



Abschlussbericht zum Projekt

Entwicklung einer neuen Strategie zur Emissions- und Erfolgskontrolle im Grundwasserschutz

**Gefördert aus dem
Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz
der badenova AG & Co. KG**

**Projektkoordination:
badenova AG & Co. KG**

**Projektpartner:
DVGW Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe
GIT HydroS Consult GmbH (GHC), Freiburg**

**unter Mitarbeit von:
Agentur für Nachhaltige Nutzung von
Agrarlandschaften (ANNA), Freiburg**

Entwicklung einer neuen Strategie zur Emissions- und Erfolgskontrolle im Grundwasserschutz

Untersuchungszeitraum Juni 2008 bis Mai 2011

Projektkoordination: Klaus Rhode, badenova AG & Co. KG

**bearbeitet von: Joachim Kiefer, Thomas Ball, TZW
Stephen Schrempp, Dr. Laurin Wissmeier,
Franz-Josef Kern, GHC
Martin Selz, badenova AG & Co. KG**

unter Mitarbeit von: Dr. Karl Müller-Sämman, ANNA



Freiburg und Karlsruhe, im Juni 2012

Inhaltsverzeichnis	Seite
Kurzfassung	1
1 Einleitung	2
1.1 Problemstellung	2
1.1.1 Allgemeine Problemstellung.....	2
1.1.2 Nitratkonzentrationsentwicklung WSG Hausen.....	3
1.2 Ziele des Vorhabens	3
1.3 Vorgehensweise	4
2 Untersuchungsgebiet und allgemeine Grundlagen	6
2.1 Gebietsbeschreibung	6
2.2 Bodenbeschreibung	7
2.3 Basisdaten	8
2.3.1 Auswahl der Projektflächen.....	8
2.3.2 Bodenuntersuchungen	9
2.3.3 Verwendete Klimadaten	10
2.3.4 Wassergehalte und Feldkapazitäten	12
2.3.5 Schlagkarten der Projektlandwirte	13
2.3.6 Vororterhebungen auf den Projektflächen und Biomasse Untersuchungsergebnisse	14
2.3.7 Erhebung von Beregnungsdaten und Beregnungskartierung	17
2.3.8 Nutzungserhebung.....	19
2.3.9 Rohwasseruntersuchungen	21
3 Methodik	23
3.1 Standortmodellierungen.....	23
3.1.1 Wasserhaushalts- und Stickstoffmodellierung mit dem TZW- Simulationsmodell INVAM.....	23
3.1.2 Agrarökosystemmodellierung mit Expert-N (Wasser-, Energie-, Nährstoff- und Kohlenstoffhaushalt).....	26
3.1.3 Gegenüberstellung der Eingangsdaten INVAM und Expert-N	31
3.2 Regionalisierung des Gebietsaustrags mit Expert-N	31
3.3 Gebietsaustrag mit INVAM	32
3.4 Sonstige Methoden	33

3.4.1	Auswertung Historischer N_{\min} Daten	33
3.4.2	N_{\min} -Untersuchungen	34
3.4.3	Expert-N Datenhaltungs- und Analysewerkzeuge	34
4	Auswertung historischer Bodenkontrolldaten	35
5	Modellierungsergebnisse für die Projektflächen und Diskussion.....	40
5.1	Ergebnisse der INVAM-Simulationsrechnungen.....	40
5.1.1	Beispiel H618 Körnermais.....	40
5.1.2	Übersicht über die INVAM-Modellberechnungen	42
5.2	Expert-N-Modellierungsergebnisse.....	44
5.2.1	Darstellung der Expert-N-Modellierungsergebnisse.....	44
5.2.2	Projektfläche H618 mit Körnermais in Monokultur	45
5.2.3	Projektfläche H2318.....	51
5.2.4	Diskussion der Expert-N Projektflächensimulationen.....	56
5.3	Gegenüberstellung ausgewählter Modellierungsergebnisse von INVAM und Expert-N.....	58
5.3.1	Vergleich der Modellierungsergebnisse für H618	59
5.3.2	Vergleich der Modellierungsergebnisse für H2318	62
5.3.3	Diskussion des Vergleichs von Expert-N und INVAM.....	64
6	Regionalisierung der Modellierungsergebnisse	65
6.1	Gebietsaustrag mit Expert-N.....	65
6.1.1	Hydraulische Bodeneigenschaften.....	65
6.1.2	Standardbewirtschaftungen	66
6.1.3	Bodennutzung	66
6.1.4	Pauschalisierung nicht simulierter Flächen.....	67
6.1.5	Auswertungszeitraum.....	68
6.1.6	Karten des jährlichen Gebietsaustrags	68
6.1.7	Gebietsbilanz	70
6.1.8	Variabilität des jährlichen Gebietsaustrags	71
6.1.9	Mittlere Zeitreihen des Gebietsaustrags	73
6.1.10	Auswertung der zehn wichtigsten Nutzungssequenzen.....	74
6.1.11	Diskussion der Regionalisierung des Gebietsaustrags mit Expert-N.....	77
6.2	Gebietsaustrag mit INVAM	79

7	Neue Strategie zur Emissions- und Erfolgskontrolle	84
7.1	Reduktionspotential der Nitratreinträge in bewirtschaftete Grundwassersysteme	84
7.2	Reduktionspotential der Emissionen klimaschädlicher Gase	85
7.3	Bewertung der entwickelten Methodik	86
7.4	Mehrwert der Kombination von Expert-N und INVAM	87
7.5	Übertragbarkeit auf andere Gebiete	88
7.6	Prognosefähigkeit	89
7.7	Vorschläge für weiteres Vorgehen im Projektgebiet	89
7.8	Datenbedarf zur Weiterführung der Auswertungen mit Expert-N	90
7.8.1	Standortauswahl	90
7.8.2	Wassergehalts- und Nitratbeprobung	91
7.8.3	Bonituren	91
7.8.4	Ernteerhebung	91
7.8.5	Bewirtschaftungsdaten	91
7.8.6	Nutzungskartierung	91
7.8.7	Standard Bewirtschaftungen	92
8	Forschungsbedarf	92
9	Zusammenfassung und Fazit	92
10	Danksagung	97
11	Literatur	97

Abbildungen im Text

Abbildung 2.1:	Wasserschutzgebiet Hausen / badenova, Projektgebiet und Lage der Projektflächen	7
Abbildung 2.2:	Pedotope und Projektflächen	8
Abbildung 2.3:	Lage der Niederschlagsstationen und der Zentren der Radolankacheln im Bereich des WSG Hausen	11
Abbildung 2.4:	Verlauf der Wassergehalte in den Bodenschichten 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm und daraus abgeleitete Feldkapazitäten für die Projektfläche H 618.	12
Abbildung 2.5:	Trockenmassebildung und C/N-Verhältnis einiger Zwischenfruchtaufwüchse nach Kartoffel und als Untersaaten in Saatmais und Spargel im Jahr 2009.	17

Abbildung 2.6:	Nitratkonzentrationen von Wasserproben aus den Beregnungsbrunnen im Projektgebiet.....	18
Abbildung 2.7:	Kartierung der beregnungsfähigen Flächen im Projektgebiet	19
Abbildung 2.8:	Landnutzungskartierung im Bereich des Wasserwerks Hausen am 15.06.2008.....	20
Abbildung 2.9:	Verteilung der landwirtschaftlichen Hauptnutzungen für das Projektgebiet mit einer landwirtschaftlichen Nutzfläche von ca. 1208 ha exemplarisch für das Jahr 2008	21
Abbildung 2.10:	Entwicklung der mittleren Nitratkonzentrationen bei den Brunnen A 2, A 3, A 4, B 1 und B 4 des WW Hausen seit 1995.	22
Abbildung 3.1:	Stickstoffkreislauf im System Boden-Pflanze-Atmosphäre (Quelle unbekannt).....	27
Abbildung 3.2:	Dynamik und Beschreibung der unterschiedlichen Biomasse- und N-Pools im Jahresablauf für Spargel im dritten Anbaujahr (zusätzlich vergrößert im Anhang: Abbildung A3.1)	30
Abbildung 4.1:	Lage der Teileinzugsbereiche für die Auswertung der Nitratstickstoffgehalte der Jahre 1990 – 2008	36
Abbildung 4.2:	Mittlere Nitratstickstoffgehalte WSG Hausen Herbst 1990 – 1999, Schutzzone II & IIIA, Gesamtauswertung.....	38
Abbildung 4.3:	Mittlere Nitratstickstoffgehalte WSG Hausen Herbst 1990 – 1999, Schutzzone IIIB, Gesamtauswertung	39
Abbildung 4.4:	Mittlere Nitratstickstoffgehalte WSG Hausen Herbst 2000 – 2008, Schutzzone II & IIIA, Gesamtauswertung.....	39
Abbildung 4.5:	Mittlere Nitratstickstoffgehalte WSG Hausen Herbst 2000 – 2008, Schutzzone IIIB, Gesamtauswertung	40
Abbildung 5.1:	Nitratstickstoffgehalte und Bodenwassermengen im Zeitraum Mai 2010 bis Mai 2011 sowie INVAM-Modellrechnungsergebnisse für die Projektfläche H618	42
Abbildung 5.2:	Bodenfeuchtedynamik bei der Projektfläche H618 von Mitte Oktober 2007 bis Ende April 2011	46
Abbildung 5.3:	Stickstoffdynamik bei der Projektfläche H618 von Mitte Oktober 2007 bis Ende April 2011	48
Abbildung 5.4:	Pflanzenentwicklung bei der Projektfläche H618 von Mitte Oktober 2007 bis Ende April 2011	49
Abbildung 5.5:	Grundwasserneubildung und Nitratauswaschung H618	51
Abbildung 5.6:	Bodenfeuchtedynamik bei der Projektfläche H2318 von Mitte Oktober 2007 bis Ende April 2011	53

Abbildung 5.7:	Stickstoffdynamik bei der Projektfläche H2318 von Mitte Oktober 2007 bis Ende April 2011	54
Abbildung 5.8:	Pflanzenentwicklung bei der Projektfläche H2318 von Mitte Oktober 2007 bis Ende April 2011	55
Abbildung 5.9:	Grundwasserneubildung und Nitratauswaschung auf Fläche H2318.....	56
Abbildung 5.10:	Vergleich der von Expert-N und INVAM berechneten Sickerwassermengen für H618 (jeweils April-April aufsummiert).....	60
Abbildung 5.11:	Expert-N Wasserbilanzglieder während der INVAM Simulations-zeiträume	60
Abbildung 5.12:	Vergleich der mit Expert-N (GHC) und INVAM (TZW) berechneten Nitratauswaschungen für H618 (jeweils April-April aufsummiert).....	61
Abbildung 5.13:	Vergleich der von Expert-N und INVAM berechneten Sickerwassermengen für H2318 (jeweils April-April aufsummiert).....	62
Abbildung 5.14:	Vergleich der mit Expert-N (GHC) und INVAM (TZW) berechneten Nitratauswaschungen für H2318 (jeweils April-April aufsummiert).....	62
Abbildung 6.1:	Anteile der 10 häufigsten Nutzungssequenzen und deren Flächenanteile in Hektar	66
Abbildung 6.2:	Nitratauswaschung und Grundwasserneubildung ohne Pflanzenwachstum	68
Abbildung 6.3:	Modellierter Gebietsaustrag 2008 (Expert-N).....	69
Abbildung 6.4:	Modellierter Gebietsaustrag 2010 (Expert-N).....	69
Abbildung 6.5:	Histogramme des jährlichen Gebietsaustrags. Der Median ist durch die strich-punktierte Linie gekennzeichnet.	72
Abbildung 6.6:	Mittlere Zeitreihen des Gebietsaustrags.....	73
Abbildung 6.7:	Mittlere Niederschlagssumme, Grundwasserneubildung und N-Auswaschung der Fruchtfolge Körnermais, Winterweizen, Feldsalat, Körnermais	76
Abbildung 6.8:	Mittlere Niederschlagssumme, Grundwasserneubildung und N-Auswaschung aller Spargelstandorte	77
Abbildung 6.9:	Prozentualer Anteil der einzelnen Fruchtfolgen an der mittleren N-Auswaschung 2008-2010 im Projektgebiet für simulierte Fruchtfolgen.....	80
Abbildung 6.10:	Verhältnis des Anteils von N-Auswaschung zu Flächenanteil im Projektgebiet für simulierte Fruchtfolgen	82

Tabellen im Text

Tabelle 2.1:	Biomasse­mengen und Biomasse­eigenschaften einiger Kulturen auf Projekt-Beobachtungsflächen im Wasserschutzgebiet Hausen (2009-2010)	16
--------------	--	----

Tabelle 3.1:	Im Projekt verwendete Pflanzenmodelle für Kulturarten	30
Tabelle 3.2:	Gegenüberstellung der Eingangsdaten von Expert-N und INVAM.....	31
Tabelle 5.1:	Flächenzusammenstellung für die INVAM-Simulationsrechnungen aufgrund der Fruchtfolge	43
Tabelle 5.2:	Zusammenstellung der mit INVAM abgeschätzten Nitratauswaschungen und Sickerwassermengen für die Kollektive und Einzelflächen mit gleicher Fruchtfolge (vgl. Tabelle 5.1)	44
Tabelle 5.3:	Übersicht zur Projektfläche H618	45
Tabelle 5.4:	Hydraulische Kenngrößen der Projektfläche H618	45
Tabelle 5.5:	Übersicht zu Projektfläche H2318	52
Tabelle 5.6:	Hydraulische Kenngrößen der Projektfläche H2318	52
Tabelle 5.7:	Gegenüberstellung der berechneten Sickerwassermengen und der von INVAM und Expert-N berechneten Nitratauswaschungen für H 618.....	61
Tabelle 5.8:	Gegenüberstellung der berechneten Sickerwassermengen und der von INVAM und Expert-N berechneten Nitratauswaschungen für H 2318.....	63
Tabelle 6.1:	Übersicht Devastierungsfläche.....	67
Tabelle 6.2:	Gebietsausträge der Auswertungsperioden	70
Tabelle 6.3:	Mittelwert, Standardabweichung und Median der jährlichen Auswaschungsparameter	71
Tabelle 6.4:	Jährliche ² Niederschlagssumme, Grundwasserneubildung und Nitratauswaschung in Abhängigkeit der zehn häufigsten Nutzungssequenzen.....	75
Tabelle 6.5:	Zusammenstellung der sieben Nutzungen / Fruchtfolgen mit den bedeutendsten Nitratausträgen im Projektgebiet	81
Tabelle 7.1:	Erforderliche Daten für eine Übertragung der Methodik auf andere Gebiete	88

Abbildungs- und Tabellenanhang

Abbildungen und Tabellen zu Kapitel 2

Tab. B2.1:	Legende und Profilbeschriebe Pedotope
Tab. B2.2:	Übersicht zu den Ergebnissen der Grunduntersuchungen auf den Projektbeobachtungsflächen
Tab. B2.3:	Beispiel für einen Erhebungsbogen zur Schlagdatei

Abbildungen und Tabellen zu Kapitel 3

Abb. A3.1: Dynamik und Beschreibung der unterschiedlichen Biomasse- und N-Pools im Jahresablauf für Spargel im dritten Anbaujahr (inhaltlich identisch zu Abb. 3.2)

Abbildungen und Tabellen zu Kapitel 6

Tab. B6.1: Standardbewirtschaftungen der Gebietsregionalisierung

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
d	Tag
DüV	Düngeverordnung
FM	Frischmasse
LAI	Leaf Area Index = Blattflächenindex (Relation von Blattfläche zu Bodenoberfläche in einem Pflanzenbestand)
LTZ	Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (Karlsruhe)
n	Anzahl der Messungen / Versuche
N	Stickstoff
NH ₄	Ammonium
NO ₃	Nitrat
t	Tonnen
SchALVO	Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung Baden-Württemberg
TM	Trockenmasse
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WSG	Wasserschutzgebiet

Fachbegriffe

Evaporation	Verdunstung von Wasser von Boden- und von Wasseroberflächen
Transpiration	Verdunstung von Wasser als Abgabe von Wasserdampf durch Grünpflanzen
Evapotranspiration	Summe aus Transpiration und Evaporation
Potentielle Evaporation	maximal mögliche Verdunstung (gemessen an freier Wasseroberfläche)
Konfidenzintervall	Mittelwert \pm Standardabweichung

Kurzfassung

Im vorliegenden Projekt wurden die Möglichkeiten überprüft, die sich ergeben, wenn die Überwachung gebietstypisch repräsentativer Ackerflächen mit periodischen Bodenbeprobungen durch eine ganzjährige, begleitende Modellierung des Stickstoffhaushalts ergänzt wird. Mit regional angepassten Simulationsansätzen des Agrarökosystemmodells Expert-N und mit Hilfe des Auswaschungsmodells INVAM wurden dazu für die im Wasserschutzgebiet Hausen an der Möhlin (südlich Freiburg) relevanten Kulturarten Saat- und Körnermais, Sommer- und Wintergetreide, Früh- und Spätkartoffel, Spargel, Erdbeeren und einige Zwischenfrüchte die Auswaschung berechnet. In Kombination mit einem geeigneten Regionalisierungsansatz und entsprechenden Auswertungswerkzeugen zur Übertragung der gebietstypischen Kennwerte auf das Gesamtgebiet sollte dadurch eine innovative Methodik zur Emissions- und Erfolgskontrolle für die Wasserwirtschaft geschaffen werden.

Wie die vorliegenden Untersuchungen aus dem Projektzeitraum Frühjahr 2008 bis Frühjahr 2011 zeigen, sind die größten Unterschiede im Nitrataustrag der Projektflächen durch den Einfluss der Kulturarten und Fruchtfolgen bedingt. Das Reduktionspotential der N-Auswaschung einer Fruchtfolge hängt dabei von der absoluten N-Auswaschung, den Einsparmöglichkeiten und dem Flächenanteil ab.

Als Fruchtfolgen bzw. Kulturarten mit hohem Reduktionspotential wurden für das Projektgebiet, das ein Teil des WSG Hausen ist, aufgrund der hohen N-Auswaschung Feldsalat nach Winterweizen bzw. Frühkartoffel, Erdbeeren und Spargel sowie aufgrund der großen Anbaufläche Körnermais und Saatmais (zusammen 61,3% der landwirtschaftlichen Nutzfläche) identifiziert.

Eine Ausweitung überproportional auswaschungswirksamer Fruchtfolgen ist aus Gewässerschutzsicht kritisch zu sehen, da dies – die gleiche Flächenbewirtschaftung angenommen - zu einer Zunahme der Nitratinträge insgesamt führen würde. Andererseits ist zu vermuten, dass gerade bei den Kulturen mit flächenspezifisch hohen N-Auswaschungen im Hinblick auf die Nitratinträge noch ein hohes Reduzierungspotential vorhanden ist. Durch Bewirtschaftungs- oder Fruchtfolgeänderungen bei wenigen Flächen wäre dann auch eine deutliche Reduzierung des Gesamtpotentials zu erreichen.

Die vorliegende Studie stellt die Bedeutung und den Mehrwert eines kombinierten Ansatzes aus Messungen einerseits und flächenbegleitenden Simulationen mit Expert-N und INVAM andererseits heraus. Beide Simulationsmethoden zeigen, dass die üblichen Herbstkontrollen alleine keine befriedigende Auskunft über die Auswaschung während des vegetationsfreien Zeitraums und im gesamten Jahresverlauf geben.

Für die badenova resultieren aus dem Projekt insbesondere deutlich verbesserte, quantitative Aussagen über den Anteil einzelner Nutzungen bzw. Fruchtfolgen an der gesamten Nitratauswaschung im Projektgebiet sowie die Gewinnung kultur- und gebietsspezifischer Informationen, die für Empfehlungen zur Düngung, Fruchtfolge und/oder Bewirtschaftung herangezogen werden können.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

1.1.1 Allgemeine Problemstellung

Um die bisherige Entwicklung des Nitratgehalts im Grundwasser eines Wassereinzugsgebiets bewerten und eine Prognose vornehmen zu können, sind bei überwiegend landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten, neben einer Kenntnis der hydrogeologischen Zusammenhänge vor allem möglichst genaue Informationen über die Höhe der jährlichen gebietsspezifischen Nitratauswaschung aus dem pflanzenverfügbaren Wurzelraum landwirtschaftlich genutzter Flächen erforderlich.

Die bisherige Emissionskontrolle für Wasserschutzgebiete setzt im Wesentlichen auf die Auswertung von einmaligen Herbstkontrollen bezüglich der Stickstoffgehalte im Bodenraum landwirtschaftlich genutzter Flächen am Ende der Vegetationszeit. Entsprechend der Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung Baden-Württembergs (SchALVO), werden diese Kontrollen im Zeitraum 15.10. bis 15.11. durchgeführt. Seitens der Wasserversorger werden die Landeskontrollen durch eigenständige Überwachungsprogramme in Form einer kontinuierlichen Beobachtung der Entwicklung der Nitratgehalte in den Brunnen und Vorfeldmessstellen begleitet und teilweise um eigene problemorientierte Bodenkontrollen ergänzt. Vom Eintrag des Nitrats in die ungesättigte Zone bis zu dessen Feststellung im Rohwasser der Wasserfassungen können aufgrund des transportbedingten Zeitverzuges mehrere Jahre bis Jahrzehnte liegen.

Damit verbunden ist der Nachteil, dass Entscheidungen über die Notwendigkeit oder Erkenntnisse über den Erfolg von Maßnahmen zur Erniedrigung des Nitratauswaschungspotentiales im Hinblick auf die gesetzten Qualitätsziele nur mit großer zeitlicher Verzögerung möglich sind. Reaktionen seitens der Wasserwirtschaft können daher nur verspätet erfolgen.

Die Aussagemöglichkeit von Herbstkontrollen beschränkt sich im Wesentlichen auf das aktuelle Auswaschungspotential zum Zeitpunkt der Herbstkontrolle selbst.

Die unterschiedlichen N-Bilanz- und –Verlustglieder können sowohl für die vorangehende Vegetationsperiode, als auch die nachfolgende Auswaschungsperiode auf dieser Datenbasis bestenfalls qualitativ abgeschätzt werden. Eine hinreichend genaue Quantifizierung in Hinblick auf eine belastbare Emissions- bzw. Erfolgskontrolle ist nicht möglich.

Damit erweist sich, dass insbesondere vor dem Hintergrund zunehmender klimatischer Veränderungen und der sich zukünftig weiter verändernden Intensität und des Anbauspektrums der landwirtschaftlichen Produktion, die bisherige Fokussierung auf Herbstkontrollen den wachsenden Anforderungen hinsichtlich einer aussagekräftigen, quantitativen Darstellung der gebietsspezifischen Belastungssituation und bestehender Risiken (Eintragungspotentiale) immer weniger gerecht wird.

Die erwartete Zunahme der klimatischen Variabilität zwischen den einzelnen Jahren, verbunden mit einer Verschärfung hinsichtlich der Extreme, lässt zunehmende Unterschiede für die relevanten Wasser- und Stickstoffbilanzglieder zwischen den einzelnen Jahren erwarten.

Langjährige mittlere Richtwerte (Faustzahlen bezüglich Ertragserwartung, Wasserdargebot, Nährstoffaufnahme- und Mineralisierungsraten etc.) werden für die Steuerung und Bewertung der Einzeljahre zunehmend weniger zutreffend.

1.1.2 Nitratkonzentrationsentwicklung WSG Hausen

Die badenova fördert beim Wasserwerk Hausen Trinkwasser für ein rund 285.000 Einwohner zählendes Versorgungsgebiet, welches aus der Stadt Freiburg und 13 angeschlossenen Umlandgemeinden besteht. In den Jahren 2008 bis 2010 wurden im Durchschnitt 7.3 Mio. m³ Rohwasser pro Jahr gewonnen. Im Unterschied zu benachbarten Gewinnungsanlagen im intensiv landwirtschaftlich genutzten südlichen Oberrheingraben wies das aus den fünf Tiefbrunnen der Brunnengalerie Hausen geförderte Rohwasser bisher neben einer allgemein guten Qualität auch günstige Nitratwerte auf. Dies ist in erster Linie auf den positiven Einfluss gering belasteten Uferfiltrats aus den infiltrationswirksamen Schwarzwaldflüssen Möhlin und Neumagen zurückzuführen.

In den letzten Jahren wurde jedoch ein deutlicher Anstieg der Nitratgehalte im Rohwasser beobachtet, welcher nach erster Einschätzung hauptsächlich die beiden südlichen Brunnen der B-Reihe (B1 und B4) betrifft, bei genauerer Betrachtung aber auch für die Brunnen A2 und A4 festzustellen ist (vgl. Abschnitt 2.3.9).

Diese Entwicklungen bilden zusammen mit den identifizierten Schwächen der SchALVO-Kontrollen wichtige Gründe für die Durchführung des vorliegenden badenova-Innovationsfonds Projektes.

1.2 Ziele des Vorhabens

Ein erfolgversprechenderes Kontrollsystem mit verbesserter Aussagekraft und Umsetzbarkeit ist von einem Ansatz zu erwarten, der zukünftig überwiegend auf eine überschaubare Anzahl repräsentativer Kooperationsflächen anstelle flächendeckender Betriebsdaten (Bodenkontrollen, Bilanzen) seitens der Landwirte im Wasserschutzgebiet zurückgreift. Zudem ist es von Vorteil, wenn dessen Datengrundlagen und Beobachtungsdaten weitgehend durch den Wasserversorger selbst erhoben werden können.

Im Projekt sollten deshalb die Möglichkeiten überprüft werden, die sich aus einer ganzjährigen Überwachung von gebietsspezifisch repräsentativen Ganglinienflächen mit einer begleitenden Modellierung des Stickstoffhaushaltes und der N-Dynamik ergeben. Mit regional angepassten Modellansätzen des Agrarökosystemmodells Expert-N und des Auswaschungsmodells INVAM sollten für die im Wasserschutzgebiet Hausen relevanten Kulturarten Saat- und Körnermais, Sommer- und Wintergetreide, Früh- und Spätkartoffeln, Spargeln, Erdbeeren und einige Zwihschenfrüchte, die Auswaschungspotenziale berechnet werden.

Mit dem vorliegenden Projekt sollte damit eine alternative Strategie zur gebietsspezifischen Emissions- und Erfolgskontrolle im Grundwasserschutz mit folgenden Zielsetzungen entwickelt werden:

- Möglichkeit einer direkten, qualitativen und quantitativen Emissions- und Erfolgskontrolle für das aktuelle Jahr.
- Möglichkeit der kontinuierlichen Überwachung und Auswertung, sowohl vegetationsbegleitend als auch während des Auswaschungszeitraumes, auch über mehrere Jahre hinweg.
- Verbesserte ganzjährige Transparenz für die Erklärung von Prozessen und Wechselwirkungen, eine verbesserte Steuerung von Maßnahmen als auch zur Steigerung der Akzeptanz von Maßnahmen, die von der Landwirtschaft eingefordert werden.

Schaffung einer erweiterten Prognosefähigkeit zur Abschätzung der Wirkungen sich verändernder Rahmenbedingungen (Kulturarten, Klimabedingungen (Extreme) und veränderter Bewirtschaftungsweisen (z.B. Düngung), um zukünftige Chancen und Risiken besser abschätzen zu können. Dadurch besteht die Möglichkeit des Einsatzes als Frühwarnsystem und als Entscheidungshilfe bei Entwicklung nachhaltiger Bewirtschaftungsszenarien.

1.3 Vorgehensweise

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die Vorgehensweise gegeben, eine detaillierte Beschreibung der vorgenommenen Untersuchungen und Erhebungen erfolgt im Kapitel 2, eine Beschreibung der Simulationsmodelle und der Methodik in Kapitel 3.

Für eine möglichst genaue Abschätzung der gebietsspezifischen Nitratauswaschung war zunächst eine repräsentative Abschätzung für die wichtigsten im Gebiet vorhandenen Kulturen und die vorhandenen unterschiedlichen Böden über die gesamte Projektlaufzeit erforderlich. Als Basis für eine derartige Abschätzung erfolgten im Wasserschutzgebiet Hausen im Projektzeitraum Bodenkontrollen an jeweils ca. 10 Terminen/Jahr auf Nitrat- und Ammoniumstickstoff auf insgesamt ca. 40 Flächen, welche die Hauptnutzungen (Körnermais, Saatmais, Spargel, Kartoffeln, Erdbeeren, Getreide) und die unterschiedlichen Böden im Gebiet repräsentieren (vgl. Abschnitt 2.3.2.1).

An acht ausgewählten Standorten erfolgten zudem bodenkundliche Untersuchungen, durch die wichtige bodenphysikalische Parameter erhoben wurden (vgl. Abschnitt 2.3.2.2).

Bei sämtlichen Bodenproben wurden neben den Nitratstickstoffgehalten auch die Wassergehalte bestimmt, die für die Berechnungen mit dem Simulationsmodell INVAM erforderlich sind, sowie zur Abschätzung der Feldkapazität herangezogen wurden (vgl. Abschnitt 2.3.4).

Um möglichst alle flächenrelevanten Daten für die Simulation mit INVAM und die Modellierung von beobachteten Projektstandorten mit Expert-N vorliegen zu haben, wurden alle von den Projektlandwirten zur Verfügung gestellten detaillierten Angaben zur Bewirtschaftung aufgenommen (vgl. Abschnitt 2.3.5).

Vorort wurden auf den Projektflächen alle relevanten Pflanzendaten erhoben und Untersuchungen der Biomasse durchgeführt (vgl. Abschnitt 2.3.6).

Für eine Berücksichtigung der Berechnung bei der Gesamtauswertung wurden zudem die berechneten Flächen kartiert und die Nitratkonzentrationen der Brunnenwässer, die zur Berechnung herangezogen werden, gemessen (vgl. Abschnitt 2.3.7).

Während des Projektzeitraums von 2008 bis 2011 erfolgten jährliche Erhebungen der aktuellen Nutzungen an jeweils zwei Terminen (vgl. Abschnitt 2.3.8).

Mit Hilfe des Modellierungssystems **Expert-N** wurden geeignete, aus robusten Modellkomponenten bestehende Modellansätze für die Kulturarten Mais, Weizen, Gerste, Kartoffel, Spargel, Erdbeeren und Zwischenfrüchte bzw. Zwischennutzungen (Feldsalat) identifiziert, kalibriert und validiert und für die kulturspezifische Beschreibung der Nitratdynamik der einzelnen Beobachtungsstandorte im Jahresverlauf eingesetzt. Während für Körnermais und Saatmais aus dem vorangegangenen Referenz-Projekt [Müller-Sämann, Hölscher, Schrempf et al. 2011] heraus bereits auf geeignete, kulturspezifische Ansätze zurückgegriffen werden konnte, wurden diese für Kartoffeln (früh, spät), Sommer- und Wintergetreide, Spargel und Erdbeeren im Rahmen dieses Projektes neu bestimmt. Für Kartoffeln und Getreide wurde auf explizite Pflanzenmodellansätze zurückgegriffen, während für Spargel und Erdbeeren vereinfachte Entzugsfunktionen zugrunde gelegt wurden, die anhand der Literatur und mithilfe vorgenommener Messungen und Beobachtungen im Gebiet ermittelt wurden.

Beim Agrar-Ökosystemmodell Expert-N, handelt es sich um ein modulares Modellsystem, das zur Beschreibung des kompletten ganzjährigen Kohlenstoff-(C) / Stickstoff-(N)-haushaltes im System Boden-Pflanze in hoher zeitlicher Auflösung dient (vgl. Abschnitt 3.1.2).

Weiterhin erfolgte mit Hilfe des bislang im Zeitraum November-März erfolgreich eingesetzten und validierten Simulationsmodells **INVAM** (= Integrales Nitrat-Verlagerungs- und Auswaschungs-Modell) eine Abschätzung der Nitratauswaschung über den Herbst-Winter-Zeitraum ab dem ersten Wassersättigungszeitpunkt im Frühsommer/Herbst (vgl. Abschnitt 3.1.1).

Mit Hilfe der Daten zur Bodennutzungskartierung und -beschaffenheit, der Berechnungskartierung und regionalisierten Klimadaten, wurden die mit Expert-N erzielten Ergebnisse auf das gesamte Projektgebiet übertragen. Auch die mit INVAM erzielten Ergebnisse wurden mit Hilfe von Abschätzungen auf das gesamte Projektgebiet übertragen. Die Anwendung der beiden Modelle ermöglichte die **Berechnung der gebietsrepräsentativen mittleren Nitratauswaschung** für das WSG Hausen.

Durch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse des relativ aufwändigen und komplexen Agrar-Ökosystemmodells Expert-N mit den Ergebnissen des zur Berechnung der Nitratauswaschung im Herbst-Winter-Zeitraum bewährten und weniger komplexen Simulationsmodells INVAM wird gezeigt, wo sich die beiden Modelle im Sinne der Problemstellung sinnvoll ergänzen können und welche jeweiligen Mehrwerte sich aus deren Anwendung gegenüber den bisher etablierten Auswerteverfahren ergeben.

Weiterhin wurde versucht, aus der innovativen Kombination von modernen Methoden und einem veränderten Überwachungsansatz heraus ein verbessertes Konzept zur Emissions- und Erfolgskontrolle im Wassereinzugsgebiet eines Wasserversorgers zu entwickeln. Das resultierende Instrument soll auch ermöglichen, auf der Basis der Erhebung von gebietsrepräsentativen Messdaten kulturspezifische Aussagen hinsichtlich der Auswaschungsrisiken zu

machen, die sich aus vorliegenden Nitratstickstoffgehalten in unterschiedlichen Bodenklassen ergeben. Hierbei können auch Abschätzungen des Mineralisierungs- und Denitrifikationsgeschehens und die Prognose der weiteren Stickstoffaufnahme während der Vegetationszeit berücksichtigt werden.

2 Untersuchungsgebiet und allgemeine Grundlagen

2.1 Gebietsbeschreibung

Das Projektgebiet ist Teil des WSG Hausen, das sich im rechtsrheinischen Teil des Oberrheingrabens südlich von Freiburg befindet und sich von den Gemeinden Hausen und Mengen im Nordwesten bis kurz vor die im Süden gelegene Stadt Staufen erstreckt. Das Projektgebiet umfasst mit 1788 ha ca. 46 % des WSG Hausen (ca. 3900 ha). Seine Grenze wurde auf Grundlage des Grundwasserzustrombereiches zu den Brunnenreihen A und B des Wasserwerkes Hausen festgelegt. Sie verläuft von der Ortschaft Hausen im Bereich der Gemarkungsgrenze Biengen/Mengen nach Offnadingen. Im Abstrom des Wasserwerkes und nach Süden hin stimmt die Projektgrenze mit der Grenze des Wasserschutzgebietes überein (Verlauf entlang des Bachgrabens nach Schlatt, nördlich um den Krozinger Berg herum und weiter am Südrand von Bad Krozingen). Nach Südosten hin wurde das Projektgebiet in einem Bereich mit mehr als 10 Jahren Fließzeit zu den Brunnen begrenzt (mittlere Fließgeschwindigkeit bei oberflächennahem Transport ca. 11-13 Jahre; die tatsächlichen mittleren Fließzeiten liegen in Folge der Durchmischung mit tieferen Bereichen des Grundwasserleiters bei 17.5-19.5 Jahren). Um bei quantitativen Auswertungen / Bilanzbetrachtungen keine Teilflächen berücksichtigen zu müssen, ist das Projektgebiet zudem flurstückscharf abgegrenzt.

Abbildung 2.1 zeigt die Lage des Projektgebiets und der Beobachtungsflächen (im Weiteren auch als Projektflächen bezeichnet). Abschnitt 2.3.1 enthält eine Beschreibung der Auswahlkriterien für die Projektflächen.

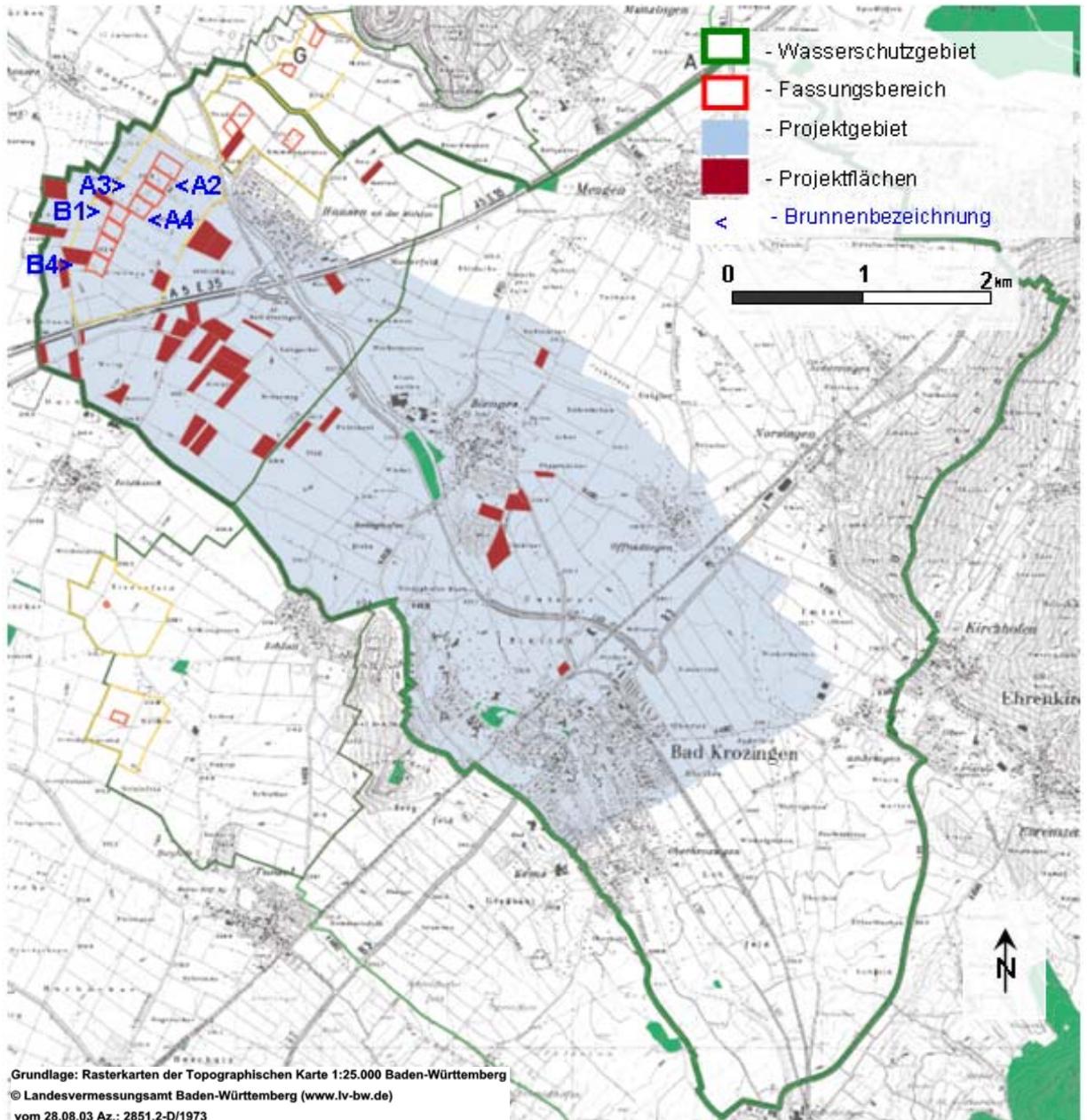


Abbildung 2.1: Wasserschutzgebiet Hausen / badenova, Projektgebiet und Lage der Projektflächen

2.2 Bodenbeschreibung

Die Variabilität der Böden im Projektgebiet ist hoch und reicht von geringmächtigen, skeletthaligen Böden über Kies bis hin zu tiefgründigen Lössböden der Vorbergzone. Anlehmige Sande und sandige bis schluffige Lehme auf Schotter sowie periodisch staunasse Aueböden (Pseudovergleyung) sind verbreitet. Dazwischen sind häufig Braunerden und Parabraunerden anzutreffen. Auf teilerodierten Lösskuppen treten auch Pararendzinen auf.

Abbildung 2.2 zeigt die verschiedenen Pedotope im Projektgebiet. Die Nummer der Legendeinträge korrespondiert mit den Boden- und Profilbeschrieben in Tabelle B2.1 im Tabellenanhang. Für Siedlungsgebiete ohne nennenswerte landwirtschaftliche Nutzung wurden keine Bodenbeschreibungen erhoben. Zusammen mit den Pedotopen ist die Lage und Identifikationsnummer der Beobachtungsflächen gekennzeichnet. Das Untersuchungsgebiet ist blau umrandet.

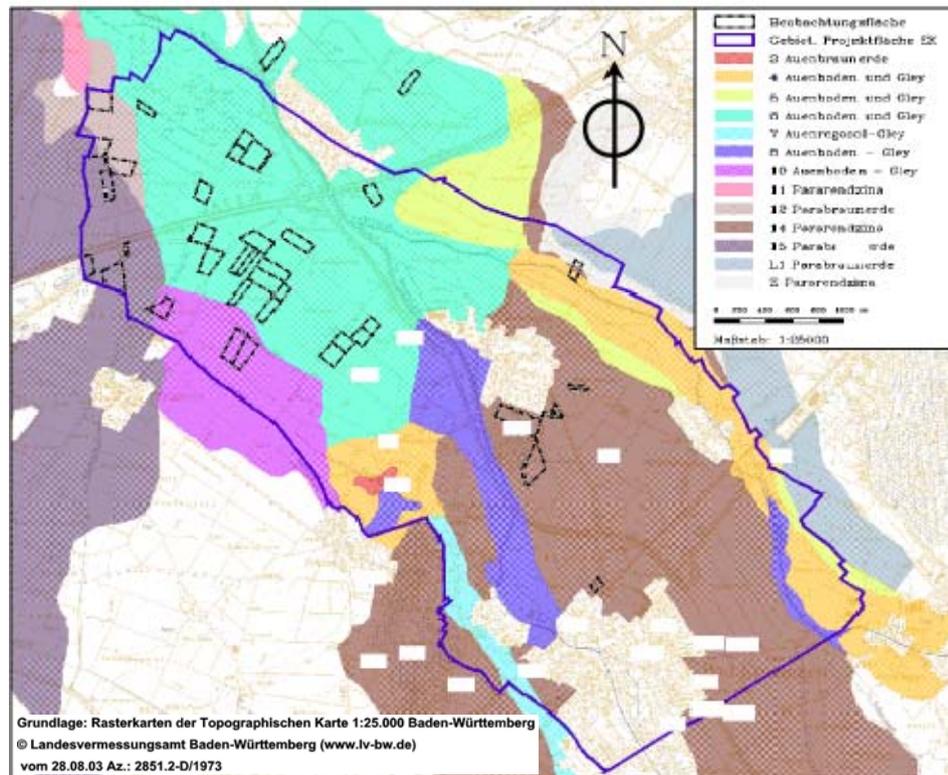


Abbildung 2.2: Pedotope und Projektflächen

2.3 Basisdaten

2.3.1 Auswahl der Projektflächen

Auswahlkriterien für die Festlegung der Projektflächen waren unter anderem die Bereitschaft der Bewirtschafter, Bewirtschaftungsdaten in Form von Schlagkarteien für die Projektbearbeitung zur Verfügung zu stellen (vgl. Abschnitt 2.3.5). Die landwirtschaftliche Nutzung und die geplante Fruchtfolge für den Zeitraum 2008 bis 2011 war für die Auswahl ein weiteres wichtiges Kriterium. Auf Grundlage der Standorteigenschaften wie Bodenart, Feldkapazität und Lage im Wasserschutzgebiet wurden bereits im Winter 2007 / Frühjahr 2008 verschiedene Flächen in Absprache mit den jeweiligen Bewirtschaftern als Beobachtungsflächen in die engere Auswahl genommen. Nach weiteren Recherchen wurden im Herbst 2008 gemeinsam durch alle Projektbeteiligten insgesamt 40 Flächen für die weitere Projektbearbeitung festgelegt. Diese Flächen wurden von 8 Landwirten bearbeitet. Die Lage der Beobachtungsstandorte innerhalb des Projektgebiets ist in Abbildung 2.1 in Abschnitt 2.1 vermerkt.

2.3.2 Bodenuntersuchungen

2.3.2.1 Untersuchungen der Böden auf Nitrat- und Ammoniumstickstoff

Im Zeitraum Mai 2008 bis Dezember 2011 erfolgte die Entnahme von Bodenproben auf den Projektflächen aus dem Bodenbereich 0-90 cm in etwa monatlichem Abstand durch die badenova AG oder durch von ihr beauftragte Lohnunternehmer gemäß den Richtlinien des TZW. Die Entnahme erfolgte mit einem umgebauten Jeep oder einer Nitratraupe.

Insgesamt wurden im Rahmen des Projektes am TZW 1.272 Bodenprofile auf deren Nitratstickstoffgehalt analysiert sowie 1.333 Ammoniumanalysen durchgeführt. Bei sämtlichen Bodenproben wurden neben den Nitratstickstoffgehalten auch die Wassergehalte bestimmt. Die Daten wurden regelmäßig in elektronischer Form an die Projektbeteiligten weitergeleitet und dienten als Basis für die Simulations- und Modellrechnungen (vgl. Abschnitt 3.1).

