

## 8.4 Regionaler Stoffhaushalt (TP IV-4a)

Teilprojektleiter: Dr. W. Windhorst

Bearbeiter: Dr. E.-W. Reiche, Dr. A. Rinker

### 8.4.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Teilvorhabens „Quantitative Beschreibung des Landschaftsstoffhaushaltes“ werden – basierend auf hoch auflösenden Standortinformationen – modellgestützte Berechnungen zu Auswirkungen teilschlagspezifischer Pflanzenbaumethoden auf den Landschafts-Wasser-, Nährstoff- und Kohlenstoffhaushalt durchgeführt. Ziel ist es, auf der Grundlage des heute bekannten Prozessverständnisses Aussagen darüber abzuleiten, in welchem Maße die Einführung von teilschlagspezifischen Anbaumethoden Konsequenzen auf den Landschaftswasser- und Stoffhaushalt hat. Unter Verwendung flächenhaft vorliegender Standortinformationen können mittels spezifisch angepasster Modellierungswerkzeuge Landnutzungsszenarien beschrieben werden. Damit lassen sich Vergleichsrechnungen durchführen, um die bei konventioneller Anbauweise anfallenden Stoffverluste denen unter Einsatz von schlagspezifischen Pflanzenbaumethoden gegenüberzustellen. Dabei wird zwischen zwei Anbauvarianten unterschieden: eine, bei der die technischen Möglichkeiten teilschlagspezifischer Pflanzenbaumethoden nur in Hinblick auf eine Ertrags- bzw. Gewinnmaximierung optimiert wurden, und eine, bei der die Vermeidung negativer Umwelteffekte als Vorgabe berücksichtigt wurde. Um Standortsensitivitäten in einer an die Fragestellung angepassten Weise zu erfassen, werden eine Reihe von möglichst digital verfügbaren bzw. mit relativ geringem Aufwand aufbereitbaren Datenbeständen in Kombination gebracht und so aufbereitet, dass sie zur Modellparameterisierung verwendbar sind. Hierzu zählen Daten zur Bodenbeschaffenheit (Quelle: Bodenschätzung, bodenkundliche Landesaufnahme oder räumlich hoch aufgelöste Einzelkartierungen), zum Relief (möglichst digitale Höhenmodelle im Maßstab 1:5.000), zur Landnutzung (z. B. aus ATKIS, DGK5, TK25, Fernerkundungsdaten), zum Gewässernetz (z. B. aus ATKIS, DGK5, TK25) sowie Klimadaten (DWD, betriebsbezogene Wetterstationen). Im Einzelnen wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- gewässereinzugsgebietsbezogene Abgrenzung der Bilanzierungsräume,
- Aufbereitung der Ausgangsdaten durch Methoden zur „Digitalen Landschaftsanalyse und Modellierung“,
- Abschätzung der aktuellen Stoff-Austragsituation (konventioneller Ackerbau) auf der Basis von Simulationsrechnungen,
- Implementierung neuer Modell-Eingabemöglichkeiten zur Beschreibung kleinräumig unterschiedlichen Wachstumsverhaltens unter Berücksichtigung der Aussaatstärke, unterschiedlicher Bodenbearbeitungstiefen und unterschiedlicher Stickstoff-Düngermengen,
- Modellüberprüfung und -optimierung anhand vorliegender Messergebnisse zum Weizen-ertrag und zu  $N_{\min}$ -Gehalten,
- modellgestützte Abschätzung der nach Einführung von kleinräumig differenzierten Ackerbautechniken entstehenden Effekte, bezogen auf den regionalen Stoffhaushalt (Nährstoff, Kohlenstoff und Wasserbilanzen),
- Formulierung und modellgestützte Testung von Anbauregeln, die durch Beachtung von kleinräumigen Standortunterschieden zu Stoffaustragsreduzierungen führen,

- prototypische Erarbeitung einer Methodik zur Einbindung landschaftsökologischer Zielgrößen bei der Erstellung von Applikationskarten.

Als Ergebnis der Berechnungen werden folgende, für jeden Teilschlag berechneten Kenngrößen ermittelt: Wasserhaushaltskomponente (Verdunstung, Grundwasserneubildungsrate, laterale Abflusskomponente), Bodenabtrag, gasförmige Stickstoffverluste, Nitratverlagerung mit dem Sickerwasser, Veränderung des Kohlenstoffvorrates im Boden, Nettoprimärproduktion, CO<sub>2</sub>-Freisetzungsrate. Die Abschätzungen wurden für Gewässereinzugsgebiete durchgeführt, welche jeweils mehrere tausend Hektar umfassen und die Versuchsstandorte Thumby, Kassow und Wulfen repräsentieren.

## Summary

The task of the subproject "Quantitative description of matter balances on the landscape level" is to evaluate the effects of precision agriculture concerning nutrient and water balances covering the field and the regional level too. This is modelled with a GIS-based model system, which could be validated on different spatial scales. The simulations are based on highly resolved spatial site data collected in the *pre agro*-project. The model tools are used to develop alternative land use scenarios estimating losses of matter caused by recent agricultural management (a) on the one hand and by site specific methods of precision agriculture (b). In both scenarios two optimisation strategies are distinguished, one aiming to maximise the economic yield and another aiming to avoid negative environmental effects. In order to take site specific differences into account as far as possible not only on the site level but on the regional level too, easy accessible digital landscape information and easy transformable analog information are used to assemble the data needed to run the model system. The following data sources are exploited: soil maps, digital terrain models, land use data, hydrological maps and meteorological data sets. If feasible, official data are used preferably and enriched by local information. Based on this, it is possible to elaborate an integrative site and regional evaluation covering following steps:

- regional separation of catchments in order to define the spatial area of matter balances,
- Harmonisation of all available site information in order to set up the data sets needed by the model (preprocessing),
- Simulation and estimation of matter losses caused by conventional agriculture,
- Integration of model features in order to take site specific differences of plant growth into account, which are caused by the precision agriculture (site specific plant numbers, site specific tillage depth, site specific nitrogen fertilisation),
- Calibration and optimisation of the model based on measured data about yield and soil nitrogen content,
- Simulation and estimation the effects of precision agriculture concerning regional nutrient and water balances,
- Model based development of rules to minimise matterlosses by site specific management,
- Development of strategies to allow the integration of landscape based environmental quality targets in precision agriculture.

