem gewissen Prozentsatz gewichtet wird. D. h. es wird nicht nur eine FF-Rotation in der Modellrechnung verwendet, sondern es können beliebig viele FF-Rotationen herangezogen werden. Man könnte z. B. aus der 23-schlägigen Modellfruchtfolge, welche eher nicht praxisüblich erscheint, zwei oder mehrere kürzere Fruchtfolgen machen und deren Ergebnisse aus der FF-Rotation im Anschluss zusammenmixen. Einen Ausnahmefall einer FF-Rotation stellt das Dauergrünland dar (jedes Jahr die gleiche Kultur), welches bis jetzt im Beispiel der Katastralgemeinde Obergralla weder in der Modellfruchtfolge, noch in der FF-Rotation berücksichtigt wurde, jedoch aber zur landwirtschaftlichen Nutzfläche zu zählen ist. Anhand von Dauergrünland wird im Folgenden das Prinzip des FF-Mixers erklärt.

Aus der statistischen Kulturenverteilung ist bekannt, dass Dauergrünland in Obergralla mit 9 % Flächenanteil vorkommt. Der Anteil der Kulturen innerhalb der FF-Rotation beträgt 87 % (54 % Körnermais, 14 % Ölkürbis, 6 % Win-

**Tabelle 6: Prinzip des FF-Mixers am Beispiel der mittleren Jahressummen von Grundwasserneubildung und Stickstoffaustrag für Obergralla.**

	FF-Rotation (90,6 %)	Dauergrünland (9,4 %)	Ergebnis-Mix
GWNB [mm/a]	243,7 * 0,96 +	259,1 * 0,094 =	245,1
N-Fracht [kg/ha/a]	29,4 * 0,96 +	5,3 * 0,094 =	27,1

GWNB...Grundwasserneubildung      N-Fracht...Stickstofffracht

tergerste, 5 % Silomais, 4 % Sojabohne, 4 % Winterweizen; siehe *Tabelle 1*). Jene 4 % an Kulturen, welche in der Modellrechnung nicht berücksichtigt werden (Senf, Sommergerste, Winterraps, Luzerne; siehe *Tabelle 1*), werden auf die FF-Rotation bzw. das Dauergrünland aufgerechnet. Somit ergibt sich das Verhältnis von 90,6 % FF-Rotation zu 9,4 % Dauergrünland. *Tabelle 6* zeigt exemplarisch die Berechnung des gemixten Ergebnisses anhand der mittleren Jahressummen für Grundwasserneubildung und Stickstofffracht im Modellgebiet Obergralla. Die Mitberücksichtigung des Dauergrünlandes ist ein weiterer Schritt, die Realität in der Modellrechnung so gut wie möglich nachzubilden. Des Weiteren sind sehr lange Modellfruchtfolgen nicht praxisüblich und können mit Hilfe des FF-Mixers verhindert werden. Man muss jedoch beachten, dass bei der Verwendung von mehreren FF-Rotationen es relativ schwierig ist, die Prozentsätze der jeweiligen FF-Rotation für das Mixen zu ermitteln, sodass die statistische Kulturenverteilung so gut wie möglich wiedergegeben wird. Das Software-Tool StotraPGen beinhaltet daher Lösungsansätze, indem das Rotieren und Mixen von Fruchtfolgen sehr genau und schnell verwirklicht werden kann.

### StotraPGen

Am JOANNEUM RESEARCH Graz, Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit, wurde das Software-Tool *StotraPGen* (Stotrasim-Projekt-Generator) entwickelt, das auf Basis der Methoden *FF-Rotation* und *FF-Mixer* in Verbindung mit dem Modellverbund SIMWASER/STOTRASIM über mehrere Pre- und Postprocessing-Operationen die Verwendung des Input-Parameters Landnutzung aus der statistischen Kulturenverteilung automatisiert und optimiert. So wird mit diesem Tool die Berücksichtigung mehrerer regionaltypischer Fruchtfolgen (sog. *Leitfruchtfolgen*), wie sie in den betrachteten Modellgebieten tatsächlich angebaut werden, erheblich erleichtert. Diese Leitfruchtfolgen (inkl. deren Bewirtschaftungsweisen und Düngenniveaus von Kulturen) werden in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftlichen Umweltberatung Steiermark für Modellregionen erstellt und geben die praxisübliche Bewirtschaftung wieder. D. h. anders als bei der Modellfruchtfolge, wo die Anzahl und die Abfolge der Kulturen von der mittleren statistischen Kulturenverteilung einer Katastralgemeinde abgeleitet wird, werden hier – unabhängig von der Kulturenverteilung – praxisübliche Leitfruchtfolgen erstellt (siehe *Tabelle 7*), welche von StotraPGen automatisch rotiert und auf den Modellzeitraum ausgeweitet werden. Erst anschließend wird auf Basis der statistischen INVEKOS-Landnutzungsverteilung der einzelnen Jahre über ein in