2.3.2.2 Bodenkundliche Untersuchungen von ausgewählten Projektflächen

Im Jahr 2009 wurden von Solum (Büro für Boden und Geologie Freiburg) bodenphysikalische Untersuchungen an insgesamt acht ausgewählten Standorten im Projektgebiet Hausen vorgenommen. Hierzu wurden Grabungen bis 1 m Tiefe auf den entsprechenden Flächen durchgeführt. Aus den freigelegten Profilen wurden für die Analyse der physikalischen Bodeneigenschaften jeweils sechs Stechzylinderproben pro Beobachtungspunkt in den unterschiedlichen diagnostischen Horizonten entnommen (3-6 je nach Bodentyp. Zudem erfolgte eine Beschreibung bzw. Ansprache des Bodenprofils mit begleitender Photodokumentation. Die Ergebnisse (Profilaufnahmen) sind in einem separaten Bericht dokumentiert. Nachfolgend werden nur einige ausgewählte Ergebnisse wiedergegeben [Spatz, Glomb, und Buck 2010].

Weitere bodenphysikalische Parameter, wie z.B. Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen und Feldkapazität wurden im Labor bestimmt.

Der höchste Wert für die nutzbare Feldkapazität (nFK) wurde mit rd. 180 mm (0-90 cm) ermittelt, die ermittelte Feldkapazität lag bei 312 mm. Für sechs aus braunem Auenboden bestehenden Projektflächen lagen die Werte zwischen etwa 125 und 160 mm (0-90 cm), die Feldkapazitäten lagen zwischen 271 und 315 mm.

Mit Proben vom Februar 2009 erfolgten die Grunduntersuchungen der Oberböden mit Bestimmung der Grundnährstoffgehalte (P, K, Mg), der Textur (Ton-, Schluff-, Sandfraktion), der Humusgehalte (mit C/N Verhältnis), des pH-Werts und des Gesamt N-Gehalts der Böden.

Diese Laboranalysen erfolgten beim Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg in Karlsruhe (LTZ). Die Zusammenstellung der Grunduntersuchungen aller 40 Projektbeobachtungsflächen findet sich in Tabelle B2.2 im Anhang.

Die Humusgehalte lagen typischerweise etwas unter 2 %, die Spannweite auf einzelnen Flächen reichte von 1,3 bis 3,6 % Humus.

Die C/N-Verhältnisse lagen insgesamt zwischen 8,1 und 9,7 und waren damit unauffällig.

Die Gehalte der Grundnährstoffe Phosphor, Kalium und Magnesium lagen meist im mittleren Bereich (Gehaltsstufe C).

2.3.3 Verwendete Klimadaten

Als Basis für die Auswertungen dienten zunächst die bei der langjährigen Niederschlagsstation beim WW Hausen der badenova AG erhobenen Klimadaten (Niederschlag, Temperatur). Die für die Verdunstungsberechnungen erforderlichen weiteren Klimadaten (z. B. Luftfeuchtigkeit) wurden von den benachbarten Stationen Freiburg-Mitte und Heitersheim bezogen.

Im Februar 2009 wurde von der badenova AG eine neue Wetterstation beim Brunnen B1 des Wasserwerks Hausen zur Erhebung der erforderlichen gebietsspezifischen Klimadaten mit automatischer Datenübertragung in Betrieb genommen. Insbesondere bei Starkniederschlägen zeigte sich durch Vergleich mit weiteren nahegelegenen Stationen, dass die Niederschläge im Gebiet erhebliche Unterschiede aufwiesen.

Deshalb wurde versucht, die starken räumlichen Unterschiede in der Niederschlagsmenge und –intensität innerhalb des Projektgebiets durch Verwendung der vom DWD herausgegebenen radargestützten Niederschlagsdaten (Radolan-Daten, <http://www.dwd.de/RADOLAN>) zu berücksichtigen. Radolan liefert in Deutschland flächendeckende, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste stündliche Niederschlagshöhen in einer Intensitätsauflösung von 0,1 mm und einer räumlichen Auflösung von 1 km², wobei angeeichte Radarniederschlagsdaten eine Synthese aus den beiden Datenquellen Radar- und Bodenmessnetz darstellen.

Die dem Projektgebiet nächstgelegene Radarstation befindet sich auf dem Feldberg. Die Lage der verwendeten Ombrometer zur Aneicherung der Radardaten ist nicht bekannt und konnte auch nicht beim DWD in Erfahrung gebracht werden. Jeder Projektfläche im Untersuchungsgebiet wurden die räumlich aufgelösten Niederschlagsdaten der entsprechenden Radolankachel (1 km²-Raster) zugeordnet. **Abbildung 2.3** zeigt die Lage der Niederschlagsstationen und der Zentren der Radolankacheln im Bereich des Projektgebiets.

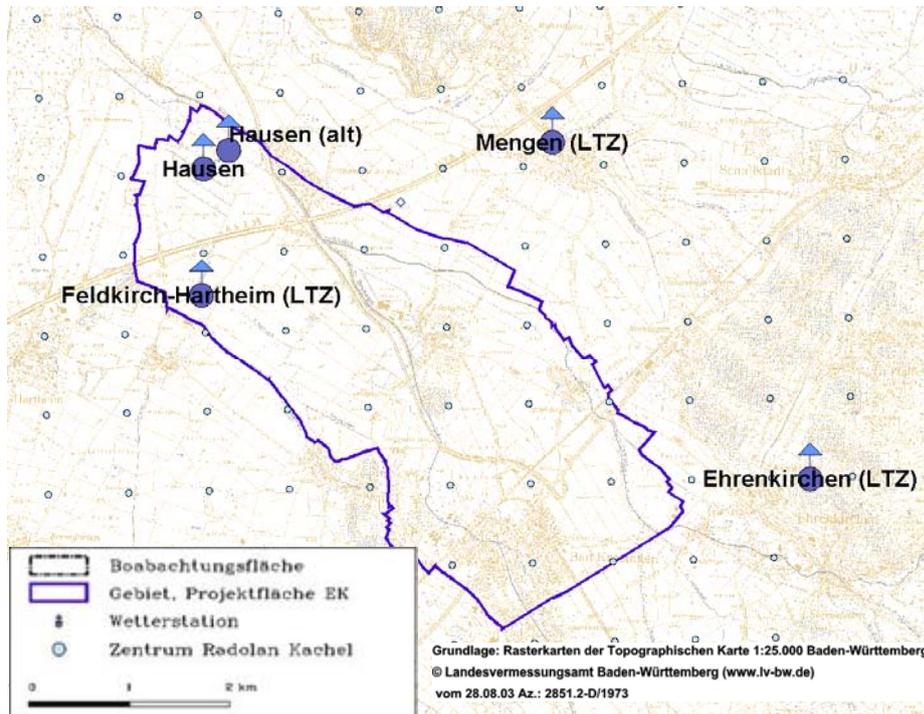


Abbildung 2.3: Lage der Niederschlagsstationen und der Zentren der Radolankacheln im Bereich des WSG Hausen

Bei einem Vergleich der Radolandaten mit den Niederschlagswerten weiterer nahegelegener Klimastationen zeigten sich vor allem bei Starkregenereignissen deutliche Unterschiede. Beispielsweise wiesen die an den umliegenden Niederschlagsstationen gemessenen Tageswerte für den 12.07.2010 mit Werten zwischen 11 mm (Freiburg-Mitte), 21,5 mm (Ehrenkirchen), 30,5 mm (Heitersheim) 54,5 mm (Hausen-neu), 63,4 mm Opfingen und Mengen und 73,6 mm Feldkirch-Hartheim eine enorme Spannweite auf. Die Radolanwerte der Kacheln im Projektgebiet lagen jedoch nur zwischen 12,2 und 40,7 mm und damit erheblich unter den Messwerten einiger Stationen im Projektgebiet.

Die Analyse der jährlichen Niederschlagssumme der Radolandaten im Vergleich mit den Stationsmesswerten ergab ab 2010 eine systematische Unterschätzung der Niederschlagsmenge. Als Ursache wird eine veränderte Aneicherungsroutine seitens des DWD vermutet.

Da der Niederschlag ein entscheidender Faktor bei der Simulation des Wasser- und Stickstoffhaushalts ist, wurde seitens GHC ein Korrekturverfahren auf Tageswertbasis entwickelt, um einerseits die räumliche Auflösung und Differenzierung der Radolandaten zu erhalten, andererseits die beobachteten Niederschlagsmengen der umliegenden Stationen als Referenz zu berücksichtigen.

Das Korrekturverfahren berechnet die Differenz zwischen Stationswert und dem Niederschlag der entsprechenden Radolankachel für alle aktiven Klimastationen, sodass jeder Station ein Fehler der Radolan-Rohdaten zugeordnet werden kann. Dieser Fehler wird dann über das ‚Inverse Distance Weighting‘-Verfahren auf die Radolankacheln projiziert und zum Nieder-

schlag der jeweiligen Radolankachel addiert. Falls sich durch das Korrekturverfahren negative Niederschlagsmengen ergeben, werden diese auf Null gesetzt.

Die korrigierten Radolandaten für den 12.07.2010 reichen im Projektgebiet von 27,8 mm bis 58,8 mm.

2.3.4 Wassergehalte und Feldkapazitäten

2.3.4.1 Abschätzung der Feldkapazität aus den Messwerten

Bei sämtlichen Bodenproben wurden neben den Nitratstickstoffgehalten auch die Wassergehalte bestimmt. Nach längeren Feuchtperioden und/oder intensiven Niederschlägen sind die Böden insbesondere im Herbst-Winterzeitraum bis zur Feldkapazität wassergesättigt. Wenn daher die Entwicklung der Wassergehalte über mehrere Herbst-Winterzeiträume betrachtet wird und dabei Termine unmittelbar nach Starkniederschlägen oder durch Schnee beeinflusste Probennahmetermine unberücksichtigt bleiben, kann aus dem Verlauf der Wassergehalte sehr gut die Feldkapazität der jeweiligen Bodenschichten abgeschätzt werden. Die **Abbildung 2.4** zeigt beispielsweise den Verlauf der Wassergehalte in den Bodenschichten 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm für die Projektfläche H 618 (Körnermaisbau 2008 – 2011) von Januar 2008 bis August 2011. Deutlich zu erkennen sind die jährlich wiederkehrenden Änderungen des Wassergehalts im Jahresverlauf. Eine nähere Erläuterung der Bodenfeuchtedynamik erfolgt in Abschnitt 5.2.2.2.

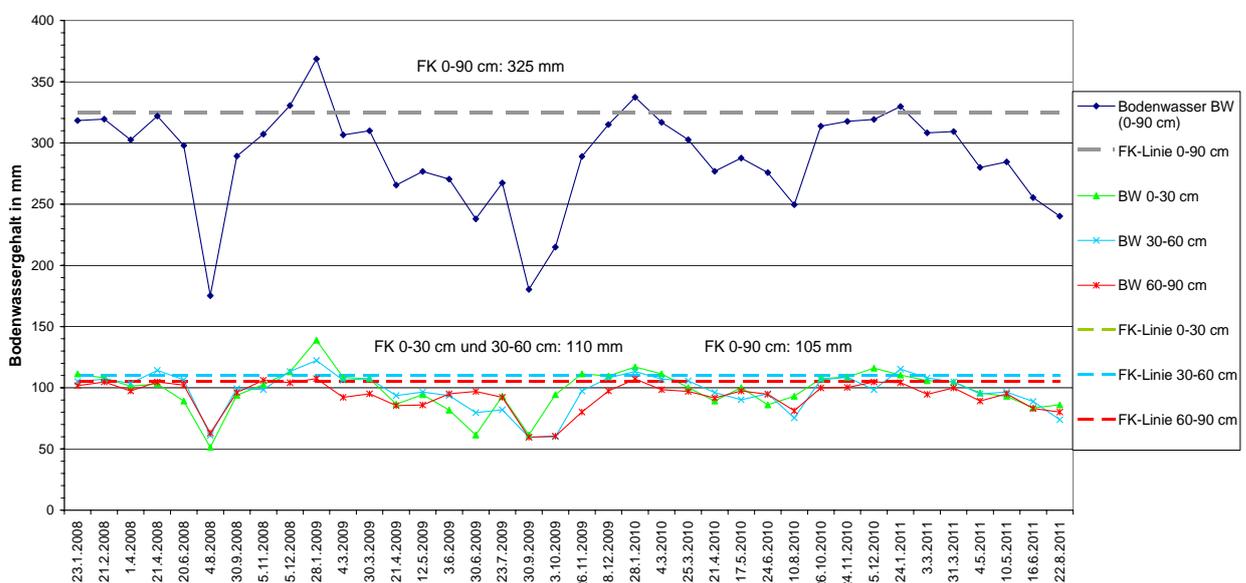


Abbildung 2.4: Verlauf der Wassergehalte in den Bodenschichten 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm und daraus abgeleitete Feldkapazitäten für die Projektfläche H 618.

Die eingezeichneten gestrichelten Linien zeigen die abgeschätzten Feldkapazitäten für die einzelnen Bodenschichten. Für die Fläche H 618 wurde eine Feldkapazität von $110 + 110 + 105 = 325$ mm für den Bodenbereich 0-90 cm abgeschätzt. Die Werte vom 28.01.2009 sind überhöht (Ursache unklar, möglicherweise Schneelast bei den Probenahmen, vgl. Abschnitt 5.2.2.2) und wurden bei der Festlegung der Feldkapazität nicht berücksichtigt.

Um von der Feldkapazität (Fk) auf die nutzbare Feldkapazität (nFk) zu schließen, wurden alle weiteren verfügbaren Informationen (Solum-Auswertungen, Reichsbodenschätzung, Lehrbuch der Bodenkunde [Blume et al. 2002]) herangezogen und daraus das Verhältnis aus nutzbarer Feldkapazität und Feldkapazität gebildet. Mit diesen Faktoren wurde die nFk aus der aus den Wassergehalten abgeleiteten Fk abgeschätzt.

Diese Werte wurden auch für die von GHC durchgeführten Berechnungen verwendet. Ein Vergleich mit den aus der Reichsbodenschätzung abgeleiteten Werten zeigt, dass diese teilweise deutlich niedriger liegen. Die Unterschiede waren häufig darauf zurückzuführen, dass die Bodenprofile der Reichsbodenschätzung nicht bis 90 cm sondern z. B. nur bis 60 oder 70 cm Bodentiefe reichten.

2.3.4.2 Simulation der Wassergehaltsdynamik

Zur Simulation der Wassergehaltsdynamik in Expert-N mit Hilfe der Richards Gleichung (Richards, 1931) werden die hydraulischen Funktionen des Retentionsvermögens (Wassergehalts-Saugspannungsbeziehung) und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (Saugspannungs-Leitfähigkeitsbeziehung) benötigt (siehe Kapitel 3.1.2.1).

Die Parameter der hydraulischen Funktionen werden von den Bodenkenngrößen Feldkapazität (Vol.%), permanenter Welkepunkt (Vol.%), Gesamtporosität (Vol.%), Wendepunkt der Retentionskurve (Pa), Lufteintritt (Pa) und gesättigte Leitfähigkeit (cm/d) abgeleitet. Diese Kenngrößen wurden im Rahmen des Projekts von SOLUM (Büro für Boden + Geologie) anhand von Profilgrabungen auf ausgewählten Standorten bestimmt (vgl. Abschnitt 2.3.2.2). Wo keine Profilbeschreibungen zur Verfügung standen, wurden die Bodenkenngrößen mittels Pedotransferfunktionen von der Bodenschätzung des Landesamts für Geoinformation und Landesentwicklung Baden-Württemberg abgeleitet. An Standorten mit erheblichen Differenzen zwischen simulierten und gemessenen Wassergehalten wurden die hydraulischen Kenngrößen zudem manuell angepasst, um eine realistische Simulation des Wasserhaushalts zu gewährleisten.

2.3.5 Schlagkarten der Projektlandwirte

Die Erfassung der wichtigsten Bewirtschaftungsdaten der Flächen, die für die Parametrisierung und Kalibrierung bei den Modellberechnungen herangezogen wurden, erfolgte über ein Formular, welches die Landwirte für jede Kultur gegen eine Aufwandsentschädigung ausfüllten. Das Formular enthält Angaben zur Fruchtfolge und Vorgeschichte des Feldes, zu Zeitpunkt und Intensität von Bodenbearbeitungsmaßnahmen, zu Düngungszeitpunkten, Ausbrin-

gungsmengen und Düngerformulierungen. Auch Saattermine, Saatstärken, Sorten, Beregnungen und sonstige Pflegemaßnahmen wurden von der Ernte der Vorkultur bis zum Erntetermin der jeweiligen Hauptkultur dokumentiert (siehe auch Tabelle B2.3 im Anhang). Bei Mais, Kartoffel, Getreide und Gründüngung wurden flächengenau und ergänzend dazu eigene Ertrags-erhebungen durchgeführt (Kap.2.3.6).

Die für die Jahre 2008 bis 2010 erhobenen Schlaginformationen wurden nach Prüfung der Aufzeichnungen durch die Mitarbeiter von ANNA und badenova und fallbezogen auch nach Rücksprache mit den Landwirten, in ein digitales Datenblatt überführt. Nach Abstimmung zwischen Datenerfasser und Modellierer wurden die Angaben aus der Schlagdatei in einer zentralen Smallworld GIS basierten Projektdatenbank zusammengeführt und gemeinsam mit Boden- und Klimadaten sowie weiteren Flächeninformationen zu Simulationsobjekten aufbereitet.

Zum Projektende lagen für die Jahre 2008 – 2010 – mit Ausnahme der Erdbeerflächen - Schlagdaten zu allen Projektflächen vor.

Die Angaben zu Düngung, Bodenbearbeitung und Beregnung wurden zudem zusammen mit den gemessenen Wassergehalten und den N_{\min} -Messungen in eine Gesamtdatei eingegeben, die den Projektbeteiligten zur Verfügung gestellt wurde.

Die Angaben zur Bewässerung wurden mit Analysewerten der badenova zu den mittleren Nitratgehalten des Wassers hinterlegt, so dass die Stickstoffzufuhr über das Beregnungswasser bei der Modellierung berücksichtigt werden konnte.

Für die Sonderkulturen Erdbeeren, Spargeln, Kürbis, Feldsalat und Gründüngung wurden anhand der Angaben der Landwirte, sowie auf Grundlage eigener Messungen und Analysen in Verbindung mit Kennzahlen aus der Fachliteratur [Fink et al. 2007, LFL (Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft) 2008a, LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg) 2010a, LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg) 2010b, Schneider-Götz et al. 2011] regionaltypische Produktionsszenarien definiert. Sie dienten als Grundlage für N-Modellierungen mit Leach-N (vgl. Abschnitt 3.1.2.4).

2.3.6 Vororterhebungen auf den Projektflächen und Biomasse Untersuchungsergebnisse

Zur Parametrisierung und Kalibrierung der Wachstumsmodelle, der Identifikation der Mineralisierungsdynamik sowie zur Quantifizierung von Parametern für den Stickstoffentzug durch die Pflanze, wurden auf den Projektflächen in den Jahren 2008 bis 2010 nachfolgende Daten zur Bestandsentwicklung erfasst.

Über die Vegetationsperiode hinweg wurden phänologisch wichtige Entwicklungsstadien wie der Aufgang der Saaten, der Beginn des vegetativen Hauptwachstums, der Eintritt in die generative Phase, Blühbeginn und Erntetermine (Reife) anhand der BBCH Skala [Meier 2001] mit Datum festgehalten. Außerdem wurden auftretende Pflanzenkrankheiten, Schädlinge und Schädigungen durch Wetter- und Naturereignisse wie Hagel- und Wildschäden nach den

Richtlinien für die Durchführung von Sortenversuchen des Bundessortenamtes bonitiert und bei der Bewertung der Bestandesentwicklungen und Erträge berücksichtigt. Die Bonituren erfolgten dabei anhand eines Boniturschlüssels von 1 (fehlend oder nicht vorhanden) bis 9 (sehr stark oder abgestorben) unter Berücksichtigung der Befallsprozente von Pflanzen und Pflanzenteilen [BSA (Bundessortenamt) 2000]. Die Boniturnwerte dienten zur Orientierung bei den Modellsimulationen und zur Erklärung bzw. dem Abgleich der auf den Feldern beobachteten Entwicklungen mit den Ergebnissen der Simulationen mit den Wachstumsmodellen.

2.3.6.1 Bestandesdaten und Ertragserhebungen

Ebenfalls vegetationsbegleitend erfolgten Messungen in den Pflanzenbeständen und repräsentative Probenahmen zu Bestandesdichten, Biomasseaufwuchs und Biomassequalität von Haupt- und Zwischenfrüchten. Von den Ernteproben wurden repräsentative Teilproben zur Bestimmung von Menge und Qualität der Ernteprodukte (Trockenmasse- und N-Gehalte) entnommen. Die Probennahmen erfolgten dabei mittels Probeschnitten auf den Parzellen. Nur bei Kartoffel wurden Proben von den Erntewagen genommen. Gemessen und ausgewertet wurden auch die Ernterückstände (Trockenmasse und C/N Verhältnis). Bei Gründungs-pflanzen erfolgte die Bestimmung von Biomasseaufwuchs, Biomasseeigenschaften (C/N-Verhältnis) und Stickstoffzug. Die Trockenmasse- und Qualitätsuntersuchungen erfolgten beim LTZ Augustenberg in Karlsruhe nach laborüblichen Standardmethoden [LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg) 2010b].

Die Erhebungen lieferten Orientierungsdaten für die Modellparametrisierung und die Abschätzung der Stickstoffentzüge, der Stickstoffabfuhr (über die Ernte) und zu den Mineralisierungseigenschaften der auf den Feldern verbliebenen Gründungs-pflanzen und Pflanzen-rückstände.

2.3.6.2 Felddaten und Biomasse-Untersuchungsergebnisse

Die Bestandsdichten bei Saatmais Mutterpflanzen und bei Körnermais variierten zwischen 7,5 Pflanzen/m² und 9,2 Pflanzen pro m², wobei Werte zwischen 7,5 und 8,2 eher typisch waren für Körnermais und Werte größer 8,2 fast ausschließlich bei Saatmais Mutterpflanzen vorkamen.

Auch bei Weizen traten deutliche Unterschiede mit Bestandesdichten von 430 bis 640 ähren-tragenden Halmen/m² auf.

In der **Tabelle 2.1** sind einige Mess- und Analysenergebnisse zusammengestellt, wie sie auf den Beobachtungsflächen in den Jahren 2009 und 2010 ermittelt wurden. Wie unter stark variierenden Feldbedingungen nicht anders zu erwarten, wiesen die meisten Parameter erhebliche Schwankungen von Feld zu Feld und von Jahr zu Jahr auf, was auf unterschiedliche Saatzeitpunkte, Vegetationsbedingungen, Bodenverhältnisse, Bewirtschaftungs- und Sorteneinflüsse zurückgeführt werden kann.

Tabelle 2.1: Biomassemengen und Biomasseeigenschaften einiger Kulturen auf Projekt-Beobachtungsflächen im Wasserschutzgebiet Hausen (2009-2010)

Kultur/ Ernteorgan	2009			2010		
	kg TM /ha	N- Gehalt in %	C/N Verhältnis	kg TM /ha	N- Gehalt in %	C/N Verhältnis
Saatmais/Vaterpfl. Biomasse siloreif	3150 (1900-4150)	1,5 (1,3-1,6)	30 (28-34)	2768 (2316 – 3357)	1,5 (1,4-1,7)	28,9 (26-32)
Saatmais/Mutterpfl. Biomasse siloreif	10480 (8310-11110)	1,2 (1,0-1,3)	.. (..)	7265 (5550-9080)	1,5 (1,3-1,6)	.. (..)
Körnermaispflanze Stroh	..	..	..	8672 (6640-10400)	1,1 (0,7-1,4)	43 (33-57)
Mutterpfl./Saatmais Stroh	..	..	..	7106 (5400-9200)	1,2 (0,7-1,4)	38 (32-62)
Kartoffelkraut	1749 (1008-2290)	2,6 (1,6-3,3)	16 (14-25)	1569 (960-1949)	2,7 (2,5-3,0)	15 (14-17)
Wi-Weizen Gesamtpflanze siloreif	11900 (9300-14200)	1,4 (1,2-1,5)	.. (..)	16583 (14800-17800)	1,5 (1,3-1,6)	.. (..)
Wi-Weizen Stroh	5128 (3600-6600)	0,9 (0,7-1,1)	52 (42-65)	8394 (6500-9900)	0,6 (0,6-0,7)	77 (70-87)
Begrünung (Senf/Rübsen/Ölret tich)	955 (400-3900)	3,8 (1,9-5,5)	11 (7-23)	1471 (650-2525)	3,4 (2,9-3,8)	12 (10,9-14,1)
Weidelgras Untersaat in Saatmais	590 (450-810)	2,4 (2,1-2,7)	16 (14-17)	450 (..)	4,0 (..)	11 (..)

Die Untersaaten von Zwischenfrüchten in Saatmais konnten die Anforderungen an einen befriedigenden Mindestertrag wegen später Saattermine oder trockener Bedingungen zur Ansaat meist nicht erfüllen. Wie in **Abbildung 2.5** ersichtlich, waren die Aufwüchse in den Saatmaisgassen bis auf zwei Ausnahmen meist sehr gering und wiesen bei den Kreuzblütlern auch C/N Verhältnisse kleiner 10 auf. Derartige Biomassen mineralisieren sehr schnell nach einer Einarbeitung. Nur bei relativ ausgereiften ertragreicheren Biomassen, (siehe z.B. Senf nach Kartoffel) kann mit einer spürbaren Schutzwirkung gegen Auswaschung gerechnet werden.

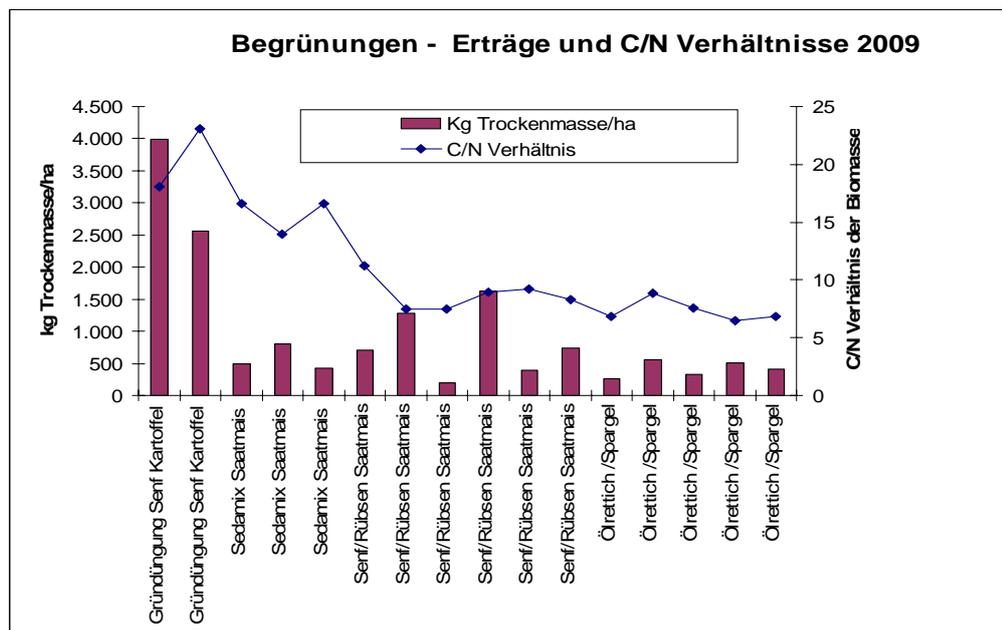


Abbildung 2.5: Trockenmassebildung und C/N-Verhältnis einiger Zwischenfruchtaufwüchse nach Kartoffel und als Untersaaten in Saatmais und Spargel im Jahr 2009.

Die in Form von Maisstroh bei Körnermais und bei Mutterpflanzen von Saatmais zurückgeführten Biomassen sind mit 7-9 t TM und die Stickstoffmengen mit 60 bis über 100 kg N/ha erheblich. Bei einem C/N Verhältnis von etwa 40:1 bei der Einarbeitung im Herbst ist deshalb im Frühjahr kaum noch mit Festlegungen von Stickstoff zu rechnen.

Bis zum April 2011, dem Ende der Erfassung von Felddaten, wurden die Beobachtungen auf den Flächen noch weitergeführt, wobei Exakterhebungen nur noch bei Getreide erfolgten, da hier die Datenlage noch unzureichend war.

2.3.7 Erhebung von Beregnungsdaten und Beregnungskartierung

Die Beregnungsflächen im Projektgebiet, wurden vor Ort von badenova-Mitarbeitern kartiert und von GHC in ein Geographisches Informationssystem (GIS) übernommen. Zudem wurden den beregneten Projektflächen die Nitratkonzentrationen des jeweiligen Beregnungsbrunnens zugeordnet. Die im Projektzeitraum gemessenen Nitratkonzentrationen der Wasserproben aus den Beregnungsbrunnen im Projektgebiet sind in der **Abbildung 2.7** zusammengestellt. Die Nitratkonzentrationen reichen von 21,9 bis 98,5 mg/L. Die Probennahme erfolgte durch die Brunnenbetreiber oder badenova-Mitarbeiter. Die Analyse erfolgte im Labor der badenova AG. Beim Beregnungswasser des Beregnungsbrunnens Birnbaum wird zeitweise aus einem nahe gelegenen Baggersee Wasser zugemischt. Dies ist vermutlich die Ursache für die relativ großen Nitratkonzentrationsschwankungen im Beregnungswasser.

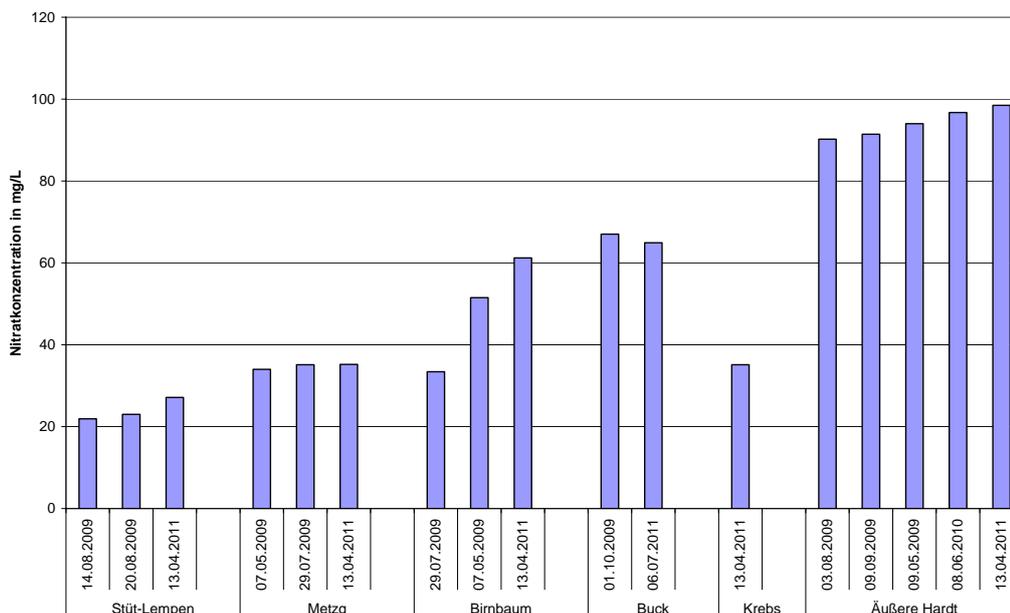


Abbildung 2.6: Nitratkonzentrationen von Wasserproben aus den Beregnungsbrunnen im Projektgebiet

Für die Projektflächen lagen Angaben zu den Beregnungsmengen und die Anzahl der Einzelgaben durch die Bewirtschafter vor. In Kombination mit den durchgeführten Nitratanalysen des Beregnungswassers konnte eine Abschätzung des N-Eintrags über das Beregnungswasser erfolgen und bei den Modellberechnungen berücksichtigt werden.

Für das gesamte Projektgebiet wurden 380 beregnungsfähige Flächen mit einer Gesamtfläche von 417,37 ha ausgewiesen.

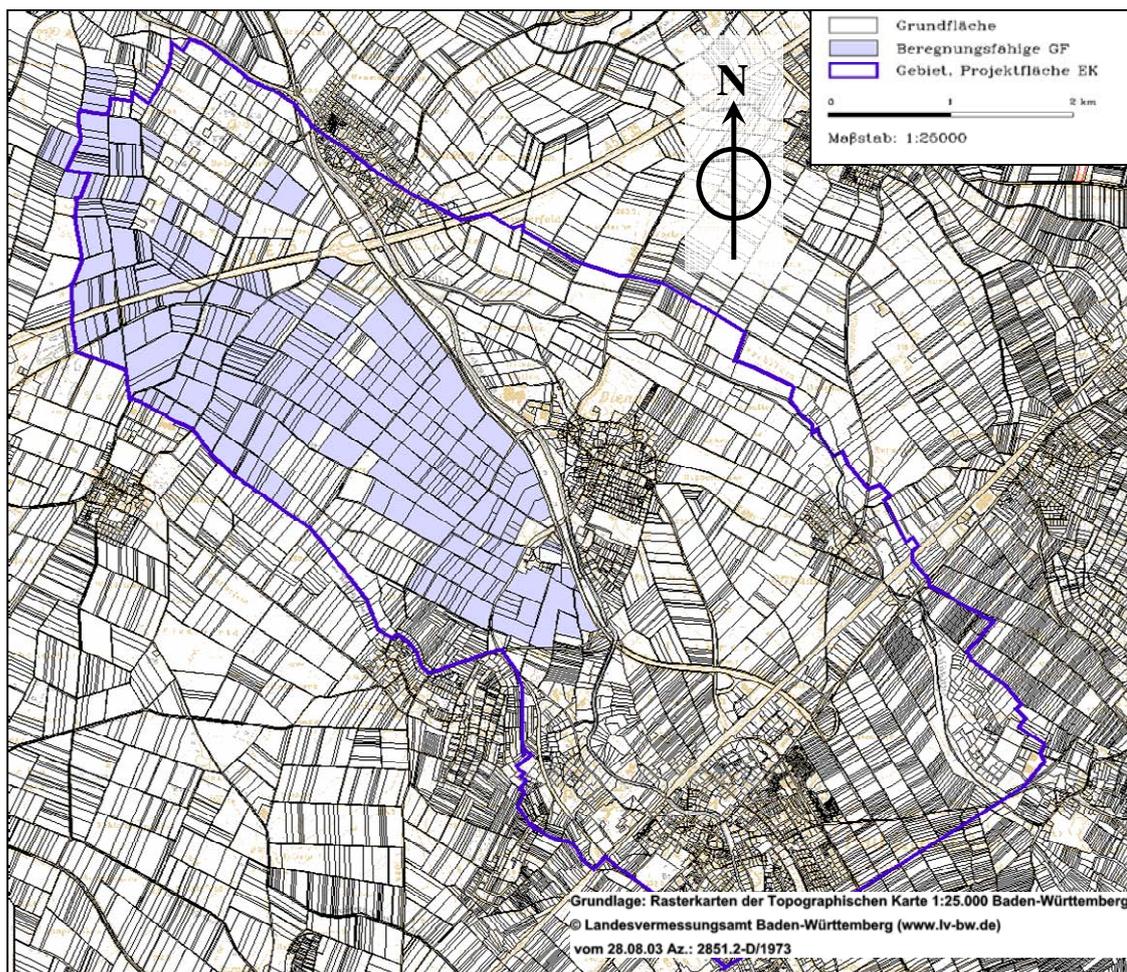


Abbildung 2.7: Kartierung der berechnungsfähigen Flächen im Projektgebiet

2.3.8 Nutzungserhebung

Jeweils im Juni der Jahre 2008 bis 2011 erfolgte im Projektgebiet die flurstücksgenaue Erhebung der landwirtschaftlichen Nutzungen. Um zusätzlich zu den Hauptnutzungen auch die jeweiligen Folgenutzungen und evtl. Zwischenfrüchte zu dokumentieren, wurde das Projektgebiet jeweils im September erneut beobachtet und die aktuellen Kulturen aufgenommen. Die vor Ort erhobenen Daten wurden in einem geographischen Informationssystem (GIS) erfasst und ermöglichten kultur- und flächenbezogene Gewichtungen der erhobenen Nitratstickstoffgehalte im Projektgebiet. **Abbildung 2.8** zeigt als Beispiel die Kartierung für das Jahr 2008 und den Nahbereich des WW Hausen.

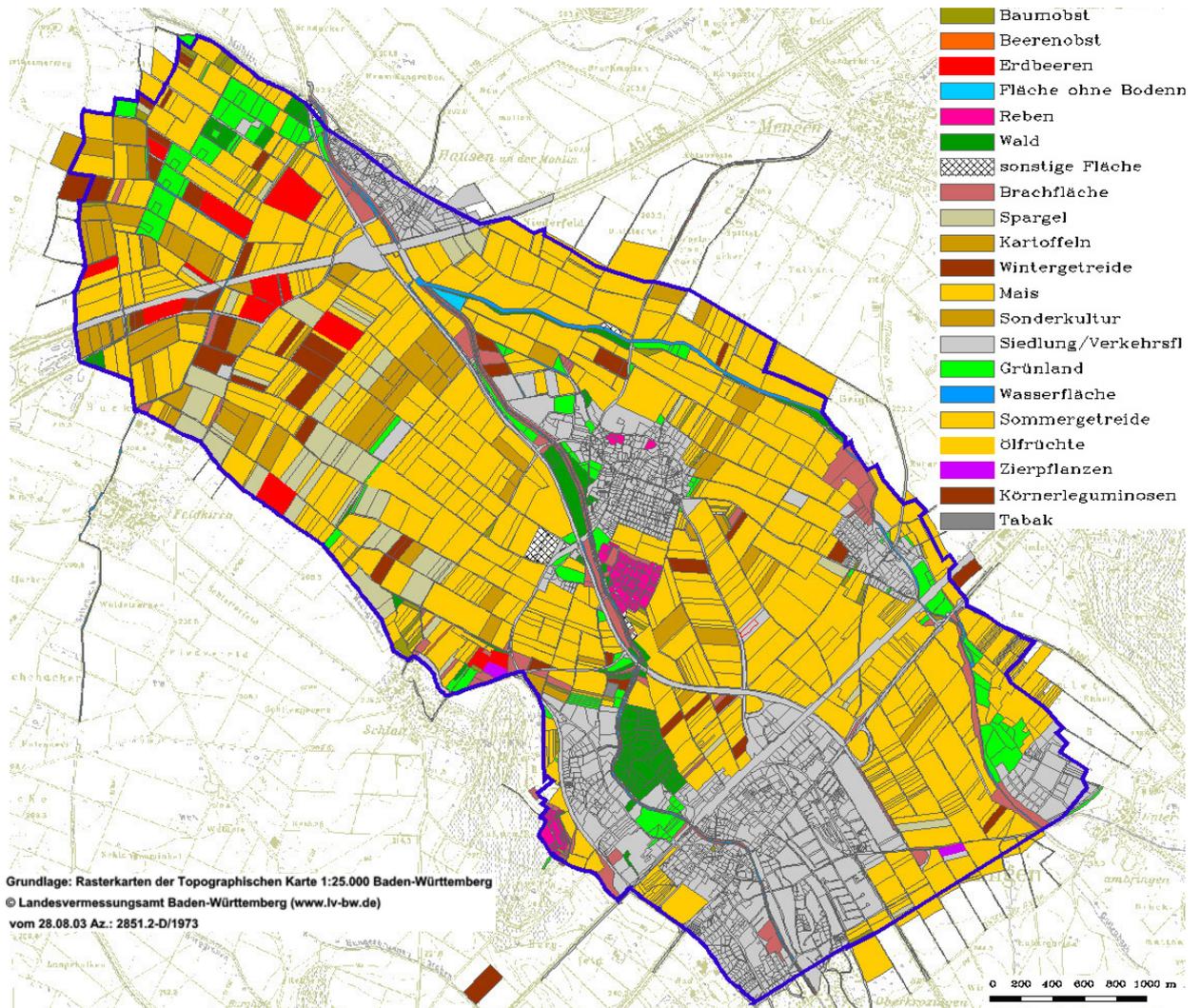


Abbildung 2.8: Landnutzungskartierung im Bereich des Wasserwerks Hausen am 15.06.2008

Als weitere Kartierungen liegen der 15.06.2009 und 15.06.2010 vor.

Der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche liegt bei 68%, gefolgt von Siedlungen mit ca. 16% und Straßen mit ca. 9% Flächenanteil. Wald und Freiflächen nehmen einen Anteil von ca. 4% ein, öffentliche Grünflächen ca. 2% und Gewässerflächen ca. 1%.

In der **Abbildung 2.9** sind die Anteile der jeweiligen Hauptnutzungen am gesamten Projektgebiet im Jahr 2008 dargestellt.

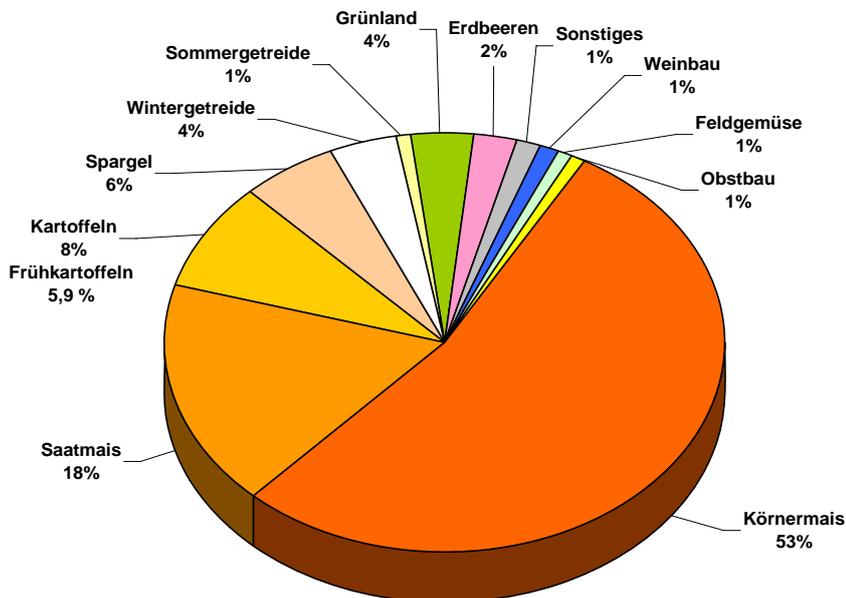


Abbildung 2.9: Verteilung der landwirtschaftlichen Hauptnutzungen für das Projektgebiet mit einer landwirtschaftlichen Nutzfläche von ca. 1208 ha exemplarisch für das Jahr 2008

Die Grafik zeigt, dass Körnermais mit ca. 53 % gefolgt von Saatmais mit rd. 18 % den höchsten Flächenanteil bei den landwirtschaftlichen Nutzungen im Jahr 2008 hatte. Kartoffeln werden mit einem Anteil von 8 % im Gebiet angebaut, wobei der Anteil der Frühkartoffeln bei ca. 5,9% liegt und damit den höchsten Anteil darstellt. Spargel werden zu ca. 6%, gefolgt von Winter- und Sommergetreide mit insgesamt ca. 5% Flächenanteil angebaut. Grünland nimmt im Gebiet noch einen Flächenanteil von ca. 4% ein. Die Erdbeeren sind mit einem Anteil von 2% vertreten. Weinbau, Feldgemüse und der Obstanbau sind mit je 1% Flächenanteil vorhanden. Zu den sonstigen Kulturen mit insgesamt ca. 1%, zählen z. B. Ackerbohnen, Raps, Tabak, Stilllegung, welche z. T. nur mit Einzelflächen im Projektgebiet vertreten sind.

Der Anbau von Saatmais ist maßgeblich vom Flächenbedarf für die Saatguterzeugung abhängig. Die Anbauflächen von Kartoffeln und dabei in erster Linie Frühkartoffeln (ca. 60%) im Folienanbau, befinden sich überwiegend im Bereich der Saatmaisgebiete. Die Änderungen beim Saatmaisbau und die Einhaltung der Fruchtfolge bei Kartoffel- bzw. Frühkartoffeln stehen z. T. im direkten Zusammenhang bei der Flächennutzung.