## 8.4.2 Einleitung

Der Schwerpunkt der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten des Teilvorhabens „Regionaler Stoffhaushalt“ lag in der Konzeptionierung, programmtechnischen Umsetzung, Testung und flächenhaften Anwendung von Teilmodellen, mittels derer auf der Grundlage vorhandener Simulationsmodelle teilschlagspezifische Pflanzenbaumaßnahmen im Rahmen von Modellszenarien berücksichtigt werden können. Die in den vorangegangenen Jahren durchgeführten Arbeiten zur Aufbereitung flächenhaft vorliegender Standortdaten konnten abgeschlossen werden. Die im Teilvorhaben durchgeführten Regionalstudien beziehen sich auf die Standorte Thumby, Kassow und Wulfen. Die Anwendung von Einzelverfahren des Methodenpaketes DILAMO („Digitale Landschaftsanalyse und -modellierung“ (Reiche, 1999) erfordert eine Reihe von räumlich hoch aufgelösten Landschaftsdaten (Boden, Relief, Gewässernetz, Landnutzung). Während die Arbeiten für die Standorte Thumby und Kassow aufgrund der vorgefundenen Datenlage in befriedigender Weise durchgeführt werden konnten, ist bei den Ergebnissen, die sich auf den Standort Wulfen beziehen, mit größeren Unsicherheiten zu rechnen. Hier liegen Grundlagendaten (z. B. Höhenmodell, Bodenschätzungsdaten) nur lückenhaft bzw. in einer geringen räumlichen Auflösung vor.

Im hier vorliegenden Zwischenbericht wird exemplarisch auf Teilergebnisse Bezug genommen. Schwerpunktmäßig werden die Aspekte des regionalen Stickstoffhaushaltes beleuchtet. Hierzu werden Teilergebnisse der Regionalstudien Kassow und Thumby vorgestellt.

Die Ergebnisdarstellung gliedert sich wie folgt:

- Ausweisung austragssensitiver Teilflächen am Beispiel des Projektgebietes Kassow,
- modellgestützte Abschätzung von Einzelkomponenten des regionalen Stickstoffhaushaltes am Beispiel der Projektgebiete Kassow und Thumby,
- Erweiterungen und Anpassungen des Simulationsmodells WASMOD an spezifische Anforderungen des teilschlagspezifischen Pflanzenbaus.

## 8.4.3 Ausweisung austragssensitiver Teilflächen am Beispiel des Projektgebietes Kassow

Die Aufbereitung der Ausgangsdaten erfolgte mit dem Methodenpaket DILAMO (Digitale Landschaftsanalyse und -modellierung). Dieses aufeinander abgestimmte System von Computermodellen dient der komplexen Analyse und Bewertung von Landschaftsräumen. DILAMO bietet mit dem Programm WASMOD die Möglichkeit, auf verschiedenen Maßstäben - vom Bodenprofil bis zum Einzugsgebiet von mehreren 100 km<sup>2</sup> Größe - den Stoff-, Wasser- und Energiehaushalt und die darin stattfindenden Prozesse dynamisch in ihren Ursache-Wirkungsbeziehungen modellhaft zu berechnen. Darüber hinaus kann mit den Programmen „BOSSA“, „TOPNEW“, „TOPTRA“, „TOPNET“ und „SURREAL“ unter Zuhilfenahme eines GIS eine boden-, relief- und hydrologiebezogene Strukturanalyse des Gebietes durchgeführt werden. Das Modellsystem kombiniert dynamische und statische Rechenverfahren. Durch die Kopplung mit dem Geographischen Informationssystem ARC/INFO können topologische Informationen in die Berechnungen einfließen und so eine räumlich differenzierte Darstellung der Ergebnisse ermöglichen. Die Anwendung der aufgeführten Verfahren verhilft unter anderem zu einer differenzierten Analyse standörtlicher Sensitivitäten in Hinblick auf nutzungsbedingte Stoffverluste.

Tab. 8.4-1: DILAMO, ein Methodenpaket zur digitalen Landschaftsanalyse und Modellierung: einbezogene Informationsebenen, Datenquellen, Auswertungsmethoden und Resultate (Reiche et al., 1999)

Tab. 8.4-1: DILAMO, a package of digital methodes for landscape analysis and modelling

Informationsebenen			
Boden	Relief	Gewässernetz und andere linienhafte Landschaftselemente	Flächennutzung und Vegetation, Wetterdaten
Datenquellen			
Kartierergebnisse, Profilbeschriebe der Bodenschätzung	Digitale Höhenmodelle (DGM 5; DGM 25, DGM 50)	ATKIS-Geometrien und Attributinformationen, DGK 5, Aufzeichnungen der Wasser- u. Bodenverbände	Biotoptypenkartierung der Landesämter, Fernerkundung, Gemeinde- und Agrarstatistik, Daten des DWD.
Auswertungsmethoden und Modelle			
„BOSSA-SH“ profilbezogene Ableitung relevanter Bodenkenngrößen, Bewertung der Bodenfunktionen; SURREAL: flächenhafte Zuordnung von Profilinformationen	„TOPNEW“ Analyse der Reliefsituation (Hang- und Senkenidentifikation, Abgrenzung topographischer Einzugsgebiete, Erosionsabschätzung)	„TOPTRA“ Kalkulation von Grundwassergleichen und Analyse der Abflusssituation, flächenbezogene Oberflächen- und Grundwasserabflusszuordnung	„WASMOD“ Flächenhafte dynamische Modellierung von Stoff- u. Wasserflüssen in der Biosphäre, Pedosphäre u. Hydrosphäre.
Ergebnisse			
Bodenarten/-typen-Kennzeichnung, Zuordnung bodenphysikalischer Eigenschaften, Einordnung in ein funktionsbezogenes Bewertungsschema	rasterbezogene Angaben zur Hanglänge, Hangform und Hangneigung, Angaben zum mittleren jährlichen Bodenabtrag	mittlere Grundwasserstände, Kennzeichnung von Abflussbarrieren und Einzugsgebietsgrenzen	polygon- und vorfluterbezogene Berechnung von Wasser-, Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorbilanzen

Als Bewertungsgrundlage wurden die in Tabelle 8.4-2 aufgelisteten und an den Vorgaben nachhaltiger Ressourcenbewirtschaftung ausgerichteten leitbildorientierten Umweltqualitätsziele herangezogen. Mit Hilfe der in Tabelle 8.4-1 aufgeführten Methoden unter Beachtung der in Tabelle 8.4-2 aufgeführten Bewertungskriterien konnten 620 ha von insgesamt 2.218 ha Ackerfläche als austragssensitiv identifiziert werden. Die den einzelnen Kriterien zugeordneten Flächenanteile sowie die nach Informationsüberlagerung zugeordneten kumulativen Flächenanteile werden in Tabelle 8.4-2 zusammengestellt.

Tab. 8.4-2: Leitbildorientierte Ableitung von Umweltqualitätszielen und Indikatoren

Tab. 8.4-2: *Indication of environmental quality targets*

Umweltqualitätsziel	Kriterium/Indikator
Funktionsfähigkeit des Landschaftswasserhaushaltes	Optimierung der Evaporation, Minimierung der schnellen Abflusskomponente: berechneter Anteil an Interflow und Oberflächenabfluss an der Wasserbilanz
Funktionsfähigkeit des Landschafts-Stickstoffhaushaltes	Optimierung der Stickstoffkreislauffunktion (ausgeglichene Bilanzen zwischen N-Rückführung und N-Mineralisation): Kohlenstoff- und Stickstoffmineralisationsrate, anmoorige Böden unter Ackernutzung als gefährdete Standorte, Minimierung gelöster und gasförmiger Stickstoffverluste: berechnete Denitrifikations- und N-Auswaschungsverluste
Funktionsfähigkeit des Landschafts-Phosphorhaushaltes	Minimierung lateraler Phosphatverlagerung: Bodenabtrag durch Wassererosion

Der oben tabellarisch zusammengefasste Bewertungsansatz wurde exemplarisch für einzelne Projektstandorte mit Hilfe der o.a. GIS-basierten Auswertungsmethoden umgesetzt. Am Beispiel des Untersuchungsgebietes Kassow werden die Ergebnisse für folgende Bewertungsaspekte in den Abbildungen 8.4.1a – 8.4.1f (s. Anhang) kartographisch dargestellt: Flächen mit hohem Erosionspotential (a), Flächen mit hohem Nitrat-Austragspotential (b), Flächen mit hohem Denitrifikationspotential (c), Niedermoorflächen (d), grundwassernahe Standorte (e), Standorte mit hohem Oberflächen- und Interflow-Potential (f).

Tab. 8.4-3: Flächenanteil der austragssensitiven Teilschläge (Untersuchungsgebiet Kassow)

Tab. 8.4-3: *spatial proportion of areas with a high risk of nutrient losses (study area Kassow)*

Teilflächenbeschreibung	Flächenanteil separat (ha)	Flächenanteil kumulativ (ha)
Betrachteter Landschaftsausschnitt	3.009	
Acker	2.218	
Niedermoor, Anmoor	169,9	
Grundwasserflurabstand < 300 cm	141	293
Hohe Anteile a. schnell. Abflusskomponenten (> 100 mm)	30	310,62
Erosion > 7.5 t/(ha*a)	101	408,4
Nitrataustrag > 60 kg N/(ha*a)	279	504
Denitrifikationsverluste > 25 kg N/(ha*a)	399	620

Als Ergebnis der Analyse austragssensitiver Teilflächen ist zusammenfassend festzustellen, dass ein Flächenanteil von ca. 28 % den aufgeführten Kriterien zuzuordnen ist. Für diese Flächen ist aus ökologischer Sicht die Beachtung austragsmindernder Managementmaßnahmen besonders empfehlenswert. Entsprechend sollte hier bei der Verwendung der zur Verfügung stehenden Instrumente des teilschlagspezifischen Pflanzenbaus ein stärkeres Gewicht auf die Austragsminderung als auf die Ertragsmaximierung gelegt werden. In welchem Maße dieses erfolgen kann, ist mit den Projektpartnern, die die Festlegung von Applikationsregeln federführend bearbeiten, abzustimmen. Hier könnten weitere Modellanwendungen insbesondere dazu dienen, pflanzenbauliche Maßnahmen so festzulegen, dass ökonomische Einbußen und ökologische Risikominderungen in einer für alle Seiten akzeptablen Weise abgestimmt werden.

#### 8.4.4 Modellgestützte Abschätzung von Einzelkomponenten des regionalen Stickstoffhaushaltes am Beispiel der Projektgebiete Kassow und Thumby

Mit dem Modellsystem WASMOD (REICHE, 1996; FRÄNZLE et al., 2001) wurden die Wasser- und Stoffströme von Teileinzugsgebieten in den Regionen Kassow und Thumby bilanziert. Die Resultate wurden für unterschiedliche Nutzungsverhältnisse (konventioneller Ackerbau, Grünland und Wald) ausgegeben. Die Auswertung hinsichtlich der aktuellen Stoff-Austragsituation ergibt dabei folgendes Bild:

##### **Kassow:**

In einer zusammenfassenden Auswertung wurden die Wasser- und Stoffströme der letzten 10 Simulationsjahre bilanziert. Die Gesamtfläche der in die Analyse einbezogenen Teileinzugsgebiete beträgt 3.009 ha. Die nach dem Prinzip der „ecological response units“ erfolgte Flächengliederung mit Hilfe der oben beschriebenen Methoden ergab eine Anzahl von insgesamt 13.046 Einzelpolygonen. Ein Anteil von 2.218 ha (= 74 %) ist als Ackerfläche ausgewiesen. Die Grünlandflächen sind mit 375 ha (= 12 %) und die Waldflächen mit 338 ha (= 11 %) an der Gesamtfläche vertreten. Die durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme beträgt 586 mm und liegt damit deutlich unter dem Bundesdurchschnitt von 780 mm. Die berechnete mittlere jährliche Verdunstung liegt bei 490 mm. Differenziert nach den ausgewählten Nutzungsklassen divergiert dieser Wert ebenso wie im Vergleich der Einzeljahre.