**Tabelle 7: Übersicht über die verwendeten Leitfruchtfolgen für die Katastralgemeinde Obergralla in StotraPGen.**

Schlag:	1	2	3	4	5	Anteil
LFF 1	KM-Monokultur					14 %
LFF 2	KM	KÜ	KM	WG	KM	30 %
LFF 3	KÜ	KM	WW	KM	KM	20 %
LFF 4	KM	KM	SJ	SM	KÜ	26 %
LFF 5	Dauergrünland					10 %
LFF...Leitfruchtfolge	WW...Winterweizen					100 %
KM...Körnermais	SJ...Sojabohne					
KÜ...Ölkürbis	SM...Silomais					
WG...Wintergerste						

StotraPGen integriertes Optimierungsverfahren der Anteil jeder FF-Rotation pro Katastralgemeinde so errechnet, dass die vorkommenden Kulturen in den FF-Rotationen den INVEKOS-Daten so gut wie möglich entsprechen (Spalte Anteil in *Tabelle 7* zeigt exemplarisch die von *StotraPGen* ermittelte Gewichtung der einzelnen Fruchtfolgen am Gesamtergebnis). Die Ermittlung dieser Anteile ist notwendig für das spätere Mixen der FF-Rotationen. Zuvor werden jedoch von StotraPGen noch alle Landnutzungs-Inputfiles und SIMWASER/STOTRASIM-Projektfiles generiert und die gesamte SIMWASER/STOTRASIM-Modellrechnung automatisiert abgearbeitet. Die Ergebnisse für die Wasser- und Stickstofffracht im Boden werden von SIMWASER/STOTRASIM in einer Zeit-Tiefen-Matrix ausgegeben, d. h. Wasser- und Stofffracht sind als Tagessummen des gesamten Modellzeitraums in 10 cm Tiefenstufen (bis zur maximalen Tiefe des Bodenprofils im Modell) bekannt. Mit Hilfe der FF-Mix-Funktion in StotraPGen kann für jede gewünschte Tiefe das gemixte Ergebnis auf Tagesbasis ausgegeben werden.

Des Weiteren soll noch erwähnt werden, dass es nicht zwingend notwendig ist, eine Leitfruchtfolge mit bestimmten Bewirtschaftungsweisen und bestimmten Düngermengen über den gesamten Modellzeitraum anzuwenden, sondern es ist auch möglich, innerhalb des Modellzeitraums einzelne Perioden mit verschiedenen Leitfruchtfolgen zu definieren (z. B. Leitfruchtfolge 1: 1987-2009; Leitfruchtfolge 2a von 1987-2000 und Leitfruchtfolge 2b von 2001-2009). Dies ist notwendig, wenn sich im Laufe der Zeit starke Änderungen der statistischen Kulturenverteilung bzw. Änderungen im Düngenniveau von Kulturen ergeben (z. B. bei Leitfruchtfolge 2a wird für Körnermais um 20 kg/ha/a mehr Stickstoff aufgebracht als bei Leitfruchtfolge 2b).

## Ergebnisse

Die Modellergebnisse von Grundwasserneubildung und Stickstoffaustrag der vier zuvor beschriebenen Methoden *Modellfruchtfolge*, *FF Rotation*, *FF-Mixer* und *StotraPGen* werden hier anhand des Beispiels Obergralla auf verschiedenen Betrachtungsskalen verglichen:

### Mittlere Jahressummen

In *Tabelle 8* sind die mittleren Jahressummen für Grundwasserneubildung und Stickstoffaustrag ins Grundwasser, sowie die mittlere Nitratkonzentration für das Modellge-

**Tabelle 8: Mittlere Jahressummen der unterschiedlichen Methoden für Grundwasserneubildung (GWNB), Stickstofffracht (N-Fracht) und Nitratkonzentration (cNO<sub>3</sub>).**