2.3.9 Rohwasseruntersuchungen

Abbildung 2.10 zeigt die Entwicklung der mittleren Nitratgehalte des Grundwassers der derzeit genutzten Brunnen A2, A3, A4, B1 und B4 des Wasserwerks Hausen seit 1995. Das Projektgebiet wurde so gewählt, dass die Teileinzugsgebiete dieser fünf Brunnen zum überwie-

genden Teil innerhalb des Projektgebietes liegen. Der Brunnen C1 wird zurzeit nicht genutzt. Sein Einzugsgebiet liegt komplett nördlich und außerhalb des Projektgebiets. Für die Darstellung wurden aus den in etwa monatlichem Abstand vorliegenden Nitratanalysergebnissen Jahresmittelwerte gebildet

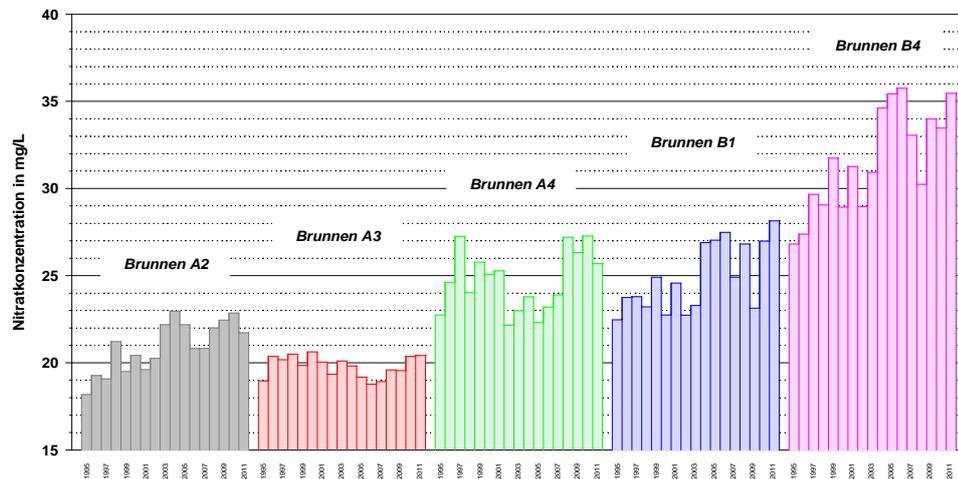


Abbildung 2.10: Entwicklung der mittleren Nitratkonzentrationen bei den Brunnen A 2, A 3, A 4, B 1 und B 4 des WW Hausen seit 1995.

In Abbildung 2.10 erkennt man einerseits ein deutlich höheres Niveau der Nitratkonzentrationen der Rohwässer aus den im südlichen Bereich des WSG Hausen gelegenen Brunnen A4, B1 und B4. Zudem sind deutliche Unterschiede hinsichtlich der Entwicklung der Nitratkonzentrationen zu erkennen.

Die mittleren Nitratkonzentrationen für das Rohwasser des Brunnens A3 haben sich aufgrund der Verdünnung durch infiltriertes Oberflächenwasser aus Möhlin und Neumagen seit 1995 nur unwesentlich geändert. Der Standort des Brunnens A2 liegt zwar näher an der Möhlin als der Brunnen A3, er ist jedoch mit einer Filterstrecke im Bereich von 47,5 bis 112,5 m u. GOK tiefer verfiltert als der Brunnen A3 (Filterstrecke 37,4 – 61,4 und 64,4 - 76,4 m u. GOK). Dies erklärt die etwas geringere Beeinflussung durch Uferfiltrat beim Brunnen A2 gegenüber A3.

Im Mittel über diese derzeit genutzten fünf Brunnen des Wasserwerks Hausen haben die Nitratkonzentrationen gegenüber 1995 um 4,1 mg/L (arithmetisches Mittel) zugenommen. Dies entspricht einer durchschnittlichen Anstiegsrate von rd. 0,2 mg/L/a.

3 Methodik

3.1 Standortmodellierungen

3.1.1 Wasserhaushalts- und Stickstoffmodellierung mit dem TZW-Simulationsmodell INVAM

Das vom TZW bereits 1991 entwickelte Simulationsmodell INVAM (= Integrales Nitrat-Verlagerungs- und Auswaschungs-Modell, (© RÖDELSPERGER & ROHMANN)) ermöglicht eine Berechnung des Zeitpunkts und der Höhe von Nitratauswaschungen auf der Basis von Messergebnissen und gibt Hinweise über mögliche Mineralisierungs- oder Denitrifikationseffekte. Es wurde bislang schwerpunktmäßig für die Abschätzung der Nitratauswaschung auf vielen Ganglinienflächen in verschiedenen Wasserschutzgebieten innerhalb des auswaschungsrelevanten Herbst-Winter-Zeitraums angewendet und im Rahmen des DVGW-Forschungsvorhabens W 13/00: „Validierung und Weiterentwicklung eines standortunabhängigen Bodenkontrollverfahrens zur Ermittlung der Nitratauswaschung mit einfachen Nitratauswaschungs-Modellrechnungen“ validiert [Sturm, Kiefer et al. 2004].

Mit Hilfe des Simulationsmodells INVAM erfolgte eine Abschätzung der Nitratauswaschung für die Projektflächen durch das TZW.

Für eine Simulation mit INVAM sind folgende Eingangsdaten erforderlich:

- N-Deposition
- Sickerungsrelevante Niederschlagsmengen
- Feldkapazität des Bodens
- Bodenwassergehalte zu den Messzeitpunkten
- Boden-Nitratstickstoffgehalte zu den Messzeitpunkten

Der atmosphärische Stickstoffeintrag (Deposition) wird pauschal über die Stickstoffkonzentration des Niederschlags berücksichtigt. Bei einem typischen Berechnungszeitraum für die Modellierung mit INVAM von etwa 3-5 Wochen beträgt dieser Eintrag rd. 0,5-1 kg N/ha. Ein möglicher erhöhter Eintrag in bestimmten Gebietsteilen durch Abtrift aus Gebieten mit hohen Ammoniakemissionen infolge der Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern (Gülle, Jauche) ist für das Untersuchungsgebiet nicht bekannt und wurde daher auch nicht berücksichtigt.

Die sickerungsrelevante Niederschlagsmenge wird durch eine klimatische Wasserbilanz unter Einbeziehung der potentiellen Evapotranspiration abgeschätzt. Als Niederschlagshöhen wurden für das Projektgebiet die den jeweiligen Flächen zugeordneten korrigierten RADOLAN Daten verwendet (vgl. Abschnitt 2.3.3).

Die potentielle Evapotranspiration wurde mittels einer Berechnung nach HAUDE abgeschätzt.

- Zu beachten ist, dass sie der aktuellen (realen) Verdunstung nur in Zeitabschnitten mit hoher Bodenfeuchte bzw. häufigen Regenfällen entspricht, da sie von der Art und Form der Bodenbedeckung, der Bodenart und Bodenfeuchtigkeit und den jeweiligen Witterungsbedingungen abhängt.
- Für die hier vorliegenden Berechnungen werden Niederschlag und Verdunstung über den Zeitraum zwischen den einzelnen Probennahmeterminen aufsummiert.
- Nach dem HAUDE-Verfahren wird ein jahreszeitlich variierender, empirischer Koeffizient („Haude-Faktor“) in die Berechnung einbezogen, der die unterschiedliche Verdunstung der Kulturen im Jahresverlauf, abhängig von Pflanzenart und Entwicklungsstadium berücksichtigt. Der Berechnung liegen daher neben den genannten Parametern auch entsprechende Verdunstungsfaktoren für unterschiedliche Kulturen und die einzelnen Monate zu Grunde, die sich zwischen 0,1 und 0,4 [mm/d/hPa] bewegen.
- Für Kulturen, für die keine kulturspezifischen Verdunstungsfaktoren vorlagen, wurden die Verdunstungsfaktoren anderer Kulturen verwendet, die hinsichtlich der Vegetationszeit und des Bewuchses den tatsächlich vorhandenen Kulturen am nächsten kommen dürften. Die mit diesen Daten berechnete klimatische Wasserbilanz kann daher nur einen Näherungswert für die tatsächlichen Verhältnisse darstellen.

Zur Berechnung der täglichen potentiellen Evapotranspiration (ET_p) für das WSG Hausen wurden bis 08.02.2009 die Aufzeichnungen der mittleren Tagestemperaturen sowie der relativen Luftfeuchte der DWD-Station Freiburg-Mitte (um 13 Uhr MEZ) herangezogen.

Am 09.02.2009 wurde die neu beim Brunnen B1 errichtete badenova-Wetterstation in Betrieb genommen. Ab diesem Zeitpunkt lagen sowohl Lufttemperatur als auch die relative Feuchte um 14 Uhr MEZ vor und konnten in die Berechnungen eingesetzt werden.

Lagen zudem Daten zu vorgenommenen Berechnungen vor, so wurden die entsprechenden Berechnungsmengen zu den Niederschlagswerten addiert. Im Falle von Frostschutzberechnungen bei Frühkartoffeln wurde kein Abzug für die Verdunstung vorgenommen, bei den anderen Berechnungen wurde von einer gebietsüblichen Berechnung z.B. über Rohre oder mit Berechnungswagen ausgegangen und ein pauschaler Abzug von 5 % für die Evaporation vorgenommen (Die Transpiration wird über Haude berücksichtigt).

Vorgehensweise:

Auf Basis der klimatischen Wasserbilanz, des tatsächlichen Bodenwassergehalts zum Messzeitpunkt sowie der Feldkapazität wird von INVAM eine theoretische Sickerwassermenge berechnet. Bei gesättigten Bodenwasserverhältnissen entspricht die klimatische Wasserbilanz der theoretischen Sickerwassermenge. Liegen zu Beginn des Berechnungszeitraums ungesättigte Bodenwasserverhältnisse vor, wird das Bodenfeuchtedefizit zunächst aufgefüllt, bevor die Sickerung beginnt.

Zunächst wird eine reine Auswaschungsrechnung zwischen Start- und Endprofil durchgeführt.

Können die Änderungen der Nitratstickstoffgehalte in den entsprechenden Bodenschichten und der Profilsommenwerte durch die reine Auswaschungsrechnung nicht mit hinreichender Genauigkeit nachvollzogen werden, so kann die Auswaschungsrechnung beispielsweise iterativ durch zusätzliche Berücksichtigung einer mineralisierungsbedingten Nitratfreisetzung, einer Düngung oder von Nitratverlusten durch Denitrifikation oder auch andere Stickstoffsinken und -quellen (positive und negative Anpassungen) erweitert werden. Voraussetzung für diese Modellanpassung ist, dass die naturgesetzlichen Bedingungen im jeweiligen Zeitraum erfüllt sind, wie z. B. Bodenbearbeitung, Gefrier-/Auftauprozesse oder das Abfrieren der Begrünung für die Mineralisierung. Da diese Anpassungen auf das am folgenden Probennahmetermin gemessene Nitratstickstoffprofil ausgerichtet sind, ist eine Durchführung dieser Anpassungen nur dann zulässig, wenn bis zu diesem Termin tatsächlich von Sickerwasserbildung ausgegangen werden kann, also gesättigte Bodenwasserbedingungen vorliegen.

Bei den Probennahmeterminen zu Beginn und gegen Ende der Grundwasserneubildungsperioden lagen teilweise ungesättigte Bodenwasserbedingungen vor. Eine INVAM-Modellierung mit entsprechenden Anpassungen an dieses Bodenprofil wurde daher an diesen Terminen nicht durchgeführt, so dass die Ergebnisse auf reinen Auswaschungsberechnungen basieren. Die Abweichung dieser Ergebnisse von den tatsächlich bei den Probennahmen ermittelten Nitratstickstoffgehalten wird für diese Fälle als Bilanzsaldo angegeben. Auch wenn die Ergebnisse der reinen Auswaschungsrechnung nahezu auf dem Niveau des in der Bodenprobe ermittelten Nitratstickstoffgehalts lagen, so wurde ebenfalls auf eine weitere Anpassung verzichtet und die Differenz zum Messwert in gleicher Weise als Bilanzsaldo aufgeführt.

Teilweise erfolgten Simulationsberechnungen auch über die Kulturzeit bei ungesättigten Verhältnissen zum Start- und Endtermin, wenn infolge hoher Niederschläge eine Sickerwasserbildung berechnet wurde. Für derartige Berechnungen ist INVAM nur bedingt geeignet. Die Ergebnisse für derartige Zeiträume können daher nur einen Hinweis auf die Größenordnung der Nitratauswaschung geben. Falls die Zeiträume zwischen zwei Probennahmeterminen zu groß waren (ab ca. 3 Monaten), wurde auf Simulationsberechnungen aufgrund zu großer Unsicherheiten verzichtet.

Aus den Versuchsergebnissen und den Überlegungen zur Sensitivität der Modellparameter wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens W 13/00 Empfehlungen zum praktischen Einsatz von INVAM und die Anforderungen an die Ausgangsdaten abgeleitet. Diese sind in der entsprechenden Veröffentlichung [Sturm et al. 2004] näher erläutert und werden daher hier nur stichprobenhaft aufgeführt:

- Qualität der Probennahme und Einhaltung der Kühlkette
- Qualität der Eingangsdaten (z. B. analytische Nitratstickstoffbestimmung)
- Plausibilitätsüberprüfungen der Eingangsdaten
- möglichst genaue Abschätzung der Feldkapazität

- Verwendung regionaler Niederschlagsdaten
- Verwendung eines möglichst realitätsnahen Verdunstungsanteils
- ausreichende, ggf. standortangepasste Länge der Berechnungszeiträume. Hierfür hat sich ein Zeitraum von ca. 3-4 Wochen als optimal erwiesen.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass durch die Wahl des Haude-Berechnungsverfahrens der potentiellen Evapotranspiration die Verdunstung über- und damit der Nitrataustrag unterschätzt werden kann.

Im Hinblick auf die praktische Anwendung des Mischzellenmodells sind folgende Punkte zu beachten:

- Es sollte versucht werden, die Plausibilität der Annahmen für die positiven und negativen Anpassungen zu überprüfen.
- Ein zeitlicher Versatz zwischen Niederschlag und Versickerung wird bei zu kurzen Zeiträumen im Modell nur eingeschränkt nachgebildet, deshalb ist bei der Modellierung auf ausreichend große Zeitspannen zu achten.
- Da ein Nitrataustrag mit schnellen Wasserflüssen in Grobporen von INVAM nicht simuliert werden kann, wird in Einzelfällen die Höhe der Denitrifikation durch die negative Anpassung bei der Modellierung möglicherweise leicht überschätzt und die Nitratauswaschung somit als zu niedrig angenommen.

Die Ergebnisse der INVAM-Simulationen sind in Abschnitt 5.1 zusammengestellt.

3.1.2 Agrarökosystemmodellierung mit Expert-N (Wasser-, Energie-, Nährstoff- und Kohlenstoffhaushalt)

Beim Agrar-Ökosystemmodell Expert-N, das vom GSF Forschungszentrum Neuherberg in Kooperation mit der TU München entwickelt wurde [Priesack & Bauer 2003], handelt es sich um ein modulares Modellsystem, das der Entwicklung und Anwendung deterministischer Modelle zur Beschreibung des ganzjährigen Kohlenstoff- und Stickstoffhaushaltes im System Boden-Pflanze in täglicher Auflösung dient. Dabei können alle wesentlichen Prozesse (Mineralisation, Immobilisierung, Auswaschung, Nitrifikation, Denitrifikation, Pflanzenentzug, etc.) abgebildet werden (**Abbildung 3.1**).

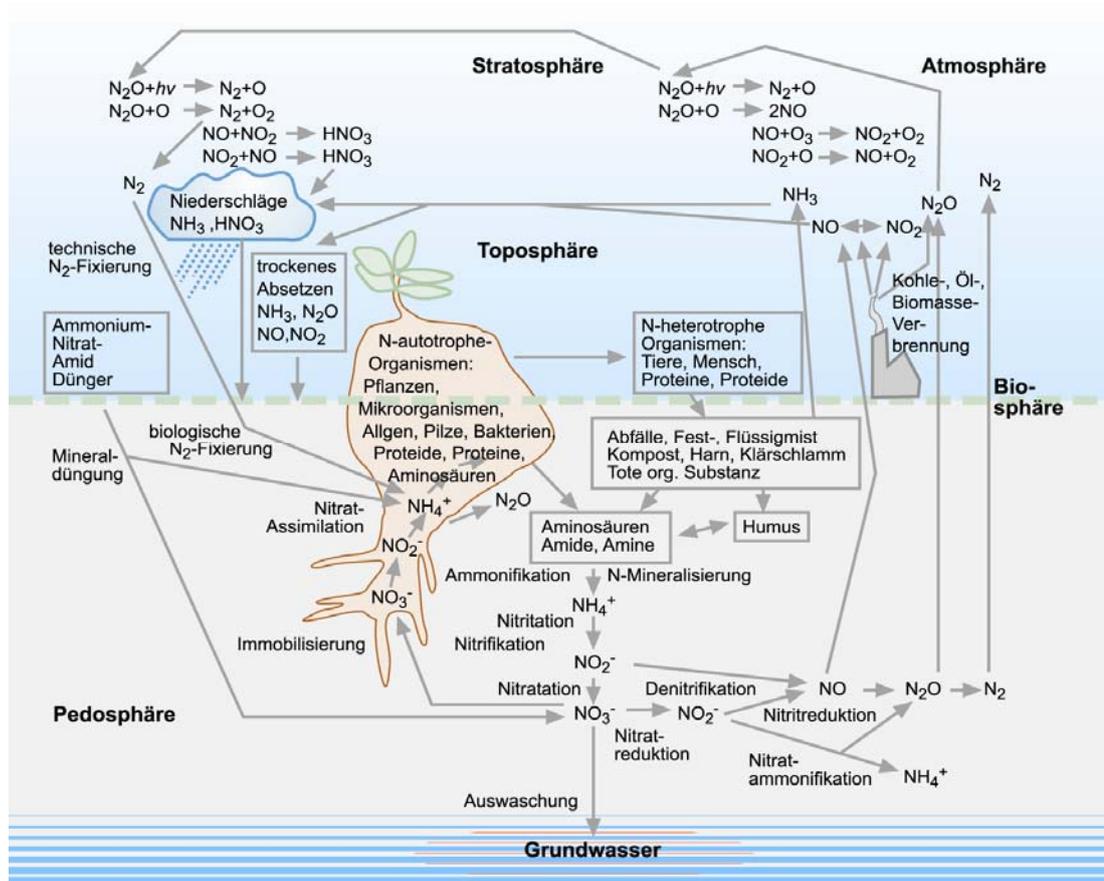


Abbildung 3.1: Stickstoffkreislauf im System Boden-Pflanze-Atmosphäre (Quelle unbekannt)

Die Simulation des Pflanzenwachstums und des damit verbundenen Stickstoffentzugs aus dem Bodenraum erfolgt über "erklärende" bzw. explizite Pflanzenmodellansätze. Diese zeichnen sich durch Ihre Fähigkeit aus, die phänologische Entwicklung der Pflanze (Biomasse, Ertrag) in Abhängigkeit der aktuellen Verhältnisse bezüglich Energie-, Nährstoff- und Wasserversorgung zu beschreiben [Engel & Klocking 1994, Engel & Priesack 1993, Wang 1997]. Innerhalb des Modellierungssystems Expert-N wurden geeignete, aus robusten Modellansätze bestehende Modellkomponenten für die im Gebiet hauptsächlich vorkommenden Kulturarten identifiziert, kalibriert und validiert und für die kulturspezifische Beschreibung der Nitratdynamik der einzelnen Beobachtungsstandorte im Jahresverlauf eingesetzt. Während für Körnermais und Saatmais bereits auf valide Pflanzenmodelle zurückgegriffen werden konnte, wurden diese für Kartoffeln, Sommer- und Wintergetreide, Spargel, Erdbeeren, Feldsalat und diverse Zwischenfrüchte im Rahmen dieses Projektes erst erarbeitet. Für Kartoffeln und Getreide wurde auf autonome Pflanzenmodellansätze zurückgegriffen, während für Spargel, Erdbeeren, Feldsalat und Zwischenfrüchte geeignete Entzugsfunktionen etabliert wurden.

Die Berechnungsverfahren der Prozessmodule insbesondere der Pflanzenentwicklung werden im Folgenden kurz erläutert.

3.1.2.1 Wasserhaushaltsmodul

Die Simulation des Bodenwasserhaushalts in Expert-N basiert auf der numerischen Lösung der eindimensionalen Richards-Gleichung für die ungesättigte Zone. Das Lösungsverfahren ist weitgehend mit dem von [Celia et al. 1990] entwickelten und in HYDRUS implementierten Algorithmus identisch. Für die numerische Lösung der Richards-Gleichung sind geschlossene analytische Funktionen für die hydraulische Saugspannungs–Wassergehaltsbeziehung (Retentionskurve) sowie die Saugspannungs–Leitfähigkeitsbeziehung notwendig [Brooks & Corey 1966, Mualem 1976, van Genuchten 1980]. In dieser Untersuchung werden zu Gunsten der numerischen Robustheit die hydraulischen Funktionen von [Hutson & Cass 1987] verwendet.

Der Bodenwasserhaushalt wurde mit einer Diskretisierung von 2 cm bis in eine Tiefe von 90 cm simuliert. Der Beschränkung auf die obersten 90 cm liegt die Annahme zu Grunde, dass der Einfluss der landwirtschaftlichen Nutzung auf N-Retention und Wasserfluss in tieferen Bodenbereichen vernachlässigt werden kann.

3.1.2.2 Stofftransportmodul

Der Transport gelöster Stickstoff- und Kohlenstoffkomponenten wird in Expert-N mit der allgemeinen Advektions-Dispersions-Reaktionsgleichung [Bear 2007] berechnet, für dessen numerische Lösung das finite Elemente Verfahren nach [Simunek, Sejna et al. 2009] angewandt wird.

3.1.2.3 Reaktionsmodul

Expert-N simuliert den Stickstoff- und Kohlenstoffhaushalt als Übergang verschiedener immobililer Pools mit unterschiedlichen Transformationsraten. Die Transformationsraten sind unter anderem von den Raten und Füllständen anderer Pools, der Bodentemperatur und dem Wassergehalt abhängig. Damit ergibt sich ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen welches ebenfalls numerisch gelöst wird. Die parallele Simulation des Stickstoff- und Kohlenstoffhaushalts ist nicht zu Letzt notwendig, um den Einfluss des C/N-Verhältnisses auf die jeweiligen Transformationsraten zu berücksichtigen.

Tiefenabhängige N- und C-Pools sind für Pflanzenrückstände (Litter), organischen Dünger (Manure) und Humus angelegt. Zusätzlich existieren gesonderte Pools für oberflächliche Pflanzenrückstände (Surface Litter), oberflächlichen organischen Dünger (Surface Manure), oberflächlichen Humus (Surface Humus) und stehende Pflanzenreste (Standing Crop Residue).

Zur Anpassung der Transformationsraten auf die lokalen Gegebenheiten im Projektgebiet dienen tiefenabhängige Parameter, deren Werte anhand des Vergleichs mit INVAM und der im Boden gemessenen Nitratgehalte angepasst wurden.

3.1.2.4 Pflanzenwachstumsmodule

Für die autonome Simulation des Pflanzenwachstums anhand der spezifischen Wachstumsbedingungen am Simulationsstandort kamen je nach Kulturart unterschiedliche Pflanzenmodelle zum Einsatz. Die folgende Beschreibung der Pflanzenmodelle CERES und SUCROS entstammt weitgehend der Expert-N Methodendokumentation (Expert-N Dokumentation der Modellbibliothek FAM – Bericht 60, [Priesack 2006]).

Die Modelle CERES und SUCROS sind gut etablierte Bestandeswachstumsmodelle, die in zahlreichen Untersuchungen ausführlich getestet wurden und die mit ihren Weiterentwicklungen heute zum Standardwerkzeug der Modellierung von Ackerpflanzenbeständen gehören [Jones, Hoogenboom et al. 2003, van Ittersum, Leffelaar et al. 2003]. CERES und SUCROS, sind sogenannte 'generische' Bestandeswachstumsmodelle die, abgesehen von zusätzlichen Einzelprozessen, mit einer jeweils kaum veränderten Modellstruktur, aber unterschiedlicher Modellparametrisierung die Entwicklung und das Wachstum verschiedener Kulturpflanzenarten simulieren können:

- CERES: Weizen, Gerste, Roggen und Mais
- SUCROS: Weizen, Gerste, Roggen, Mais, Kartoffel und Zuckerrübe

Die CERES-Modelle simulieren das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzenbeständen anhand der verschiedenen Entwicklungsstadien, die eine Kulturpflanze durchläuft. Unter Wachstum ist die Zunahme an Gewicht, Volumen, Länge oder Fläche der Pflanze oder von Pflanzenteilen zu verstehen, während sich die Entwicklung der Pflanze auf die zeitliche Abfolge bestimmter kritischer Ereignisse im Lebenszyklus der Pflanze bezieht.

Das Modell SUCROS kann als generisches Pflanzenmodell das Wachstum der in Europa am häufigsten angebauten Ackerfrüchte simulieren. Die Modelle für die verschiedenen Fruchtarten unterscheiden sich zum einen durch die Berücksichtigung der von Pflanzenart zu Pflanzenart unterschiedlichen Pflanzenorgane, wie Ähren, Maiskolben, Knollen oder Rübenkörper als Frucht- bzw. Speicherorgane. Zum anderen wird die Allokation der Assimilate nach unterschiedlichen, aber fest vorgegebenen Verteilungsschlüsseln abhängig vom Entwicklungsstadium modelliert. Die Verteilungsschlüssel stellen somit die entsprechende Parametrisierung der Allokationsmuster für die verschiedenen Pflanzenarten dar. Darüber hinaus werden unterschiedliche, für die Pflanzenart spezifische Assimilationsraten, Lichtnutzungseffizienzen, kritische Temperaturen, Reduktionsfaktoren, maximale Durchwurzelungstiefen und relative Wurzelverteilungen, sowie unterschiedliche Raten für die Erhaltungatmung, das Blattflächenwachstum, die Lichtextinktion, die phänologische Entwicklung und die Seneszenz eingesetzt.

Bei LEACHN handelt es sich um ein Stickstoffentzugmodell bei dem das Pflanzenwachstum nicht autonom simuliert wird, sondern der potenzielle Stickstoffentzug der Pflanze durch eine Entzugsfunktion explizit vorgegeben wird. Damit reagiert der Stickstoffentzug nicht wie bei den anderen Wachstumsmodellen direkt auf gegebene Wachstumsbedingungen (Wasser, Temperatur, Licht) am Standort. Dennoch ist die tatsächliche Stickstoffaufnahme der Pflanze durch

die vorhandene Stickstoffmenge im Boden limitiert. Da beim LEACHN-Ansatz der durch die Pflanze entzogene Stickstoff dem System unwiderruflich entzogen ist, muss im Modell die Stickstoffmenge nicht-abgefahrener Pflanzenrückstände dem Boden in Form einer Düngung zum Zeitpunkt der Ernte zugeführt werden. Die Parametrisierung der Entzugszeiträume, der Entzugs- und Düngermengen erfolgte anhand vorhandener Schlagkarteien und soweit möglich unter Verwendung von Trockenmasse-, C- und N-Gehalten aus eigenen Beprobungen. Bei Spargel, Erdbeere und Kürbis wurden die verwendeten Modellwerte weitgehend der Fachliteratur entnommen [Fink et al. 2007, LFL (Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft) 2008b, LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg) 2010b].

Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft für Spargel im dritten Anbaujahr die Dynamik und Beschreibung der unterschiedlichen Biomasse- und N-Pools im Jahresablauf.

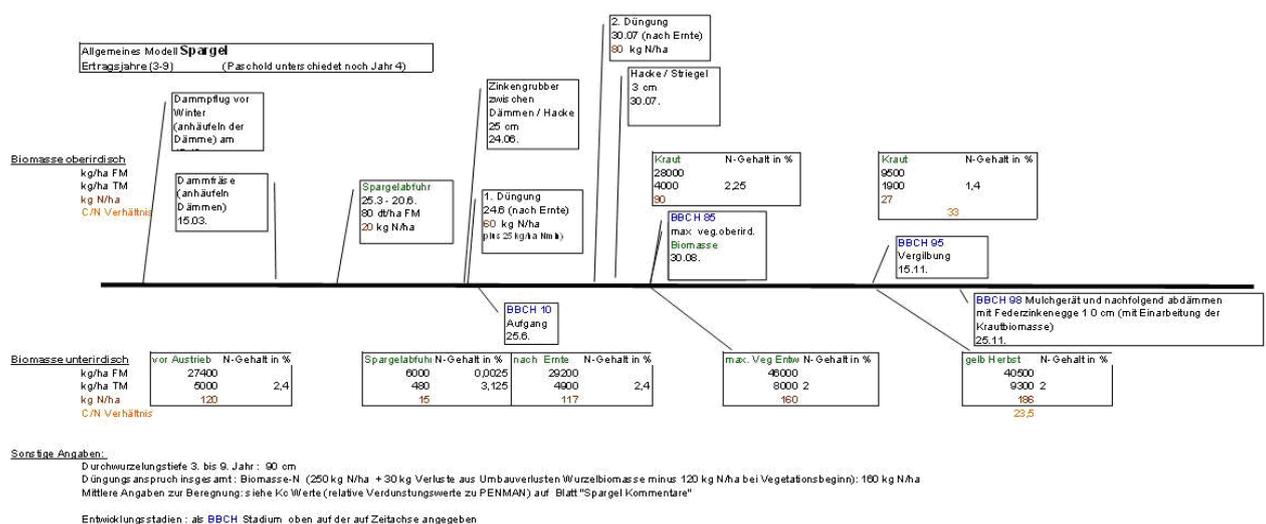


Abbildung 3.2: Dynamik und Beschreibung der unterschiedlichen Biomasse- und N-Pools im Jahresablauf für Spargel im dritten Anbaujahr (zusätzlich vergrößert im Anhang: Abbildung A3.1)

Die im Projekt verwendeten Pflanzenmodelle für die einzelnen Kulturarten sind in der **Tabelle 3.1** aufgeführt.

Tabelle 3.1: Im Projekt verwendete Pflanzenmodelle für Kulturarten

CERES	SUCROS	LEACHN
Wintergerste	Frühkartoffel	Spargel
Sommergerste	Kartoffel, gemittelt	Feldsalat
Körnermais	Spätkartoffel	Erdbeere
Saatmais	Winterweizen	Kürbis
Silomais	Sommerweizen	Gelbsenf /Ölrettich/ Gräsermischung/ Phacelia

Die Ergebnisse der Expert-N Modellierungsergebnisse sind in Abschnitt 5.2 zusammengestellt.

3.1.3 Gegenüberstellung der Eingangsdaten INVAM und Expert-N

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Unterschiede zwischen Expert-N und INVAM werden in der **Tabelle 3.2** anhand einer Gegenüberstellung der Eingangsdaten von Expert-N und INVAM dargestellt.

Tabelle 3.2: Gegenüberstellung der Eingangsdaten von Expert-N und INVAM

Eingangsdaten	Expert-N	INVAM
1.) hydrometeorologische Daten		
Niederschlag	korrigierte Radolan-Daten (DWD), Klima-Messstation WW Hausen (badenova)	korrigierte Radolan-Daten (DWD), Klima-Messstation WW Hausen (badenova)
N-Deposition	9.855 kg/ha/a NH4-N; 5.11 kg/ha/a NO3-N	ca. 3-5 kg/ha/a NO3-N, NH4-N über Anpassung
Luftfeuchte	Klima-Messstation WW Hausen (badenova)	DWD Freiburg / Klima-Messstation WW Hausen (badenova)
Temperatur	Klima-Messstation WW Hausen (badenova): Min, Max, Median	DWD Freiburg / Klima-Messstation WW Hausen (badenova)
Sonnenscheindauer/Globalstrahlung	Klima-Messstation WW Hausen (badenova)	--
Windgeschwindigkeit	Klima-Messstation WW Hausen (badenova)	--
	Berechnung/Modellierung des Bodenwasserhaushalts inklusive aller relevanten Bilanzgrößen (Transpiration, Evaporation, Oberflächenabfluss, Sickerung, etc.)	Sickerungsrelevante Niederschlagsmenge aus klimatischer Wasserbilanz = Differenz zwischen Niederschlagshöhe und potentieller Evapotranspiration (Haude), Bodenwasserbilanz
2.) Boden-Kenngrößen		
Grundlage (Basisannahme)	Reichsbodenschätzung	qualitativ
gesättigte Leitfähigkeiten	Reichsbodenschätzung	--
Feldkapazität FK	Profilaufnahmen oder Reichsbodenschätzung	Ableitung aus Bodenwassergehalten, Berücksichtigung weiterer Informationen (Solum-Untersuchungen, Reichsbodenschätzung)
nutzbare Feldkapazität nFK	Profilaufnahmen oder Reichsbodenschätzung	Verhältnis nFK/FK aus weiteren Informationen (Solum- Untersuchungen, Literatur)
permanenter Welkepunkt	Profilaufnahmen oder Reichsbodenschätzung	--
	gemessene Retentionskurven und gesättigte Leitfähigkeiten sind gegenüber der Reichsbodenschätzung zu bevorzugen	--
org. Kohlenstoff (C org)	Reichsbodenschätzung	--
pH-Wert	Reichsbodenschätzung	--
Trockenrohdichte	Reichsbodenschätzung	zur Berechnung der Nitratstickstoffgehalte (Messwerte oder Schätzung)
3.) Pflanzenmodellierung		
	generische Pflanzenmodelle (CERES, SPASS, SUCROS, LEACHN)	--
	Kulturart (Vorfrucht, Hauptfrucht)	--
4.) Messdaten		
	Boden-Nitrat- und Ammoniumstickstoff- sowie Wassergehalte (nur zur Validierung)	Boden-Nitratstickstoff- und Wassergehalte zum jeweiligen Messtermin (Mehrfachkontrollen)
	Ertragsschätzungen bezogen auf Trockenmasse	--
5.) Bewirtschaftungsdaten (Hauptfrucht)		
	Düngerart, -menge und -termin, falls Eigenmischung Nitrat-, Ammonium-, und Harnstoffgehalte	Termine für Haude-Berechnung / INVAM-Anpassungen
	Bodenbearbeitungsgerät, -tiefe und -termin,	Überlagerung der Auswaschungsberechnung / INVAM- Anpassungen
	Beregnungsart, -menge und -termin	Beregnungsmenge und -termin für Haude-Berechnung (nur falls die Bewässerung innerhalb eines Berechnungszeitraumes erfolgte)
	Saattermin, -Stärke, -Tiefe, Auflauftermin, Erntetermin, Biomasseabfuhr	Saat- und Erntetermin für Haude-Berechnung

3.2 Regionalisierung des Gebietsaustrags mit Expert-N

Zur Bestimmung des Stickstoffaustrags im gesamten Projektgebiet wurden 1731 landwirtschaftlich genutzte Flächen explizit in Expert-N simuliert.

Grundlage der Regionalisierung sind die Landnutzungskartierungen mit Angabe der Haupt- und Zwischenfrucht die von badenova zum 15.6. und 15.11. der Jahre 2008 bis 2010 erhoben wurden (s. Abschnitt 2.3.8). Mit Hilfe der Landnutzungskartierungen wurden Sequenzen der flächenanteilig überwiegender Nutzung für jede Grundfläche im Projektgebiet gebildet. Die Projektion der Nutzungen von Bewirtschaftungsflächen zu Grundflächen ist notwendig, um statische Flächen als Basis der Simulationen zu erhalten, deren Geometrie, anders als bei Bewirtschaftungsflächen, während des Simulationszeitraums unverändert bleibt. Jede landwirtschaftlich genutzte Grundfläche hat somit ihre individuelle Nutzungshistorie mit drei Hauptkulturen für die Jahre 2008 bis 2010 und bis zu drei Zwischennutzungen.

Die notwendigen Bewirtschaftungsdaten für die jeweilige Nutzung, wie Düngung, Bodenbearbeitung, Saat- und Erntetermin etc. wurden - wenn möglich - von den beobachteten Standorten abgeleitet, um regionale Besonderheiten bei der Bewirtschaftung zu berücksichtigen. Nutzungen, für welche die Anzahl der im Projekt beobachteten Standorte nicht ausreicht um repräsentative Kollektive zu bilden (Sommerweizen, Wintergerste, Silomais), wurden mit Hilfe regionsüblicher Standardbewirtschaftungen aus früheren Projekten (Referenz-Projekt) [Müller-Sämann et al. 2011] simuliert.

Auf Basis der chronologischen Nutzungssequenz wurde mit Hilfe der Standardbewirtschaftung eine durchgängige Simulationssequenz mit Haupt und Zwischenfrüchten für jede Grundfläche geschaffen und von Expert-N modelliert.

Regionale Unterschiede in der Bodenbeschaffenheit wurden berücksichtigt, indem das Projektgebiet hinsichtlich bodengenetischer Kriterien in 52 Pedotope gegliedert wurde. Für jedes Pedotop wurde dann ein typisches Bodenprofil ausgewählt, welches für die Simulation aller im Pedotop gelegener Grundflächen verwendet wurde. Da einige Pedotope ähnliche oder gleiche Bodentypen ausweisen, reduziert sich die Anzahl der verwendeten Typprofile auf 13.

Ähnlich wie für die Simulation der Beobachtungsstandorte, wurde das aktuelle Wettergeschehen am Ort der Grundfläche mit Hilfe der regionalisierten Klimadaten abgebildet.

Nicht landwirtschaftlich genutzte Flächen, oder solche für die keine Pflanzenmodelle zur Verfügung stehen, wurden berücksichtigt, indem die Sickerwasser- und Auswaschungszeitreihe einer nicht bepflanzten Devastierungsfläche mit atmosphärischem N-Eintrag ohne Humusmineralisierung simuliert wurde. Diese Zeitreihen wurden dann für die jeweilige Nutzung mit Faktoren für die Verdunstungsleistung und N-Resorption beaufschlagt und anschließend für den jeweiligen Betrachtungszeitraum ausgewertet (vgl. Abschnitt 6.1.4).

3.3 Gebietsaustrag mit INVAM

Um eine Aussage über die Nitratauswaschung für das gesamte Projektgebiet vornehmen zu können, wurde zunächst aus den mit INVAM berechneten Nitratauswaschungen (vgl. Abschnitt 3.1.1) und den jeweiligen bei den Nutzungskartierungen erhobenen Gesamtflächen (vgl. Abschnitt 2.3.8) die gesamte Nitratauswaschung für die einzelnen Fruchtfolgen und Auswaschungsperioden berechnet. Von den insgesamt 209 unterschiedlichen Fruchtfolgesequen-

zen mit landwirtschaftlicher Nutzung entsprachen insgesamt 18 Kulturen bzw. Fruchtfolgen einer auf den Projektflächen simulierten Fruchtfolge und konnten 16 INVAM-Kollektiven zugeordnet werden. Dabei wurden auch die Flächenanteile von zwei Fruchtfolgekollektiven mit Kartoffeln einbezogen, die bei der Nutzungserhebung nicht nach Kartoffelarten (früh / mittelfrüh / spät) differenziert wurden.

Die Bodenvariabilität ist hierbei aufgrund der Flächenauswahl der Beobachtungsstandorte bereits teilweise berücksichtigt. Nicht alle Böden sind jedoch zum Anbau jeder Kultur gleich gut geeignet, daher wurde bereits bei der Flächenauswahl darauf geachtet, möglichst typische Standorte zu wählen.

Die Berechnungen zum Gebietsausstrag enthält Abschnitt 6.2.

3.4 Sonstige Methoden

3.4.1 Auswertung Historischer N_{\min} Daten

Für den Zeitraum von 1987 – 2008 liegen für das Projektgebiet umfassende N_{\min} -Daten vor, die im Rahmen der jeweiligen SchALVO-Herbstkontrollen der badenova erhoben wurden. Die Daten liegen größtenteils in elektronischer Form vor und wurden geografisch den Teileinzugsbereichen der einzelnen Rohwasserfassungen zugeordnet (vgl. Abbildung 4.1).

Insbesondere für die Datensätze der Jahre 1987-1999 waren die Angaben zur Gemarkung oder die Flurstücksnummern teilweise unvollständig. Erst durch die Zuhilfenahme früher verwendeter Karten und Lagepläne gelang es weitgehend, die Daten den einzelnen Teileinzugsbereichen zuzuordnen.

Ein Teil der Daten konnte zunächst noch nicht zugeordnet werden. Daher wurde eine Liste mit offenen Fragen und nicht zuordenbaren Flächen zur Überprüfung bzw. Ergänzung an die im Gebiet tätigen badenova Mitarbeiter geschickt, die aufgrund der vorhandenen Unterlagen und der Gebietskenntnisse noch einen Großteil der Daten verorten konnten.

Wegen fortbestehender Unsicherheiten bei Zuordnung der Daten der Jahre 1987 bis 1989 zu den Kontrollflächen wurde gemeinsam von badenova und TZW entschieden, diese nicht für die Auswertungen zu verwenden.

Vom Datenbestand für die Jahre 1990 - 2009 konnten zwischen 1 % und max. 5 % der Daten nicht eindeutig zugeordnet werden. Sie wurden bei der Auswertung ebenfalls nicht berücksichtigt, so dass etwas mehr als 95 % der erhobenen Daten in die Auswertung einbezogen werden konnten. Dies entsprach in jedem Jahr etwa zwischen 300 und 450 Datensätzen. Mit dieser Datenbasis wurden arithmetische und flächengewichtete Auswertungen der Nitratstickstoffgehalte nach Brunnen-Teileinzugsgebieten und den einzelnen Schutzzonenbereichen vorgenommen.

Wegen der Überlappung der Brunnenteileinzugsbereiche kommt es vor, dass einzelne Flächen in mehreren Teileinzugsbereichen liegen und somit mehrfach in die Auswertungen eingehen. Die Zuordnung zu den Schutzzonenbereichen ist jedoch eindeutig.

Die Ergebnisse der Auswertungen sind in Kapitel 4 aufgeführt.

3.4.2 N_{min}-Untersuchungen

Die am Technologiezentrum Wasser verwendete Vorgehensweise zur Vorbehandlung der Bodenproben und zur Bestimmung der N_{min}-Gehalte wurde mit der Zielsetzung erarbeitet, ein schnelles und gegenüber Störstoffen unanfälliges Analysenverfahren zur Nitratbestimmung in den Bodenextrakten anwenden zu können und die Bodenproben möglichst in feldfrischem Zustand für die Untersuchungen einzusetzen. Die Vorgehensweise ist in TZW-Heft 26 [Sturm et al. 2004] ausführlich beschrieben und im Rahmen der SchALVO Baden-Württemberg offiziell als Methode anerkannt (Erlass des Ministeriums Ländlicher Raum Baden-Württemberg (MLR) mit Az.: 23-8223.50 vom 05.05.1994).

3.4.3 Expert-N Datenhaltungs- und Analysewerkzeuge

Zur automatisierten Simulation einer großen Anzahl von Standorten im Modellsystem Expert-N wurde im Rahmen des Projekts die Struktur zur Datenhaltung und Analyse geschaffen bzw. existierende Strukturen erheblich erweitert.

Folgende Teilaufgaben werden von den 3 Hauptkomponenten erfüllt:

- Expert-N
 - Simulationsplattform für Agrarökosystemmodellierung (wie oben beschrieben)
- Smallworld GIS
 - Datenbank für Bewirtschaftungsdaten
 - Detaillierte Bewirtschaftungsdaten der Projektflächen
 - Nutzungskartierung im gesamten Projektgebiet mit Haupt- und Zwischennutzung
 - Datenbank für Klimazeitreihen
 - Klimaregionalisierung für den jeweiligen Simulationsstandort
 - Datenbank für Bodeneigenschaften
 - Automatisierte Erstellung von Simulationssequenzen aus Bewirtschaftungsdaten und Steueranwendung für Expert-N
 - Reimport der Modellergebnisse zur räumlichen Interpretation
 - Darstellung des Austragspotentials als Karte
- MATLAB
 - Visualisierung der Modellergebnisse als lückenlose Zeitreihe für die gesamte Simulationsperiode aller Simulationsstandorte (Beobachtungsstandorte und Grundflächen der Gebietsregionalisierung)
 - Periodenspezifische Auswertung der Simulationszeitreihen (z.B. kumulierte Grundwasserneubildung und N-Auswaschung)

- Statistische Analyse in Form von Histogrammen und mittlere Zeitreihen mit Konfidenzintervallen
- Auswertung von Nutzungssequenzen

Vorteile dieser Simulationsstruktur liegen in der

- hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung (tägliche Werte aller Modellergebnisse auf allen simulierten Grundflächen),
- periodenspezifischen Quantifizierung des Austragspotentials (z.B. jährlich oder bezogen auf vegetationsfreie Zeit),
- Transparenz des Prozessgefüges,
- Anwendbarkeit mit der aktuell und jährlich verfügbaren Datengrundlage,
- Möglichkeit der jährlichen Fortschreibung mit vertretbarem Aufwand,
- Flexibilität bei der Modifikation bezüglich Nutzungs- und/oder Bewirtschaftungsänderungen,
- Prognosefähigkeit (z.B. für alternative Bewirtschaftungsszenarien)
- Übertragbarkeit auf andere Gebiete und
- Ausbau- und Lernfähigkeit.

4 Auswertung historischer Bodenkontrolldaten

Bei den jährlichen Bodenkontrollen der badenova AG handelt sich um eigenständige Überwachungsprogramme, die dazu dienen, die Nitratauswaschungspotenziale auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, sowohl während als auch nach der Vegetationszeit zu ermitteln. Für die vorliegenden Auswertungen wurden die jährlichen Herbstkontrollergebnisse nach dem Ende der Vegetationsperiode herangezogen.

Bei den Bodenkontrollen der badenova wurden Anfang der 1990er Jahren noch möglichst alle Nutzungen annähernd flächenrepräsentativ erfasst. Gegen Ende der 1990er Jahre wurden die Kontrollen dahingehend modifiziert, dass der Schwerpunkt der Kontrollen neben den Maisflächen auf intensive Problemkulturen gelegt wurde. Seither wird jedes Jahr schwerpunktmäßig eine gebietsrepräsentative Anzahl von Maisflächen, eine gebietsrepräsentative Anzahl von Spargel- und Kartoffelflächen sowie Getreideflächen mit besonderer Berücksichtigung von Flächen mit Feldsalat als letzter Nutzung beprobt.