Die für die Berechnungen angenommenen mittleren jährlichen Stickstoffeinträge unterscheiden sich nach Nutzungsklassen deutlich. Für Ackerbauflächen (Fruchtfolge: Winterraps, Winterweizen, Wintergerste) wurde ein mittlerer Stickstoffeintrag von 220 kg/(ha\*a) vorgegeben, für die intensiv genutzten Grünlandflächen liegt dieser Wert bei 300 kg/(ha\*a) und für die Waldflächen wurde mit Einträgen von 29 kg N/(ha\*a) gerechnet. Dies entspricht dem für Waldflächen angenommenen atmosphärischen Stickstoffeintrag.

Für die Ackerbauflächen wurde eine mittlere Stickstoffentnahme durch Abfuhr des Erntegutes von durchschnittlich 161 kg N/(ha\*a) bilanziert.

Die höchsten Mineralisationsraten weisen die als Grünland ausgewiesenen Flächen auf. Mit 287 kg/ha liegt der Betrag weit über dem der Ackerbau- (52 kg/ha) und der Waldflächen (52 kg/ha). In den Grünlandgebieten sind Flächen mit Nieder- und Anmoor einberechnet, die diese hohe Mineralisationsrate maßgeblich bestimmen. Auch die gasförmigen, zum großen Teil Denitrifikationsprozessen zuzuordnenden Stickstoffverluste sind auf den Grünlandflächen aus dem gleichen Grund am höchsten. Durchschnittlich werden hier 49 kg N/(ha\*a) an die Atmosphäre abgegeben, während der für Ackerflächen berechnete Wert bei 30 kg N/(ha\*a) liegt.

Der berechnete Stickstoffaustrag mit dem Sickerwasser ist im Durchschnitt der Simulationsjahre auf den Ackerflächen am höchsten. Es werden auf diesen Flächen 29 kg N/ha ausgewaschen, während auf den Grünlandflächen 22 kg/ha und auf den Waldflächen 10 kg/ha mit dem Sickerwasserstrom verloren gehen.

In weiteren Simulationsrechnungen sind die Auswirkungen extremer Wasserhaushaltsbedingungen ausgewertet worden. In Abhängigkeit von der Höhe der Sickerwasserraten wurde bezogen auf die Kulturart Weizen ermittelt, in welchen Spannweiten die berechneten Stickstoffbilanzen variieren.

Im Simulationsjahr mit extrem hohen Niederschlägen (704 mm) steigt der Verlust von Stickstoff mit dem Sickerwasser an. Er erreicht auf der gesamten Ackerbaufläche fast 70 kg/ha. Durch das höhere Wasserangebot steigen die Mineralisationsraten und die gasförmigen Verluste stark an. Der Stickstoffentzug auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen durch Ernte sinkt dagegen um etwa 10 %. Die Resultate der Nettoprimärproduktion liegen ebenfalls unter den Durchschnittswerten (Waldfläche: 4.263 kg/ha, Ackerbaufläche: 8.193 kg/ha, Grünlandfläche: 8.266 kg/ha).

Im Simulationsjahr mit extrem niedrigen Niederschlägen (448 mm) sinkt der Verlust von Stickstoff mit dem Sickerwasser. Er erreicht auf den Flächen mit Ackerbau nur noch 8 kg/ha. Durch das niedrigere Wasserangebot sinken die Mineralisationsraten und die gasförmigen Verluste auf den Ackerbauflächen. Der Stickstoffentzug auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen durch Ernte sinkt dagegen um etwa 10 % ebenso wie die Nettoprimärproduktion und der Kornertrag.

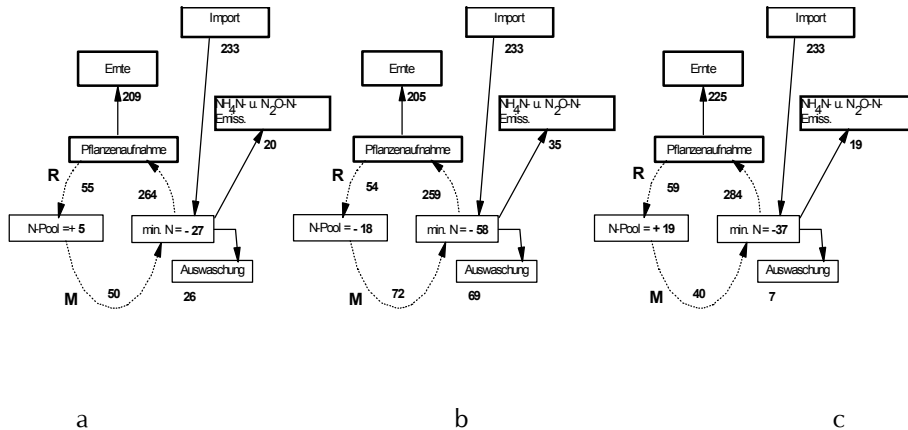
Tab. 8.4-4: Wichtige Bilanzgrößen des Wasser- und Stickstoffhaushaltes als Mittelwerte für alle Ackerteilschläge und für das Gesamtgebiet; Standort Kassow, verwendete Witterungsdaten des Zeitraumes 1987 – 1997

Tab. 8.4-4: *Water and matter balances: means of arable areas and total area (studied region Kassow).*