Mittlere Jahressumme	GWNB [mm]	N-Fracht [kg/ha]	cNO <sub>3</sub> [mg/l]
Modell-FF	246.4	31.0	55.8
FF-Rotation	243.7	29.4	53.5
FF-Mixer (Rot.+Grünland)	245.3	26.9	48.6
StotraPGen	245.5	28.7	51.9
Spannweite	2.7	4.1	7.2

biet Obergralla dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen den vier verschiedenen Methoden im langjährigen Mittel sehr gering sind. Die Spannweite der Grundwasserneubildung beträgt 2,7 mm/a, die der Stickstofffracht 4,1 kg/ha/a. Das ergibt für die mittlere Nitratkonzentration eine Differenz von 7,2 mg/l zwischen Maximal- und Minimalwert. Des Weiteren kann gesagt werden, dass die mittlere Jahressumme der Grundwasserneubildung rund 26 % des mittleren Jahresniederschlags (928 mm/a; Zeitraum 1987-2009) und die mittlere Jahressumme des Stickstoffaustrags ca. 23 % der im Modell durchschnittlich aufgebrauchten Stickstoffmenge aller Kulturen pro Jahr (122 kg/ha/a) beträgt.

### Einzeljahressummen

Die Summen der Grundwasserneubildung und des Stickstoffaustrags für die einzelnen Jahre des Modellzeitraums, sowie die daraus resultierenden mittleren Nitratkonzentrationen im Sickerwasser sind in *Tabelle 9* für die beiden Methoden *Modellfruchtfolge* und *StotraPGen* dargestellt. Wie man an der Spannweite erkennen kann, ergeben sich schon wesentlich größere Unterschiede zwischen der *Modellfruchtfolge* und *StotraPGen* als bei den mittleren Jahressummen über den gesamten Modellzeitraum. Die maximale Spannweite bei der Grundwasserneubildung liegt im Jahr 1991 und beträgt 26 mm, d. h. man hätte bei der Berechnung der Grundwasserneubildung mit Hilfe der *Modellfruchtfolge* anstatt mit *StotraPGen* eine um 26 mm erhöhte Sickerwassermenge für das Jahr 1991 modelliert. Dieser Unterschied entspricht in etwa 11 % der mittleren Jahressumme der Grundwasserneubildung von 245 mm. Bei der Stickstofffracht ergibt sich die größte Spannweite mit 19 kg/ha (oder 63 % der mittleren Jahressumme von 29 kg/ha) im Jahr 1992. Die absoluten Werte mögen bezogen auf die Dauer eines Jahres nicht sonderlich hoch erscheinen, betrachtet man jedoch die daraus resultierende Nitratkonzentration, welche im Jahr 1992 eine Spannweite von 31 mg/l aufweist, scheinen die Unsicherheiten bei der Verwendung der *Modellfruchtfolge* schon relativ groß zu sein.

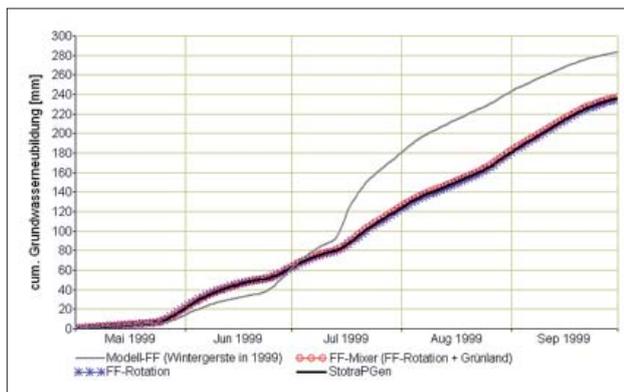
### Monatssummen

Diese Betrachtungsskala bezieht sich nicht genau auf die Dauer eines Monats, sondern es wurde nach einer Periode gesucht, welche sehr große Abweichungen zwischen den Methoden *Modellfruchtfolge*, *FF Rotation*, *FF-Mixer* (*FF-Rotation + Grünland*) und *StotraPGen* aufweist. Eine solche Periode kommt zwischen Anfang Mai und Ende