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Auswertung der historischen Bodenkontrolldaten ist in Abschnitt 3.4.1 beschrieben. Für die im Rahmen des Projektes vorgenommenen umfassenden Auswertungen der Nitratstickstoff-Restgehalte für die Jahre 1990 bis 2008 wurden die Kontrollflächen hinsichtlich ihrer Lage nach folgenden Gebietsbereichen unterschieden:

- Schutzzonenbereiche II/IIIA und IIIB,
- Lage innerhalb oder außerhalb des Teileinzugsgebiets (TEG) der A- und B-Brunnen („< TEG“ oder „> TEG“)

- Lage innerhalb eines konkreten Brunnen-Teileinzugsgebiets der A-Brunnen, bzw. der Brunnen B1 oder B4.

Zudem wurden die Flächen außerhalb des Teileinzugsgebiets der A- und B-Brunnen noch in einen nördlichen, südlichen, westlichen (nur im Schutzzonenbereich II/IIIA) und östlichen Bereich (nur im Schutzzonenbereich IIIB) aufgeteilt.

Teilweise liegen den Auswertungen für die Teileinzugsgebiete nur wenige Flächen zugrunde. Dies betrifft z. B. das Jahr 1997 im Schutzzonenbereich IIIB oder den Bereich außerhalb TEG Ost im Zeitraum 1990 bis 1998. Dies ist bei der Dateninterpretation zu berücksichtigen. In den Abbildungen wurden Mittelwerte, denen weniger als 6 Werte zu Grunde lagen durch nicht ausgefüllte Symbole gekennzeichnet.

Die **Abbildung 4.1** zeigt die Lage der entsprechenden Flurstücke und Teilauswertungsbereiche. Darin sind auch die Überlappungsgebiete der Brunneneinzugsbereiche BI-BIV sowie AII-AIV separat gekennzeichnet. Diese wurden für die vorliegenden Auswertungen jedoch wieder den jeweiligen Brunneneinzugsbereichen zugeschlagen.

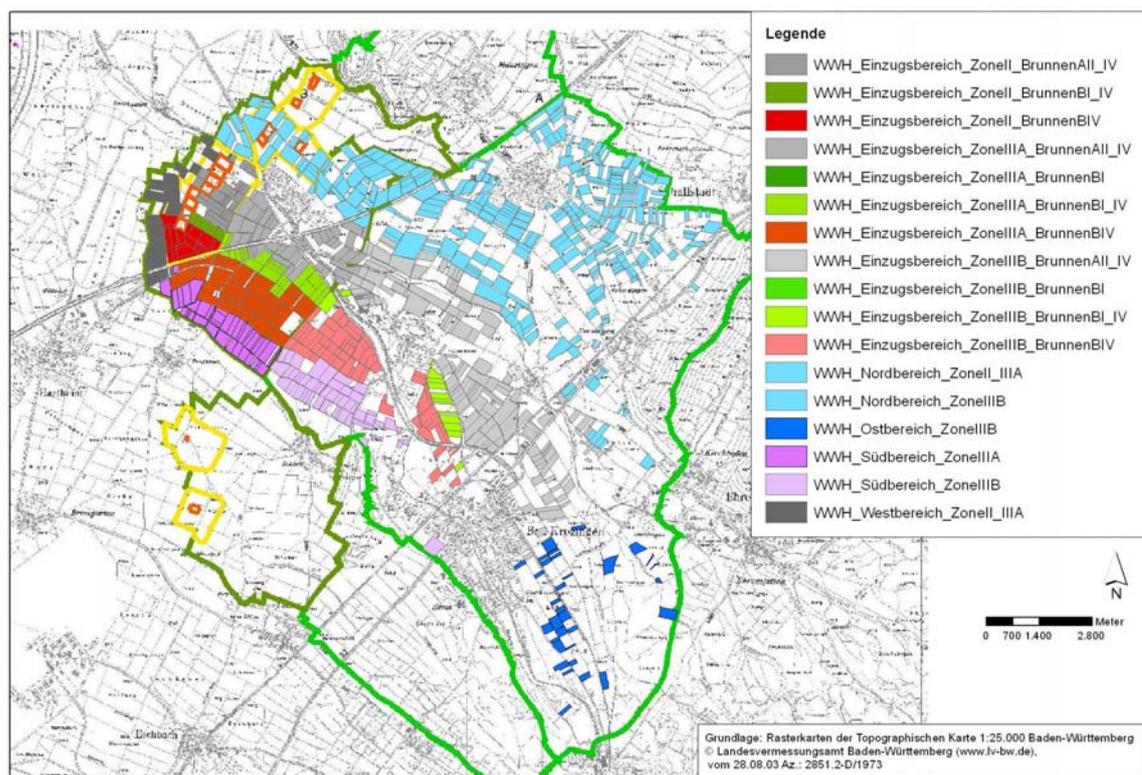


Abbildung 4.1: Lage der Teileinzugsbereiche für die Auswertung der Nitratstickstoffgehalte der Jahre 1990 – 2008

Die Auswertungsergebnisse wurden getrennt nach den Zeiträumen 1990 bis 1999 und 2000 bis 2008 in Form von Tabellen und Abbildungen zusammengefasst, die der badenova vorliegen. Die Gesamtauswertungen für die Jahre 1990 - 1999 und die Schutzzonenbereiche II/IIIA und IIIB sind in **Abbildung 4.2** und **Abbildung 4.3** dargestellt. Die entsprechenden Auswertungen für die Jahre 2000 bis 2008 zeigen **Abbildung 4.4** und **Abbildung 4.5**.

Die Auswertungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

a) Gesamtes Schutzgebiet

- Beim Vergleich der Jahre untereinander fallen insbesondere die Jahre 1990 und 1991 mit deutlich höheren mittleren Nitratstickstoffrestgehalten als in den Folgejahren auf. Nur das klimatische Extremjahr 2003 wies ähnlich hohe Werte auf. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Jahre 1990, 1991, 1993 und 2003 mit Jahresniederschlagssummen unter 600 mm (badenova-Klimastation beim WW Hausen) sehr trocken waren. Man kann davon ausgehen, dass es in diesen Jahren infolge der Trockenheit bei vielen Kulturen zu Ertragsdepressionen kam, die infolge verringerter Stickstoffaufnahme zu hohen Nitratstickstoff-Restgehalten führten.
- Bei den Nitratstickstoff-Restgehalten der Körnermaisflächen sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren deutlich höher als die Unterschiede zwischen verschiedenen Teileinzugsgebieten. Die höchsten Nitratstickstoffgehalte wurden in trockenen Jahren wie z.B. 1990, 1991, 2003 oder 2005 festgestellt. Das Projekt „Umweltschonender Maisanbau“ umfasste die Mehrzahl der Körnermaisflächen im WSG Hausen und begann im Jahre 1992, wodurch deutliche Reduzierungen der Nitratstickstoffrestgehalte bei den Körnermaisflächen erreicht wurden. Körnermaisflächen hatten und haben aufgrund ihres hohen Flächenanteils einen wesentlichen Einfluss auf den Gesamtmittelwert.
- Die höchsten nutzungsspezifischen Mittelwerte werden häufig bei Getreideflächen mit Folgenutzung Feldsalat festgestellt. Es handelt sich dabei jedoch meist nur um wenige Flächen

b) Schutzzonenbereich II/IIIA („altes Schutzgebiet“)

- Innerhalb des Schutzzonenbereichs II/IIIA weisen die Flächen im Einzugsbereich des südlichsten Brunnens BIV meist höhere mittlere Nitratstickstoffgehalte auf als die Flächen im Einzugsbereich der A-Brunnen und des Brunnens BI.
- Innerhalb des Schutzzonenbereichs II/IIIA fällt im Zeitraum 1990 -1999 sowie in den Jahren 2003 bis 2005 und 2008 der Gebietsbereich „außerhalb Teileinzugsgebiet Süd“ mit erhöhten Nitratstickstoffgehalten auf. Dies betrifft insbes. die Hauptfrüchte Spargel, Kartoffeln und teilweise auch Körnermais.
- Bei den Auswertungen für die Jahre 2000-2008 sind bei den Flächen, die innerhalb des Schutzzonenbereiches II/IIIA und außerhalb des Teileinzugsgebiets der A- und B-Brunnen in den Teilbereichen Süd und West liegen, für die Kulturen Körnermais, Saatmais, Kartoffeln, Spargel und Getreide – Feldsalat relativ häufig deutlich höhere Nitratstickstoffrestgehalte festzustellen als für die Flächen innerhalb des Teileinzugsgebiets der A- und B-Brunnen.

Fazit:

Bei der Auswertung der Nitratstickstoffgehalte der Jahre 1990 bis 2008 fallen zunächst die starken Unterschiede zwischen den Jahren auf, wobei sehr hohe Nitratstickstoffgehalte in sehr trockenen Jahren (1990, 1991, 2003) auftraten und in erster Linie eine Folge von Ertragsdepressionen aufgrund der Trockenheit sein dürften.

Darüber hinaus fallen in der Schutzzone II/IIIA der südliche und westliche Bereich (außerhalb des Teileinzugsgebietes „TEG“ der A- und B-Brunnen) mit erhöhten Nitratstickstoff-Restgehalten auf. Innerhalb des Teileinzugsgebietes betrifft dies in früheren Jahren den Einzugsbereich des Brunnens BIV. Bei einigen Kulturen traten in diesen Bereichen erhöhte Werte teilweise seit Anfang der Bodenkontrollaktionen auf. Dies dürfte – neben der in diesem Grundwasserbereich geringeren Verdünnung durch Uferfiltrat der Gewässer Möhlin und Neumagen – ein wesentlicher Grund für die höheren Nitratkonzentrationen bei den südlichen Brunnen, insbesondere beim Brunnen BIV sein.

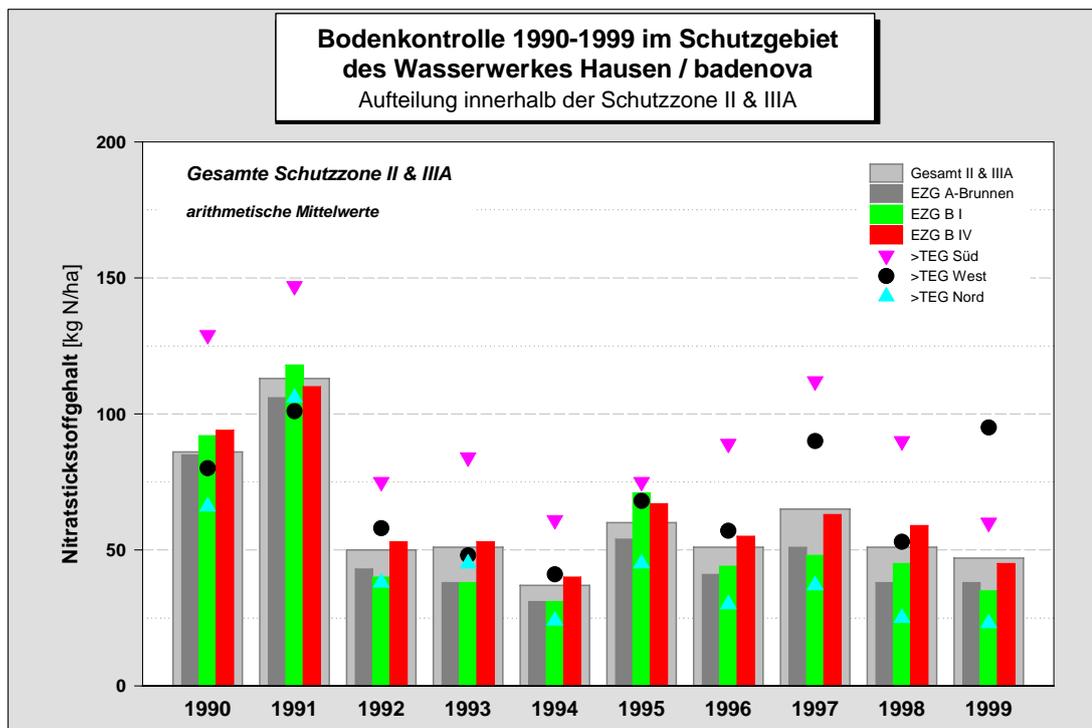


Abbildung 4.2: Mittlere Nitratstickstoffgehalte WSG Hausen Herbst 1990 – 1999, Schutzzone II & IIIA, Gesamtauswertung

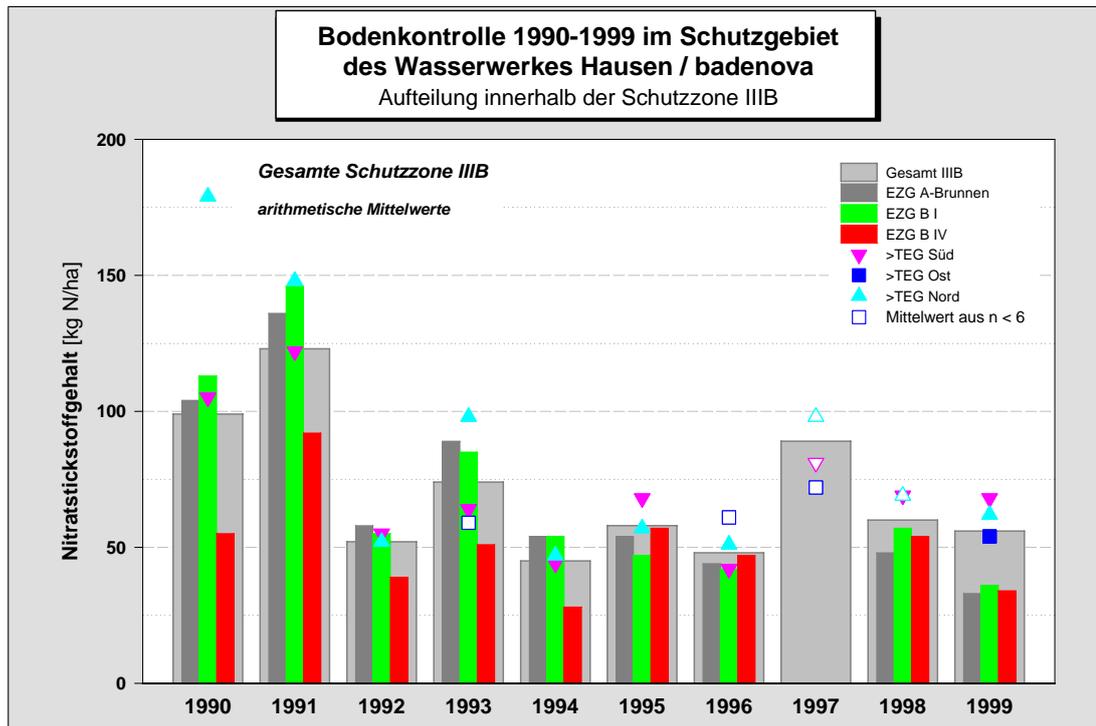


Abbildung 4.3: Mittlere Nitratstickstoffgehalte WSG Hausen Herbst 1990 – 1999, Schutzzone III B, Gesamtauswertung

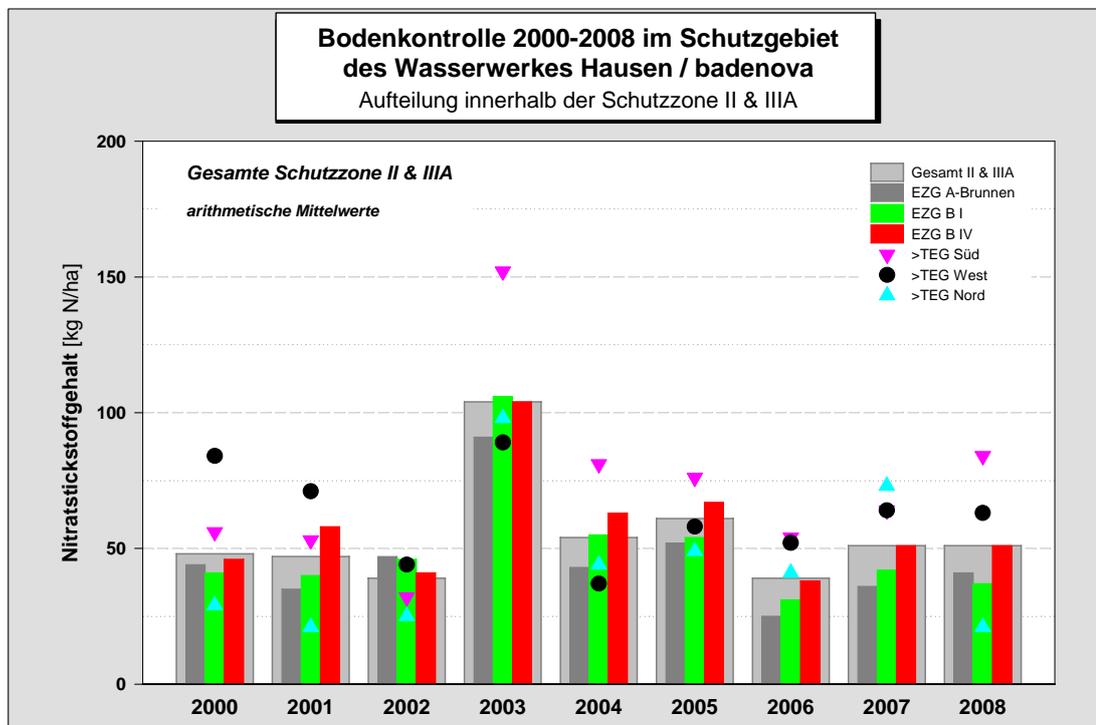


Abbildung 4.4: Mittlere Nitratstickstoffgehalte WSG Hausen Herbst 2000 – 2008, Schutzzone II & III A, Gesamtauswertung

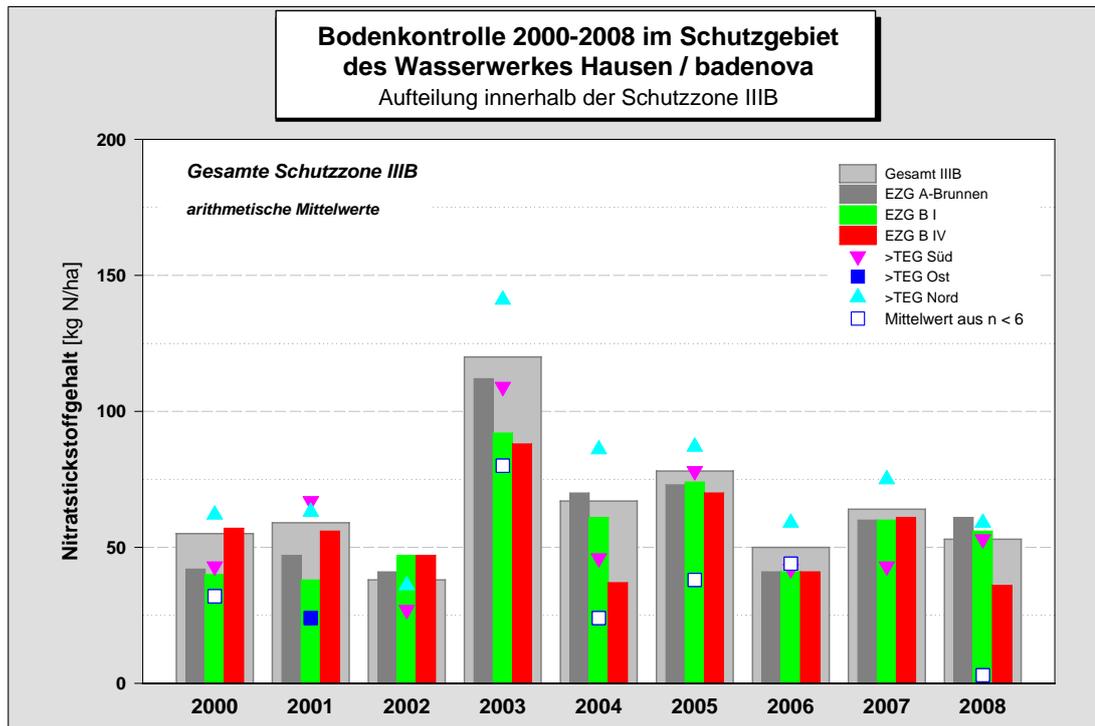


Abbildung 4.5: Mittlere Nitratstickstoffgehalte WSG Hausen Herbst 2000 – 2008, Schutzzone IIIB, Gesamtauswertung

5 Modellierungsergebnisse für die Projektflächen und Diskussion

Die hier präsentierten Projektflächen wurden exemplarisch hinsichtlich gebietstypischer Bewirtschaftung, Fruchtfolge, Bodenart, Zeitraum der Beobachtung und Güte der Simulation aus den 40 Beobachtungsstandorten ausgewählt.

5.1 Ergebnisse der INVAM-Simulationsrechnungen

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der INVAM-Modellierung ist in Abschnitt 3.1.1 erläutert.

5.1.1 Beispiel H618 Körnermais

In der **Abbildung 5.1** sind die Entwicklungen der Nitratstickstoffgehalte und der Bodenwassergehalte sowie die Ergebnisse der INVAM-Simulationsrechnungen im Vergleich zu den Messwerten für die Fläche H618 und den Zeitraum Mai 2010 bis Mai 2011 dargestellt. Für diese Fläche und den dargestellten Zeitraum soll im Folgenden beispielhaft die grundsätzliche Vorgehensweise bei den INVAM-Simulationen erläutert werden:

a) Bewirtschaftungsmaßnahmen im Untersuchungszeitraum

- Es handelt sich um eine Projektfläche mit Körnermais im Monomaisanbau (Daueranbau von Körnermais). Die Körnermaisernte erfolgte am 22.10.2010.
- Bis Mitte Dezember 2010 lag die Fläche mit Maisstroh-Ernteresten und ohne Bodenbearbeitung brach und wurde am 21.12.2010 gepflügt.

b) **Wassersättigung**

- Die Wassersättigung des Bodens für den Bodenbereich 0-90 cm wurde zwischen den Probennahmeterminen 24.11.2010 und 15.12.2010 erreicht. Sie beträgt bei dieser Fläche etwa 325 mm im Bodenbereich von 0-90 cm. Nach Berechnung der Haude-Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz ergab sich zwischen diesen beiden Probennahmeterminen ein erster Sickerwasseranfall von 126 mm (Abbildung 5.1).
- Von Mitte Dezember 2010 bis Ende Januar 2011 war der Bodenbereich 0-90 cm meist vollständig wassergesättigt. Bis Anfang März 2011 wurden weitere 78 mm Sickerwasser berechnet.

c) **Änderungen der Nitratstickstoffgehalte**

- Zwischen den Probennahmeterminen 24.11.2010 und 24.01.2011 hat sich der Nitratstickstoffsummenwert kontinuierlich von 24 auf 13 kg N/ha verringert und ist danach bis Anfang März 2011 wieder geringfügig auf 16 kg N/ha angestiegen.
- Die Abnahme der Nitratstickstoffgehalte zwischen den Probennahmeterminen 24.11.2010 und 24.01.2011 konnte vor allem auf Auswaschungseffekte zurückgeführt werden. In diesem Berechnungszeitraum waren nur geringfügige Anpassungen (vgl. Abschnitt 3.1.1) erforderlich.

Die Nitratauswaschung kann damit für die Körnermaisfläche H618 und den Zeitraum von 24.11.2010 bis 03.03.2011 auf insgesamt **rd. 18 kg N/ha** geschätzt werden. Die mittlere theoretische Nitratkonzentration in den abgeschätzten 204 mm Sickerwasser unter dieser Fläche beträgt **rd. 39 mg/L**.

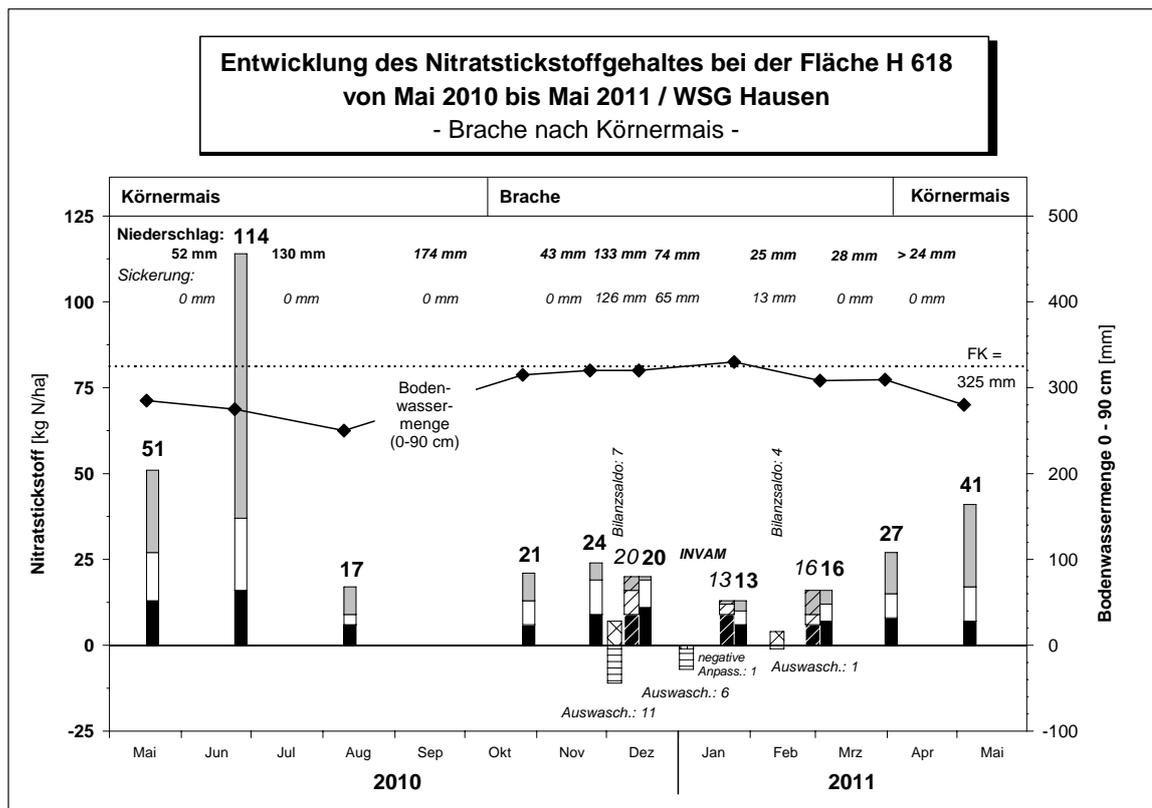


Abbildung 5.1: Nitratstickstoffgehalte und Bodenwassermengen im Zeitraum Mai 2010 bis Mai 2011 sowie INVAM-Modellrechnungsergebnisse für die Projektfläche H618

Ein Vergleich der INVAM-Modellrechnungsergebnisse mit den Expert-N-Berechnungsergebnissen erfolgt in Abschnitt 5.3.1.

5.1.2 Übersicht über die INVAM-Modellberechnungen

Von den 40 Projektflächen wurden 31 Flächen für die INVAM-Modellberechnungen herangezogen. Die anderen neun Flächen wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit überwiegend wegen unvollständiger Bodenprofile (oft nur Bodenprofile von 0 bis 60 cm Tiefe) nicht für die Auswertungen berücksichtigt. Für diese Flächen hätten sich aufgrund der fehlenden Bodenschicht von 60 bis 90 cm Tiefe i. d. R. höhere Auswaschungen in 60 cm Tiefe ergeben als für vergleichbare Flächen mit Bodenprofilen bis 90 cm Tiefe.

Aus den 31 Projektflächen wurden für die INVAM-Berechnungen soweit möglich Kollektive aus Flächen gebildet, die über den gesamten Projektzeitraum identische Fruchtfolgen aufwiesen. Falls dies nicht möglich war, wurden Einzelflächen berechnet. Teilweise konnten Kollektive nur im ersten Projektjahr (2008) oder in den ersten beiden Projektjahren (2008 und 2009) gebildet werden. In den übrigen ein oder zwei Jahren mussten aufgrund nicht mehr identischer Fruchtfolgen Berechnungen für die Einzelflächen erfolgen.

Insgesamt konnten anhand der 31 Projektflächen 16 verschiedene Fruchtfolgen ausgewertet werden. Diese Flächen wurden im Zeitraum Anfang April 2008 bis Anfang Mai 2011 an insgesamt zwischen 20 Terminen (H135 - Erdbeeren) und 34 Terminen (H618 - Körnermais) kontrolliert. Meist lagen für die Auswertungen die Ergebnisse von ca. 25 Probennahmeterminen vor.

Die **Tabelle 5.1** zeigt eine Übersicht über die Projektflächen bzw. Kollektive und die jeweiligen Fruchtfolgen, die für die INVAM-Simulationen herangezogen wurden.

Tabelle 5.1: Flächenzusammenstellung für die INVAM-Simulationsrechnungen aufgrund der Fruchtfolge

Kollektive, Flächen	Fruchtfolge 2008/09 → 2009/10 → 2010/11
H198/H1262, H618	Körnermais → Körnermais → Körnermais
H2202	Körnermais → Körnermais → Winterweizen/Brache
H209/H639/H765/H1457	Körnermais → Kartoffeln/Senf → Körnermais
H2318	Körnermais → Kartoffeln/Senf → Getreide/Feldsalat
H385, H80	Körnermais → Winterweizen/Feldsalat → Körnermais
H537/H2291	Saatmais → Saatmais → Saatmais
H52	Frühkartoffeln/Gründungspflanzen → Saatmais → Winterweizen
H217	Frühkartoffeln/Brache → Körnermais → Frühkartoffeln/Senf
H2319	Kartoffeln → Winterweizen/Gründungspflanzen → Körnermais
H129, H290	Spargel → Spargel → Spargel
H48/H69, H35/H137, H138	Erdbeeren → Erdbeeren → Erdbeeren/Brache
H135	Erdbeeren → Erdbeeren → Erdbeeren/Feldsalat
H240	Gemüse (Zwiebel) → Saatmais → Saatmais
H2209, H155	Winterweizen/Feldsalat → Sommergerste/Feldsalat → Zierkürbis
H124	Winterweizen/Feldsalat → Zierkürbis → Zierkürbis
H463	Winterweizen/Feldsalat → Kartoffeln → Winterweizen/Feldsalat

Mit Hilfe des Simulationsmodells INVAM wurde versucht, die Entwicklungen der Nitratstickstoffgehalte bei den aufgeführten Kollektiven und Einzelflächen nachzuvollziehen, um daraus die Größenordnung der Nitratstickstoffauswaschung für die jeweiligen Fruchtfolgen im Projektzeitraum abzuschätzen. Die Ergebnisse der INVAM-Simulationen sind in der **Tabelle 5.2** zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Zusammenstellung der mit INVAM abgeschätzten Nitrat Auswaschungen und Sickerwassermengen für die Kollektive und Einzelflächen mit gleicher Fruchtfolge (vgl. Tabelle 5.1)

Kollektive / Einzelflächen mit gleicher Fruchtfolge	Nitrat Auswaschung in kg N/ha			Sickerwassermenge in mm			Nitratkonz. im Sickerw. in mg/L			mittlere Nitratkonz. in mg/L
	2008/09	2009/10	2010/11	2008/09	2009/10	2010/11	2008/09	2009/10	2010/11	
Köma-Köma-Köma	21	9	15	240	114	194	39	35	32	36
Köma-Köma-WW-Br	78	4	13	249	85	161	139	21	36	85
Köma-Kart/Senf-Köma	63	27	33	314	100	155	89	120	94	96
Köma-Kart/Senf-Getr/FS	17	25	62	193	109	206	39	102	140	93
Köma-WW/FS-Köma	14	52	34	166	144	121	37	158	125	102
Sama-Sama-Sama	34	11	8	319	128	178	47	38	20	37
Kart./GD(SG)-Sama-WW	43	30	14	202	139	128	94	96	48	82
Fr.kart/Br.-Köma-Fr.Kart/Senf	43	30	12	202	139	145	94	96	37	77
Kart-WW/GD-Köma	28	53	56	116	125	204	107	188	122	136
Spargel-Spargel-Spargel	44	20	23	281	134	197	69	66	52	63
Erdbe-Erdbe-Erdbe-Br	58	39	38	293	172	172	89	109	95	96
Erdbe-Erdbe-Erdbe-FS	50	33	84	310	182	195	71	80	191	107
Gem(Zw.)-Sama-Sama	54	56	26	202	178	123	118	139	94	119
WW/FS-SG/ FS-Zierk.	75	49	29	256	194	206	131	113	61	103
WW/FS +Zierk-Zierk	56	51	28	309	181	180	80	125	69	89
WW/FS-Kart-WW/FS	50	48	42	217	149	106	102	143	176	131

Die Spannweite der mit INVAM berechneten mittleren theoretischen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser unter diesen Fruchtfolgen reicht von 36 mg/L für Körnermais im Daueranbau bis 136 mg/L für die Fruchtfolge Kartoffeln → Winterweizen/Gründüngung → Körnermais.

Die Ergebnisse der INVAM-Simulationsrechnungen waren Basis für die in Abschnitt 6.2 vorgenommenen Abschätzungen der gesamten N-Auswaschung (N-Fracht) für das Projektgebiet.

5.2 Expert-N-Modellierungsergebnisse

5.2.1 Darstellung der Expert-N-Modellierungsergebnisse

Um die Modellergebnisse von INVAM und Expert-N auch für die Auswaschungsperiode 2010/2011 vergleichen zu können, wurden die Simulationen in Expert-N unter Berücksichtigung der Bewirtschaftung bis zum 11.04.2011 fortgeführt. Die kumulierten Werte des Niederschlags, der Grundwasserneubildung, des N-Eintrags und des N-Austrags wurde für die Auswertungsperioden 2008, 2009 und 2010 jeweils auf den Zeitraum vom 15. Oktober der Vorjahres (bzw. dem Beginn der Simulationsperiode 2008) bis zum 15. Oktober des jeweiligen Auswertejahres bezogen. Dieser Zeitraum wurde gewählt, um die Haupt-Auswaschungszeit in den Winterhalbjahren nicht auf zwei Auswertungsperioden aufzuteilen und damit eine bessere Vergleichbarkeit mit INVAM zu gewährleisten.

In den folgenden Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 werden die Ergebnisse der Expert-N-Modellberechnungen exemplarisch für zwei wichtige Kulturfolgen im WSG Hausen anhand der Projektflächensimulationen H618 und H2318 detailliert erläutert. Diese Ausführungen geben einen vertieften Einblick in den Informationsgehalt und die Interpretationsmöglichkeiten der Expert-N-Ergebnisse. Eine gesamthafte Diskussion der Expert-N Projektflächensimulationen sowie eine zusammenfassende Bewertung wird in Abschnitt 5.2.4 vorgenommen.

5.2.2 Projektfläche H618 mit Körnermais in Monokultur

Die Projektfläche H618 nahe der nördlichen Grenze des Projektgebiets, nordöstlich der Ortschaft Biengen gelegen, stellt einen Referenzstandort für Körnermais in Monokultur mit herkömmlicher Düngung dar. Im Jahr 2010 erfolgt die Düngung in zwei Gaben mit einer Andüngung als Unterfußdüngung zur Saat mit 31 kg N/ha in Form einer Eigenmischung mit 8,8% Nitratstickstoff und 15,1% Ammoniumstickstoff, sowie einer Hauptdüngung mit 133 kg N/ha als Harnstoff mit 46% Amidstickstoff. In den Jahren 2008 und 2009 war die Düngung ähnlich hoch. Die Kultur wurde nicht beregnet. **Tabelle 5.3** enthält eine Übersicht über die wichtigsten Berechnungsergebnisse für den Projektzeitraum.

Tabelle 5.3: Übersicht zur Projektfläche H618

Jahr	2008 ¹⁾	2009	2010
Hauptfrucht	Körnermais	Körnermais	Körnermais
Zwischenfrucht	-	-	-
Niederschlag (mm)	799	625	674
Grundwasserneubildung (mm)	322	232	184
Stickstoff Eintrag ²⁾ (kg N/ha)	172	182	179
Nitrat Auswaschung (kg N/ha)	23	17	22

¹⁾ Zeiträume bezogen auf die Periode 15.10. des Vorjahres bis 15.10. des angegebenen Jahres

²⁾ beinhaltet Eintrag durch Düngung und atmosphärische Deposition (15 kg N/ha/a)

5.2.2.1 Bodentyp

Der Boden, als Parabraunerde und als schluffiger Lehm charakterisiert, ist auf Grund seiner Genese der Bodenart Löss zuzuordnen. Die hydraulischen Kenngrößen zur Simulation des Wasserhaushalts sind in **Tabelle 5.4** aufgeführt.

Tabelle 5.4: Hydraulische Kenngrößen der Projektfläche H618

Horizontmächtigkeit (cm)	Porosität (%)	Feldkapazität (%)	Permanenter Welkepunkt (%)	Gesättigte Leitfähigkeit (cm/d)
20	54	40	13	70
20	44	36	11	25
60	44	36	11	25

5.2.2.2 Bodenwasserhaushalt der Projektfläche H618

Abbildung 5.2 zeigt die Bodenfeuchtedynamik als Mittel über die Profilabschnitte 0 – 30 cm, 30 – 60 cm und 60 – 90 cm Tiefe während der Simulationsperiode von Ende Oktober 2007 bis April 2011 in täglicher Auflösung (blaue Linie). Neben den Wassergehalten in Prozent sind die mittleren hydraulischen Parameter des jeweiligen Profilabschnitts (Porosität, Feldkapazität und permanenter Welkepunkt) als gestrichelte horizontale Linien eingetragen. Da die Profilab-

schnitte nicht unbedingt mit den Bodenhorizonten übereinstimmen, werden die Horizonteigenschaften anteilig am Profilabschnitt gemittelt.

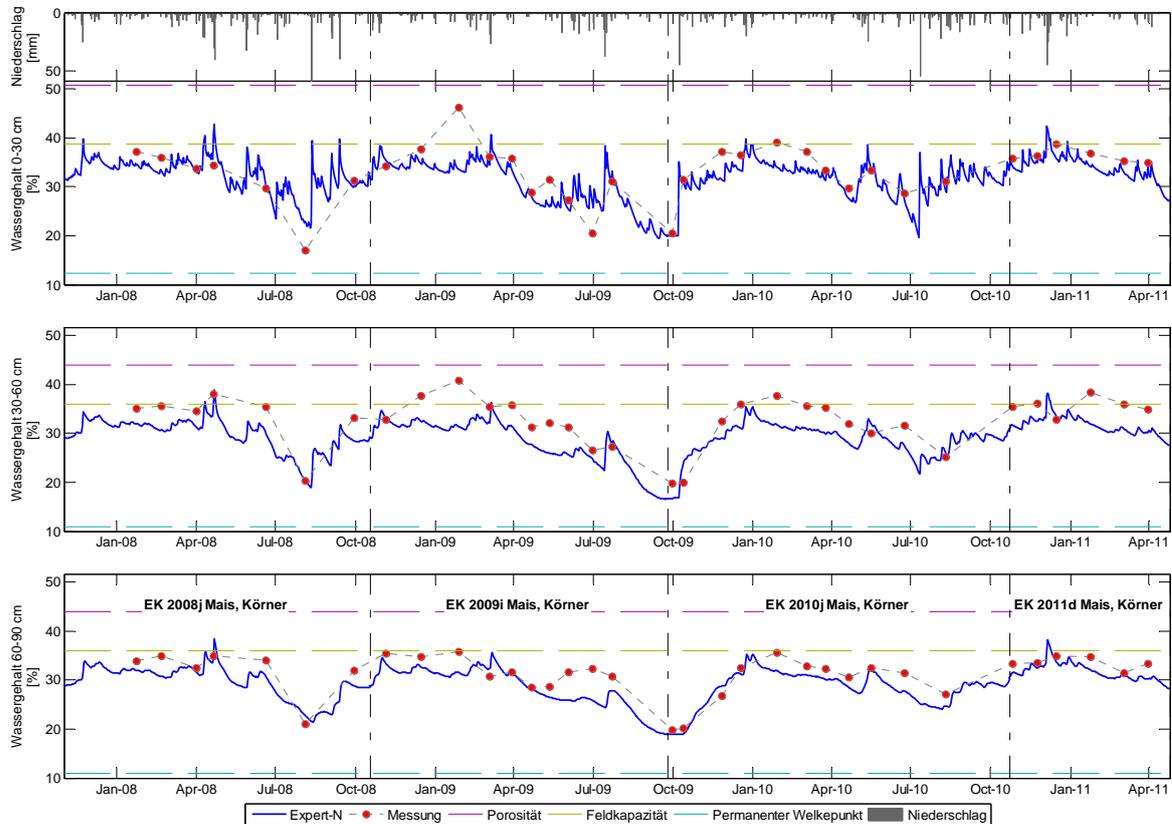


Abbildung 5.2: Bodenfeuchtedynamik bei der Projektfläche H618 von Mitte Oktober 2007 bis Ende April 2011

Die vertikalen strichpunktierten Linien kennzeichnen die Erntetermine der Anbaufrucht. Zudem sind Fruchtart und Anbaujahr (Jahr der Ernte) im untersten Abschnitt der Grafik vermerkt. Die Wassergehaltsmessungen des TZW sind für alle drei Profilabschnitte als rote Punkte eingetragen. Der standortspezifische Niederschlag inklusive etwaiger Beregnungen ist im obersten Teil der Grafik für den Bodenabschnitt 0 – 30 cm über den Wassergehalten mit schwarzen Linien abgebildet. Wurde der Standort beregnet, so sind Beregnungstermine zusätzlich als blaue Rauten in der Grafik für den Profilabschnitt 0 – 30 cm vermerkt. Die Projektfläche H618 wurde im Projektzeitraum nicht beregnet.

Der Vergleich von Bodenfeuchtedynamik und täglichen Niederschlagsmengen verdeutlicht die starke Reaktion des Wassergehalts im oberen Profilabschnitt auf Einzelniederschläge während mit zunehmender Profiltiefe die Bedeutung von Einzelereignissen gegenüber länger anhaltenden Feuchteperioden abnimmt. So hebt etwa das Starkniederschlagsereignis vom 12.08.2008 mit 59 mm den Wassergehalt im oberen Profilabschnitt unmittelbar von 23% auf 39% während der untere Profilabschnitt kaum auf dieses Ereignis reagiert. Der Wassergehalt in den tieferen Bodenschichten ist weitestgehend geprägt von der vegetationsbedingten

Transpiration während der Sommermonate (Juli – September 2008, Juli – Oktober 2009). Aufgrund der erheblichen Niederschlagsmenge im Sommer 2010 (267 mm vom 01.07.2010 – 30.09.2010) ist hier der Rückgang der Wassergehalte während der Vegetationsperiode im unteren und mittleren Profilabschnitt weniger stark ausgeprägt.

Im Vergleich mit den Messwerten des TZW zeigt sich generell eine sehr gute Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Wassergehalte. Speziell die Entleerung und Befüllung der Bodenspeicher über die Vegetationsperioden hinweg wird vom Modell gut wiedergegeben. Darüber hinaus zeigt sich, dass Schwankungen im Wassergehalt, hervorgerufen durch sommerliche Einzelereignisse, mit Hilfe der Simulationen gut verfolgt werden können, auch wenn diese Ereignisse innerhalb eines beprobungsfreien Zeitraums liegen. Der verdunstungsbedingte Rückgang der Wassergehalte während der Sommermonate sowie das vereinzelte Überschreiten der Feldkapazität während der Wintermonate sind durch die Messungen gut belegt.

Der Messwert vom 28.01.2009 mit 46% Wassergehalt, welcher weit über der Feldkapazität von 40% und damit dem Retentionsvermögen des Bodens liegt, ist möglicherweise durch Schneeeauflage bei den Probenahmen verfälscht worden. Die mittlere Tagestemperatur von -1,9 C, sowie vernachlässigbare Niederschläge im Vorfeld der Messung untermauern diesen Verdacht.

5.2.2.3 Stickstoffdynamik

Abbildung 5.3 illustriert die simulierte Nitratdynamik in den Profilabschnitten 0 – 30 cm, 30 – 60 cm und 60 – 90 cm. Zusammen mit den Simulationsergebnissen sind die Messwerte des Nitratstickstoffs als rote Punkte eingetragen. Zusätzlich zu den Ernteterminen und Fruchtartbeschriftungen wie in Abbildung 5.2 sind in der Grafik für den obersten Profilabschnitt noch die Termine der Bodenbearbeitungs- und Düngungsmaßnahmen als grüne Kreuze beziehungsweise gelbe Rauten eingetragen. Falls der Standort beregnet wurde, ist der Nitratintrag über das Beregnungswasser ebenfalls als gelbe Raute vermerkt.