Nutzung	SUMHA	NDS	ETA	EINTR	AUSTR	ABFUHR	MINERA	VERL	NRUECK
10-jähriges Mittel									
Ackerbau	2218,2	58,6	49,3	219,9	-28,7	160,5	51,8	29,8	58,1
Gesamtfläche	3009,2	58,6	49,3	203,0	-24,5	168,5	98,6	40,5	74,8
Im Vergleich zum 10-jährigen Mittel hohe Niederschläge									
Ackerbau	2218,2	70,4	49,1	217,0	-69,5	144,5	70,7	61,2	56,6
Gesamtfläche	3009,2	70,4	49,8	200,8	-59,9	148,3	107,6	82,5	68,9
Im Vergleich zum 10-jährigen Mittel niedrige Niederschläge									
Ackerbau	2218,2	44,8	46,2	217,0	-7,7	144,6	47,7	21,6	57,0
Gesamtfläche	3009,2	44,8	46,9	200,8	-7,3	158,7	91,5	29,6	74,8

Mit: SUMHA = Flächengröße in ha, NDS = Niederschlag in cm/a, ETA = Verdunstung in cm/a, EINTR = Stickstoffeintrag kg N/(ha\*a), AUSTR = Stickstoffverlust im Sickerwasser kg N/(ha\*a), ABFUHR = Stickstoffentzug durch Ernte kg N/(ha\*a); MINERA = Mineralisationsrate kg N/(ha\*a), VERL = gasförmiger Stickstoffverlust kg N/(ha\*a), NRUECK = Stickstoffrückgabe kg N/(ha\*a)

Für die Ackerflächen wurde eine Detailauswertung - jeweils bezogen auf die Weizen-Anbaujahre innerhalb der Fruchtfolge - durchgeführt. Dazu wurden exemplarisch zwei Jahre, eines mit niedriger und eines mit hoher Auswaschung bilanziert und der berechneten mittleren Stickstoffbilanz gegenübergestellt (s. Abb. 8.4-2a,b,c). Deutlich wird die Zunahme der Mineralisationsrate und der gasförmigen Stickstoffverluste bei hohem Wasservorrat gegenüber dem trocknerem Jahr.



M = Mineralisation      R = Stickstoffrückführung über Erntereste

Abb. 8.4-2: Differenzierte Stickstoffbilanz: Kulturart Weizen, Projektgebiet Kassow, a) gemittelt über 10 Jahre, b) Einzeljahr mit besonders hoher Nitratauswaschung, c) Einzeljahr mit besonders niedriger Nitratauswaschung

Fig. 8.4-2: Components of the nitrogen balance calculate for wheat (studied area Kassow), a) mean (10 years) b) single year characterized by high nitrogen leaching, c) single year characterized by low nitrogen leaching.

### Thumby:

Die Gesamtfläche der Projektregion Thumby zugehörigen Teileinzugsgebiete beträgt 6.647 ha. Durch Anwendung der in Tabelle 8.4-1 aufgeführten Methoden ergab sich eine Einteilung in insgesamt 15.443 Einzelpolygone. Die Ackerflächen nehmen davon 5.518 ha (=83%) ein. Die Grünlandflächen sind mit 437 ha (=7%) und die Waldflächen mit 426 ha (=6%) an der Gesamtfläche nur zu geringen Anteilen repräsentiert. Die durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme beträgt 841 mm und ist damit über 250 mm höher als die der Region Kassow (M = 586 mm). Die berechnete mittlere jährliche Verdunstung liegt bei 470 mm und ist damit 20 mm niedriger als in der Region Kassow. Differenziert nach den ausgewählten Nutzungsklassen schwankt dieser Wert zwischen 515 mm (Wald), 466 mm (Ackerbau) und 486 mm (Grünland).

Wiederum wurde für die Ackerflächen ein durchschnittlicher jährlicher Stickstoffeintrag von 220 kg/ha unter Annahme einer dreijährigen Fruchtfolge (Wintereraps, Winterweizen, Wintergerste) vorgegeben, für die Grünlandflächen 300 kg N/ha und für die Waldflächen 29 kg N/ha. Die errechnete, mit der Ernte dem System entzogene Stickstoffmenge beträgt - bezogen auf Ackerflächen - 143 kg/ha. Die Nitrat-Sickerverluste betragen hier 46 kg N/ha.

Dazu wurden exemplarisch jeweils ein Jahr mit niedrigen und eins mit hohen Auswaschungsverlusten betrachtet und der berechneten mittleren Stickstoffbilanz gegenübergestellt (s. Abb. 8.4-2a,b,c).

In einem Simulationsjahr mit extrem hohen Niederschlägen (954 mm) steigt der Nitrat-Sickerverlust ebenso wie die Mineralisationsraten und die Denitrifikationsraten deutlich an. Die Entzüge sinken um 10 - 20 %. Entsprechend niedriger fallen die Ernteerträge aus.

Im Simulationsjahr mit vergleichsweise niedrigen Niederschlägen (688 mm) entspricht die Höhe der Sickerverluste in etwa der der Durchschnittsjahre. Durch das niedrigere Wasserangebot sinken die Mineralisationsraten auf den Grünlandflächen.

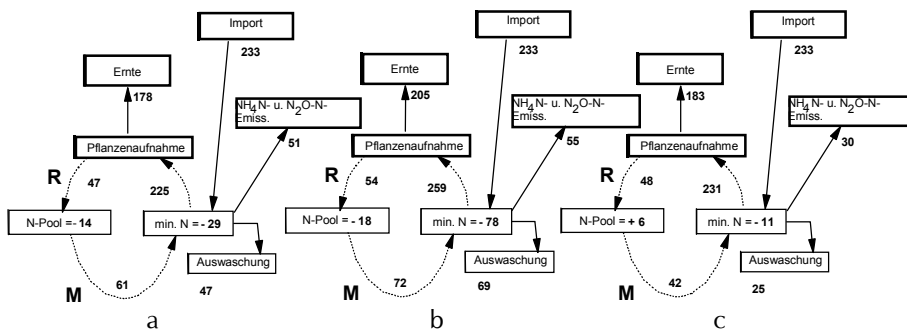
Auf den Ackerflächen liegen diese Werte in der Größenordnung der Durchschnittsjahre. Der Stickstoffentzug auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen durch Ernte sinkt auf den Grünlandflächen um etwa 10 %, während der Wert auf den Ackerflächen nahezu stabil bleibt.