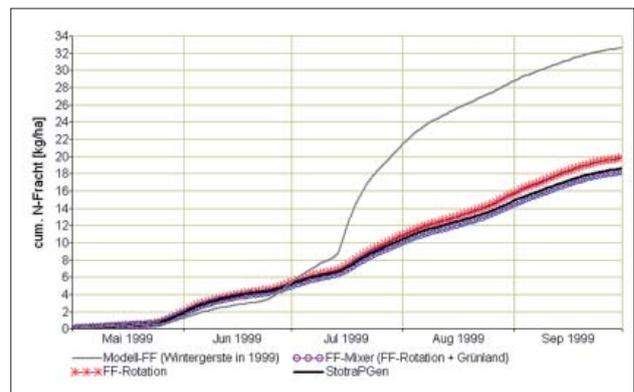
**Tabelle 9: Jahressummen für Grundwasserneubildung (GWNB) und Stickstoffaustrag (N-Fracht), sowie mittlere Nitratkonzentrationen (cNO<sub>3</sub>) der Methoden Modellfruchtfolge und StotraPGen für Einzeljahre.**

GWNB [mm]	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Modell-FF	203	230	109	98	250	279	266	415	362	541	133	429	400	178	111	206	111	125	127	233	202	130	533
StotraPGen	225	229	107	95	224	283	252	402	385	558	118	413	385	186	121	190	98	142	147	233	189	128	537
Spannweite	22	0	2	3	26*	4	14	13	24	17	15	17	15	8	10	16	13	18	21	0	14	2	4
N-Fracht [kg/ha]	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Modell-FF	48	32	12	12	37	60	45	50	46	62	12	37	43	14	11	20	15	17	20	30	20	12	60
StotraPGen	41	42	16	12	36	41	31	44	46	53	10	41	30	16	13	19	13	20	21	25	21	14	56
Spannweite	7	9	4	1	1	19*	14	6	0	9	1	4	13	2	2	1	2	3	1	4	0	1	4
cNO <sub>3</sub> [kg/ha]	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Modell-FF	105	62	48	53	65	95	75	54	56	51	39	38	48	35	44	43	58	60	68	56	45	42	50
StotraPGen	81	81	67	58	72	64	55	49	53	42	39	44	35	38	46	45	59	63	63	48	49	47	47
Spannweite	24	18	19	5	6	31*	20	5	3	9	0	6	13	2	2	2	0	3	6	8	4	5	3

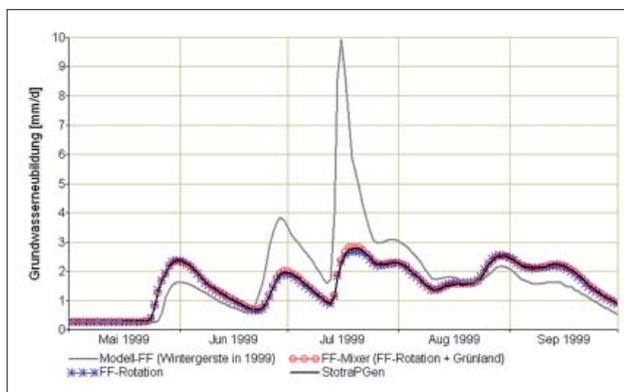
\*) maximale Spannweite



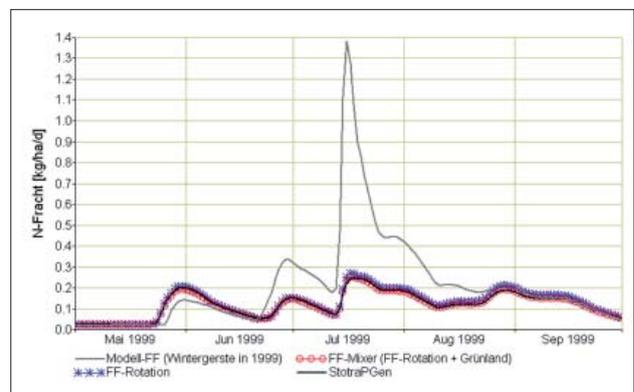
**Abbildung 5: Kumulierte Tagessummen der Grundwasserneubildungen für die Methoden Modellfruchtfolge, FF-Rotation, FF-Mixer und StotraPGen von 1.5.1999 bis 30.9.1999.**