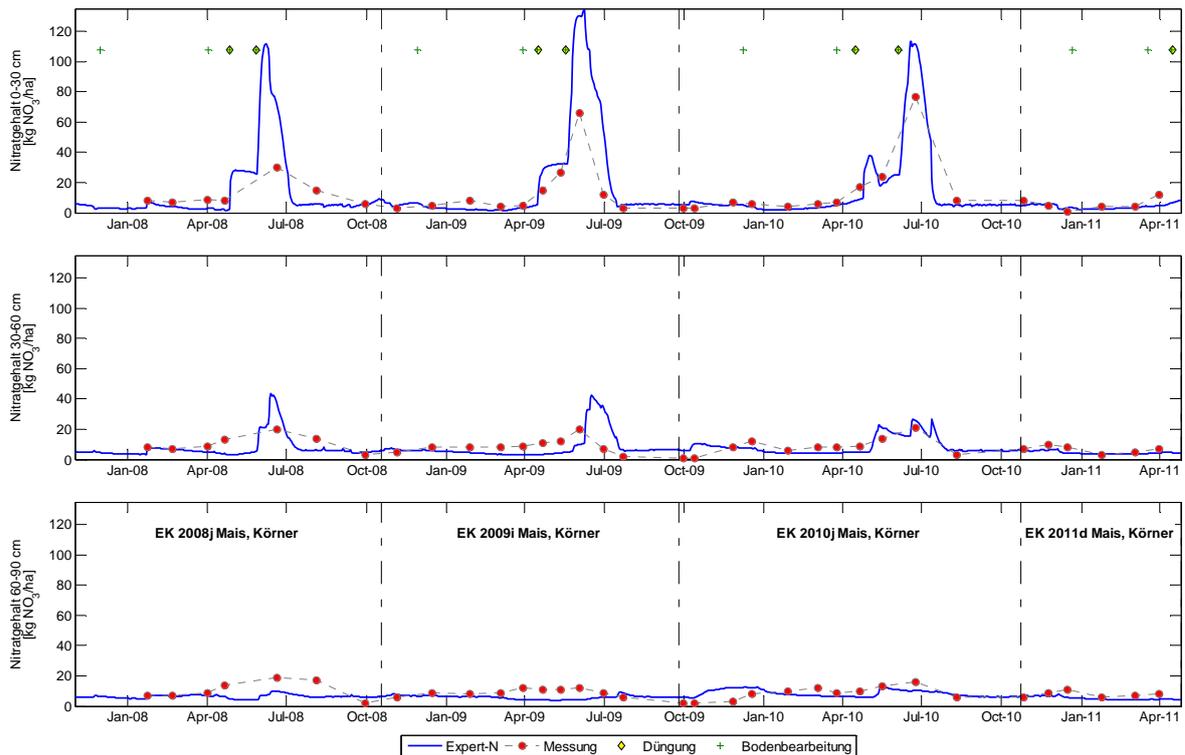


Abbildung 5.3: Stickstoffdynamik bei der Projektfläche H618 von Mitte Oktober 2007 bis Ende April 2011

Die simulierte Nitratmenge in der obersten Bodenschicht zeigt jeweils eine starke Reaktion auf die Düngungen zu Beginn der Vegetationsperiode. Der Anstieg der Stickstoffmenge fällt mit der ersten Düngung von 29 kg N/ha Mitte/Ende April zusammen. Die Hauptdüngung von 126 kg N/ha erfolgt dann etwa 4-5 Wochen später Ende Mai/Anfang Juni und löst die Spitzenwerte des N-Gehalts im Boden aus. Die dabei freigesetzten Stickstoffmengen im Boden entsprechen weitgehend den zugeführten Stickstoffmengen im Dünger. Mit zunehmender Profiltiefe sinkt der N-Gehalt auf etwa ein Zehntel des ursprünglichen N-Gehalts im Oberboden. Für die Auswaschung in den Grundwasserleiter sind nur die N-Gehalte in der untersten Bodenschicht relevant.

Im Vergleich mit den gemessenen Stickstoffgehalten fallen besonders die signifikant höheren N-Mengen im Oberboden auf. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass im Modell keine löslichkeitsbedingte Obergrenze bei der Stickstoffkonzentration gesetzt ist. Außerdem bleibt die Lösungskinetik des Düngers unberücksichtigt. Hauptursache der überhöhten N-Gehalte dürfte jedoch die Modellannahme der homogenen Düngerverteilung auf der Bodenoberfläche sein. Tatsächlich wird der Dünger in Form von Aggregaten (Körnern) ausgebracht die im Vergleich zu homogen verteiltem Dünger im gleichen Zeitraum geringere Stickstoffmengen freisetzen. Andererseits wird bei der Bohrstockbeprobung zur N-Gehaltsanalyse darauf geachtet, keine Düngeköerner mit in die Probe aufzunehmen. Daher wird bei der Messung die N-Menge des obersten Profilabschnitts nach Düngungsmaßnahmen im Allgemeinen eher unterschätzt.

Trotzdem wird die Dynamik der starken Stickstoffzunahme im Oberboden im Zuge der Düngungen auch von den Messungen nachvollzogen. Mit zunehmender Tiefe wird das Signal des Stickstoffeintrags erheblich gedämpft und die Stickstoffgehalte der Simulation entsprechen im Profilschnitt 60 – 90 cm weitgehend dem Niveau der Messungen.

5.2.2.4 Pflanzendynamik

Abbildung 5.4 illustriert die Pflanzenentwicklung während der Wachstumsperiode anhand der Indikatoren Stickstoffaufnahme, Entwicklungsstadium (BBCH) und Biomasse. Wie bei der **Abbildung 5.3** zur Stickstoffdynamik, sind die Dünge- und Bodenbearbeitungstermine in der Grafik der Stickstoffaufnahme vermerkt. Zusätzlich sind die beobachteten Entwicklungsstadien zusammen mit der simulierten Pflanzenentwicklung als blaue Punkte eingetragen. Die beobachteten Handelserträge wurden, umgerechnet auf Trockenmasse, in der Darstellung der simulierten generativen Biomasse (Korn) als rote Punkte vermerkt.

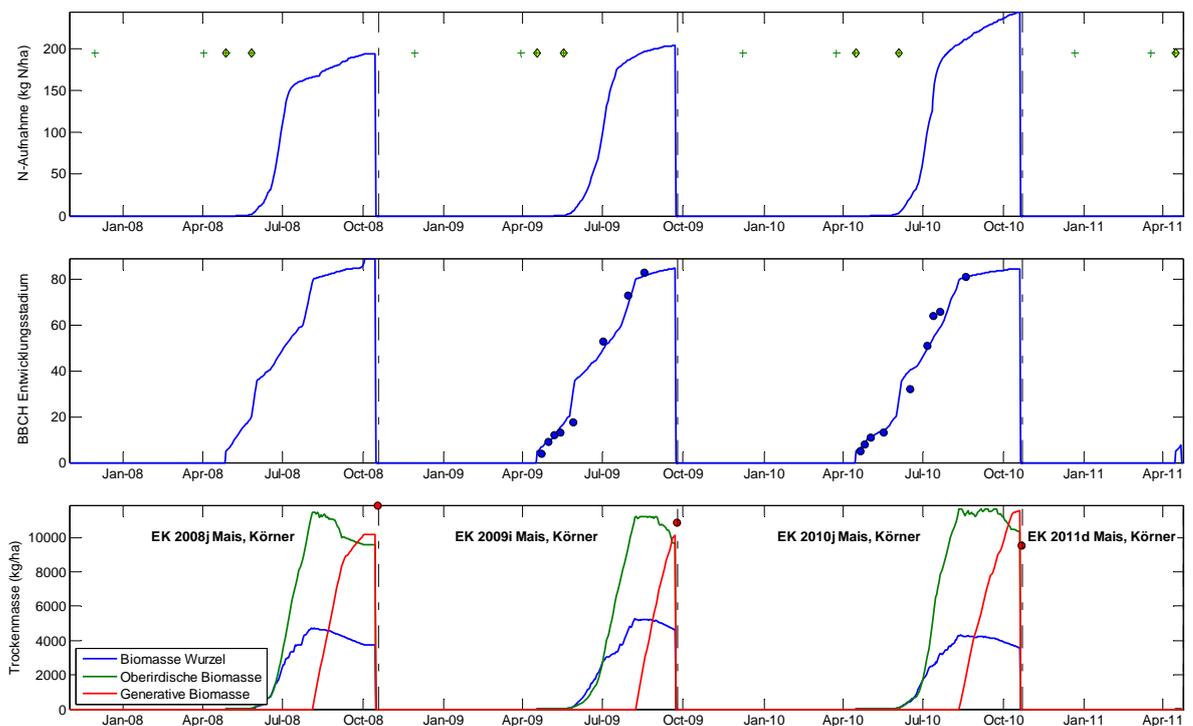


Abbildung 5.4: Pflanzenentwicklung bei der Projektfläche H618 von Mitte Oktober 2007 bis Ende April 2011

Der oberste Teil der Abbildung illustriert die Unterschiede in der Stickstoffaufnahme durch die Pflanze aufgrund unterschiedlicher Wachstumsbedingungen in den Jahren 2008 bis 2010. Die N-Aufnahme variiert zwischen 193 kg N/ha in 2008 und 244 kg N/ha in 2010. Grundsätzlich übersteigt die von der Pflanze resorbierte N-Menge die gesamte gedüngte N-Menge um etwa 50 - 90 kg N/ha. Die Differenz zwischen resorbierter und gedüngter N-Menge wird im Wesent-

lichen durch Mineralisierung der Pflanzenrückstände der Vorfrucht bereitgestellt. Dementsprechend liegt die Nachlieferung aus dem Stickstoffpool der Pflanzenrückstände 2010 mit 50 kg N/ha deutlich höher als die 26 bzw. 28 kg N/ha in den Jahren 2008 und 2009. Dies liegt darin begründet, dass die Pflanzenrückstände (Litter) bei Mais in Monokultur innerhalb eines Jahres nicht vollständig mineralisieren. Der akkumulierte N-Pool setzt dann in den Folgejahren der Modellierung mehr Stickstoff frei. Die übrige N-Menge bei der Pflanzenaufnahme wird durch Mineralisierung aus dem Humuspool bestritten, welche an diesem Standort konstant bei etwa 55 kg N/ha/a liegt.

Die simulierte Pflanzenentwicklung in den drei Jahren verläuft ähnlich und stimmt gut mit den beobachteten Entwicklungsstadien für 2009 und 2010 überein. Auffällig ist die deutlich kürzere Wachstumsperiode 2009 mit einer fast vier Wochen früheren Ernte verglichen mit 2010. 2008 stellt sich ab Oktober mit dem Entwicklungsstadium 89 Vollreife ein. Mit Beginn der Vollreife ist die Biomasseentwicklung und Stickstoffaufnahme in allen Pflanzenteilen abgeschlossen. Im Jahr 2010 bauten die Pflanzen bei der Simulation bis zur späten Ernte am 23.10.2010 noch langsam generative Biomasse auf, was mit kontinuierlicher N-Aufnahme einherging.

Prinzipiell verläuft die Biomasseentwicklung in den 3 Jahren in ähnlicher Form. In der Anfangsphase der Wachstumsperiode forciert die Pflanze zuerst die Ausbildung des Wurzelsystems und des Blattapparats, bevor dann während der Ertragsbildung Stickstoff von den anderen Pflanzenteilen in die generative Kornbiomasse umgelagert wird. Entsprechend des Entwicklungsstadiums ist die Biomasseentwicklung 2008 Ende September abgeschlossen. Da ab diesem Zeitpunkt keine weitere Ertragsbildung mehr stattfindet, bleibt der Ertrag mit 102 dt TM/ha hinter dem gemessenen Wert von 119 dt TM/ha zurück. Die geringen Wassergehalte im Unterboden von Juli bis Oktober 2008 deuten darauf hin, dass die Pflanze bei der Simulation in der Phase der Fruchtbildung (Makrostadium 7) trockenheitsbedingt in ihrer Entwicklung eingeschränkt ist. Trotz steigender Wassergehalte im September und Oktober kann die Pflanze das entstandene Defizit nicht mehr ausgleichen. Der Unterschied zwischen simulierter und gemessener Ertragsmenge kann durch die verbesserte Resistenz neuer Züchtungen gegen Wasserstress bedingt sein (im vorliegenden Fall kam die Sorte PR 38 A 24 zum Anbau), für die das verwendete CERES Pflanzenwachstumsmodell noch nicht parametrisiert ist. Die leichte Unterschätzung des Ertrags im 2. Anbaujahr liegt in der verkürzten Vegetationsperiode und ebenfalls geringer Wassergehalte während der Fruchtentwicklung begründet.

Im Anbaujahr 2010 liegen im Modell optimale Wachstumsbedingungen vor: hohe Wassergehalte während der Fruchtentwicklung, sowie gute Stickstoffversorgung durch Düngung und Mineralisierung der Humus- und Pflanzenrückstände. Der simulierte Ertrag liegt demnach mit 116 dt TM/ha über dem der Jahre 2008 und 2009. Dagegen ergab die Ernteerhebung tatsächlich nur 95 dt TM/ha. Grund für die Überschätzung des Ertrags im Modell war hier ein Hagel Schaden vom Abend des 12.07.2010, der ca. 35% der Blattfläche vernichtete und damit zu empfindlichen Ertragseinbußen führte. Generell können solche klimatischen Einzelereignisse, genauso wie Pflanzenkrankheiten und Schädlingsbefall nicht vom Modell abgebildet werden, was bei der Beurteilung der simulierten Pflanzenentzüge zu berücksichtigen ist.

Die auffällige Depression in der Biomasseentwicklung der Wurzel um den 05.07.2009 ist mit niedrigen Wassergehalten von 22 – 24 % in den unteren Profilabschnitten erklärbar. Die Niederschläge vom 14.07.2009 und steigende Bodenfeuchte regten dann das Wurzelwachstum zur Kompensation des entstandenen Entwicklungsrückstandes an. Die Ertragsbildung wird jedoch in der Folge um etwa eine Woche verzögert. Diese Wechselwirkungen von Wassergehalt und Pflanzenwachstum sind beispielhaft für das Prozessgefüge im verwendeten CERES Pflanzenmodell und konnten auf vergleichbaren Standorten (z.B. H198) verifiziert werden.

5.2.2.5 Grundwasserneubildung und Nitratauswaschung

Abbildung 5.5 zeigt die kumulierte Grundwasserneubildung (auf der linken y-Achse in blau) zusammen mit der kumulierten Nitratauswaschung (auf der rechten y-Achse in rot) über den gesamten Simulationszeitraum. Dünge-, Bodenbearbeitungs- und Erntetermine sind wie in den vorhergehenden Abbildungen vermerkt. Als Beginn der Wachstumsperiode kann das Datum der ersten Düngung im Anbaujahr herangezogen werden. In Übereinstimmung mit den INVAM Simulationen wird deutlich, dass Grundwasserneubildung und N-Auswaschung überwiegend im vegetationsfreien Zeitraum zwischen Vorfruchternte und Beginn des Pflanzenwachstums stattfindet. Intensive Niederschläge wie im Sommer 2010 können jedoch auch während der Vegetationsperiode zur Auswaschung von geringen N-Mengen auf guten Ackerstandorten führen (3 kg N/ha auf Fläche H618). In Abhängigkeit von Fruchtfolge, Anbauweise, Bodenart und den klimatischen Bedingungen kann die Auswaschung während der Wachstumsperiode jedoch auch einen signifikanten Beitrag zur gesamten Auswaschung leisten, wie anhand der hier nicht detailliert wiedergegebenen Projektfläche H80 erkennbar ist.. **Abbildung 5.5** zeigt auch, dass die N-Auswaschung trotz stark unterschiedlicher Niederschlags- und Sickerwassermengen zwischen den Jahren nur wenig variiert, da der N-Eintrag sowie die Pflanzenaufnahme nicht primär von den Wassergehalten abhängen.

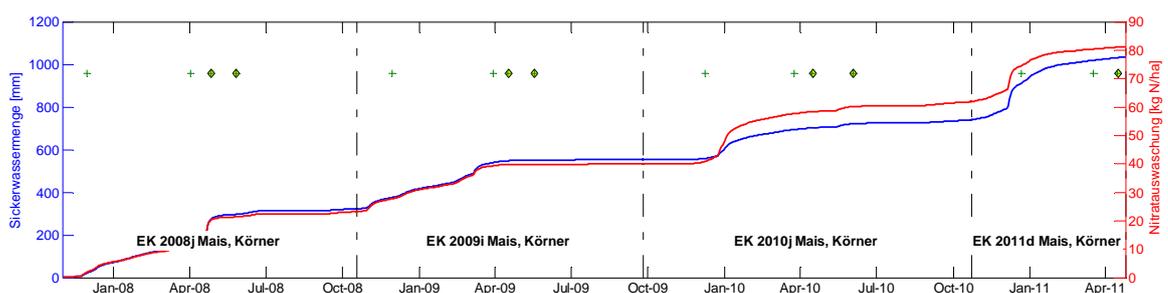


Abbildung 5.5: Grundwasserneubildung und Nitratauswaschung H618

5.2.3 Projektfläche H2318

Die Projektfläche H2318 im Südosten des Projektgebiets nördlich von Bad Krozingen stellt einen Referenzstandort für den Fruchtwechsel Körnermais, Kartoffel und Winterweizen mit Zwischenfrüchten Gelbsenf und Feldsalat dar. Darüber hinaus kann der Standort als repräsen-

tativ für die Sequenz Feldsalat nach Winterweizen angesehen werden. Die **Tabelle 5.5** enthält eine Übersicht über die wichtigsten Berechnungsergebnisse für den Projektzeitraum.

Tabelle 5.5: Übersicht zu Projektfläche H2318

Jahr	2008 ¹⁾	2009	2010
Hauptfrucht	Körnermais	Kartoffel	Winterweizen
Zwischenfrucht	-	Gelbsenf	Feldsalat
Niederschlag (mm)	836	640	688
Grundwasserneubildung (mm)	230	282	190
Stickstoff Eintrag ²⁾ (kg N/ha)	179	147	129
Nitrat Auswaschung (kg N/ha)	21	24	28

¹⁾ Zeiträume bezogen auf die Periode 15.10. des Vorjahres bis 15.10. des angegebenen Jahres

²⁾ beinhaltet Eintrag durch Düngung und atmosphärische Deposition (15 kg N/ha/a)

5.2.3.1 Bodentyp der Projektfläche H2318

Die Bodenart an diesem Standort ist als Lehm anzusprechen. Wie bei Projektfläche H618 wird der Boden aufgrund seines Ausgangssubstrats als Lössboden charakterisiert. Die hydraulischen Kenngrößen zur Simulation des Wasserhaushalts sind in **Tabelle 5.6** aufgeführt.

Tabelle 5.6: Hydraulische Kenngrößen der Projektfläche H2318

Horizont- mächtigkeit (cm)	Horizont- bezeich- nung	Sub- strat	Porosität (%)	Feld- kapazität (%)	Permanenter Welkepunkt (%)	Gesättigte Leitfähigkeit (cm/d)
25	Ah	Lfs2	55	40	15	70
20	Bt	Lfs2	45	36	17	25
55	Cv	Lfs2	38	33	17	5,5

5.2.3.2 Bodenwasserhaushalt H2318

Die Simulation der Wassergehalte in **Abbildung 5.6** zeigt generell eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen in allen drei Profilabschnitten. Ähnlich wie bei H618 liegt bei der Messung am 28.01.2009 die Bodenfeuchte weit über Feldkapazität, was wieder auf eine Schneebeeinflussung bei den Probenahmen schließen lässt.

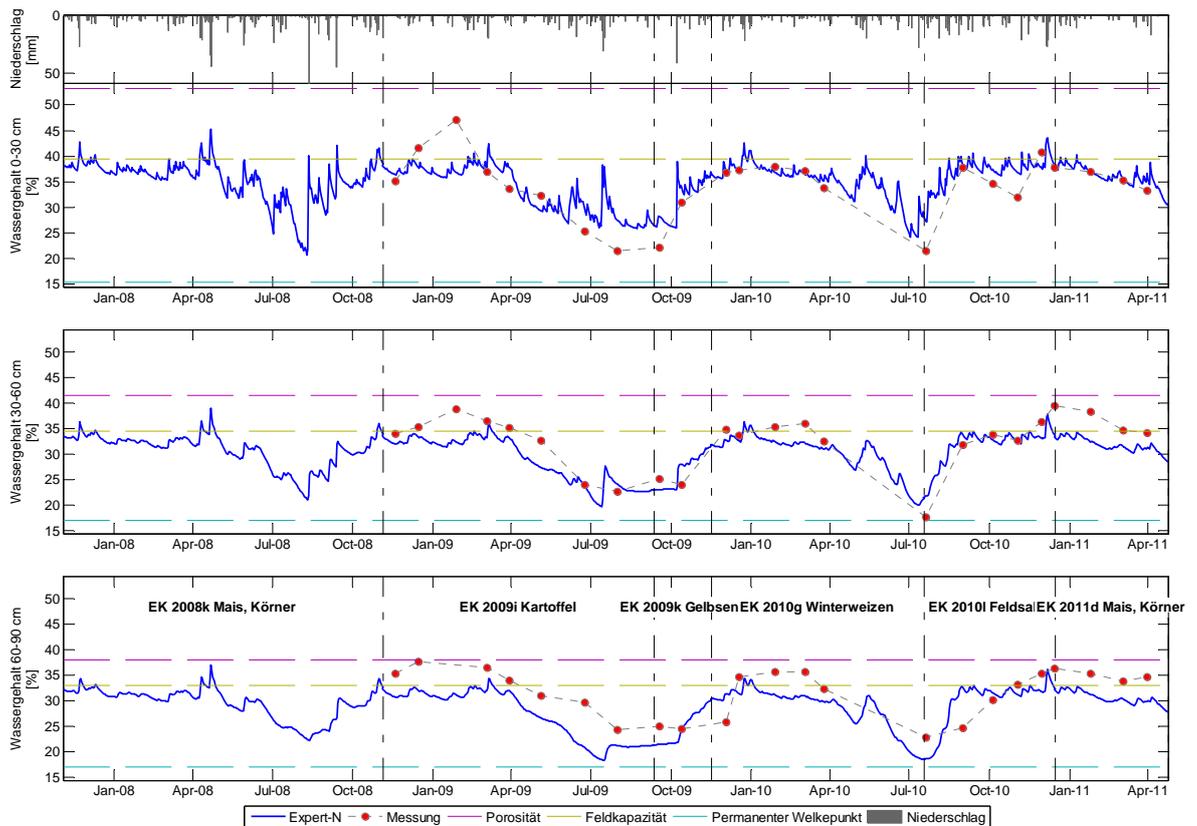


Abbildung 5.6: Bodenfeuchtedynamik bei der Projektfläche H2318 von Mitte Oktober 2007 bis Ende April 2011

Im untersten Profilabschnitt liegen die simulierten Wassergehalte leicht unterhalb der Messwerte, was auf eine geringfügige Unterschätzung des permanenten Welkepunktes und der Gesamtporosität in diesen Bereichen hindeutet. Dies führt dazu, dass der realen Pflanze während der Sommermonate mehr Wasser zur Transpiration zur Verfügung steht als der Pflanze im Modell, bevor Wasserstress auftritt.

5.2.3.3 Nitrathaushalt der Projektfläche H2318

Die Simulation des Nitratgehalts in den verschiedenen Profilabschnitten zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten (**Abbildung 5.7**). Das Anbaujahr 2009 weist unter Kartoffel hohe Spitzenwerte des Stickstoffgehalts im Oberboden aus, welche etwa zehn Wochen nach der Düngung Anfang April wieder auf Werte vor der Düngung abgesunken sind. Dieser Sachverhalt wird durch das Modell sehr gut abgebildet.

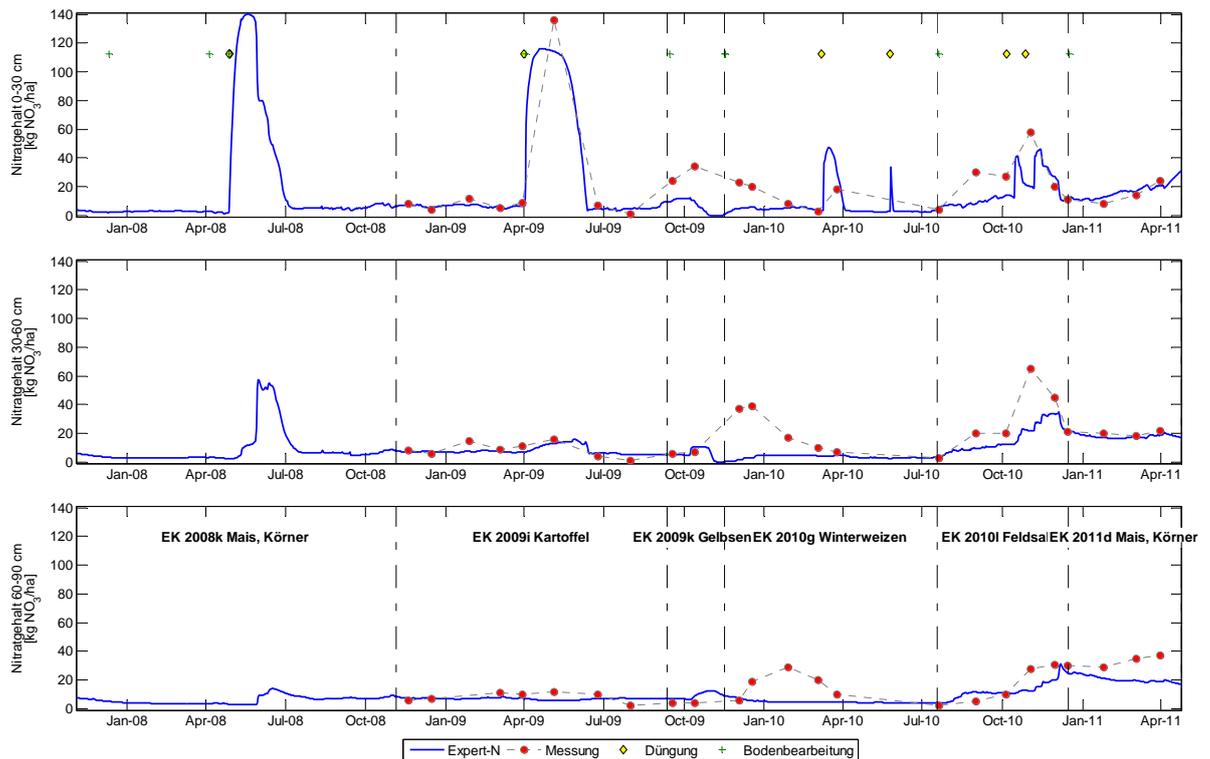


Abbildung 5.7: Stickstoffdynamik bei der Projektfläche H2318 von Mitte Oktober 2007 bis Ende April 2011

Nach der Kartoffelernte am 12.09.2009 weisen die Messungen einen Pool an freiem Stickstoff von etwa 40 kg N/ha aus, der sich im weiteren Verlauf in tiefere Bodenschichten verlagert. Die Messungen zeigen weiter, dass dieser Stickstoffpool während der Vegetationsperiode der Zwischenfrucht (Gelbsenf) allmählich in tiefere Bodenschichten verlagert wird. Erst im Winter 2010 nach der Saat des Winterweizens kommt es demnach zu Auswaschung. Im Modell wird dieser freie Stickstoff, der auf die Mineralisierung der Ernterückstände der Kartoffel zurückzuführen ist, nur ansatzweise abgebildet. Die Analyse der Stickstoffpools deutet darauf hin, dass das Modell die Mineralisierung der Pflanzenrückstände während der Vegetationsperiode des Gelbsenfs im Oktober 2009 leicht unterschätzt. Außerdem überschätzt das LEACHN Entzugsmodell hier die N-Aufnahme des Gelbsenfs, der in Wirklichkeit weniger Stickstoff aufnahm, was möglicher Weise durch die geringen Niederschläge bedingt wurde.

Während der Vegetationsperiode des Winterweizens geht der Gehalt an freiem Stickstoff in allen Profilschnitten stark zurück. Mit der Parametrisierung für Winterweizen simuliert das SUCROS Pflanzenmodell eine extrem schnelle Aufnahme des durch die Düngungen am 08.03.2010 und 25.05.2010 freigesetzten Stickstoffs. Auch wenn die fast vollständige N-Aufnahme innerhalb weniger Tage unrealistisch scheint, so kann doch die allgemeine N-Dynamik unter Winterweizen durch die vorhandenen Messungen bestätigt werden.

Wichtig im Hinblick auf das Auswaschungspotential sind die steigenden N-Gehalte während des nachfolgenden Anbaus von Feldsalat als Zwischenfrucht vor Körnermais in 2011. Nicht nur die Düngung sondern vor allem Mineralisierung der Pflanzenrückstände erhöht den Gehalt freien Stickstoffs auf Werte von über 50 kg N/ha. Der Verlauf dieser Stickstoffhöhung stimmt sehr gut mit den Messungen überein. Der mineralisierte Stickstoff überdauert die Feldsalaternte und stellt bis zur Wachstumsperiode des nachfolgenden Körnermaises im April 2011 ein hohes Auswaschungsrisiko dar.

5.2.3.4 Pflanzendynamik auf Projektfläche H2318

Die Dynamik der Stickstoffaufnahme durch die Pflanze weist große Unterschiede zwischen verschiedenen Fruchtarten aus. Vor allem der Winterweizen fällt durch die extrem schnelle Aufnahme während der Fruchtbildung auf. Die N-Aufnahme der Zwischenfrüchte, Gelbsenf und Feldsalat, folgt der typischen Aufnahmefunktion des LEACHN Entzugsmodells. Da dieses Modell die Pflanzenentwicklung nicht autonom simuliert, fehlt hier die Darstellung der BBCH Entwicklungsstadien (**Abbildung 5.8**).

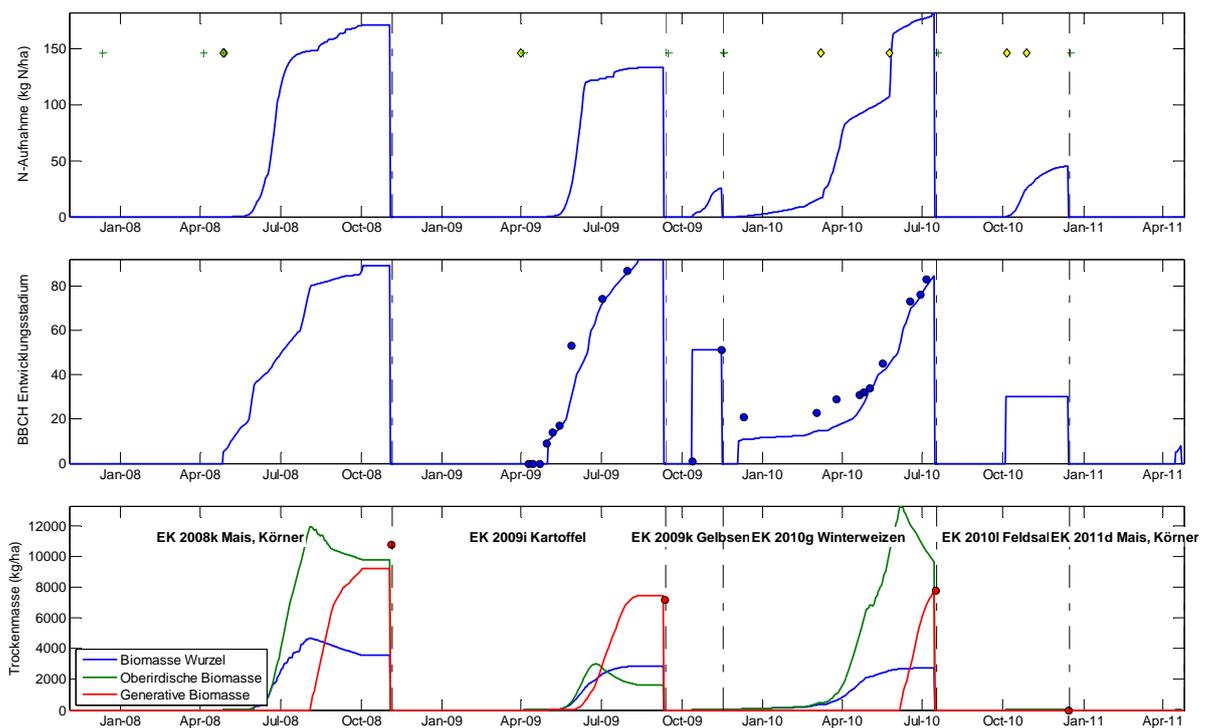


Abbildung 5.8: Pflanzenentwicklung bei der Projektfläche H2318 von Mitte Oktober 2007 bis Ende April 2011

Bei der Kartoffel im Anbaujahr 2009 stimmt die simulierte Pflanzenentwicklung sehr gut mit den beobachteten Bonituren überein. Beim Winterweizen im Anbaujahr 2010 wurde praktisch direkt nach der Saat das Makrostadium 2 der Bestockung festgestellt, das im Modell jedoch

erst Ende April erreicht wird. Als Ursache ist hier zu vermuten, dass der reale Saattermin bereits Mitte November erfolgt sein muss und nicht erst im Dezember, wie modellseitig ausgewiesen. Nach dem Termin des Schossens (Makrostadium 3, laut Beobachtung am 21.04.2010 erreicht) stimmt die simulierte Pflanzenentwicklung gut mit den Bonituren überein, d.h. die simulierte Pflanzenentwicklung holt den durch den falschen Saattermin induzierten Entwicklungsrückstand wieder auf.

Bei der Biomassebildung in den verschiedenen Pflanzenteilen ist eine hervorragende Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Erträge festzustellen. Lediglich der Ertrag des Körnermais im Anbaujahr 2008 bleibt mit 92 dt TM/ha hinter den gemessenen 107 dt TM/ha etwas zurück. Ähnlich wie am Standort H618 erreicht der Körnermais Anfang Oktober das Vollreifestadium, ab dem keine weitere Biomassebildung und Stickstoffaufnahme stattfindet. Auch hier unterschätzt das Modell in der Tendenz noch das Ertragspotenzial der modernen Züchtungen.

5.2.3.5 Grundwasserneubildung und Nitrat auswaschung bei Projektfläche H2318

Wie bei H618 findet der größte Teil der Auswaschung während der vegetationsfreien Periode in den Wintermonaten statt (**Abbildung 5.9**). Von Simulationsbeginn bis November 2010 verlaufen die Kurven der kumulierten Grundwasserneubildung und Nitrat auswaschung mehrheitlich parallel. Die Nitratkonzentration im Sickerwasser ist demnach geringen Schwankungen ausgesetzt. Durch die verstärkte Mineralisierung unter Feldsalat sowie dessen reichliche Düngung im Verhältnis zur N-Aufnahme steigt die N-Auswaschung gegenüber der Sickerwassermenge und damit auch die N-Konzentrationen signifikant an. 54% des gesamten N-Austrags während der Simulationsperiode entfallen auf die letzten 8 Monate unter Feldsalat beziehungsweise der nachfolgenden Schwarzbrache vor der Saat des Körnermais.

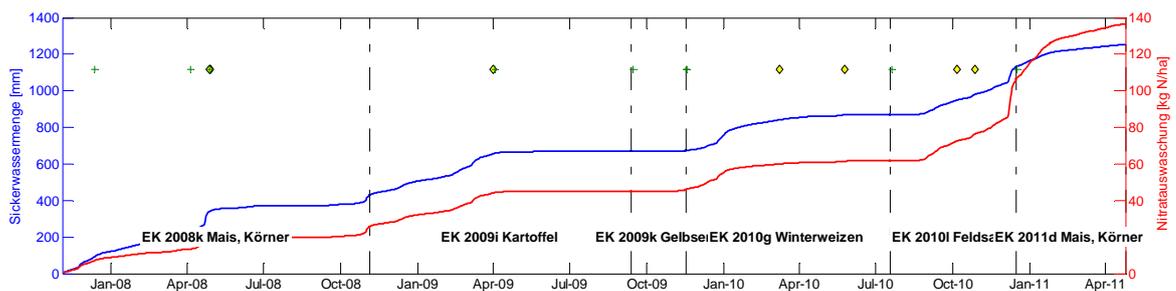


Abbildung 5.9: Grundwasserneubildung und Nitrat auswaschung auf Fläche H2318

5.2.4 Diskussion der Expert-N Projektflächensimulationen

Im Allgemeinen liefern die gezeigten Projektflächensimulationen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Wasser- und Nitratgehalten in allen Profilabschnitten. Darüber hinaus stimmt die modellierte Pflanzenentwicklung mit den beobachteten BBCH Stadien sehr gut überein. Auch die gemessenen Ernteerträge werden vom Modell befriedigend re-

produziert. Die Validierung des Modells kann durch den Vergleich mit unabhängigen Messungen als erfolgreich angesehen werden. Eine zutreffende Parametrisierung für die lokalen Gegebenheiten im Projektgebiet ist also gewährleistet. In Einzelfällen ergeben sich jedoch größere Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Werten, die im Folgenden diskutiert werden.

Zunächst ist festzuhalten, dass auch die Messungen sowohl der Wassergehalte als auch der Nitratgehalte grundsätzlich fehlerbehaftet sein können. Es ist daher zwingend erforderlich auch Plausibilitätsüberprüfungen durchzuführen, damit unrealistische Werte, wie z. B. erhöhte Wassergehalte infolge von Probenahmen bei Regen oder Schnee oder erhöhte Nitrat- und Ammoniumstickstoffgehalte wie sie z.B. bei Probenahmen kurz nach Düngungen aufgrund der Erfassung von Düngemittelteilchen auftreten, nicht zur Bewertung herangezogen werden. Darüber hinaus müssen auch einzelne Ausreißer deren Ursache unklar ist, wie z. B. der Wassergehalt der Messung vom 28.01.2009 bei H618, von der Bewertung ausgeschlossen werden.

Angaben zu Ernteerträgen sind mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Sie beruhen entweder auf im Projekt gemessenen Stichproben oder auf Angaben bzw. Einschätzungen der Landwirte. Auftretende Unterschiede zwischen Messung und Simulation beruhen daher nicht grundsätzlich auf einer nicht adäquaten Beschreibung durch das Pflanzenmodell.

Es bestehen jedoch auch einige grundsätzliche Einschränkungen des gewählten, aktuellen Modellansatzes, die im Wesentlichen häufig die beobachteten Abweichungen zwischen den erzielten Modellergebnissen und Messungen / Beobachtungen im Einzelfall begründen und in die Interpretation der Ergebnisse einzubeziehen sind:

- Klimatische und pflanzenphysiologische Einzelereignisse wie Hagel- und Sturmschäden oder Pilz- und Schädlingsbefall können vom Modell nicht automatisch abgebildet werden.
- Aufgrund der verfügbaren Datengrundlage und im Hinblick auf die Zielsetzung der Regionalisierung konnte für die verschiedenen Bodenarten im Projekt nur ein einheitlicher Mineralisierungsansatz berücksichtigt werden.
- Das mittlere Verhalten der dreidimensionalen Strukturen beim Spargelanbau mit Gasen und Dämmen wird nur durch ein eindimensionales Modell abgebildet.
- Der Einfluss von Abdeckfolien beim Spargel- und Kartoffelanbau kann im Modell bisher nicht abgebildet werden.
- Der Einfluss der gehemmten Nitrifikation stabilisierter Dünger kann im aktuellen Modell nur sehr eingeschränkt bzw. stark vereinfacht nachgebildet werden.
- Das Pflanzenmodell der Kartoffel unterschätzt grundsätzlich noch leicht die N-Aufnahme der aktuellen Kartoffelsorten in ihre unterschiedlichen Pflanzenteile.
- Die Geschwindigkeit der N-Resorption bei Winterweizen wird überschätzt.

Trotz dieser Einschränkungen erlauben die Projektflächensimulationen das Verhalten einzelner Fruchtfolgen auf Referenzstandorten im Projektgebiet im zeitlichen Verlauf abzubilden.

Die Simulation der Projektfläche H618 zeigt, dass der N-Austrag unter Körnermais in Monokultur auf mittlerem Boden durch angepasste Bewirtschaftung und zurückhaltende Düngung auf Werte unter 30 kg N/ha/a reduziert werden kann.

Die Simulationen der Projektfläche H2318 verdeutlicht den negativen Einfluss der Zwischenfrucht Feldsalat. Die Anregung der Mineralisierung, Düngung und geringe N-Resorption führen hier zu Spitzenwerten des N-Austrags.

Zusätzlich zeigt die Simulation bei H80 (hier nicht dargestellt) deutliche N-Verluste während der Wachstumsperiode an. Auch wenn die Simulationen der meisten Standorte keine oder nur geringfügige N-Auswaschungen während der Wachstumsperiode anzeigen, so können spezielle Bewirtschaftungsweisen (i. e. Fruchtfolge, Düngung) oder ungewöhnliche klimatische Verhältnisse zu signifikanten Auswaschungen auch in der Haupt-Vegetationsperiode führen. Von Expert-N werden bei entsprechender Bodenfeuchte auch Sickerungs- und Auswaschungsereignisse während der Vegetationsperiode simuliert.

Die frühe und hohe Düngung des Körnermais 2008 auf der hier nicht dargestellten Projektfläche H2202 führt gegenüber H618 zu signifikant erhöhten N-Verlusten. Dies verdeutlicht zum einen den offensichtlichen Einfluss der Düngemenge auf den N-Austrag. Andererseits wird die Bedeutung des Düngetermins im Hinblick auf die aktuelle Bodenfeuchte und die Niederschlagssummen und –intensitäten der Folgeperiode deutlich. Bei ungünstigem Düngetermin, einem hohen Ausgangsgehalt der Bodenfeuchte und nachfolgend erheblichen Niederschlägen mit Sickerungsvorgängen zwischen Düngung und Hauptvegetationsperiode, können trotz relativ kleiner Düngemengen erhebliche N-Verluste auftreten. Der sorgfältigen und situationsbezogenen Bemessung der Düngergaben kommt deshalb große Bedeutung zu. Ebenfalls kann gesagt werden, dass den Einflussmöglichkeiten des Landwirts aufgrund der begrenzten Vorhersagbarkeit des Wettergeschehens und wegen wirtschaftlicher Zwänge bei der Anzahl der Düngetermine auch Grenzen gesetzt sind.

5.3 Gegenüberstellung ausgewählter Modellierungsergebnisse von INVAM und Expert-N

Für einen Vergleich der Modellierungsergebnisse von INVAM und Expert-N wurden zunächst die berechneten Sickerwassermengen einander gegenübergestellt. Hierzu wurden die täglichen Sickerwassermengen über ein Jahr jeweils bis zum 01.04. aufsummiert. Bei INVAM erfolgte die Berechnung mit Hilfe einer klimatischen Wasserbilanz unter Einbeziehung der bei den Probennahmeterminen gemessenen Wassergehalte (vgl. Abschnitt 3.1.1), weshalb die Ergebnisse auf Basis der Probennahmezeiträume dargestellt sind, während die von Expert-N berechneten Ergebnisse auf Tageswertbasis dargestellt sind (vgl. Abschnitt 3.1.2). Hinsichtlich des Starttermins der Berechnungen unterscheiden sich die beiden Modelle dahingehend, dass

Expert-N die Wasser- und N-Bilanz kontinuierlich auf Tagesbasis ab Beginn der Simulationsperiode 2008 simuliert, während die INVAM-Berechnungen mit dem ersten Probennahmetermin beginnen. Daher sind für den Zeitraum 01.01.2008 bis zum ersten Probennahmetermin (etwa zum Projektbeginn) nur die von GHC berechneten Sickerwassermengen und Nitratauswaschungen dargestellt. Ein Vergleich der beiden Berechnungen ist erst ab dem ersten Probennahmetermin möglich, der je nach Projektfläche (und Kultur) zwischen April und November 2008 lag. Falls im April 2009 bzw. 2010 ein Probennahmetermin stattfand, wurde die Aufsummierung zu diesem Termin zurückgesetzt. Falls kein Probennahmetermin im April stattfand und es (nach der INVAM-Berechnung) zu keiner Sickerwasserbildung kam, wurde die Aufsummierung jeweils am 20./21.04. zurückgesetzt.

Im Jahr 2011 erfolgten die INVAM-Berechnungen bis zum Probennahmetermin Ende April /Anfang Mai, die Expert-N-Berechnungen bis zum 25.04.2011.

Beim Vergleich der einzelnen Zeiträume untereinander ist zu berücksichtigen, dass der erste betrachtete Zeitraum 2008/2009 in der Regel kürzer als ein Jahr ist, während die beiden folgenden Zeiträume ein vollständiges Jahr berücksichtigen.

Am Ende der nachfolgenden Vergleiche (Abschnitte 5.3.1 und 5.3.2) erfolgt eine zusammenfassende Beschreibung und Bewertung (Abschnitt 5.3.3).

5.3.1 Vergleich der Modellierungsergebnisse für H618

Fruchtfolge: 2008: Körnermais / Brache - 2009: Körnermais / Brache -
2010: Körnermais / Brache - 2011: Körnermais

Die INVAM-Simulationsergebnisse für diese Fläche sind in Abschnitt 5.1, die Expert-N-Simulationsergebnisse sind in Abschnitt 5.2.2 näher erläutert.

Abbildung 5.10 zeigt eine Gegenüberstellung der von GHC (orange) und TZW (magenta) berechneten Sickerwassermengen, die im Projektzeitraum unter der Fläche H618 angefallen sind.