Tab. 8.4-5: Wichtige Bilanzgrößen des Wasser- und Stickstoffhaushaltes als Mittelwerte für alle Ackerteilschläge und für das Gesamtgebiet; Standort Thumby, verwendete Witterungsdaten des Zeitraumes 1985 – 1995

Tab. 8.4-5: Water and matter balances: means of arable areas and total area (studied region Thumby).

Nutzung	SUMHA	NDS	ETA	EINTR	AUSTR	ABFUHR	MINERA	VERL	NRUECK
10-jähriges Mittel									
Ackerbau	5518,2	84,1	46,6	220,1	-46,0	142,5	56,0	41,5	51,6
Gesamtfläche	6646,5	84,1	46,6	204,9	-42,7	135,5	64,5	41,1	55,2
Im Vergleich zum 10-jährigen Mittel hohe Niederschläge									
Ackerbau	5518,2	95,4	48,1	219,2	-49,6	129,0	60,4	72,1	48,2
Gesamtfläche	6646,5	95,4	48,2	204,2	-46,6	120,2	65,7	68,4	49,8
Im Vergleich zum 10-Jährigen Mittel niedrige Niederschläge									
Ackerbau	5518,2	68,8	46,3	221,6	-49,2	147,0	57,9	44,5	50,9
Gesamtfläche	6646,5	68,8	45,9	206,2	-46,3	137,1	65,7	44,3	53,6

Mit: SUMHA = Flächengröße in ha, NDS = Niederschlag in cm/a, ETA = Verdunstung in cm/a, EINTR = Stickstoffeintrag, AUSTR = Stickstoffverlust im Sickerwasser, ABFUHR = Stickstoffentzug durch Ernte; MINERA = Mineralisationsrate, VERL = gasförmiger Stickstoffverlust, NRUECK = Stickstoffrückgabe (alle in kg/(ha\*a))



M = Mineralisation R = Stickstoffrückführung über Erntereste

Abb. 8.4-3: Differenzierte Stickstoffbilanz: Kulturart Weizen, Projektgebiet Thumby, a) gemittelt über 10 Jahre, b) Einzeljahr mit besonders hoher Nitrat auswaschung, c) Einzeljahr mit besonders niedriger Nitrat auswaschung

Fig. 8.4-3: Components of the nitrogen balance calculate for wheat (studied area Thumby), a) mean (10 years) b) single year characterized by high nitrogen leaching, c) single year characterized by low nitrogen leaching.

Wiederum wurde für die Ackerflächen eine Detailauswertung – jeweils bezogen auf Weizen-Anbaujahre innerhalb der Fruchtfolge – durchgeführt. Dazu wurden wiederum exemplarisch zwei Jahre, eines mit niedriger und eines mit hoher Auswaschung bilanziert und der berechneten mittleren Stickstoffbilanz gegenübergestellt (s. Abb. 8.4-3a,b, c). Deutlich wird die Zunahme der Mineralisationsrate und des gasförmigen Stickstoffverlustes bei hohem Wasservorrat gegenüber dem trockneren Jahr.

### 8.4.5 Erweiterungen und Anpassungen des Simulationsmodells WASMOD an spezifische Anforderungen des teilschlagspezifischen Pflanzenbaus

Neben der Ausweisung von Standorteigenschaften, die einen Einfluss auf ökologisch relevante Stofftransport- und Umsetzungsprozesse haben, wird angestrebt, mittels Modellsimulationen die Auswirkungen, die auf den Einsatz von precision farming-Techniken zurückzuführen sind, aufzuzeigen. Die Modellrechnungen erfolgen mit dem Simulationsmodell WASMOD (REICHE 91, 94, 97), durch welches wesentliche Kohlenstoff- und Stickstofftransformations- bzw. -transportprozesse beschrieben und im regionalen Maßstab bilanziert werden können. Um WASMOD für die spezielle Fragestellung einsetzen zu können, wurde eine Reihe von Neuerungen eingeführt. Hierdurch können die wesentlichen teilschlagspezifischen Pflanzenbaumaßnahmen in die Simulationsrechnungen integriert werden: Saatstärkenmodifikation, variable Bearbeitungstiefen und Anpassung der Stickstoff-Düngermengen, abgestuft in 3 Düngergaben. Zu diesem Zweck kann durch Aufruf entsprechender, die pflanzenbaulichen Maßnahmen im Phänologieverlauf beschreibender Tabellenfunktionen (sog. Phäno-Datei) eine zusätzliche Steuerdatei aktiviert werden, in welcher die für die teilschlagbezogenen Managementanpassungen notwendigen Angaben abgelegt sind (s. Tab. 8.4-6).

Tab. 8.4-6: Aufbau der Steuerdatei für teilschlagbezogene Managementanpassungen

Tab 8.4-6: Precision agriculture related features modelled by WASMOD (**W**ater and **s**ubstance **m**odell)

Maßnahme	Differenzierte Anpassung und Kriterium A	Differenzierte Anpassung und Kriterium B	Differenzierte Anpassung und Kriterium C	Differenzierte Anpassung und Kriterium D
Saadichte	Reduktionsfaktor bei Tongehalt 15 – 20 % (Bed. A)	Reduktionsfaktor bei Tongehalt 10 – 15 % (Bed. B)	Reduktionsfaktor bei Tongehalt 5 – 10 % (Bed. C)	Ausgleichsfaktor abhängig vom Humusgehalt
Bearbeitungstiefe	Maximum-Tiefe	Minimum-Tiefe	Tongehalt als Entscheidungsgröße	Grundwasserflurabstand bzw. Hydromorphie
Grunddüngung	Reduktionsfaktor bei Saatstärke Bedingung A, B, C	Anrechenbarkeitsfaktor bezogen auf N <sub>min</sub> -Gehalt bis 60 cm Bodentiefe	Anrechnung von N <sub>org</sub> aus Vorfrucht (z.B. Raps)	Reduktionsfaktor bei Mangelentwicklung
2. Düngergabe	Reduktionsfaktor bei Saatstärke Bedingung A, B, C	Reduktionsfaktor bei Mangelentwicklung	Erhöhungsfaktor bei Unterversorgung	Reduktionsfaktor bei Mangelentwicklung
3. Düngergabe	Reduktionsfaktor bei Saatstärke Bedingung A, B, C	Reduktionsfaktor bei Mangelentwicklung	Erhöhungsfaktor bei Unterversorgung	Reduktionsfaktor bei Mangelentwicklung