**Abbildung 6: Kumulierte Tagessummen der Stickstofffrachten für die Methoden Modellfruchtfolge, FF-Rotation, FF-Mixer und StotraPGen von 1.5.1999 bis 30.9.1999.**



**Abbildung 7: Tagessummen der Grundwasserneubildungen für die Methoden Modellfruchtfolge, FF-Rotation, FF-Mixer und StotraPGen von 1.5.1999 bis 30.9.1999.**



**Abbildung 8: Tagessummen der Stickstofffrachten für die Methoden Modellfruchtfolge, FF-Rotation, FF-Mixer und StotraPGen von 1.5.1999 bis 30.9.1999.**

September 1999 vor und soll darstellen, wie groß die Unterschiede in einem Zeitraum von fünf Monaten sein können. Während, wie in *Abbildung 5* und *Abbildung 6* zu sehen ist, die Verläufe von *FF Rotation*, *FF-Mixer* (FF-Rotation

+ Grünland) und *StotraPGen* für die Grundwasserneubildung und den Stickstoffaustrag nahezu gleich sind, hebt sich der Verlauf der *Modellfruchtfolge* sehr stark von den übrigen Summenkurven ab. Die Unterschiede zwischen der

*Modellfruchtfolge* und der Methode *StotraPGen* sind nach fünf Monaten ca. 48 mm für die Grundwasserneubildung und ca. 14 kg/ha für die Stickstofffracht. Bei genauerer Betrachtung ist zu erkennen, dass diese Differenzen eigentlich sogar nur aus den drei Monaten Juli, August und September resultieren und stellen für diesen Zeitraum eine beträchtliche Summe dar.

### Tagessummen

*Abbildung 7* und *Abbildung 8* zeigen die Unterschiede für Grundwasserneubildung und Stickstoffaustrag zwischen den vier Methoden auf Tagesbasis. Es ist wiederum zu erkennen, dass die Kurven für *FF Rotation*, *FF-Mixer* (FF-Rotation + Grünland) und *StotraPGen* nahezu ident verlaufen und nur die *Modellfruchtfolge* davon abweicht. Der maximale Unterschied zwischen der *Modellfruchtfolge* und den übrigen Methoden ergibt sich am 16.7.1999 mit Differenzen von 7,7 mm für die Grundwasserneubildung und von 1,13 kg/ha für die Stickstofffracht. Vergleicht man diese Abweichungen mit den mittleren Tagessummen von Grundwasserneubildung (0,67 mm/d) und Stickstoffaustrag (0,079 kg/ha/d), so kann man sagen, dass die Differenzen zwischen der *Modellfruchtfolge* und den restlichen Methoden bei der Grundwasserneubildung um 11 Mal größer und beim Stickstoffaustrag um 14 Mal größer sind als die mittleren Tagessummen.

### Diskussion

Wie anhand der Ergebnisse zu sehen ist, ergeben sich je nach Betrachtungsskala mehr oder weniger große Unterschiede zwischen *Modellfruchtfolge*, *FF Rotation*, *FF-Mixer* (FF-Rotation + Grünland) und *StotraPGen*. Während die Differenzen in den mittleren Jahressummen von Grundwasserneubildung und Stickstoffaustrag zwischen den vier Methoden vernachlässigbar klein sind, hebt sich bei allen anderen betrachteten Zeitskalen vor allem die **Modellfruchtfolge** immer wieder sehr stark von den Restlichen ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei dieser Methode nur jeweils eine Kultur pro Jahr berücksichtigt wird und sich somit, besonders auf Monats- und Tagesbasis, vegetationsabhängige Extremwerte ergeben (*Abbildung 5* bis *Abbildung 8*). Vor allem bei Wintergetreide mit einem relativ frühen Erntezeitpunkt (Ende Juni bis Ende Juli) wirken sich Niederschläge im Sommer und Frühherbst durch die fehlende Interzeptions- und Transpirationsverdunstung stark auf die Grundwasserneubildung und somit auf die Stoffverlagerung im Boden aus. Auf Einzeljahresbasis (*Tabelle 9*) sind die Ergebnisunterschiede zwischen *Modellfruchtfolge* und *StotraPGen* bei der Stickstofffracht im Bereich der Monatsbasis (19 kg/ha vlg. mit 14 kg/ha), bei der Grundwasserneubildung jedoch deutlich unter der Monatsbasis (26 mm vlg. mit 48 mm). Grund dafür könnte sein, dass sich die Extremwerte bei der Grundwasserneubildung aufgrund des größeren Betrachtungszeitraums schon ausgleichen.