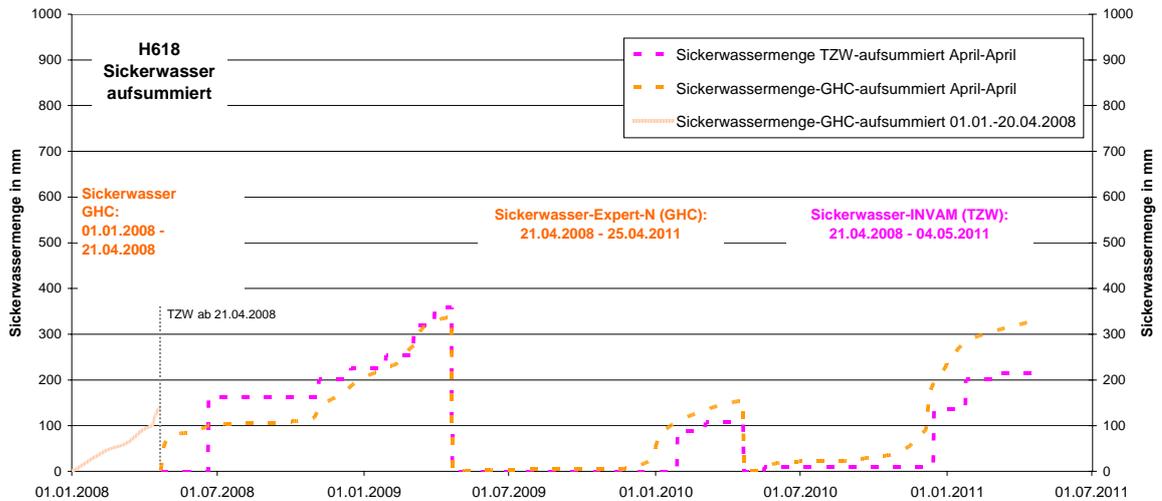


Abbildung 5.10: Vergleich der von Expert-N und INVAM berechneten Sickerwassermengen für H618 (jeweils April-April aufsummiert)

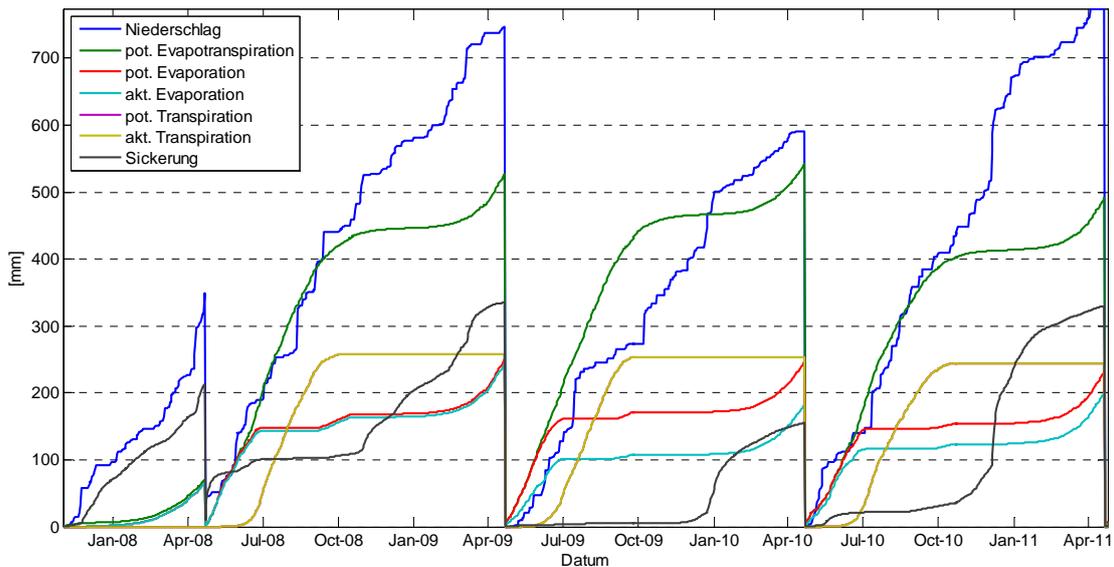


Abbildung 5.11: Expert-N Wasserbilanzglieder während der INVAM Simulationszeiträume

Abbildung 5.11 schlüsselt die einzelnen Bilanzglieder der Wasserbilanz, wie sie von Expert-N berechnet wird, auf. Die Sickerung ergibt sich demnach als Differenz zwischen Niederschlag und den aktuellen Verdunstungsgrößen. Die schwarze Linie „Sickerung“ in Abbildung 5.11 entspricht der orangenen Linie in Abbildung 5.10.

Abbildung 5.12 zeigt auf Basis der berechneten Sickerwassermengen für die mit Hilfe von INVAM (magenta) und Expert-N (orange) berechneten Nitrat- auswaschungen (Summenwerte) für die Projektfläche H618.

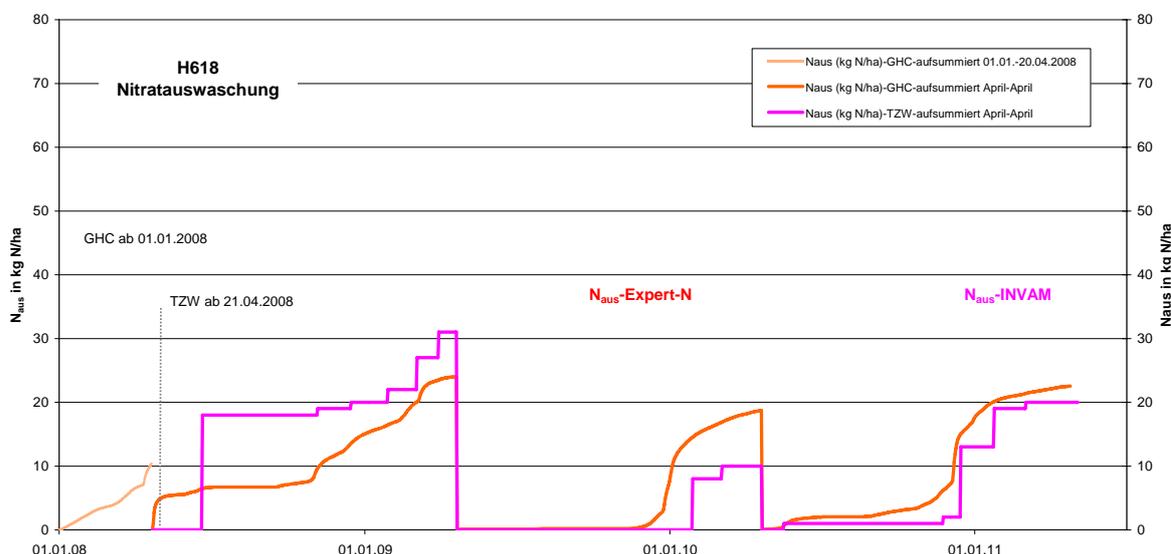


Abbildung 5.12: Vergleich der mit Expert-N (GHC) und INVAM (TZW) berechneten Nitrat- auswaschungen für H618 (jeweils April-April aufsummiert)

Aufgrund der Vielzahl an Bilanzgliedern des Stickstoffkreislaufs wird auf eine mit Abbildung 5.12 vergleichbare Darstellung zu Gunsten der Übersichtlichkeit verzichtet.

In der **Tabelle 5.7** werden die Summenwerte der berechneten Sickerwassermengen und der von INVAM und Expert-N berechneten Nitrat- auswaschungen für H618 zum Vergleich einander zusätzlich tabellarisch gegenübergestellt.

Tabelle 5.7: Gegenüberstellung der berechneten Sickerwassermengen und der von INVAM und Expert-N berechneten Nitrat- auswaschungen für H 618.

H618 Zeitraum	Sickerwassermengen in mm			Nitrat- auswaschung in kg N/ha		
	INVAM	Expert-N	Differenz	INVAM	Expert-N	Differenz
21.04.2008 - 20.04.2009	358	337	- 21	31	24	- 7
21.04.2009 - 20.04.2010	107	155	+ 48	10	19	+ 9
21.04.2010 - 25.04.2011	214	329	+ 115	20	23	+ 3
Gesamt	679	821	+ 142	61	66	+ 5

Insgesamt ist für die Projektfläche H618 eine gute Übereinstimmung bei den Sickerwasser- mengen (Ausnahme 2010/11) und eine sehr gute Übereinstimmung bei den berechneten Nit- rat- auswaschungen festzustellen.

Generell zeigt die Berechnung der N-Auswaschung mit Expert-N geringere Unterschiede zwischen den Beobachtungsperioden als INVAM. Dabei stimmen beide Modelle in der tendenziell verringerten N-Auswaschung 2009/2010 überein.

5.3.2 Vergleich der Modellierungsergebnisse für H2318

Fruchtfolge: 2008: Körnermais/Brache – 2009: Kartoffeln (spät) / Senf / Winterweizen – 2010: Winterweizen / Feldsalat – 2011: Körnermais

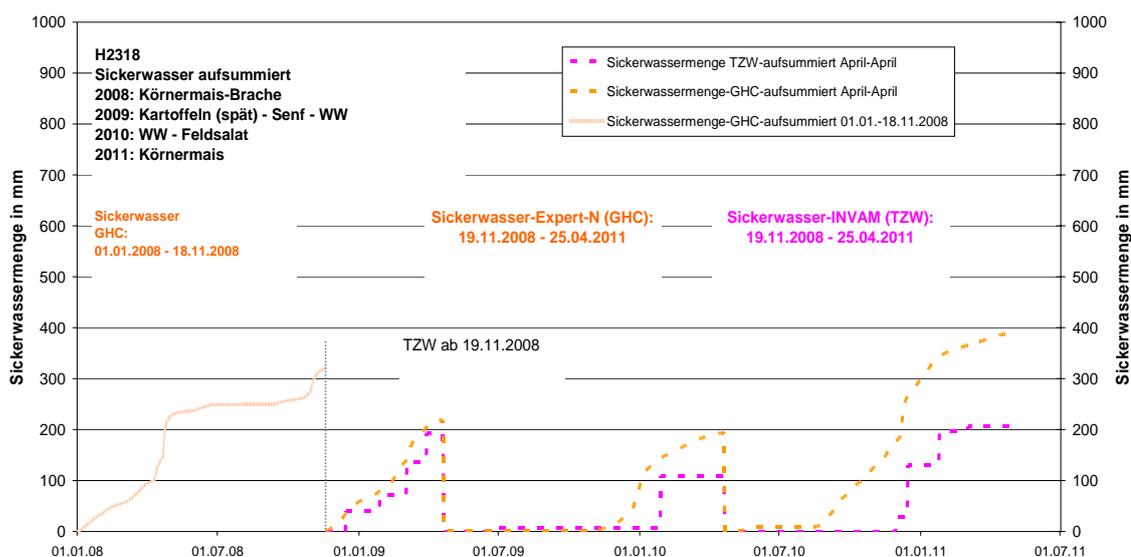


Abbildung 5.13: Vergleich der von Expert-N und INVAM berechneten Sickerwassermengen für H2318 (jeweils April-April aufsummiert)

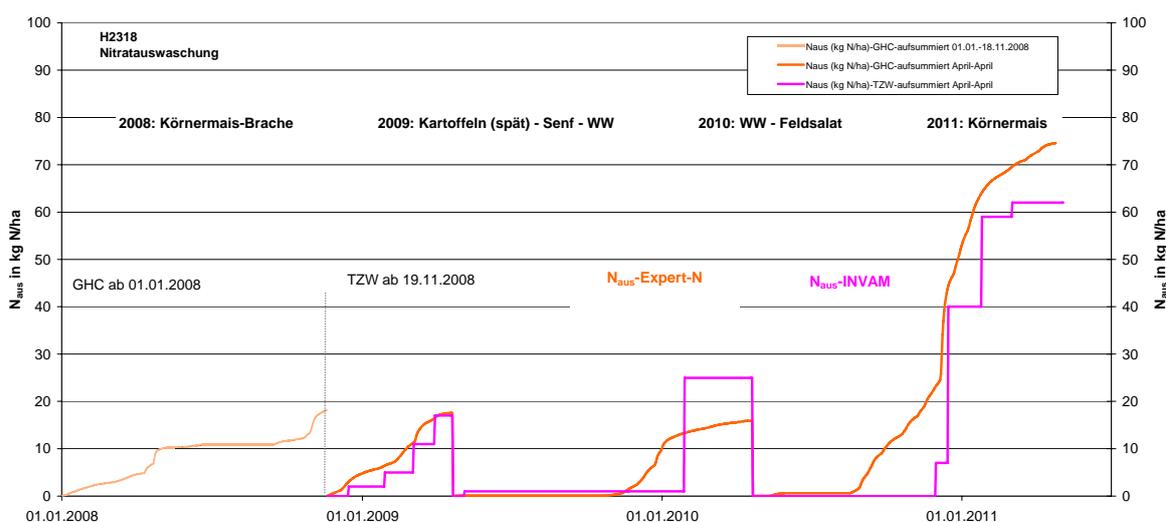


Abbildung 5.14: Vergleich der mit Expert-N (GHC) und INVAM (TZW) berechneten Nitrat-Auswaschungen für H2318 (jeweils April-April aufsummiert)

Tabelle 5.8: Gegenüberstellung der berechneten Sickerwassermengen und der von INVAM und Expert-N berechneten Nitrat auswaschungen für H 2318.

H2318 Zeitraum	Sickerwassermengen in mm			Nitrat auswaschung in kg N/ha		
	INVAM	Expert-N	Differenz	INVAM	Expert-N	Differenz
19.11.2008 - 20.04.2009	193	218	+ 25	17	18	+ 1
21.04.2009 - 20.04.2010	109	194	+ 85	25	16	- 9
21.04.2010 - 25.04.2011	206	387	+ 181	62	74	+ 12
Gesamt	508	799	+ 291	104	108	+ 4

Vergleich: 2008/09 sehr gute Übereinstimmung,
 2009/10 Sickerwassermengen deutlich höher, Nitrat auswaschung niedriger,
 2010/11 Sickerwassermengen deutlich höher, Nitrat auswaschung etwas höher

Da die Pflanzenentwicklung des Winterweizens 2010 erst im April einsetzt, wird die Transpiration in Expert-N ab Ernte der Vorfrucht September 2009 bis April 2010 unterbunden. Dies führt im Vergleich zu INVAM zu höherer Sickerwasserbildung.

Expert-N schätzt die Transpirationsleistung des Feldsalats sehr gering. Dies erklärt die hohe Sickerwassermenge im Winter 2010/2011.

Die niedrigere N-Auswaschung im Winter 2009/2010 erklärt sich durch die nachhaltige N-Fixierung des Gelbsenfes, der einen Großteil des Stickstoffs aus den Pflanzenrückständen der Kartoffelvorfrucht vor der Auswaschung bewahrt. Infolge der Winterweizeneinsaat am 18.11.2009 und der hohen Niederschläge zwischen den Probennahmeterminen Mitte Dezember 2009 und Ende Januar 2010 kommt es infolge von Mineralisierungseffekten zur Freisetzung von Nitratstickstoff aus den eingearbeiteten Senfpflanzen und einer Auswaschung von 24 kg N/ha (INVAM) in diesem Zeitraum.

Nach der Winterweizenernte im Juli 2010 lagen mit 9 kg N/ha sehr niedrige Nitratstickstoffgehalte vor, die nach der Bodenbearbeitung zur Feldsalateinsaat zunächst Anfang Oktober auf knapp 57 kg N/ha anstiegen. Nach der Düngung von 2 x 25 kg N/ha Anfang und Ende Oktober 2010 lagen Ende November Nitratstickstoffgehalte von 96 kg N/ha vor, die bis Ende Januar 2011 infolge einer N-Auswaschung in Höhe von 52 kg N/ha (INVAM) wieder bis auf 57 kg N/ha abnahmen. Die deutlich höhere N-Auswaschung im Winter 2010/2011 ist mit den höheren Nitratstickstoffgehalten infolge der Düngung des Feldsalats im Oktober und mit der erhöhten Sickerwasserbildung während der Vegetationsperiode des Feldsalats begründbar.

5.3.3 Diskussion des Vergleichs von Expert-N und INVAM

Die möglichen Ursachen der Unterschiede werden im Folgenden diskutiert:

- Bei den dargestellten Flächen H618 und H 2318, sowie der nicht dargestellten Fläche H80 kann die Übereinstimmung der Modellergebnisse überwiegend als gut bezeichnet werden.
- Bei den hier nicht detailliert vorgestellten Projektflächen H2202 und dem Spargelkollektiv H290&H129 traten deutliche Unterschiede bei den Modellergebnissen auf, deren Ursachen nicht abschließend geklärt werden konnten. Qualitativ dürften jedoch folgende Unterschiede in der grundsätzlichen Vorgehensweise bzw. in der Berechnung der Sickerwassermengen und der N-Auswaschung innerhalb der Modelle dafür verantwortlich sein:
- Die höhere Sickerwassermenge von Expert-N gegenüber INVAM ist durch folgende Punkte begründet:
 - Verwendung der Richards-Gleichung mit kontinuierlicher Sickerung im Gegensatz zu Kapazitätsansätzen mit binärem „aus/an“.
 - Als Basis für die Simulationen werden unterschiedliche Verdunstungsberechnungen eingesetzt. Bei der Verdunstungsberechnung mit Haude (INVAM) ist zu beachten, dass es sich dabei um pauschale kulturspezifische Faktoren handelt, welche die tatsächliche Pflanzenentwicklung bzw. die Abweichung von der „normalen“ Entwicklung nicht wiedergeben. Haudefaktoren liegen nicht für alle Kulturen vor. Daher mussten bei Feldsalat, Spargel und Erdbeere vereinfachende Annahmen getroffen werden (vgl. Abschnitte 3.1.1 und 3.1.2.1). Darüber hinaus liefert Haude nur Werte der potentiellen Verdunstung. Die Reduktion auf aktuelle Verdunstung in Folge trockener Böden ist nicht berücksichtigt.
 - Bei Expert-N ist die Transpiration abhängig vom aktuellen LAI. Dieser ist für eine Kulturart nicht konstant, sondern entwickelt sich mit fortschreitender Pflanzenentwicklung; Direkt nach der Saat ist der LAI Null und damit die Transpiration. Im Vergleich zur Pauschalisierung mit konstantem Haude-Faktor führt diese Vorgehensweise zu niedrigeren Transpirationsmengen im Beginn der Anbauperiode wenn die Vegetation noch nicht ausgebildet ist.
- Die höhere Nitratauswaschung von Expert-N gegenüber INVAM ist durch folgende Punkte begründet:
 - höhere Sickerwassermenge bedingt verstärkte Auswaschung
 - Humusmineralisierung als zusätzliche Quelle (je nach Bodenart)
- INVAM-Berechnungszeiträume stimmen nicht notwendig mit vegetationsfreien Zeiträumen überein, bzw. Auswaschung kann auch während der Vegetationsperiode

stattfinden. Für Aussagen hierüber ist INVAM nur eingeschränkt einsetzbar und kann lediglich Hinweise auf größere Auswaschungsereignisse geben, falls zeitlich enge Probennahmen vorliegen.

- Die Mineralisierung von Vorfrucht-Pflanzenrückständen (organische Düngung) ist mit großen Unsicherheiten bezüglich des Zeitpunktes behaftet.
- Die Denitrifikationsberechnung mit Expert-N berücksichtigt Wassergehalt, Temperatur und Stickstoffmengen in den verschiedenen Bodenpools. Die Parametrisierung ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet. Die INVAM-Berechnungen geben lediglich Hinweise über die Größenordnung erforderlicher negativer Anpassungen (z.B. Denitrifikation, Pflanzenentzug).

Fazit: Insgesamt wurden die Modellierungsergebnisse von fünf Projektflächen bzw. Kollektive detailliert miteinander verglichen. Bei drei Projektflächen mit unterschiedlichen Fruchtfolgen wurden gute Übereinstimmungen der Modellergebnisse erzielt, bei zwei Kollektiven traten größere Unterschiede auf, deren Ursachen im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht vollständig geklärt werden konnten.

Die mit Expert-N berechnete N-Auswaschung liegt aus den aufgeführten Gründen (höhere Sickerung, etc., s.o.) in der Tendenz in gleichen Berechnungszeiträumen meist etwas höher als die mit INVAM berechnete N-Auswaschung.

Mit INVAM können unabhängig von Kultur und Standort Berechnungen der N-Auswaschungen durchgeführt werden, wenn die erforderlichen Eingangsdaten (vgl. Abschnitt 3.1.1) und zeitlich enge Probennahmen vorliegen. Eine Kalibrierung ist nicht erforderlich.

Mit Expert-N lassen sich gesicherte Aussagen zur N-Auswaschung über die gesamte Vegetationsperiode machen, wenn zuverlässige Pflanzenmodelle und betriebsübliche Bewirtschaftungsdaten (Schlagkarteien) zur Verfügung stehen, wie es im vorliegenden Projekt der Fall ist (siehe Kapitel 8).

6 Regionalisierung der Modellierungsergebnisse

Grundlage der Regionalisierung sind Landnutzungsdaten mit Angabe der Haupt- und Zwischenfrucht die von badenova zum 15.6. der Jahre 2008 bis 2010 erhoben wurden.

6.1 Gebietsaustrag mit Expert-N

6.1.1 Hydraulische Bodeneigenschaften

Um die hydraulischen Eigenschaften der Grundflächen für die Wasserhaushaltsimulation in Expert-N zu erfassen, wurde das Projektgebiet anhand pedogenetischer Einheiten in Zonen gleicher Bodeneigenschaften gegliedert (Pedotope). Den Pedotopen wurden Typprofile zu-

gewiesen, welche die notwendigen hydraulischen Charakteristika bereitstellen (siehe Abschnitt 2.3.2.2 (Bodeneigenschaften)). Im Unterschied zur Simulation der Projektflächen, die direkt auf die individuellen Profile der SOLUM Bodenbeschriebe oder der Reichsbodenschätzung zurückgreifen, stellt hier die Verwendung von wenigen Typprofilen die robuste Simulation des Wasserhaushalts auf allen Grundflächen sicher.

6.1.2 Standardbewirtschaftungen

Die Standardbewirtschaftungen, aus denen die Simulationssequenzen aufgebaut wurden, sind in Tabelle B6.1 im Tabellenanhang aufgelistet.

6.1.3 Bodennutzung

Die Auswertung der Bodennutzung auf Grundflächenbasis zeigt, dass von den 1788 ha Projektfläche etwa 68% während des gesamten Projektzeitraums landwirtschaftlich genutzt werden (ca. 1208 ha). Mit den zur Verfügung stehenden können 92% (entspricht ca. 1108 ha und 1713 Einzelflächen) der landwirtschaftlich genutzten Fläche direkt mit Expert-N simuliert werden.

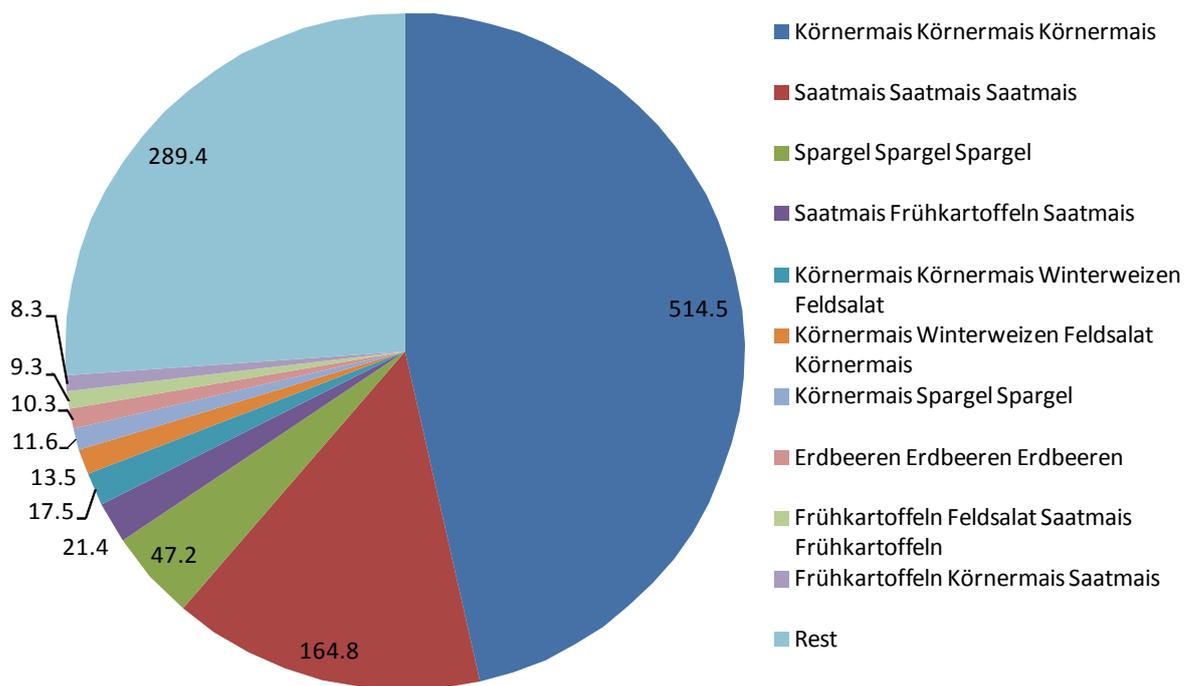


Abbildung 6.1: Anteile der 10 häufigsten Nutzungssequenzen und deren Flächenanteile in Hektar

Abbildung 6.1 zeigt die flächenmäßigen Anteile der zehn häufigsten Nutzungssequenzen (Fruchtfolgen) an der simulierten landwirtschaftlichen Nutzfläche. Die bei weitem häufigste Nutzungsfolge ist demnach Körnermais in Monokultur mit 515 ha, gefolgt von Saatmais in Monokultur mit 165 ha. Die dritthäufigste Fruchtfolge ist Spargel mit 47 ha. Schon die vierthäufigste Fruchtsequenz (Saatmais, Frühkartoffel, Saatmais) hat mit 21 ha nur noch einen

prozentualen Anteil von weniger als 2% an der gesamten Simulationsfläche. Das bedeutet, dass eine Vielzahl von individuellen Fruchtfolgen, die nur auf wenigen Flächen anzutreffen sind, dennoch einen bedeutenden Teil der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche ausmachen. Dies rechtfertigt den höheren Rechenaufwand bei der Simulation einzelner Grundflächen gegenüber der Betrachtung von Nutzungskollektiven mit gleichen Nutzungssequenzen. Mit verlängerten Simulationszeiträumen wird die Betrachtung von Nutzungskollektiven immer schwieriger, da der Wechsel der Anbaufrucht von Jahr zu Jahr notgedrungen zur Verkleinerung der Kollektive bis hin zu Einzelflächen mit individueller Nutzungshistorie führt. Mit der Simulation von Einzelflächen kann die Auswertung mit relativ geringem Aufwand in den Folgejahren fortgeführt werden.

6.1.4 Pauschalisierung nicht simulierter Flächen

Für nicht landwirtschaftlich genutzte Flächen und solche, für deren Fruchtfolge keine Pflanzenmodelle zur Verfügung stehen, wurde eine Simulation auf einem Standort im Zentrum des Projektgebiets mit mittleren Bodeneigenschaften (Profil der Projektfläche H618) durchgeführt. Für diese Simulation wurden der pflanzliche N-Entzug und die Humusmineralisierung bzw. –Akkumulation eliminiert um die mittleren Verhältnisse einer Devastierungsfläche wiederzugeben. Die N-Auswaschung entspricht also im Mittel der atmosphärischen Deposition von 18 kg N/a in (11,9 kg N/a Ammonium, 6,1 kg N/a Nitrat) [LUBW (Landesanstalt für Umwelt 2011)]. Die Grundwasserneubildung ist gleich dem Niederschlag (ca. 758 mm/a) minus Evaporationsverluste (ca. 28%).

Die **Tabelle 6.1** zeigt die Grundwasserneubildung und den Stickstoffaustrag der Devastierungsfläche, auf deren Basis die Abschätzung der Austräge nicht-simulierter Flächen erfolgt. Auffällig ist die geringere N-Auswaschung 2009 in Folge der verminderten Grundwasserneubildung. Mit konstanter atmosphärischer Deposition ist daher Ende der Auswertungsperiode 2009 eine größere Menge freien Stickstoffs im Boden gespeichert, die dann in der Auswertungsperiode 2010 ausgewaschen wird.

Tabelle 6.1: Übersicht Devastierungsfläche

Jahr	2008	2009	2010
Niederschlag (mm)	824	628	668
Grundwasserneubildung (mm)	604	394	487
Stickstoff Eintrag ¹ (kg N/ha)	18	18	18
Nitrat Auswaschung (kg N/ha)	18	11	20

¹beinhaltet atmosphärische Deposition

Abbildung 6.2 zeigt die Zeitreihen der Grundwasserneubildung und Nitratauswaschung auf der simulierten Devastierungsfläche. Die Kurven verlaufen weitgehend parallel mit leicht erhöhter Sickerung gegenüber der N-Auswaschung von April 2008 bis etwa April 2009. Die kurzfristige, ereignisbezogene Dynamik des N-Austrags ist zwar stark von der Sickerwaserdynamik abhängig. Im Mittel über mehrjährige Zeiträume ist der N-Austrag im Modell jedoch durch die N-Bilanz, hier dem atmosphärischen Eintrag, vorgegeben und damit weit-

gehend unabhängig von Niederschlag und Sickerung. Langfristige Speicheränderungen durch Humusakkumulation oder –Mineralisierung wurden ausgeschlossen.

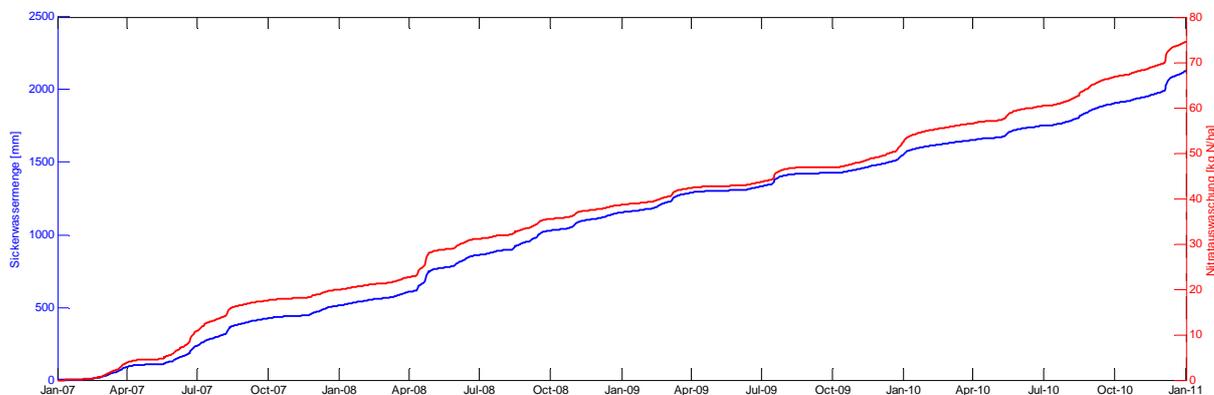


Abbildung 6.2: Nitratauswaschung und Grundwasserneubildung ohne Pflanzenwachstum

Für die Auswertung nicht simulierter Flächen wurden Grundwasserneubildung und N-Auswaschung mit nutzungsspezifischen Faktoren multipliziert, die die Zeitreihen der Devastierungsfläche an die N-Aufnahme und Transpirationsleistung der jeweiligen Nutzungsart anpassen. Die Korrekturfaktoren wurden von Ergebnissen der Untersuchungen „Modellierung des N-Austrags im gefährdeten Grundwasserkörper Markgräflerland (16.8)“ [LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg) 2009b] und „Gefährdete Grundwasserkörper in Baden-Württemberg“ [LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg) 2009a] des LTZ abgeleitet.

Die Beaufschlagung der Devastierungsfläche dient der geschlossenen flächendeckenden Simulation des Projektgebiets. Die Faktoren liefern grobe Abschätzungen der Sickerwassermenge und Nitratauswaschung unter den angegebenen Flächennutzungen und sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Für die genauere Abschätzung der N-Auswaschung von Siedlungsflächen und Straßen werden gesonderte Untersuchungen angeregt. Der N-Eintrag ins Projektgebiet bzw. die Verdünnung der N-Konzentration im Grundwasser über die oberirdischen Zuflüsse aus Neumagen und Möhlin können im Rahmen der Grundwassermodellierung des WSG Hausen abgeschätzt werden.

6.1.5 Auswertungszeitraum

Wie bei den Projektflächensimulationen wurde für die Auswertung des gesamten Projektgebiets die Periode vom 15. Oktober des Vorjahres bis zum 15. Oktober des Auswertungsjahres herangezogen.

6.1.6 Karten des jährlichen Gebietsaustrags

Zwei beispielhafte Karten des jährlichen Gebietsaustrags für die Auswerteperioden 2008 und 2010 sind im Folgenden wiedergegeben.

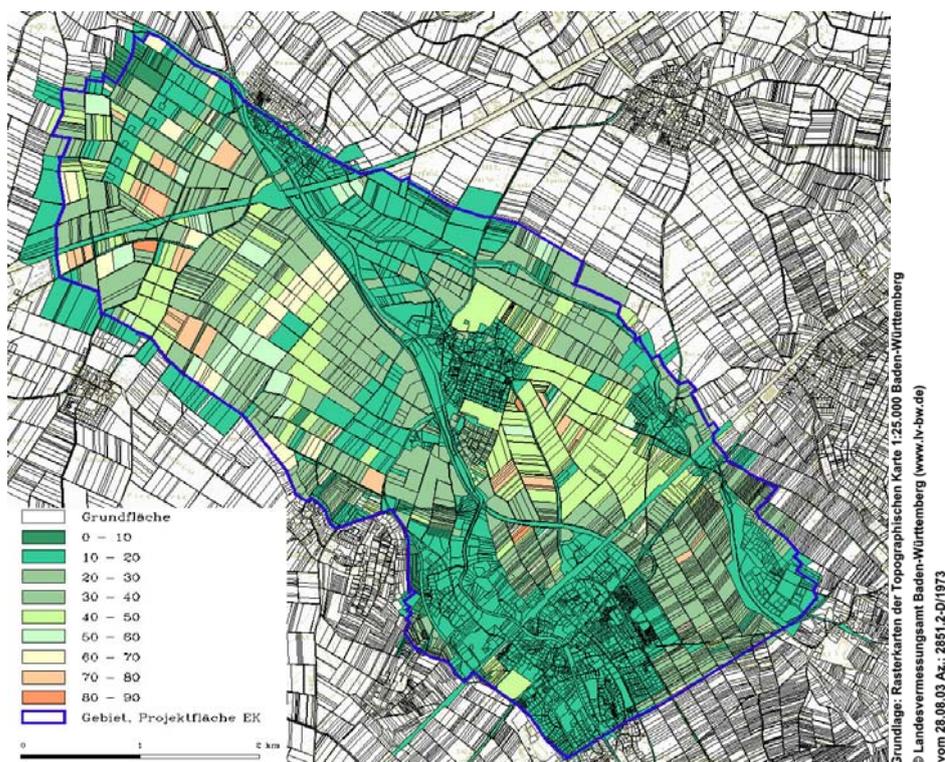


Abbildung 6.3: Modellierter Gebietsaustrag 2008 (Expert-N)

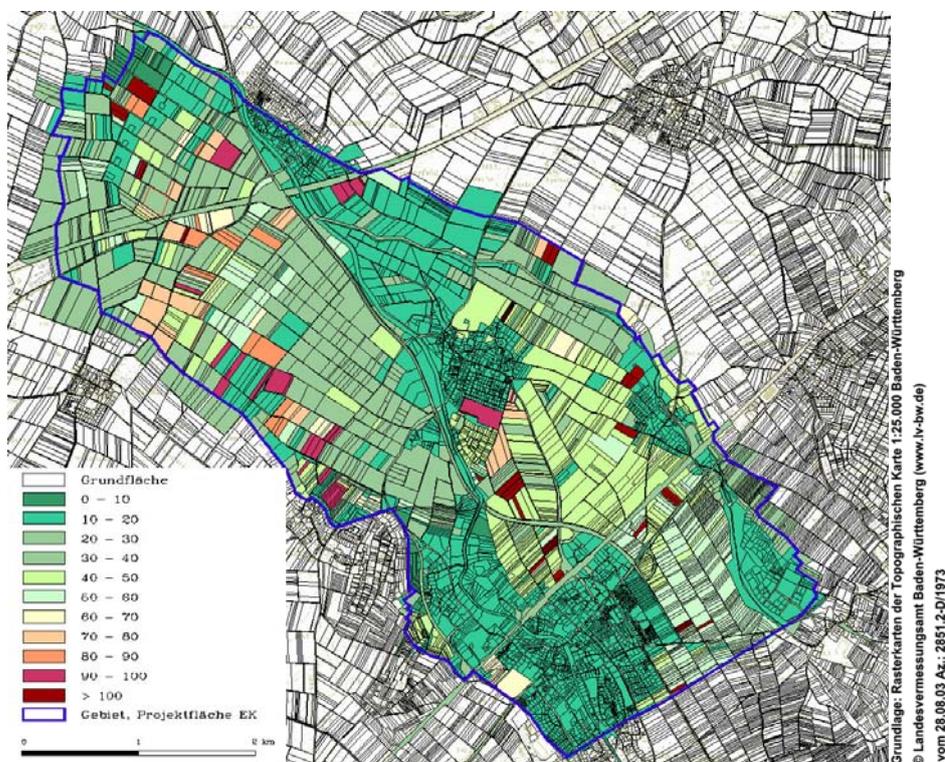


Abbildung 6.4: Modellierter Gebietsaustrag 2010 (Expert-N)

Abbildung 6.4 und 6.3 zeigen beispielhaft den N-Austrag der Auswertungsperioden 2010 und 2008 für das gesamte Projektgebiet. Randständige Grundflächen, die nur teilweise das Projektgebiet überdecken und deren Nutzung nicht kartiert worden ist, wurden aus Gründen der Konsistenz wie Devastierungsflächen behandelt, obwohl ihr Beitrag zum Gesamtsaustag gemäß ihrem Flächenanteil vernachlässigbar ist.

In den Karten zeichnet sich deutlich das Muster der Bodennutzung, besonders das der Siedlungs- und Verkehrsflächen ab. So tragen die bebauten Flächen der Ortschaften Bad Krozingen, Biengen, Hausen und Offnadingen aufgrund der atmosphärischen Deposition mit 10 bis 20 kg N/ha zum Gebietsaustag bei. Darüber hinaus bilden sich die Pedotope aufgrund gleicher hydraulischer Eigenschaften in den Karten heraus. So zeigen Pedotop 14 (Pararendzina) südöstlich von Biengen und Pedotop 6 (Brauner Auenboden und Gley), flächenmäßig die beiden größten Pedotope, die höchsten Auswaschungen. Die Tendenz der Auswaschung im Vergleich der Jahre 2008 bis 2010 zeigt einen ähnlichen Verlauf wie bei der Devastierungsfläche, mit der höchsten Auswaschung 2010 nach der langen Periode ohne signifikante Grundwasserneubildung.

Auffällig sind die großen Unterschiede der N-Auswaschung zwischen den Jahren. So überschreitet die Auswaschung 2008 nie die Marke von 85 kg N/ha (vgl. Abbildung 6.3) während 2010 auf einzelnen Standorten weit über 100 kg N/ha ausgetragen werden (vgl. Abbildung 6.4). Die hohen Spitzenwerte sind bodenunabhängig über das gesamte Projektgebiet verteilt. Werte über 90 kg N/ha sind nur auf Flurstücken mit den Kulturarten Feldsalat nach Winterweizen, Spargel und Erdbeere zu beobachten. Damit verdeutlicht die Karte den entscheidenden Einfluss der Kulturart und Fruchtfolge auf den N-Austrag.

6.1.7 Gebietsbilanz

Die **Tabelle 6.2** zeigt die Werte der mittleren Grundwasserneubildung, N-Frachten und N-Konzentration für das gesamte Projektgebiet. Für die Bilanzierung wurde nur die innerhalb des Projektgebiets liegende Fläche der Flurstücke berücksichtigt. Als Mittel des Projektgebiets sind die Werte flächengewichtet.

Tabelle 6.2: Gebietsausträge der Auswertungsperioden

Auswaschungsperiode	2008	2009	2010
Mittlere Grundwasserneubildung (mm)	412	275	313
N-Fracht (kg N/ha)	28,3	20,0	31,6
Mittlere Nitrat-Konzentration (mg/L)	30,4	32,2	44,7

Zeiträume bezogen auf die Periode 15.10. des Vorjahres bis 15.10. des angegebenen Jahres

Im Vergleich der Jahre zeigt sich, dass trotz der höchsten Grundwasserneubildung 2008 die höchste N-Auswaschung während der Auswertungsperiode 2010 erfolgte, wohingegen die geringste Grundwasserneubildung 2009 auch mit den niedrigsten N-Auswaschungen zusammenfällt.

Die schwache Korrelation zwischen Grundwasserneubildung und N-Auswaschung spiegelt sich auch in den berechneten N-Konzentrationen im Sickerwasser wieder. Trotz relativ hoher mittlerer N-Fracht 2008 liegt die berechnete Nitrat-Konzentration mit 30,4 mg/L niedriger als 2009 und 2010, was auf Verdünnungseffekte zurückzuführen ist. 2010 ist die N-Auswaschung gegenüber der mittleren Grundwasserneubildung extrem hoch, was zu den höchsten N-Konzentrationen im Sickerwasser führt. Wie im Folgenden gezeigt wird, begründet sich der hohe N-Austrag 2010 gerade mit der verminderten N-Auswaschung 2009 und der damit verbundenen N-Speicherung im Boden.

6.1.8 Variabilität des jährlichen Gebietsaustrags

Die kumulierten Werte der Niederschlagsmenge, Grundwasserneubildung und Nitratauswaschung wurden in Form von Histogrammen für die 1713 simulierten Grundflächen ausgewertet. Diese Histogramme illustrieren die Häufigkeit der erreichten Werte über die Anzahl der simulierten Grundflächen und vermitteln damit einen Eindruck von der Streuung der Niederschlags-, Sickerungs- und Auswaschungswerte um den Median.

Die **Tabelle 6.3** gibt den Median der Niederschlagssumme sowie kumulierte Grundwasserneubildung und Nitratauswaschung während der jährlichen Auswaschungsperiode zusammen mit deren Standardabweichung für die simulierten landwirtschaftlichen Nutzflächen wieder.

Tabelle 6.3: Mittelwert, Standardabweichung und Median der jährlichen Auswaschungsparameter

Auswertungsperiode	Niederschlag (mm)		Grundwasserneubildung (mm)		Nitratauswaschung (kg N/ha)	
	Median	Standardabweichung	Median	Standardabweichung	Median	Standardabweichung
15.10.2007 - 15.10.2008	840	39	399	71	38	14
15.10.2008 - 15.10.2009	638	30	277	40	32	12
15.10.2009 - 15.10.2010	682	29	229	57	42	22

Die erste Reihe der Grafiken in **Abbildung 6.5** zeigt die kumulierten Werte des Niederschlags, der Grundwasserneubildung und der Nitratauswaschung während der drei Auswerteperioden als Punktwolken zum Ende der jeweiligen Auswertungsperiode. Darin repräsentiert jedes Kreuz den Wert einer simulierten Grundfläche. Im Vergleich von Niederschlag und Grundwasserneubildung wird die viel größere Streuung der kumulierten Grundwasserneubildung deutlich, welche hauptsächlich in der unterschiedlichen Transpirationsleistung der verschiedenen Kulturarten begründet liegt. Dies wird durch die Standardabweichung bestätigt, welche im Mittel der drei Jahre für den Niederschlag bei 33 mm und für die Grundwasserneubildung bei 56 mm liegt.

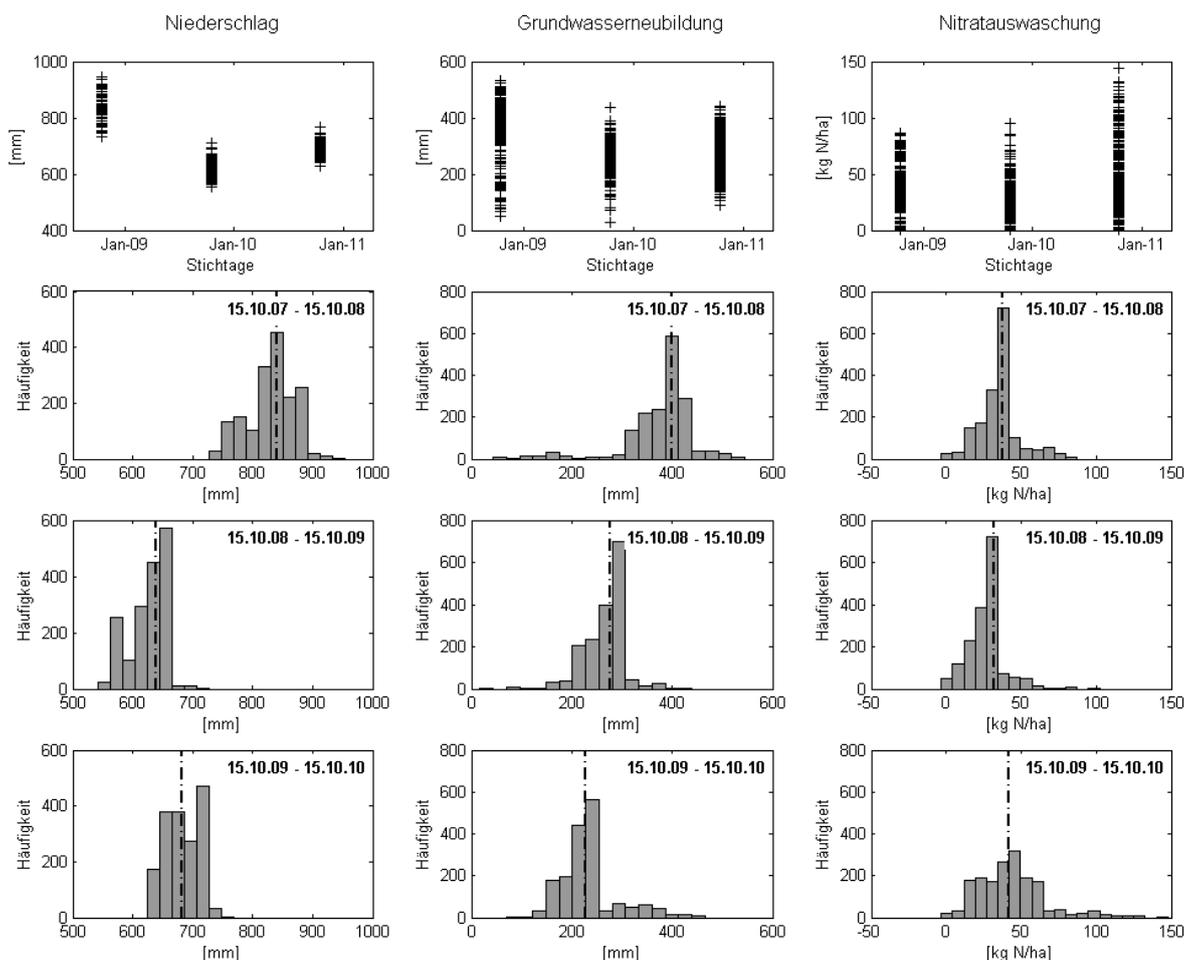


Abbildung 6.5: Histogramme des jährlichen Gebietsaustrags. Der Median ist durch die strich-punktierte Linie gekennzeichnet.