Um einen automatisierten Modellablauf über viele Jahre (standardmäßig ein Zeitraum von 30 Jahren zur ausreichenden Repräsentation unterschiedlicher Witterungsabläufe) und im Landschaftsmaßstab bei der notwendigen hohen räumlichen Auflösung (pro Beispielsgebiet 10.000 – 20.000 Einzelflächen) zu realisieren, musste die teilschlagspezifische Maßnahmenanpassung als optional aufrufbare, automatisiert ablaufende Modellfunktion eingerichtet werden. Während eines Simulationslaufes wird also, jeweils abhängig von den standortspezifischen Eingabeparametern (Tongehalt, Humusgehalt, Grundwasserflurabstand) und auf die jeweilige Applikationshöhe abgestimmt, durch die dafür zusätzlich eingeführte Steuerdatei (s. Tab. 8.4-6) vorgegeben, welche Aussaatstärke und welche Bodenbearbeitungstiefe zu wählen ist. Für die Dosierung der Stickstoffdüngung sind darüber hinaus dynamische, d. h. im Phänologieverlauf und in unterschiedlichen Anbaujahren sich ändernde Berechnungsgrößen ausschlaggebend (z.B.  $N_{min}$ -Gehalt, Bestandesentwicklung, Wassermangel).

#### 8.4.6 Simulationsergebnisse – Modellrechnungen mit und ohne Aktivierung des teilschlagspezifischen Applikations-Moduls

Die Höhe der einzelnen Stickstoffgaben und die entsprechenden Anpassungsfaktoren wurden in Anlehnung an die vom Teilprojekt III-4 (Düngung) entwickelten Algorithmen vorgegeben. Die hier erläuterten, auf der Grundlage des so erweiterten Modells durchgeführten Simulationsrechnungen beziehen sich auf Standorte der Projektregionen Thumbby und Kasow. Es wurden für beide Gebiete die gleichen pflanzen- (sorten-) und maßnahmenspezifischen Vorgaben verwendet:

Tab. 8.4-7: Bodenabhängige Vorgaben für teilschlagspezifische Pflanzenbaumaßnahmen: Saatstärke, Tiefenbearbeitung und Düngerapplikation

Tab. 8.4-7: *Soil specific application rules used in the model WASMOD to determine plant density, tillage depth and the amount of nitrogen fertilization.*

Reduktion der Saatstärke je Tongehaltsstufe:	5 %
Tongehalt als Entscheidungskriterium für Tiefpflügen:	10 %
Maximale Grunddüngung:	50 kg N/ha
Maximale 2. Gabe:	90 kg N/ha
Maximale 3. Gabe:	90 kg N/ha
$N_{min}$ -Anrechnungsfaktor:	1 aber maximal 20 kg Reduktion

Es wurden – unterschieden nach mittlerem Tongehalt (0 - 60 cm Bodentiefe) – und unter Vorgabe jeweils standortbezogener Witterungsdaten Simulationen über einen 30-jährigen Zeitraum gerechnet. Zur Auswertung kamen die Ergebnisse der jeweils letzten 10 Jahre. Für jeden Einzelschlag wurden die Berechnungen zunächst unter Vorgabe der teilschlagspezifischen Steuerung durchgeführt. Als Vergleichsszenario wurde eine für alle Standorttypen homogene Bearbeitung (Saatstärke: maximal, Bodenbearbeitungstiefe: 30 cm, N-Düngung: 199 kg N/ha) vorgegeben. Hier wurden die im teilschlagspezifischen Berechnungsszenario ermittelten mittleren N-Düngermengen eingesetzt, so dass der Gesamt-N-Aufwand bei zunächst angenommener flächenmäßiger Gleichverteilung der Standorttypen in beiden Szenarien die gleiche Höhe erreichte. Die berechneten, mittleren N-Bilanzen (Bilanzierungszeitraum: 10 Jahre) zeigen, dass die modellgestützte Anwendung der beschriebenen Applikationsvorschriften bezogen auf die 2 Versuchsregionen zu recht unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Die in den Tabellen 8.4-8 und 8.4-9 zusammengefassten Simulationsergebnisse zeigen, dass die szenarienhafte Anwendung der teilschlagspezifischen Applikationsregeln im Modellexperiment eine teilweise deutliche, Stickstoffverluste mindernde Wirkung impliziert. Dies ist nur unter Einbeziehung der dem Modell WASMOD zugrundeliegenden komplexen Prozessstruktur nachzuvollziehen. Neben der Reduzierung der Stickstoff-Sickerverluste wurde eine leichte Erhöhung der Stickstoffaufnahme und damit des mit dem Erntegut dem System entnommenen Anteils berechnet – auch dann, wenn die Gesamtmenge des applizierten Düngestickstoffs im Vergleich zum konventionellen Ackerbau gleich hoch ist. Hier wirkt sich insbesondere die in die Berechnungen einfließende Saatstärkenregulierung aus, durch die Unterschiede bezüglich des zeitlichen Ablaufes der Wasseraufnahme, aber auch der u. a. durch den Wasserhaushalt gesteuerten Stickstoffmineralisation resultieren. Während sich die Verringerung der Auswaschungsverluste bei den tonarmen Standorten am stärksten ausprägt (durchschnittliche Reduzierung: Kassow 17 kg N/(ha\*a), Thumbby 13 kg N/(ha\*a)) sind die Ertragsgewinne auf den tonreichen Standorten dort am höchsten, wo aufgrund der Applikationsregeln die höchsten Düngermengen appliziert werden. Gemäß der Simulationsrechnungen würde die Anwendung der teilschlagspezifischen Applikationsregeln also für leichte, tonarme Standorte ein Absinken der N-Verluste bei gleicher Erntemenge und geringerem Düngeraufwand zur Folge haben. Auf schwereren, tonreicheren Standorten führte die Verabreichung erhöhter Düngergaben zu höheren Erträgen, ohne dass eine Anhebung der Verluste zu verzeichnen wäre. Der Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen, die sich auf den Projektstandort Kassow beziehen, mit jenen von Thumbby ergibt wiederum, dass auf den tonreicheren Böden Schleswig-Holsteins unter Zugrundelegung gleicher Düngermengen eine um 10 – 20 kg N/(ha\*a) geringere Stickstoffausnutzung erfolgt. Dies ist auf die höheren Niederschläge und damit verbundenen höheren Sickerverluste bzw. Denitrifikationsverluste zurückzuführen. Weitere Modelltests sollen zeigen, inwiefern diese durch Modifikation der teilschlagspezifischen Applikationsregeln zu reduzieren sind.