Mit Hilfe der **FF-Rotation** ist es möglich – unabhängig von der Zeitskala – vegetationsabhängige Extremwerte in den Modellergebnissen auszugleichen, indem alle in einer Katastralgemeinde vorkommenden Kulturen in

jedem einzelnen Jahr berücksichtigt werden (gewichtet nach der statistischen Kulturenverteilung). Für Betrachtungen von Grundwasserneubildung und Stickstoffaustrag auf Einzeljahres-, Monats- oder Tagesbasis ist diese Methode daher unbedingt anzustreben. Da jedoch der Aufwand der manuellen Erstellung der einzelnen Varianten sehr groß ist, ist die standardmäßige Anwendung dieser „manuellen FF-Rotation“ auf regionaler Ebene nicht realisierbar.

Abgesehen vom Aufwand, der beim **FF-Mixer** noch größer als bei der *FF-Rotation* ist, bietet diese Methode eine sehr gute Möglichkeit, die Realität (auf Basis von statistischen Kulturenverteilungen) noch besser wiederzugeben. Z. B. bewirkt das prozentuell gewichtete Mixen des Dauergrünlandes zur FF-Rotation Ergebniskorrekturen von Grundwasserneubildung und Stickstoffaustrag, die je nach Betrachtungsskala unterschiedlich hoch ausfallen. Im Allgemeinen erhöht eine Berücksichtigung von Dauergrünland die Grundwasserneubildung und senkt den Stickstoffaustrag ins Grundwasser (*Tabelle 6*). Das ist zum einen darauf zurückzuführen, dass der Wasserentzug über die Wurzeln bei Gras geringer ist als bei Ackerkulturen, und zum anderen, dass auf Grünland in der Modellrechnung kein Dünger angewendet wurde. Die Ermittlung des jeweiligen prozentuellen Gewichts einer FF-Rotation ist sehr komplex und ohne Computerunterstützung auf der regionalen Skala sehr schwierig.

Mit Hilfe des Software-Tools **StotraPGen** können alle Vorteile von *FF-Rotation* und *FF-Mixer* ohne großen Aufwand automatisiert bewerkstelligt und SIMWASER/STOTRASIM für landwirtschaftlich genutzte Flächen auf regionaler Ebene einfacher angewendet werden. Durch das Optimierungsverfahren werden die Prozentsätze für das Mixen der FF-Rotationen sehr genau an die vorgegebene statistische Kulturenverteilung angepasst und dadurch das Modellergebnis noch weiter verbessert. Des Weiteren wird durch die Verwendung von praxisüblichen Leitfruchtfolgen die Wirkung der Vorfrucht auf das Modellergebnis noch besser berücksichtigt. Dies hat bei Betrachtung von *Abbildung 1* und *Abbildung 2* jedoch weniger Einfluss auf die Grundwasserneubildung als auf die Stickstofffracht, die zwischen den gleichen Kulturen (Ausnahme Wintergetreide) eine größere Streuung aufweist. So ist z. B. die Streuung bei Ölkürbis in *Abbildung 2* darauf zurückzuführen, dass die höher liegende Kurve Körnermais als Vorfrucht hat, die drei tiefer liegenden jedoch Wintergetreide.

### Danksagungen

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

Die Landnutzungsinformationen aus der INVEKOS-Datenbank (139 Katastralgemeinden im Untersuchungsgebiet Murtal von Graz bis Radkersburg inklusive Stiefingtal) wurden von der Landwirtschaftskammer Steiermark mit freundlicher Unterstützung der Landwirtschaftlichen Umweltberatung Steiermark ([www.lub.at](http://www.lub.at)) zur Verfügung gestellt.

## Literatur

- 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, Band 7, 14-41, Wien.
- BMLFUW, 2006: Richtlinien für die Sachgerechte Düngung. Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft. – 6. Aufl., Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 79 S., Wien.
- BMLFUW, 2008: Richtlinien für die Sachgerechte Düngung im Garten- und Feldgemüsebau mit Kulturdatenblätter. – 3. Aufl., Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 169 S., Wien.
- STENITZER, E., 1988: SIMWASER – Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. – Mitt. der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, 31: 1-118, Petzenkirchen.