Die Grafiken in den unteren drei Reihen zeigen die Histogramme der jeweiligen Auswertungsperiode. Unterschiedliche Niederschlagssummen auf den Grundflächen ergeben sich aus der Niederschlagsregionalisierung sowie der künstlichen Beregnung. Beim Vergleich der Jahre fällt die deutlich höhere Niederschlagssumme 2008 (Median: 840 mm) gegenüber den Jahren 2009 (Median: 638 mm) und 2010 (Median: 682 mm) auf. Synchron dazu verhält sich die Grundwasserneubildung deren Median von 399 mm in 2008 auf 277 mm und 229 mm in 2009 bzw. 2010 sinkt. Dabei ist die Grundwasserneubildung 2010 trotz höherer Niederschläge rund 50 mm niedriger als 2009. Dies kann durch höhere Tagestemperaturen und damit höhere Evapotranspiration 2010 begründet werden. Die Pflanzenentwicklung und Zusammensetzung der Fruchtarten im Projektgebiet sowie die klimatischen Einflussfaktoren wie relative Luftfeuchte, Lufttemperatur und Sonnenscheindauer können also den Einfluss der Niederschlagsmenge auf die Grundwasserneubildung bis zu einem gewissen Grad kompensieren.

Die Menge des ausgewaschenen Stickstoffs ist nicht direkt von Niederschlagssumme und Grundwasserneubildung abhängig. Dennoch kann die geringe N-Auswaschung 2009 (Median: 32 kg N/ha) mit den geringsten Niederschlägen des Beobachtungszeitraums begründet werden. Die langsamere Wasserbewegung im Vergleich zu feuchteren Jahren begünstigt die Pflanzenaufnahme und verhindert die Auswaschung. Gleichzeitig verlangsamen niedrige Wassergehalte die Mineralisierung der Vorfrucht-Pflanzenrückstände. Die gegenüber der Sickerwassermenge vergleichsweise hohe N-Auswaschung 2010 (Median: 42 kg N/ha) begründet sich durch die ungünstigen Niederschlagsverhältnisse um Weihnachten 2009. Da zu diesem Zeitpunkt durch Mineralisierung der Vorfrucht-Pflanzenrückstände erhebliche Mengen Stickstoff im Boden vorhanden sind, wirkt sich die, von der Transpiration weitgehend unbeeinflusste Sickerung in stärkerem Maß auf Nitratauswaschung aus, als dies zu Zeiten der Haupt-Wachstumsperiode der Fall wäre. In der langen sickerungsarmen Zeit, der dem Auswaschungsereignis vorangeht (ab April 2009), akkumuliert zudem der mobile Stickstoff im Boden und wird dann mit der ersten nennenswerten Grundwasserneubildung ausgetragen.

6.1.9 Mittlere Zeitreihen des Gebietsaustrags

Abbildung 6.6 zeigt den Mittelwert der kumulierten Zeitreihen Niederschlag, Grundwasserneubildung und N-Austrag aus den 1713 Grundflächensimulationen zusammen mit deren Konfidenzintervall (= Mittelwert \pm Standardabweichung).

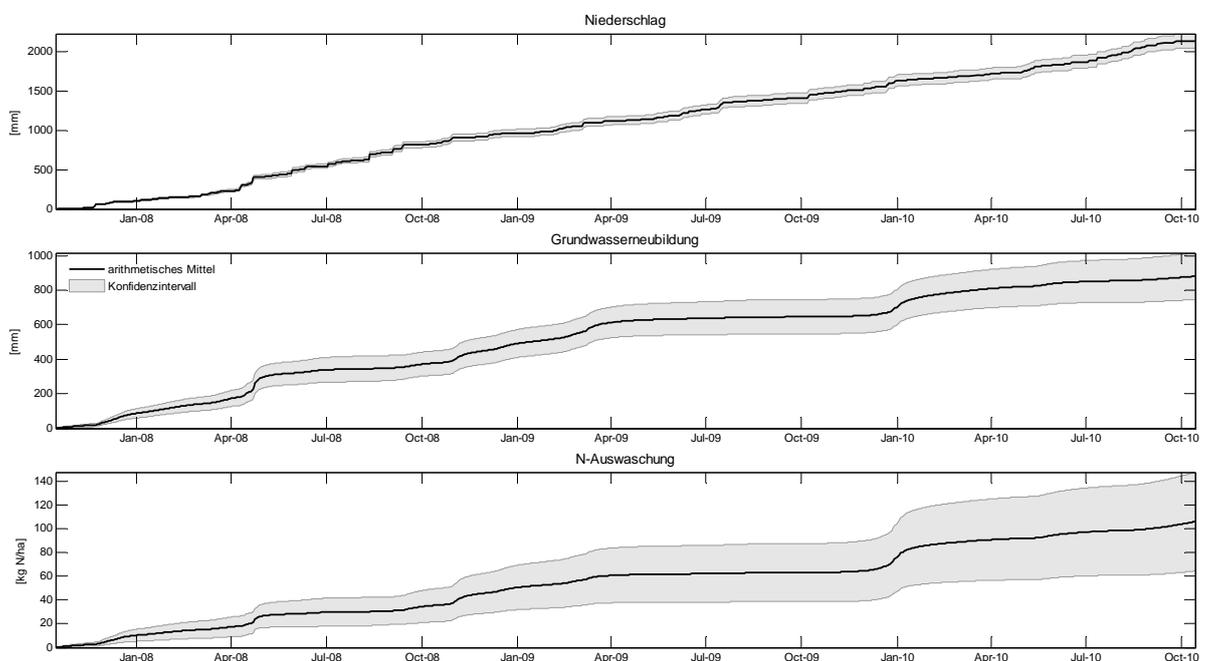


Abbildung 6.6: Mittlere Zeitreihen des Gebietsaustrags

Im Vergleich von Niederschlag und Grundwasserneubildung fällt die Zunahme der Standardabweichung durch die unterschiedliche Transpirationsleistung der verschiedenen Kul-

turarten auf. Des Weiteren tendiert die Sickerung trotz kaum veränderten Niederschlagsmengen während der Haupt- Wachstumsperiode von Mai bis Oktober gegen null. Damit wird auch die Nitratauswaschung unterbunden. Bezüglich der N-Auswaschung fällt das schon zuvor erwähnte große Austragsereignis Ende Dezember 2009 auf, bei dem innerhalb von nur 8 Wochen (vom 10.12.2009 bis 10.02.2010) 21 kg N/ha ausgewaschen wurden.

6.1.10 Auswertung der zehn wichtigsten Nutzungssequenzen

Die Analyse der verschiedenen Fruchtarten bezüglich ihres Austragspotentials wird durch mehrere Faktoren erschwert. Jede Kultur ist in die spezifische Fruchtfolge ihres Standorts eingebettet. Der Pflanzenrückständigepool baut sich über diese Fruchtfolge auf und setzt über Mineralisierung Stickstoff zur Pflanzenaufnahme und Auswaschung frei. Ammoniumhaltige Düngungen werden nitrifiziert und fließen dann in den Pool des freien Nitrats ein. Die Schwierigkeit besteht nun darin, dass die Pools im Modell nicht nach der Quelle des Stickstoffs differenziert werden. So wird z.B. im Pflanzenrückständigepool nicht unterschieden, ob der Stickstoff von der Vorfrucht des Vorjahres stammt oder von der Vorfrucht des aktuellen Jahres. Das heißt, der ausgewaschene Stickstoff kann nicht direkt der verursachenden Kultur zugeordnet werden. Gleiches gilt für die Düngung.

Beim Versuch die verursachende Fruchtart über einen zeitlichen Zusammenhang mit der Auswaschung zu identifizieren, stellt sich die Frage welche Auswaschungsperiode einer bestimmten Kultur zuzuordnen ist. So ist die Auswaschung während der Brache nach der Ernte sicherlich noch der geernteten Fruchtart zuzuschlagen. Eine genaue und sinnvolle Abgrenzung (z.B. über Saattermin, Termin der ersten Düngung etc.) ist jedoch gerade im Hinblick auf den Einfluss der Zwischenfrüchte, die unter Umständen nicht gedüngt werden, schwierig. Im Folgenden werden deshalb vollständige Nutzungssequenzen auf ihr Austragspotential während der Auswertungsperioden untersucht. Dazu werden die zehn simulierten Nutzungssequenzen mit dem größten Flächenanteil aus Abschnitt 6.1.3 verwendet (**Tabelle 6.4**).

Aufgrund der Verwendung von Standardbewirtschaftungen für die einzelnen Fruchtarten ergeben sich unterschiedliche Simulationsergebnisse rein durch unterschiedliche Bodeneigenschaften und klimatische Randbedingungen am Standort.

Der Spitzenwert des simulierten Stickstoffaustrags von im Mittel 109 kg N/ha zeigt sich bei der Fruchtfolge Körnermais 2008, Winterweizen 2009, Feldsalat 2010, Körnermais 2010 für die Auswertungsperiode 2010. Bei dieser Fruchtfolge fällt die hohe Mineralisierung der Pflanzenrückstände des Winterweizens 2009 und die geringe N-Resorption des Feldsalats 2010 mit der hohen Sickerung Ende 2009/Anfang 2010 zusammen. Die hohe Auswaschung ist also auf eine Kombination von hohem N-Eintrag aus den Vorfrucht-Pflanzenrückständen, Düngung und schlechter N-Resorption des Feldsalats und klimatisch bedingter hoher Sickerung zurückzuführen.

**Tabelle 6.4: Jährliche² Niederschlagssumme, Grundwasserneubildung und Nitrat-
auswaschung in Abhängigkeit der zehn häufigsten Nutzungssequenzen**

Nutzungs- sequenz	Fläche (ha)	Anteil (%) ¹	Periode	Nieder- schlags- summe (mm)	Grundwasser neubildung (mm)	Nitrat- aus- waschung (kg N/ha)	Standard- ab- weichung (kg N/ha)	Nitrat- konzentration Sickerwasser (mg/L)
Körnermais	514,5	46,4	2008	840	404	38	9,5	41,7
Körnermais			2009	644	284	32	8,2	49,9
Körnermais			2010	695	228	44	15,2	85,5
Saatmais	164,8	14,9	2008	879	399	28	10,2	31,1
Saatmais			2009	650	263	19	9,2	32,0
Saatmais			2010	682	221	30	13	60,1
Spargel	47,2	4,3	2008	809	487	57	9,2	51,8
Spargel			2009	601	316	42	7,6	58,9
Spargel			2010	651	363	93	13,1	113,5
Saatmais	21,4	1,9	2008	842	352	27	4,8	34,0
Frühkart.			2009	629	190	10	5,2	23,3
Saatmais			2010	651	205	38	27,6	82,1
Körnermais	17,5	1,6	2008	840	404	39	3	42,8
Körnermais			2009	640	290	33	2,4	50,4
Winterweizen Feldsalat			2010	688	305	57	4,4	82,8
Körnermais	13,5	1,2	2008	812	388	39	9,1	44,5
Winterweizen; Feldsalat			2009	638	255	32	7,7	55,6
Körnermais			2010	688	341	109	26,5	141,6
Körnermais	11,6	1	2008	842	366	28	3,3	33,9
Spargel			2009	573	380	22	4,3	25,6
Spargel			2010	630	339	79	6	103,2
Erdbeeren	10,3	0,9	2008	772	438	52	8,4	52,6
Erdbeeren			2009	577	281	49	7,3	77,2
Erdbeeren			2010	651	296	70	7,9	104,7
Frühkart.; Feldsalat	9,3	0,8	2008	892	k.E.	63	6,5	k.E.
Saatmais			2009	600	254	33	8,7	57,5
Frühkart.; Feldsalat			2010	730	216	29	1,6	59,5
Frühkart.	8,3	0,7	2008	870	k.E.	48	9,6	k.E.
Körnermais			2009	640	203	16	0,5	34,9
Saatmais			2010	682	204	17	2	36,9

¹Prozentualer Anteil an der simulierten landwirtschaftlichen Nutzfläche

²Auswertungsperiode 15.10. des Vorjahrs – 15.10. des aktuellen Jahres

Die Farbkodierung entspricht der Legende der Karten Abbildung 6.4 – Abbildung 6.5

k.E.: Initialisierungsbedingt kein aussagekräftiges Ergebnis (Frühkartoffel 2008)

Bei den aus dem Quotient von N-Auswaschung und Sickerwassermenge berechneten N-Konzentrationen im Sickerwasser ist zu berücksichtigen, dass die Eintragskonzentrationen keinesfalls den Konzentrationen am Förderbrunnen entsprechen. Verdünnungseffekte durch die gering belasteten Randzuflüsse Neumagen und Möhlin sowie Reaktionen im Grundwasser führen zu einer deutlichen Erniedrigung der Brunnenkonzentrationen.

Abbildung 6.7 zeigt die Zeitreihen der mittleren Niederschlagssumme, Grundwasserneubildung und N-Auswaschung, die aus sämtlichen Simulationen mit der Fruchtfolge Körnermais, Winterweizen, Feldsalat, Körnermais gebildet werden zusammen mit deren Konfidenzintervall. Die Grafik illustriert die Bedeutung der Grundwasserneubildung Ende 2009/Anfang 2010 und der langen sickerfreien Periode im Vorfeld ab April 2009. Dieses Sickerungsereignis führt zu N-Auswaschung, die in ihrer Magnitude den Austrag des gesamten Simulationszeitraums dominiert. Die große Spanne der N-Auswaschungen, wie sie vom Konfidenzintervall angezeigt wird, kennzeichnet **den bedeutenden Einfluss der Bodenart auf dieses Auswaschungsereignis**.

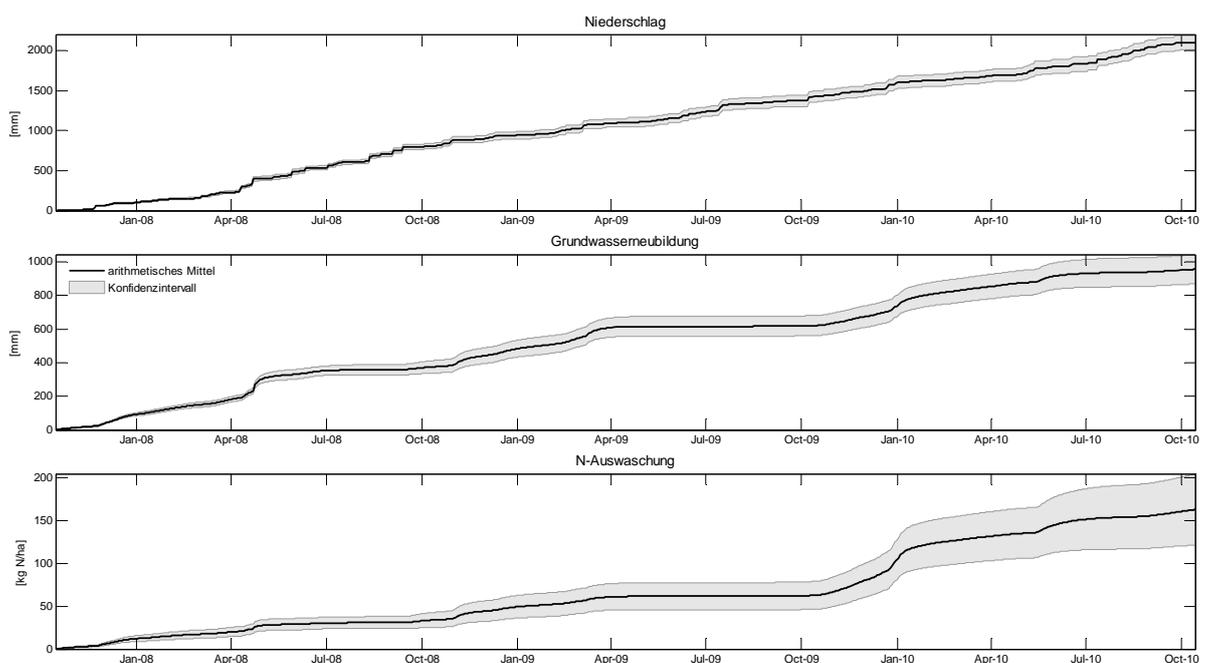


Abbildung 6.7: Mittlere Niederschlagssumme, Grundwasserneubildung und N-Auswaschung der Fruchtfolge Körnermais, Winterweizen, Feldsalat, Körnermais

Die gleiche Fruchtfolge mit Zeitversatz von einem Jahr, also Körnermais, Körnermais, Winterweizen, Feldsalat, zeigt eine deutlich geringere Auswaschung (57 kg N/ha für 2010, siehe **Tabelle 6.4**), da hier die Mineralisierung der Pflanzenrückstände des Winterweizens und die Düngung des Feldsalats erst Ende 2010/Anfang 2011 zu Buche schlägt.

Als Fruchtfolge mit dem zweitgrößten Austragspotential (im Mittel 93 kg N/ha in der Auswertungsperiode 2010) wurde Spargel identifiziert.

Abbildung 6.8 illustriert die mittleren Auswaschungszeitreihen unter Spargel. Im Vergleich mit der vorherigen Fruchtfolge hat das Auswaschungsereignis Ende 2009/Anfang 2010 beim Spargel eine geringere Bedeutung auf den Gesamtaustrag. Dennoch ist auch hier das Ereignis als Stufe in der Summenkurve des N-Austrags deutlich erkennbar. Gegenüber der vorhergehenden Simulation zeigen sich beim Spargel geringere Standortunterschiede (kleineres Konfidenzintervall), was darauf zurückzuführen ist, dass sich die Bodeneigenschaften unter Spargel kaum unterscheiden.

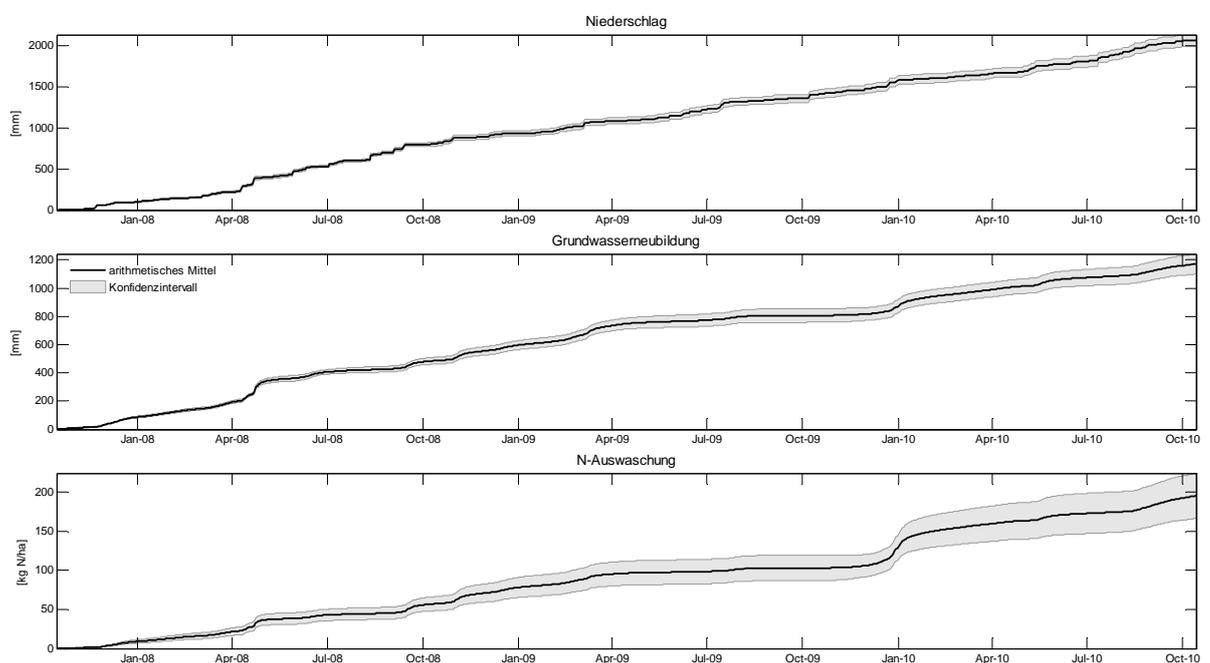


Abbildung 6.8: Mittlere Niederschlagssumme, Grundwasserneubildung und N-Auswaschung aller Spargelstandorte

Die Kulturart mit dem drittgrößten N-Austrag ist Erdbeere mit 49 – 70 kg N/ha.

Die ausgewaschenen N-Mengen unter Spargel (Mittel: 65 kg N/ha/a) und Erdbeere (Mittel: 61 kg N/ha/a) sind, für mehrjährige Zeiträume, durch die Standardbewirtschaftungen (N-Eintrag) und die Parametrisierung der Pflanzenaufnahme (LEACH-Aufnahmefunktion) festgelegt. Trotz unterschiedlicher Düngung stimmt die Größenordnung des Gebietsmittels der N-Auswaschung unter Spargel mit der Projektfläche H290 überein.

6.1.11 Diskussion der Regionalisierung des Gebietsaustrags mit Expert-N

Bei der Bewertung der Gebietssimulationen ist zu berücksichtigen, dass im Unterschied zu den Projektflächensimulationen (vgl. Kapitel 5.2), die Bewirtschaftung der einzelnen Flä-

chen nicht aus den Schlagdaten der Landwirte stammen, sondern mit Hilfe regionstypischer Standardbewirtschaftungen modelliert wurden. Im Einzelfall kann daher die Anpassung der Bewirtschaftungsweise auf einem Standort zu erheblich mehr oder weniger Stickstoffaustrag führen. Die Gebietsauswertung darf deshalb **in keinem Fall** dazu dienen, einzelne Bewirtschafter als Verursacher hoher Stickstoffbelastungen im Grundwasser zu identifizieren.

Die isolierte Betrachtung einzelner Kulturarten wird durch den Einfluss der Vorfrucht-Historie und die Identifikation der jeweiligen Stickstoffquelle bei der Auswaschung erschwert. Das Austragspotential einer Kulturart muss also im Zusammenhang mit der gesamten Fruchtfolge betrachtet werden.

Ziel der Gebietsauswertung ist daher die Beurteilung des Austragspotentials verschiedener Fruchtfolgen und deren Verteilung im Projektgebiet. Die Verwendung von Standardbewirtschaftungen ermöglicht es darüber hinaus, den Einfluss des Wettergeschehens und des Bodens auf die N-Verluste zu bewerten.

Die Karten des Gebietsaustrags (vgl. Kapitel 6.1.6) veranschaulichen die Verteilung der unterschiedlichen Risikofruchtfolgen im Projektgebiet. Zudem wird beim Vergleich mehrerer Auswertungsperioden der prägende Einfluss der Wetterbedingungen auf das Austragsrisiko deutlich. So zeigt die Karte der N-Auswaschung 2010 insgesamt deutlich höhere Werte gegenüber den Jahren 2008 und 2009. Viele der Fruchtfolgen mit hohem Austragsrisiko befinden sich in unmittelbarer Nähe der Förderbrunnen. Dies betrifft die Fruchtfolge Körnermais, Winterweizen, Feldsalat aber auch Spargel und Erdbeere.

Da sich der Anteil nicht-landwirtschaftlich genutzter Fläche im Projektgebiet auf 32% beläuft, kommt der Pauschalisierung der nicht-simulierten Siedlungs- (278 ha), Verkehrs- (155 ha) und Freilandfläche (100 ha) für die Simulation des Gebietsaustrags große Bedeutung zu. Gesicherte Literatur zur Bestimmung der Korrekturfaktoren in Kap. 6.1.4 ist aber kaum verfügbar. Eine gesonderte Untersuchung der Bedeutung von Siedlungsflächen und deren N-Austragspotential im Projektgebiet wird deshalb angeregt.

Die Gesamtgebietsbilanz verdeutlicht die Unterschiede der Auswaschungsperioden bezüglich Grundwasserneubildung, N-Fracht und N-Konzentration. Weil 2008 sowohl hinsichtlich des Niederschlags als auch der Grundwasserneubildung das feuchteste Jahr darstellt, ist die mittlere N-Konzentration im Sickerwasser trotz hoher N-Frachten die niedrigste. Im bilanzbasierten Ansatz von Expert-N kann der N-Austrag nie größer sein als die Summe von N-Eintrag und Speicheränderung. Im Modell wie in der Wirklichkeit ist daher der N-Austrag durch Düngung, atmosphärischen Eintrag und N-Mineralisierung begrenzt, während die Sickerwassermenge großen klimabedingten Schwankungen ausgesetzt ist. Die N-Konzentration im Sickerwasser wird daher zum Großteil von der naturgegebenen Sickerwassermenge bestimmt, was die Aussagekraft dieses Parameters für die Erfolgskontrolle im Grundwasserschutz limitiert.

In Folge des bilanzbasierten Ansatzes wird bei konstanter N-Zufuhr und vermindertem Ausstrag eine größere N-Menge im Boden gespeichert, was wiederum den N-Austrag der Folgejahre erhöht. Verminderte Sickerung aufgrund trockener Bodenverhältnisse kann dabei limitierend für die N-Auswaschung sein. So erklärt sich ein Teil des erhöhten N-Austrags 2010 durch die erhöhte N-Speicherung infolge der sickerfreien Periode Mitte 2009. Die Begrenzung der N-Auswaschung durch N-Eintrag und Sickerwassermenge verdeutlicht die große Bedeutung einer geschlossenen, lückenlosen Bilanzierung sowohl des Wasser- als auch des Stickstoffhaushalts.

Die Analyse der verschiedenen Fruchtfolgen bezüglich ihres Austragspotentials (Kapitel 6.1.10) belegt den hohen N-Verlust der Fruchtfolge Feldsalat nach Winterweizen. Dieses Ergebnis muss dahingehend relativiert werden, als die spezielle Wettersituation Ende 2009/Anfang 2010 mit dem großen Sickerungsereignis im Januar 2010 einen Großteil des ausgetragenen Stickstoffs liefert. Das weit gefasste Konfidenzintervall in Folge des Ereignisses zeigt an, dass auf manchen Bodenarten erheblich geringere Mengen Stickstoff ausgewaschen werden. Das Zusammenspiel ungünstiger Bodeneigenschaften und klimatischer Verhältnisse beeinflusst also dieses Ergebnis. Prinzipiell entspricht jedoch die hohe N-Auswaschung der Fruchtfolge Feldsalat nach Winterweizen dem erwarteten Verhalten und wird durch die Simulation der Projektfläche H80 bestätigt, auch wenn dort aufgrund verminderter Düngung geringere N-Auswaschung simuliert wurde.

Bei der Beurteilung der Kulturen Spargel und Erdbeere ist zu berücksichtigen, dass hier keine Pflanzenmodelle zur Verfügung stehen, sondern der Einfluss der Pflanze auf den N-Haushalt über Funktionen des potentiellen N-Entzugs vorgegeben wird. Die Ergebnisse sind jedoch insofern plausibel als auch eine grobe Abschätzung der N-Bilanz über Düngung und Ernteentzug zu großen N-Verlusten führt. Beim Vergleich des mittleren Gebietsausstrags unter Spargel mit Projektfläche H290 fällt der höhere Gebietsausstrag vor allem 2010 auf. Dies liegt in der unterschiedlichen Düngergabe begründet, die bei der Standardbewirtschaftung konstant 64 kg N/ha beträgt, während auf H290 im Anbaujahr 2008 96 kg N/ha gedüngt wurden und in den Folgejahren 50 kg N/ha.

6.2 Gebietsausstrag mit INVAM

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Berechnung (Methodik) ist in Abschnitt 3.3 beschrieben. Auf Basis der Ergebnisse der INVAM-Simulationsrechnungen (Abschnitt 5.1) wurde versucht, die gesamte N-Auswaschung (N-Fracht) für das Projektgebiet abzuschätzen.

Den höchsten Flächenanteil nehmen im Projektgebiet die Kulturen Körnermais (Monomais, 515 ha), Saatmais (Mono-Saatmais, 165 ha) und Spargelflächen (47 ha) ein, die insgesamt mit einer Fläche von 727 ha etwa 41 % der Gesamtfläche des Projektgebiets von 1788 ha entsprechen. Die weiteren simulierten 13 Fruchtfolgeglieder nehmen eine Fläche von 57,9 ha, entsprechend einem Anteil von 3,2 % ein. Dadurch konnten 43,9 % der Projektgebietsfläche konkrete Simulationsergebnisse zugeordnet werden, wodurch ermöglicht wurde, sie

hinsichtlich der Nitrat auswaschung mit den im Rahmen des Projektes berechneten Nitratkonzentrationen des Sickerwassers zu beschreiben.

Für dieses Simulationsflächenkollektiv resultierte als mittlere Nitratkonzentration des Sickerwassers ein Wert von ca. 43 mg/L. Die für das Simulationsflächenkollektiv berechneten Mittelwerte wurden in der Modellbetrachtung auch für die 421,5 ha (23,6 % des Projektgebiets) landwirtschaftlich genutzter Fläche mit nicht simulierten Fruchtfolgen herangezogen.

Bei den übrigen 581,9 ha (32,5 % des Projektgebiets) - es handelt sich dabei überwiegend um anderweitige, landwirtschaftlich nicht genutzte Flächen - wurden die von GHC verwendeten Abschätzungen für die Nitrat auswaschungen und Sickerwassermengen verwendet (vgl. Abschnitt 6.1.4). Für dieses Kollektiv wurde eine mittlere Nitratkonzentration des Sickerwassers von ca. 14 mg/L berechnet.

Für die mit INVAM simulierten Fruchtfolgen sowie für die landwirtschaftlich genutzten Flächen ohne INVAM-Simulation und die nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen wurde die N-Auswaschung für das gesamte Projektgebiet (1788 ha) berechnet. Danach resultieren mittlere Grundwasserneubildungen zwischen 186 mm (2009) und 336 mm (2008) und mittlere N-Auswaschungen zwischen 11 kg N/ha (2009) und 23 kg N/ha (2008, Zeitraum jeweils April des aktuellen Jahres bis April des Folgejahres). Der prozentuale Anteil der einzelnen Fruchtfolgen bzw. Nutzungen an der gesamten mittleren N-Auswaschung (N-Fracht), gruppiert nach den drei Rubriken, ist in der **Abbildung 6.9** dargestellt:

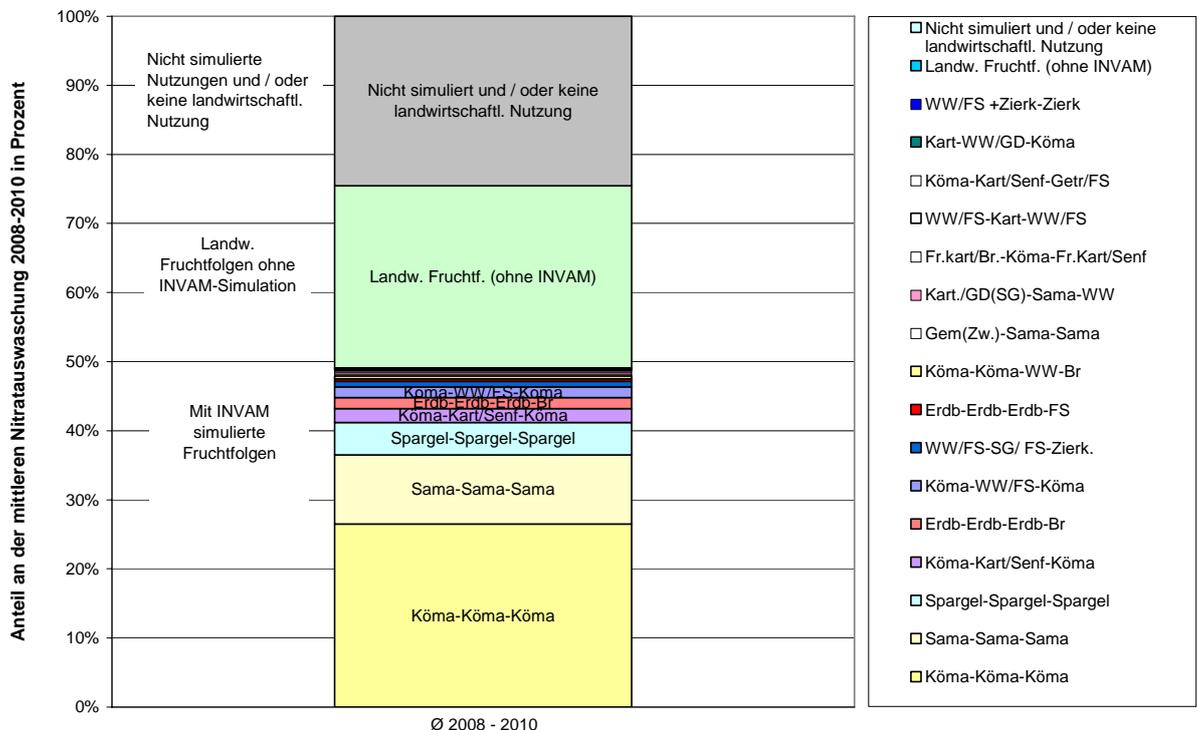


Abbildung 6.9: Prozentualer Anteil der einzelnen Fruchtfolgen an der mittleren N-Auswaschung 2008-2010 im Projektgebiet für simulierte Fruchtfolgen

Auf Basis der detailliert beobachteten und mit INVAM ausgewerteten Projektflächen unter Berücksichtigung der Flächenanteile im Projektgebiet und der Expert-N-Abschätzungen für die nicht landwirtschaftlich genutzten und nicht simulierten Flächen, resultieren für das gesamte Projektgebiet von 1.788 ha mittlere Grundwasserneubildungen zwischen 186 mm (2009) und 336 mm (2008) und mittlere N-Auswaschungen zwischen 11 kg N/ha (2009) und 23 kg N/ha (2008, Zeitraum jeweils April des aktuellen Jahres bis April des Folgejahres).

Der prozentuale Anteil der landwirtschaftlich genutzten Flächen an der gesamten Nitratauswaschung ist mit 75,5 % um rd. 8 % höher als deren Anteil an der Gesamtfläche von 67,5 %. Bei den nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen ist der Anteil an der gesamten Nitratauswaschung mit 24,6 % gegenüber dem Flächenanteil von 32,5 % entsprechend niedriger.

Die Nitratauswaschung der sieben wichtigsten landwirtschaftlichen Nutzungen / Fruchtfolgen sind in der nachfolgenden **Tabelle 6.5** noch einmal aufgeführt (vgl. Abbildung 6.9):

Tabelle 6.5: Zusammenstellung der sieben Nutzungen / Fruchtfolgen mit den bedeutendsten Nitratausträgen im Projektgebiet

	N _{aus} (2008-2010) in kg N	Anteil an der Nitratauswaschung in %	Fläche in ha	Flächenanteil in %
Köma-Köma-Köma	7.718	26,5	514,5	28,8
Landw. Fruchtfl. (ohne INVAM)	7.678	26,4	421,5	23,6
Sama-Sama-Sama	2.911	10,0	164,8	9,2
Spargel-Spargel-Spargel	1.369	4,7	47,2	2,6
Köma-Kart/Senf-Köma	581	2,0	14,2	0,8
Erdbe-Erdbe-Erdbe-Br	466	1,6	10,3	0,6
Köma-WW/FS-Köma	447	1,5	13,5	0,8
Summe	21.170	72,7	1186,0	66,3

Der höchste Anteil an der gesamten N-Auswaschung kommt dabei aufgrund des hohen Flächenanteils den landwirtschaftlichen Nutzungen Körnermais im Monomaisanbau (Daueranbau von Körnermais) mit 26,5 % an der gesamten Nitratauswaschung zu, gefolgt von Mono-Saatmais (Daueranbau von Saatmais) mit einem Anteil von 10,0 %. Die landwirtschaftlichen Fruchtfolgen ohne INVAM-Simulation stehen aufgrund des hohen Flächenanteils von 23,6 % an zweiter Stelle mit einem Anteil von 26,4 % am gesamten Nitrataustrag.

Für die landwirtschaftlich genutzten Flächen im Projektgebiet und den Zeitraum 2008 bis 2010 resultiert eine durchschnittliche N-Auswaschung (Fracht) von insgesamt rd. 22.000 kg N pro Jahr (18,2 kg N/ha). Bei dieser Art der Betrachtung gehen Flächen mit hohem Flächenanteil stark in die Bewertung ein. Aufgrund des relativ guten Abschneidens der flächenmäßig bedeutenden Kulturen Körnermais (im Monomaisanbau) und Saatmais (im Mono-Saatmais) im Projekt wird der Gesamt-Mittelwert bei dieser Vorgehensweise vermutlich tendenziell eher etwas unterschätzt.

Wie aus den langjährigen Bodenkontrollen bekannt ist, wird ein Teil der Körnermaisflächen bereits weitgehend grundwasserschonend bewirtschaftet und es ist damit zu rechnen, dass eine weitere Reduzierung der Düngung (bei sonst unveränderter Bewirtschaftung / Technik) dort zu Ertragseinbußen führen könnte.

Die Herbstkontrollergebnisse der letzten Jahre zeigen aber auch, dass die Restgehalte an Nitratstickstoff bei Körnermaisflächen meist große Unterschiede aufweisen (vgl. TZW-

um mehr als den Faktor 2 über dem jeweiligen Flächenanteil liegen. Fruchtfolgeflächen mit einem Verhältniswert deutlich größer als 1 weisen überproportional hohe Nitratauswaschungen auf, die zu hohen Nitratreträgen ins Grundwasser führen. Um dies auszugleichen sind Verdünnungsflächen mit geringem Nitratretrag erforderlich. Eine Ausweitung überproportional auswaschungswirksamer Fruchtfolgen ist aus Gewässerschutzsicht kritisch zu sehen, da dies – die gleiche Flächenbewirtschaftung vorausgesetzt - zu einer Zunahme der Nitratreträge insgesamt führen würde. Andererseits ist zu vermuten, dass hier im Hinblick auf die Nitratreträge noch ein hohes Reduzierungspotential vorhanden ist und durch Bewirtschaftungs- / oder Fruchtfolgeänderungen bei wenigen Flächen eine deutliche Reduzierung des Gesamtpotentials erreicht werden kann.

Eine Umstellung der Vorgehensweise bei der Bewirtschaftung ist insbesondere nach dem Umbruch der Erdbeeranlagen erforderlich. Hier ist aufgrund der intensiven Bodenbearbeitung nach mehrjähriger Bodenruhe und Düngungsüberschüssen mit einer hohen Freisetzung von Stickstoff zu rechnen. Weder Feldsalat noch Brache stellen aus Gewässerschutzsicht geeignete Folgenutzungen nach dem Umbruch einer Erdbeeranlage dar. Besser geeignet wären beispielsweise Gründüngungspflanzen, die nach dem Umbruch der Erdbeerpflanzen möglichst bis zum Frühjahr stehen bleiben sollten (z.B. Ölrettich, der nach Erdbeeren auch aus phytosanitären Gründen empfehlenswert ist). Noch empfehlenswerter wären Futter- oder Energiepflanzen als Folgefrucht, da sie sich nicht nur durch Massewüchsigkeit auszeichnen, sondern weil hier mit der Biomasse auch überschüssiger Stickstoff abgefahren wird. Wie aus anderen Gebieten bekannt ist, kann bei Erdbeerflächen auch durch Etablierung einer fachlich gut durchgeführten Tröpfchenbewässerung eine Verbesserung erreicht werden.

Weiterhin fällt auf, dass die Nutzung Feldsalat häufig als ein Fruchtfolgeglied bei den kritischen Fruchtfolgen vorhanden ist. Feldsalat ist ein Flachwurzler, der nur Nährstoffe aus dem Oberboden aufnehmen kann und nicht in der Lage ist, größere Mengen Stickstoff aufzunehmen, die noch von der Vorfrucht in tieferen Bodenbereichen vorhanden sind. Daher sind hier niedrige Nitratstickstoffrestgehalte zur Einsaat und eine optimale Bewirtschaftung unabdingbare Voraussetzungen für einen Anbau in Wassereinzugsgebieten.

Bei den jährlichen Bodenkontrollaktionen zum SchALVO-Termin der badenova weisen Vergleiche zwischen verschiedenen Hauptfrüchten ohne und mit Feldsalat als Folgenutzung, i. d. R. den Feldsalatanbau und nicht die jeweilige Hauptfrucht als Ursache für die überhöhten Werte aus. Die Unterschiede in den Nitratstickstoffgehalten infolge des Feldsalatanbaus betragen im Herbst 2011 bei Getreide 41 kg N/ha und bei Kartoffeln 30 kg N/ha gegenüber den entsprechenden Flächen ohne Feldsalatanbau.

Trotz intensiver Beratung ist Feldsalat als Zweitkultur in Wasserschutzgebieten nach wie vor aus der Sicht des Grundwasserschutzes, insbesondere im Hinblick auf die nahezu jedes Jahr stark überhöhten Nitratstickstoffrestgehalte, sehr problematisch.

Die flächenspezifische Belastung von Mono-Körnermais (Faktor 0,92) liegt geringfügig niedriger als die mittlere Flächenbelastung des Gesamtgebiets (Faktor = 1), d.h. die Mono-Körnermaisflächen bewirken im Vergleich zum Mittelwert der übrigen Flächen im betrachte-

ten Schutzgebiet sogar eine geringfügige Verdünnung der mittleren Nitratkonzentration des Sickerwassers.

Bei den Mono-Saatmaisflächen liegt dieser Faktor bei 1,08. Dies bedeutet, dass die flächenspezifische Belastung von Mono-Saatmais nur geringfügig höher liegt als die mittlere Flächenbelastung des Gesamtgebiets. Infolge der gegenüber den Körnermaisflächen häufig deutlich erhöhten Nitratstickstoffrestgehalte bei den Herbstkontrollen wäre eigentlich ein schlechteres Ergebnis zu erwarten gewesen. Dieses relativ gute Abschneiden der Saatmaisflächen ist eine Folge guter Bewirtschaftung und daraus resultierenden niedrigen Nitratstickstoffrestgehalte der Projektflächen mit Mono-Saatmais.

7 Neue Strategie zur Emissions- und Erfolgskontrolle

7.1 Reduktionspotential der Nitrateinträge in bewirtschaftete Grundwassersysteme

Die Nitratenauswaschung und Sickerwassermenge unter landwirtschaftlich genutzten Flächen wird von den Faktoren

- Bewirtschaftungsweise (Düngung, Bodenbearbeitung),
- Kulturart / Fruchtfolge,
- Bodenart, und von
- lokalen klimatischen Bedingungen

bestimmt. Das Reduktionspotential des Nitrateintrags einer Fläche richtet sich nach den jeweils dominierenden Faktoren. Dabei können selbstverständlich die naturgegebenen Faktoren Bodenart und Klima nicht direkt beeinflusst werden. Durch angepasste Bewirtschaftungsweise und geeignete Fruchtfolge kann jedoch der Einfluss ungünstiger Bodenarten im Bezug auf den Nitrateintrag in das Grundwassersystem zumindest teilweise kompensiert werden. Maßnahmen wie Begrünung und die Aufteilung der Düngung in mehrere Gaben können die Auswirkung ungünstiger klimatischer Einflussfaktoren, wie z.B. starke Niederschläge in direkter Folge der Düngung, begrenzen.