Tab. 8.4-8: Mit dem Modellsystem WASMOD berechnete Stickstoffhaushaltsgrößen (Mittelwerte aus 10-jährigem Simulationszeitraum. Variante 1 = Simulation teilschlagspezifischer Applikationsbedingungen, Variante 2: Simulation konventioneller Applikationsbedingungen. Standortkenngrößen und Witterungsdaten: Projektgebiet Kassow)

Tab. 8.4-8: Calculated components of the nitrogen balance modelled by WASMOD (study area Kassow, means, simulation time 10 years, simulation run 1: application as usual, run 2: application according site specific rules (Tab. 7).

Tongehalt in 0 – 60 cm Bodentiefe (%)	Flächenanteil in %	N-Düngereintrag kg N/(ha*a) Variante 1 (+ 20 kg N/(ha*a) atmosph. Einträge)	N-Sickerverluste kg N/(ha*a) Variante 1	N-Entnahme durch Ernteabfuhr: kg N/(ha*a) Variante 1	N-Düngereintrag kg N/(ha*a) Variante 2	N-Sickerverluste kg N/(ha*a) Variante 2	N-Entnahme durch Ernteabfuhr: kg N/(ha*a) Variante 2
3	41	184	55	142	199	72	142
10	42	199	22	172	199	34	159
16	12	214	11	197	199	12	181
12	5	198	10	187	199	10	181

Tab. 8.4-9: Mit dem Modellsystem WASMOD berechnete Stickstoffhaushaltsgrößen (Mittelwerte aus 10-jährigem Simulationszeitraum. Variante 1 = Simulation teilschlagspezifischer Applikationsbedingungen, Variante 2: Simulation konventioneller Applikationsbedingungen. Standortkenngrößen und Witterungsdaten: Projektgebiet Thumby

Tab. 8.4-9 : Calculated components of the nitrogen balance modelled by WASMOD (study area Thumby, means, simulation time 10 years, simulation run 1: application as usual, run 2: application according site specific rules (Tab. 7).

Mittl. Tongehalt in 0 – 60 cm Bodentiefe (%)	Flächenanteil in %	N-Dünger-eintrag kg N/(ha*a) Variante 1 (+ 20 kg N/(ha*a) atmosph. Einträge)	N-Sicker-verluste kg N/(ha*a) Variante 1	N-Ent-nahme durch Ernteab-fuhr: kg N/(ha*a) Variante 1	N-Dünger-eintrag kg N/(ha*a) Variante 2	N-Sicker-verluste kg N/(ha*a) Variante 2	N-Ent-nahme durch Ernteab-fuhr: kg N/(ha*a) Variante 2
4	22	184	39	148	199	52	148
7	29	199	44	153	199	58	137
17	15	214	59	149	199	64	126
21	34	230	23	175	199	23	145

Die Übertragung der hier dargestellten Einzelergebnisse auf den jeweiligen Gesamt-Ackeranteil der Projektregionen würde unter Zugrundelegung der teilschlagspezifischen Anbauversion für das Gebiet Kassow eine Reduzierung der Stickstoffverluste durch Nitrat-Versickerung von jährlich 12 kg N/(ha\*a) bei leichten Ertragszuwächsen (+ 2 dt Kornertrag) ergeben. Die Modellrechnungen ergeben im Vergleich zu konventionellen Anbaumethoden für das Gebiet Thumby mit –8 kg N/(ha\*a) eine geringere Verlustreduzierung – aber eine Ertragssteigerung von 8 dt Kornertrag jährlich. Diese Zahlen sind allerdings so nicht auf Praxis-Bedingungen übertragbar, weil die durchgeführten Modellvergleiche sich ausschließlich auf den Anbau von Weizen beziehen - für andere Kulturarten konnten bis jetzt noch keine teilschlagspezifischen Anbauszenarien festgelegt und gerechnet werden.

## 8.4.7 Literatur

- Fränze O., E.-W. Reiche, W. Windhorst: Conceptual Framework of the Bornhöved Lake District Research. In: Ecological Studies, Vol 147 J.D: Tenhunen et al. (eds) Ecosystem approaches to Landscape Management in Central Europe, Berlin Heidelberg 2001: 39 – 47.
- Reiche E.-W. (1991): Entwicklung, Validierung und Anwendung eines Modellsystems zur Beschreibung und flächenhaften Bilanzierung der Wasser- und Stickstoffdynamik in Böden. Kieler Geogr. Schriften **79**: 1-150.
- Reiche (1994): Modelling water and nitrogen dynamics on catchment scale. Ecological Modelling **75/76**: 371-384.
- Reiche (1996): WASMOD - Ein Modellsystem zur gebietsbezogenen Simulation von Wasser- und Stoffflüssen. Darstellung des aktuellen Entwicklungsstandes, EcoSys **4**: 143-163.
- Reiche E.-W., MEYER M. & DIBERN I. (1999): Modelle als Bestandteile von Umweltinformationssystemen dargestellt am Beispiel des Methodenpaketes "DILAMO". In: Blaschke T. [Hrsg.] (1999): Umweltmonitoring und Umweltmodellierung: 131-141.

<http://www.pz-oekosys.uni-kiel.de>