Wie die vorliegende Untersuchung zeigt, sind die größten Unterschiede im Nitrateintrag der Projektflächen hinsichtlich der Kulturarten und Fruchtfolgen zu beobachten. Dabei muss berücksichtigt werden, dass sämtlichen Auswertungen die tatsächlich beobachteten Fruchtfolgen zu Grunde liegen. Die Wahl der Anbaufrucht auf einem Standort ist aber u.U. abhängig von dessen Bodeneigenschaften und im begrenzten Maße auch von den lokalen klimatischen Gegebenheiten. Der Anbau von Spargel erfolgt z. B. vorwiegend auf mittelschweren Böden. Erdbeeren werden vorwiegend auf Standorten mit Beregnungsmöglichkeit angebaut. Dies sind oft leichte Standorte mit auswaschungsgefährdeten Böden. Der Saatmaisbau steht nicht direkt in Abhängigkeit zur Standorteigenschaft, sondern der Möglichkeit eine Produktionsinsel zu bilden. Somit ist der Anbau von Saatmais auf der gesamten Bandbreite der Böden im Gebiet vor zu finden. Vorhandene Beregnungsmöglichkeiten sind dabei aber von Vorteil.

Mit unterschiedlicher Eignung von Böden und Klimabedingungen für die verschiedenen Fruchtarten ist aber die Fruchtfolge nicht unabhängig von Bodenart und Klima, und im Sinne des Grundwasserschutzes kann das Reduktionspotential einer Fruchtfolge auch nicht unabhängig vom vorliegenden Boden und dem Klima bestimmt werden. Eine integrale Betrachtung von Fruchtfolge, Boden und Klima ist damit entscheidend.

Das Reduktionspotenzial einer Kulturart richtet sich einerseits nach der N-Auswaschung innerhalb eines Bezugszeitraums (z.B. Vegetationsperiode) und andererseits nach dem Anteil an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche, die von der Kulturart eingenommen wird. Zum Beispiel ergibt die Simulation der N-Auswaschung unter Körnermais in Monokultur im Projektgebiet im Mittel 38 kg N/ha/a (Tabelle 6.4). Mit einem Flächenanteil von 514,5 ha (46,4 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche) ist eine Reduktion der N-Auswaschung aber dennoch erheblich wirksamer als die N-Reduktion um den gleichen Betrag bei Erdbeeren mit 10,3 ha (0,9 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche). Gleichzeitig ist jedoch das Reduktionspotenzial der Kulturarten Spargel, Erdbeere und Feldsalat mit N-Auswaschungen von z. T. über 100 kg N/ha/a ungleich höher als bei Körnermais. Für eine ganzheitliche Beurteilung muss auch die räumliche Verteilung der Kulturarten im Projektgebiet einbezogen werden. Die ungünstige Lage der meisten Erdbeerstandorte in unmittelbarer Nähe der Förderbrunnen erhöht aufgrund geringer Verweildauer im Grundwasser deren Relevanz für die Wasserqualität trotz ihres geringen Flächenanteils.

Unter Abwägung von Flächenhäufigkeit und N-Auswaschung (Tabelle 6.4) ergibt sich die Einschätzung, dass die Kulturarten Spargel und Erdbeere sowie die Fruchtfolge Feldsalat nach Winterweizen das größte Reduktionspotential des N-Eintrags im Projektgebiet darstellen, insbesondere wenn der negative Einfluss der Auflösung von Spargel- und Erdbeerstandorten auf die N-Auswaschung berücksichtigt wird. Das Reduktionspotenzial der genannten Kulturen wird dadurch erhöht, dass es sich vielfach um beregnete Standorte mit leichten Böden handelt, die eine besonders große Anfälligkeit gegenüber Nitratauswaschung aufweisen.

Aufgrund der großen Flächenhäufigkeit des Körnermais und Saatmais in Monokultur (zusammen 61,3 %) sind Maßnahmen, die eine, wenn auch nur geringe, Reduktion der N-Auswaschung bewirken (bedarfsorientierte Düngung, Untersaat, Unterfußdüngung etc.) als wirksam für die Verbesserung der Grundwasserqualität einzustufen. Das Reduktionspotential solcher Maßnahmen ist in einer gesonderten Studie zu untersuchen (siehe Kapitel 8).

7.2 Reduktionspotential der Emissionen klimaschädlicher Gase

Wie bereits ausgeführt, kann über die N-Modellierung, gestützt auf ein repräsentativ gewähltes Flächenkollektiv der im Wasserschutzgebiet bedeutenden Kulturarten ein Instrument zur zurückschauenden und vorausschauenden Überwachung der Belastungssituation im Wasserschutzgebiet geschaffen werden. Gleichzeitig liefert die Echtzeitsimulation des Stickstoff- und Wasserhaushalts die Grundlagen für einen bedarfsgerechten und effizienten Umgang mit mineralischen Stickstoffdüngern.

Durch die modellgestützte Stickstoffdüngung werden Einsparungen von N-Düngern möglich, ohne wirtschaftliche Erträge zu gefährden.

Die resultierende Verringerung von Stickstoffüberschüssen bei der Düngung führt zu verminderten Einträgen in das Grund- und Brunnenwasser und kommt damit in erster Linie dem Grundwasserschutz zugute; sie hat aber auch positive Auswirkungen auf den Klimaschutz.

Mit jedem Kilogramm an Stickstoff, das beim Anbau eingespart werden kann vermindern sich die klimaschädlichen Emissionen aus der Landwirtschaft, die mit etwa 7-8 % zu den Gesamtemissionen in Deutschland beitragen [UBA 2010]. Etwa 70 % der klimarelevanten landwirtschaftlichen Emissionen sind dabei auf Lachgas (N_2O) zurückzuführen, das gegenüber CO_2 einen 300-fachen Treibhauseffekt hat [Egglestone, Buendia et al. 2006] und auch zum stratosphärischen Ozonabbau beiträgt [Crutzen 1981]. Ein großer Anteil des Lachgases stammt aus der Tierhaltung und der damit verbundenen Güllewirtschaft, es entsteht aber auch bei der Herstellung und Ausbringung mineralischer Stickstoffdünger.

Durch jedes eingesparte Kilogramm Stickstoff, z. B. in Form von Kalkammonsalpeter ausgebracht, werden etwa 4,2 kg CO_2 -Äquivalent bei Herstellung und Transport vermieden [Arman 2003]. Dazu kommen (stark schwankende) Lachgasemissionen von etwa 1,25 % des applizierten Stickstoff, die bei der Ausbringung entstehen [Forster 2007]. Sie belaufen sich auf etwa 3,75 kg CO_2 -Äquivalent pro kg N. In der Summe ergeben sich dadurch alleine bei Herstellung und Ausbringung direkte Einsparungen von 8 kg CO_2 -Äquivalent pro Kilogramm Stickstoff. Nach Untersuchungen von [Dobbie & Smith 2003], [McSwiney & Robertson 2005] und [van Groenigen et al. 2004] ist die Vermeidung von Überschüssen bei der N-Düngung in Bezug auf den Klimaschutz auch deshalb besonders effizient, weil mit abnehmender Ausnutzung der N-Düngung die N_2O -Freisetzung überproportional ansteigt.

7.3 Bewertung der entwickelten Methodik

Das Hauptziel der vorliegenden Studie, das Entwickeln und Etablieren einer neuen Strategie zur Emissions- und Erfolgskontrolle, wurde durch die Kombination dreier Teilstrategien verwirklicht.

1. Detaillierte Beobachtung und Dokumentation von Einzelstandorten sowie flächendeckende Nutzungskartierung
2. Messungsbasierte Simulation der N-Auswaschung auf Einzelstandorten mit INVAM
3. Prozessbasierte Simulation des Wasser- und Nährstoffhaushalts auf Einzelstandorten und im gesamten Projektgebiet mit Expert-N

Die Simulationsmodelle INVAM und Expert-N stützen sich auf im Feld erhobene Mess- und Beobachtungsdaten. Der unterschiedliche Datenbedarf der Modelle ist in Tabelle 3.2 dargestellt. Beide Modelle dienen dazu, die N-Auswaschung aus dem Boden und damit den N-Eintrag ins Grundwasser unter landwirtschaftlich genutzten Flächen abzuschätzen, da dieser nicht direkt gemessen werden kann. Die ausgewaschene N-Menge ist wiederum der wichtigste Parameter für die Erfolgskontrolle im Grundwasserschutz.

Die vorliegende Studie stellt die Bedeutung und den Mehrwert eines kombinierten Ansatzes aus Messungen einerseits und flächenbegleitenden Simulationen mit Expert-N und INVAM andererseits heraus. Beide Simulationsmethoden zeigen, dass die üblichen Herbstkontrollen alleine keine Auskunft über die Auswaschung während des vegetationsfreien Zeitraums und im gesamten Jahresverlauf geben.

Für den messungsbasierten Ansatz von INVAM, der die N-Mengen im Boden und Änderungen des Wassergehalts zwischen den Messungen während der vegetationsfreien Zeit mit der effektiven N-Auswaschung in Beziehung setzt, ist die periodische Beprobung repräsentativer Flächen für jede Frucht- und Bodenart unerlässlich.

Für die Simulation mit Expert-N dienen die Stickstoff- und Wassergehaltsmessungen der Modellvalidierung, sind aber nicht *a priori* notwendig. Dagegen ist hier die Erfassung der Bewirtschaftungsdaten inklusive Bodenbearbeitung und Düngung sowie der hydraulischen Bodeneigenschaften erforderlich. Dafür können die Simulationen auch mittels Nutzungskartierung und Standardbewirtschaftungen auf ungemessene Standorte extrapoliert werden. Außerdem ist Expert-N geeignet, die Effektivität von Maßnahmen zum Grundwasserschutz zu quantifizieren (siehe Kapitel 7.6).

Die vorliegende Studie zeigt die Vorteile der Kombination von detaillierter Beprobung ausgewählter Beobachtungsstandorte mit der Modellierung zur Erfolgskontrolle im Grundwasserschutz. Die Ergebnisse in Kapitel 5 belegen den Nutzen als Entscheidungsbildendes Werkzeug zur Evaluation operationeller Maßnahmen. Die Etablierung neuer Pflanzenmodelle erlaubt die Bewertung sämtlicher gebietsrelevanter Kulturarten. Die geschlossene Simulation der N-Bilanz auf Tageswertbasis ermöglicht zudem die Quantifizierung sämtlicher Stickstoffflüsse und -Transformationen und gibt Einblick in die zugrunde liegenden Prozesse im System Atmosphäre-Pflanze-Boden. In den Simulationen der Einzelstandorte (Kapitel 5.2) werden sämtliche auswaschungsrelevanten Faktoren unter spezieller Berücksichtigung der tatsächlichen Bewirtschaftung sowie der lokalen Bodeneigenschaften und des Klimas quantifiziert. Die Gebietsregionalisierung der N-Auswaschung (Kapitel 6) ermöglicht die Abschätzung der Flächenwirksamkeit von Reduktionsmaßnahmen.

7.4 Mehrwert der Kombination von Expert-N und INVAM

Der kombinierte Einsatz von INVAM und Expert-N ermöglicht die Quantifizierung des tatsächlichen N-Eintrags in das Grundwassersystem. Der größte Vorteil gegenüber dem Einsatz eines einzigen Modellsystems liegt in der Bewertung der Modellgenauigkeit sowie der gegenseitigen Kontrolle von Eingangsdaten und Modellergebnissen im Sinne der Modellvalidierung. Beiden Modellansätzen liegen völlig unterschiedliche Annahmen und Lösungsstrategien zugrunde, was notwendigerweise zu Unterschieden in den Simulationsergebnissen führt. Dennoch zeigt der Vergleich von Expert-N und INVAM (Abschnitt 5.3) mehrheitlich gute Übereinstimmung bei der N-Auswaschung. Für Standorte und Kulturarten wo dies der Fall ist, kann davon ausgegangen werden, dass die relevanten Prozesse weitestgehend verstanden sind und gesicherte Aussagen über den Wasser- und Nährstoffkreislauf gemacht werden können.

In den meisten Fällen, wo signifikante Unterschiede zwischen beiden Modelle aufgetreten sind, konnten diese der Prozessrepräsentation oder Parametrisierung des einen oder anderen Modells zugeordnet werden. Dabei ist wichtig festzustellen, dass beide Modelle unterschiedliche Stärken und Schwächen haben, und erst die Kombination der Modelle gesicherte Aussagen bezüglich der N-Auswaschung zulässt.

Darüber hinaus kann der Vergleich der Modellergebnisse für die Modellparametrisierung genutzt werden. Dies betrifft z.B. die Rate der Humusmineralisierung bei Expert-N, die mit Hilfe der INVAM-Simulationen genauer abgeschätzt werden kann. Ein weiterer Vorteil besteht aber auch in der lückenlosen Simulation der Sickerwassermenge bei Expert-N unter Berücksichtigung der von der Pflanzenentwicklung abhängigen Transpiration, die eine genauere Berechnung der Sickerung insbesondere während der Vegetationszeit erlaubt. Diese genaueren Daten können auch für die INVAM-Simulationen verwendet werden.

7.5 Übertragbarkeit auf andere Gebiete

Die beschriebene Methodik gewährleistet die Übertragbarkeit auf andere Gebiete, sofern die notwendigen Eingangsdaten für die Simulationen bereitstehen. Diese sind in der **Tabelle 7.1** zusammengestellt.

Tabelle 7.1: Erforderliche Daten für eine Übertragung der Methodik auf andere Gebiete

Eingangsdaten	Bemerkungen	
Bewirtschaftungsdaten	lückenlose Dokumentation der Bewirtschaftung einzelner Referenzstandorte für Expert-N und INVAM-Simulationen (Anzahl gebietsangepasst)	In Zusammenarbeit mit den Bewirtschaftern
Hydrometeorologische Daten	Klimadaten mindestens Tagesniederschläge, Luftfeuchte, Temperatur, ergänzend Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit	Bei großen klimatischen Unterschieden im Gebiet empfiehlt sich die Verwendung von Radolandaten
Boden-Kenngrößen	Bodendaten	Aus Reichsbodenschätzung / Literatur / Karierungen
Messdaten	Bodenprobennahme auf ausgewählten Standorten incl. der Referenzstandorte: Nitrat- und Ammoniumstickstoffanalysen sowie Wassergehaltsbestimmungen (Anzahl gebietsabhängig)	Zu Beginn ca. 8 Probennahmen / Fläche*Jahr Abschätzung der Feldkapazität aus Wassergehaltsbestimmungen möglich
Sonstige Daten / Erhebungen	Nutzungskartierung	Im Frühsommer und im Herbst zu erheben
	Ertragsschätzungen	

Weil, wie diese Studie zeigt, die Betrachtung einzelner Anbaujahre den Einfluss der Fruchtfolge auf die N-Auswaschung nicht berücksichtigen kann, ist die lückenlose Dokumentation der

Bewirtschaftung einzelner Referenzstandorte sowie Nutzungskartierung für das jeweilige Projektgebiet bereits im Vorfeld der Auswertungen notwendig. Zusätzliche Klima- und Bodendaten können meist noch im Nachhinein erhoben werden. Aufgrund der gesammelten Erfahrungen, empfehlen wir einen Beobachtungs-/Simulationszeitraum von mindestens 3 Jahren. Die Anzahl der zu beobachtenden Projektflächen richtet sich nach der Variabilität der Bewirtschaftungsweise, der Bodenart und des Klimas im Gebiet.

Die Erhebung von Bewirtschaftungsdaten mit genauen Angaben zu Kulturart, Düngerart und – Menge, sowie Saat- und Erntetermine, Art und Termin von Bodenbearbeitungen und Bewässerungen setzt eine enge Kooperation mit den Bewirtschaftern der ausgewählten Projektflächen voraus. Regelmäßige Messungen des Wasser- und N-Gehalte auf den Projektflächen sind Voraussetzung für die Simulation mit INVAM.

7.6 Prognosefähigkeit

Einer der großen Vorteile des Modellsystems Expert-N besteht in dessen Fähigkeit, den Einfluss veränderter Randbedingungen auf die Modellergebnisse (i.e. N-Austrag) mit überschaubarem Aufwand abzuschätzen. Das bedeutet, dass die Effizienz verschiedener Maßnahmen, wie die Reduktion der Düngung, der Anbau von Zwischenfrüchten oder der Verzicht auf Kulturen/Fruchtfolgen mit hohem Auswaschungspotential oder aber auch der Einfluss von Klimaänderungen getestet werden kann.

Für die Simulation und Prognose der Nitratkonzentration in den Förderbrunnen sind zusätzlich der Transport und ggf. Reaktionen im Grundwasser sowie N-Eintrag über Randzuflüsse zu berücksichtigen.

7.7 Vorschläge für weiteres Vorgehen im Projektgebiet

Um die gegenwärtige Untersuchung sinnvoll weiterzuführen und in Wert zu setzen, wird eine Reihe von Maßnahmen empfohlen:

A. Erhebungen im Gebiet

- Lückenlose Dokumentation der Nutzungen im gesamten Projektgebiet (Nutzungskartierung im Frühsommer und Herbst)
- Weiterführung der Bewirtschaftungsdokumentation für eine reduzierte Zahl an Beobachtungsflächen (ca. 18 Standorte für 6 Hauptkulturen, weitere ausgewählte Standorte für die übrigen Kulturen, voraussichtlich ca. 13 Standorte)
- Fortführung der Bodenkontrollen auf ausgewählten Standorten und Kulturen/Fruchtfolgen. Auswahl von 3 bisherigen Projektflächen je Kultur (6 Hauptkulturen), ca. 8-12 Probenahmen pro Jahr, zudem Mehrfachkontrollen bei ausgewählten Ganglinienflächen
- Mittelfristig Reduzierung der Herbstkontrollen bei den Körner- und Saatmaisflächen auf insgesamt ca. 80 Standorte (Vorjahre 90 bis 120 Standorte), sowie Reduzierung

bei den Getreideflächen (insgesamt ca. 40 Flächen) und Spargelflächen (ca. 30 Flächen)

- Keine Kontrollen mehr bei Tabak (Virgin), übrige Kulturen derzeit unveränderte Anzahl bei der Herbstkontrolle

B. Simulationen

- Weiterführung der Simulationen ausgewählter Einzelstandorte sowie der Gebietsregionalisierung
- Revision einzelner Pflanzenmodelle (Kartoffel, Winterweizen) zur detailgetreuen Abbildung von Ertragsbildung, N-Aufnahme und Transpirationsleistung (Expert-N)
- INVAM-Simulationen auf Referenzstandorten und weiteren ausgewählten Flächen zur Validierung der Annahmen
- Evaluation verschiedener Maßnahmen und Bewirtschaftungsszenarien (*Simulationen mit Expert-N*) zur Nitratreduktion bezüglich ihrer Wirksamkeit unter Berücksichtigung der Produktivität und finanzieller Aufwände
- Variante von INVAM mit Umstellung auf gleiche Verdunstungsberechnung wie Expert-N

C. Weiterverarbeitung der Ergebnisse

- Simulation von Transport und Reaktionen im Grundwasser zur Abschätzung der Brunnenkonzentrationen
 - Verdünnungseffekte durch Infiltration aus dem Vorfluter und lateralen Zuströmen
 - Reaktionen im Grundwasser

7.8 Datenbedarf zur Weiterführung der Auswertungen mit Expert-N

Grundsätzlich ist zu betonen, dass die Beprobung der Wasser- und Nitratgehalte nachträglich gar nicht, und die Dokumentation der Bewirtschaftung und Flächennutzung nur ungenau und mit großem Aufwand rekonstruiert werden können. Der lückenlosen Fortführung der Bewirtschaftungsdaten, Nutzungskartierung und Bodenbeprobung kommt daher große Wichtigkeit zu. Die nachträgliche Beschaffung von Klimadaten ist demgegenüber vergleichsweise einfach.

7.8.1 Standortauswahl

Für eine vegetationsbegleitende Simulation bieten sich die bisher kontinuierlich beprobten und dokumentierten Standorte an:

H116, H124, H1262, H1271, H129, H142, H1457, H155, H198, H209, H217, H2202, H2203, H2209, H2218, H226, H2291, H2318, H2319, H290, H320, H385, H463, H475, H481, H52, H537, H618, H639, H765, H80

Wenn möglich sollten jeweils 3 Referenzstandorte mit den Kulturen Körnermais, Saatmais, Spargel, Erdbeeren, Kartoffeln und Winterweizen simuliert werden. Dabei sind möglichst viele Standorte mit Feldsalat und Gründüngung zur Überprüfung deren Einfluss auf N-Auswaschung zu berücksichtigen.

7.8.2 Wassergehalts- und Nitratbeprobung

Diese Daten dienen für Expert-N zur Modellvalidierung. Der Datenbedarf wird hier von den INVAM-Berechnungen vorgegeben. Darüber hinaus sind keine weiteren Bodenproben notwendig.

Für Simulationen mit Expert-N alleine sind Wassergehalt- und Nitratgehaltsbestimmungen zu mindestens 4 Terminen verteilt über ein Anbaujahr sinnvoll.

7.8.3 Bonituren

Auf Bonituren, Phänologie und Messung des C/N Verhältnis in den verschiedenen Pflanzenteilen kann verzichtet werden. Die Dokumentation etwaigen Schädlingsbefalls oder Ertragsausfall durch Unwetter ist jedoch notwendig um Diskrepanzen zwischen simulierten und gemessenen Ernteerträgen zu erklären.

7.8.4 Ernteerhebung

Der tatsächliche Ernteertrag ist ein wichtiger Parameter zur Modellvalidierung. Ob eine Ertrags-schätzung durch den Landwirt ausreicht oder die qualifizierte Beprobung notwendig ist, muss mit den Projektpartnern abgeklärt werden.

7.8.5 Bewirtschaftungsdaten

Die detaillierte und lückenlose Dokumentation der Bewirtschaftung mit

- Düngerart, -Menge und –Termin, bzw. falls Eigenmischung Nitrat-, Ammonium-, und Harnstoffgehalte,
- Bodenbearbeitungsgerät, -Tiefe und –Termin,
- Beregnungsart, -Menge und –Termin, und
- Saattermin, -Stärke, -Tiefe, Auflauftermin, Erntetermin, Biomasseabfuhr

ist für die vegetationsbegleitende Simulation von Einzelstandorten mit Expert-N unerlässlich!

7.8.6 Nutzungskartierung

Für die Auswertung der N-Auswaschung im gesamten Projektgebiet ist eine lückenlose, flächendeckende Nutzungskartierung mit Haupt- und Zwischennutzung unerlässlich. Bereits fehlende Nutzungskartierungen müssen für die kontinuierliche Simulation der Flächenauswaschung rekonstruiert werden.

7.8.7 Standard Bewirtschaftungen

Standardbewirtschaftungen für die Gebietsauswertung müssen hinsichtlich veränderter Bewirtschaftungspraxis überprüft und gegebenenfalls aktualisiert werden.

8 Forschungsbedarf

Forschungsbedarf besteht noch hinsichtlich folgender Themen:

- Untersuchung zur N-Auswaschung unter Siedlungsflächen und Straßen im Projektgebiet
- Weiterentwicklung der Expert-N Pflanzenmodelle
 - o neue Sorten
 - o Winterweizen
 - o Kartoffel
- Einbeziehung von Untersaat, Begrünungen im Spargel, stabilisierten Düngern, Saatmais Vaterpflanze in Expert-N
- Behebung des Erkenntnisdefizits beim Erdbeeranbau bezüglich des Reduktionspotenzials
- Überprüfung der Unterschiede zwischen INVAM und Expert-N
- Auswirkung alternativer Düngeverfahren problematischer Kulturarten im Bezug auf Ertrag und N-Auswaschung

9 Zusammenfassung und Fazit

Projektziele

Im vorliegenden Projekt wurden die Möglichkeiten überprüft, die sich ergeben, wenn die Überwachung gebietstypisch repräsentativer Ackerflächen mit periodischen Bodenbeprobungen durch eine ganzjährige, begleitende Modellierung des Stickstoffhaushalts ergänzt wird. Mit regional angepassten Simulationsansätzen des Agrar-Ökosystemmodells Expert-N und mit Hilfe des Auswaschungsmodells INVAM wurden dazu für die im Wasserschutzgebiet Hausen relevanten Kulturarten Körner- und Saatmais, Sommer- und Wintergetreide, Früh- und Spätkartoffel, Spargel, Erdbeere und einige Zwischenfrüchte die Auswaschung modelliert und mit einem neuen Regionalisierungsansatz kombiniert. Dieser ermöglichte die modellgestützte räumliche Übertragung gebietstypischer Kennwerte und repräsentativer Ergebnisse auf das Gesamtgebiet und verspricht damit eine innovative Methodik zur direkten Emissions- und Erfolgskontrolle für die moderne Wasserwirtschaft mit folgenden Mehrwerten:

- Möglichkeit der kontinuierlichen Überwachung und Auswertung, sowohl Vegetationsbegleitend als auch während des Auswaschungszeitraumes
- Verbesserte Transparenz sowohl für die Erklärung von Prozessen, eine verbesserte Planung und Steuerung von Maßnahmen, als auch zur Steigerung der Akzeptanz von Maßnahmen, die von der Landwirtschaft eingefordert werden.
- Schaffung einer Prognoseplattform zur Abschätzung der Wirkungen sich verändernder Rahmenbedingungen (Kulturarten, Klimabedingungen und Bewirtschaftungsweisen), um zukünftige Chancen und Risiken besser abschätzen zu können.

Neue Strategie

Das Hauptziel der vorliegenden Studie, das Entwickeln und Etablieren einer neuen Strategie zur Emissions- und Erfolgskontrolle, wurde durch die Kombination dreier Teilstrategien verwirklicht:

1. Detaillierte Beobachtung und Dokumentation von Einzelstandorten sowie flächendeckende Nutzungskartierung
2. Messungsbasierte Simulation der N-Auswaschung auf Einzelstandorten mit „INVAM“
3. Prozessbasierte Simulation des Wasser- und Nährstoffhaushalts auf Einzelstandorten und im gesamten Projektgebiet mit „Expert-N“

Die Simulationsmodelle INVAM und Expert-N stützen sich auf im Feld erhobene Mess- und Beobachtungsdaten. Der unterschiedliche Datenbedarf der Modelle wurde dargelegt. Beide Modelle dienen letztlich dazu, die N-Auswaschung aus dem Bodenprofil und damit den möglichen N-Eintrag ins Grundwasser unter landwirtschaftlich genutzten Flächen abzuschätzen, da dieser unter Praxisbedingungen nicht direkt gemessen werden kann. Die ausgewaschene N-Menge wiederum ist aber der wichtigste Parameter für die Erfolgskontrolle im Grundwasserschutz.

Simulationsergebnisse und Reduzierungspotential

Auf Basis der detailliert beobachteten und mit INVAM ausgewerteten Projektflächen unter Berücksichtigung der Flächenanteile im Projektgebiet und der Expert-N-Abschätzungen für die nicht landwirtschaftlich genutzten und nicht simulierten Flächen, resultieren für das gesamte Projektgebiet von 1.788 ha mittlere Grundwasserneubildungen zwischen 186 mm (2009) und 336 mm (2008) und mittlere N-Auswaschungen zwischen 11 kg N/ha (2009) und 23 kg N/ha (2008, Zeitraum jeweils April des aktuellen Jahres bis April des Folgejahres).

Für die landwirtschaftlich genutzten Flächen im Projektgebiet und den Zeitraum 2008 bis 2010 resultiert eine durchschnittliche N-Auswaschung (Fracht) von insgesamt rd. 22.000 kg N pro Jahr (18,2 kg N/ha). Aufgrund des relativ guten Abschneidens der flächenmäßig bedeutenden Kulturen Körnermais (im Monomaisanbau) und Saatmais (im Mono-

Saatmaisbau) wird der Gesamt-Mittelwert bei dieser Vorgehensweise vermutlich tendenziell eher etwas unterschätzt.

Hingegen wurde der N-Austrag der nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen aufgrund der Verwendung der Depositionswerte der am westlichen Rand des Kaiserstuhls gelegenen Station Vogtsburg vermutlich tendenziell etwas überschätzt. Nur für diese Station waren jedoch regionale Messwerte verfügbar.

Der höchste Anteil an der gesamten N-Auswaschung kommt aufgrund des hohen Flächenanteils den landwirtschaftlichen Nutzungen Körnermais im Monomaisbau (Daueranbau von Körnermais) mit 26,5 % zu, gefolgt von Mono-Saatmais (Daueranbau von Saatmais) mit einem Anteil von 10,0 %.

Wie die vorliegenden Untersuchungen zeigen, sind die größten Unterschiede im Nitrataustrag der Projektflächen durch den Einfluss der Kulturarten und Fruchtfolgen bedingt. Das Reduktionspotential der N-Auswaschung einer Fruchtfolge hängt dabei ab von:

- der absoluten N-Auswaschung, den Einsparmöglichkeiten und dem Flächenanteil

Folgende Fruchtfolgen bzw. Kulturarten mit hohem Reduktionspotential wurden identifiziert:

- Feldsalat nach Winterweizen bzw. Frühkartoffel, Erdbeeren, Spargel:
(aufgrund der hohen N-Auswaschung dieser Nutzungen)
- Körnermais und Saatmais:
(aufgrund der großen Anbaufläche von zusammen 61,3% der landwirtschaftlichen Nutzfläche)

Um die Nitratauswaschung der im Projektgebiet wichtigsten Kultur Körnermais deutlich zu reduzieren, müsste demnach vor allem bei Körnermaisflächen mit langjährig hohen Nitratstickstoffgehalten angesetzt werden. Flächen mit langjährig niedrigen Nitratstickstoffgehalten könnten bei weiterführenden Maßnahmen ausgespart werden.

Verschiedene „Fruchtfolgen“ oder Nutzungsfolgen weisen hohe flächenspezifische Belastungen auf. Dies betrifft z. B. die Nutzungssequenzen:



Fruchtfolgeflächen mit hohen flächenspezifischen Belastungen weisen überproportional hohe Nitratauswaschungen auf, die zu hohen Nitratreträgen ins Grundwasser führen. Um dies auszugleichen sind Verdünnungsflächen mit geringem Nitratretrag erforderlich.

Bei den Simulationen mit Expert-N zeigte sich der Spitzenwert des simulierten Stickstoffaustrags von im Mittel 109 kg N/ha für die Auswertungsperiode 2010 bei der Fruchtfolge Körnermais 2008 -> Winterweizen 2008/09 -> Feldsalat 2009/10 -> Körnermais 2010. Bei dieser Fruchtfolge fällt die hohe Mineralisierung nach Winterweizen 2008/09 mit einer ge-

ringen N-Resorption des Feldsalats 2009/10 und einer hohen Sickerung Ende 2009/Anfang 2010 zusammen.

Eine Ausweitung überproportional auswaschungswirksamer Fruchtfolgen ist aus Gewässerschutzsicht kritisch zu sehen, da dies – die gleiche Flächenbewirtschaftung angenommen - zu einer Zunahme der Nitrateinträge insgesamt führen würde. Andererseits ist zu vermuten, dass gerade bei den Kulturen mit flächenspezifisch hohen N-Auswaschungen im Hinblick auf die Nitrateinträge noch ein hohes Reduzierungspotential vorhanden ist. Durch Bewirtschaftungs- oder Fruchtfolgeänderungen bei wenigen Flächen wäre dann auch eine deutliche Reduzierung des Gesamtpotentials zu erreichen.

Eine Umstellung der Vorgehensweise bei der Bewirtschaftung ist insbesondere nach dem Umbruch von Erdbeeranlagen erforderlich.

Die Nutzung Feldsalat ist häufig als ein Fruchtfolglied (Zweitnutzung) bei den kritischen Fruchtfolgen zu finden. Da Feldsalat ein Flachwurzler ist, der nur Nährstoffe aus dem Oberboden aufnehmen kann, ist er nicht in der Lage, größere Mengen Stickstoff aufzunehmen, die nach einer Vorfrucht noch im mittleren bis tiefen Bodenbereich vorhanden sind. Niedrige Nitratstickstoff-Restgehalte zur Einsaat und eine optimale Bewirtschaftung sind daher unabdingbare Voraussetzungen für einen Anbau in Wassereinzugsgebieten.

Trotz intensivierter Beratung ist Feldsalat als Zweitkultur in Wasserschutzgebieten aus der Sicht des Grundwasserschutzes nach wie vor sehr problematisch. Dies betrifft insbesondere die nahezu jedes Jahr stark überhöhten Nitratstickstoff-Restgehalte.

Aus den auf Basis von Standardbewirtschaftungen mit Expert-N vorgenommenen Regionalisierungen resultieren für die Jahre 2008 bis 2010 (Zeiträume bezogen auf die Periode Mitte Oktober des Vorjahres bis Mitte Oktober des angegebenen Jahres) mittlere Grundwasserneubildungen zwischen 275 mm (2009) und 412 mm (2008) und mittlere N-Auswaschungen zwischen 20 kg N/ha (2009) und 32 kg N/ha (2010) für das gesamte Projektgebiet.

Beim Vergleich der Ergebnisse zwischen INVAM und Expert-N ist zu beachten, dass diese mit unterschiedlichen Methoden berechnet wurden. So bedingt beispielsweise die Verwendung der maximal möglichen (potentiellen) Evapotranspiration nach Haude des INVAM Ansatzes, dass hier die berechnete Grundwasserneubildung i. d. R. geringer ausfällt als die mit Expert-N unter Berücksichtigung der tatsächlichen Pflanzenentwicklung und Verdunstung berechnete. Dies führt bei INVAM zu niedrigeren N-Auswaschungen gegenüber den Berechnungen mit Expert-N.

Historische Daten

Bei der Auswertung der Nitratstickstoffgehalte der Jahre 1990 bis 2008 fallen zunächst die starken Unterschiede zwischen den Jahren auf, wobei sehr hohe Nitratstickstoffgehalte in sehr trockenen Jahren (1990, 1991, 2003) auftraten und in erster Linie eine Folge von Ertragsdepressionen aufgrund der Trockenheit sein dürften.

Darüber hinaus fallen in der Schutzzone II/IIIA der südliche und westliche Bereich (außerhalb des Teileinzugsgebietes „TEG“ der A- und B-Brunnen) mit erhöhten Nitratstickstoff-Restgehalten auf. Innerhalb des Teileinzugsgebietes betrifft dies in früheren Jahren den Einzugsbereich des Brunnens BIV. Bei einigen Kulturen traten in diesen Bereichen erhöhte Werte teilweise seit Anfang der Bodenkontrollaktionen auf. Dies dürfte – neben der in diesem Grundwasserbereich geringeren Verdünnung durch Uferfiltrat der Gewässer Möhlin und Neumagen – ein wesentlicher Grund für die höheren Nitratkonzentrationen bei den südlichen Brunnen, insbesondere beim Brunnen BIV sein.

Mehrwert des kombinierten Ansatzes

Die vorliegende Studie stellt die Bedeutung und den Mehrwert eines kombinierten Ansatzes aus Messungen einerseits und flächenbegleitenden Simulationen mit Expert-N und INVAM andererseits heraus. Beide Simulationsmethoden zeigen, dass die üblichen Herbstkontrollen alleine keine befriedigende Auskunft über die Auswaschung während des vegetationsfreien Zeitraums und im gesamten Jahresverlauf geben.

Für den auf Messungen beruhenden Ansatz von INVAM, ist die periodische Beprobung repräsentativer Flächen für jede Frucht- und Bodenart unerlässlich. Für die Simulation mit Expert-N dienen die Stickstoff- und Wassergehaltsmessungen der Modellvalidierung, sind aber nicht *a priori* notwendig. Dagegen ist hier die Erfassung der Bewirtschaftungsdaten inklusive Bodenbearbeitung und Düngung sowie der hydraulischen Bodeneigenschaften erforderlich. Die Simulationen können mittels Nutzungskartierung und Standardbewirtschaftungen auch auf ungemessene Standorte extrapoliert werden. Außerdem ist Expert-N geeignet, die Effektivität von Maßnahmen zum Grundwasserschutz abzuschätzen und zu quantifizieren.

Der kombinierte Einsatz von INVAM und Expert-N ermöglicht die Quantifizierung des tatsächlichen N-Eintrags in das Grundwassersystem. Der größte Vorteil gegenüber dem Einsatz eines einzigen Modellsystems liegt in der Bewertung der Modellgenauigkeit sowie der gegenseitigen Kontrolle von Eingangsdaten und Modellergebnissen im Sinne der Modellvalidierung. Beiden Modellansätzen liegen völlig unterschiedliche methodische Ansätze und Lösungsstrategien zugrunde, was notwendigerweise zu Unterschieden in den Simulationsergebnissen führt. Dennoch zeigt der Vergleich von Expert-N und INVAM mehrheitlich eine gute Übereinstimmung bei der N-Auswaschung. Für Standorte und Kulturarten wo dies der Fall ist, kann davon ausgegangen werden, dass die relevanten Prozesse weitestgehend verstanden sind und gesicherte Aussagen über den Wasser- und Nährstoffkreislauf gemacht werden können. In den meisten Fällen, wo signifikante Unterschiede zwischen beiden Modelle aufgetreten sind, konnten diese der Konzeptionalisierung von Einzelprozessen oder Parametrisierung des einen oder anderen Modells zugeordnet werden. Dabei ist wichtig festzustellen, dass beide Modelle unterschiedliche Stärken und Schwächen haben und erst die Kombination der Modelle gesicherte Aussagen bezüglich der N-Auswaschung zulässt. Auf einzelnen Standorten konnten die Gründe für größere Diskrepanzen zwischen

Expert-N und INVAM im Rahmen des Projekts nicht vollständig und abschließend geklärt werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Nutzen für die badenova

Folgender Nutzen bzw. folgende Möglichkeiten zum Einsatz der neuen Erkenntnisse ergeben sich für die badenova:

- Deutlich verbesserte, quantitative Aussagen über den Anteil einzelner Nutzungen bzw. Fruchtfolgen an der gesamten Nitratauswaschung im Projektgebiet.
- Gewinnung kultur- und gebietsspezifischer Informationen, die für Empfehlungen zur Düngung, Fruchtfolge und/oder Bewirtschaftung herangezogen werden können
- Möglichkeit der rückwirkenden und vorausschauenden Überprüfung der Effizienz verschiedener Maßnahmen, wie z. B. die Reduktion der Düngung, der Anbau von Zwischenfrüchten oder der Verzicht auf Kulturen/Fruchtfolgen mit hohem Auswaschungspotential oder die Simulation des Einflusses von Klimaänderungen.
- Wenn ergänzend zu diesem methodischen Ansatz auch der Transport und ggf. Reaktionen im Grundwasser simuliert sind und der N-Eintrag über Randzuflüsse quantifiziert ist, können auch die Nitratkonzentrationen in den Förderbrunnen simuliert werden. Dadurch könnten dann auch Prognosen über zu erwartende Konzentrationsänderungen oder zu den Auswirkungen von Änderungen im Brunnenmanagement gemacht werden (z. B. Änderungen bzgl. der Fördermengen, als eine mögliche Reaktion auf veränderte Verhältnisse im WSG Hausen).

10 Danksagung

Zu allererst bedanken wir uns insbesondere beim badenova-Innovationsfonds für die finanzielle Förderung. Des Weiteren bedanken wir uns bei den Landwirten für die wertvolle Zusammenarbeit und für das Vertrauen, Einblick in die Schlaginformationen zu gewähren. Darüber hinaus bedanken wir uns bei allen, die zur Erstellung dieser Studie beigetragen haben, sei es durch Informationen, Diskussionen, Literaturhinweise und/oder die Überlassung themenspezifischer Literatur, dies betrifft insbesondere das Landwirtschaftliche Technologiezentrum Augustenberg (LTZ) in Karlsruhe und das Helmholtz Zentrum in München.

11 Literatur

- [1] Arman B. 2003: Die Ökobilanz zur Abschätzung von Umweltwirkungen in der Pflanzenproduktion – dargestellt anhand von Praxisversuchen zur konservierenden Bodenbearbeitung und von unterschiedlich intensiv wirtschaftenden konventionellen Betrieben. Institut für Pflanzenbau und Grünland, Universität Hohenheim
- [2] Bear J. 2007: Hydraulics of Groundwater. Mineola, NY, Dover Publications

- [3] Blume H.-P., Brümmer W. G., Schwertmann U. 2002: Lehrbuch der Bodenkunde. Scheffer / Schachtschabel. 15. Auflage. ISBN 978-3-8274-1324-6. Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag
- [4] Brooks R. H., Corey A. T. 1966: Properties of porous media affecting fluid flow. Journal of Irrigation and Drainage Engineering - ASCE 92[IR 2], 61-87.
- [5] BSA (Bundessortenamt). 2000: Richtlinien für die Durchführung von landwirtschaftlichen Wertprüfungen und Sortenversuchen. Hannover, Landbuch Verlag
- [6] Celia M. A., Bouloutas E. T., Zarba R. L. 1990: A general mass conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. Water Resources Research 26[7], 1483-1496.
- [7] Crutzen P. J. 1981: Atmospheric chemical processes of the oxides of nitrogen including nitrous oxide. C.C.Delwiche (ed.) (Hrsg.): Denitrification, Nitrification and Atmospheric N₂O. 17-44. Chichester, John Wiley & Sons,
- [8] Dobbie K. E., Smith K. A. 2003: Impact of different forms of N fertilizer on N₂O emissions from intensive grassland. Nutrient Cycling in Agroecosystems 67, 37-46.
- [9] Egglestone S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. 2006: Agriculture, forestry and other land use. 4. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, IGES Hayama, Kanagawa, Japan
- [10] Engel T., Klocking B. 1994: Comparison of the simulation models leaching and CERES using the building block system expert-N. Borin M., Sattin M. (Hrsg.): 362-363.
- [11] Engel T., Priesack E. 1993: Expert-N - A building-block system of nitrogen models as resource for advice, research, water management and policy. Eijsackers H. J., Hammers T. (Hrsg.): [1], 503-507.
- [12] Fink M., Paschold P.-J., Feller C., Laber H., Maync A., Scharpf H.-C., Schlaghecken J., Strohmeyer K., Weier U., Ziegler J. 2007: Düngung im Freilandgemüsebau: Datenbasis für eine erfolgreiche Düngung im Freilandgemüsebau. www.igzev.de/user/N-Expert/Gesamt_Text_Duengung_1406.pdf 2. überarb. Auflage, 1-266. Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren und Erfurt, Gartenbauliche Berichte
- [13] Forster P. 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. Climate Change 2007 [The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press
- [14] Hutson J. L., Cass A. 1987: A retentivity function for use in soil-water simulation-models. Journal of Soil Science 38[1], 105-113.
- [15] Jones J. W., Hoogenboom G., Porter C. H., Boote K. J., Batchelor W. D., Hunt L. A., Wilkens P. W., Singh U., Gijsman A. J., Ritchie J. T. 2003: The DSSAT cropping system model. Eur J Agronomy 18, 235-265.

- [16] LFL (Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft). 07.2008b: Nährstoffgehalte von Haupt- und Zwischenfrüchten.
http://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/mineralisch/10536/linkurl_0_10_0_0.pdf.
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
- [17] LFL (Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft). 07.2008a: Nährstoffgehalte von Haupt- und Zwischenfrüchten.
http://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/mineralisch/10536/linkurl_0_10_0_0.pdf.
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
- [18] LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg). 2009a: Gefährdete Grundwasserkörper in Baden-Württemberg, Abschätzung der Stickstoffeinträge durch Modellierung. LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg) (Hrsg.): 1-61.
- [19] LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg). 2009b: Modellierung des N-Austrags im gefährdeten Grundwasserkörper Markgräflerland (16.8). LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg) (Hrsg.).
- [20] LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg). 2010a: Beratungsgrundlagen für die Düngung im Ackerbau und auf Grünland. LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg)
- [21] LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg). 2010b: Hinweise zu Laboranalytischen Dienstleistungen.
- [22] LUBW (Landesanstalt für Umwelt M. u. N. B.-W. 2011: Depositionsmesswerte Station Vogtsburg i. K. <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/17446/17.4.2012>.
- [23] McSwiney C. P., Robertson G. P. 2005: Nonlinear response of N₂O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize (*Zea mays* L.) cropping system. 11, 1712-1719. Global Change Biology
- [24] Meier U. 2001: Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. 2. Berlin, Braunschweig, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
- [25] Mualem Y. 1976: New model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research 12[3], 513-522.
- [26] Müller-Sämman K., Hölscher T., Schrempp S., Hoffmann P., Naedelin U., Schulze C., Priesack E., Selz M. 2011: Schlaggenaue GIS-gestützte Nmin-Modellierung über das Internet bei Mais. Endbericht zum Projekt "Entwicklung eines internetbasierten GIS-gestützten Auskunftssystems zur schlaggenauen Modellierung der Nmin-Gehalte und des Stickstoffhaushalts bei Mais anhand von Referenzflächen" des Innovationsfonds der badenova. <http://www.annaconsult.de/Berichte/Abschlussbericht%20Referenz-Projekt%20.pdf> , 1-72. Freiburg
- [27] Priesack E. 2006: Expert-N Dokumentation der Modellbibliothek. GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit M., TUM (Technische Universität München) (Hrsg.): FAM-Bericht 60, 1-298. Hieronymus München

- [28] Priesack E., Bauer C. 2003: Expert-N Datenmanagement. GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit M., TUM (Technische Universität München) (Hrsg.): FAM-Bericht 59, 1-114. Hieronymus München
- [29] Schneider-Götz N., Pfeleiderer H., Elsässer M., Breuer J. 04.2011: Beratungsgrundlagen für die Düngung im Ackerbau und auf Grünland. www.landwirtschaft-bw.info/servlet/PB/1329854_11/index1237455051918.html , 1-133. LTZ (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg)
- [30] Simunek J., Sejna M., Saito H., Sakai M., van Genuchten M. T. 2009: The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media, Version 4.0. 281. Riverside, California, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside
- [31] Spatz P., Glomb G., Buck R. 28.01.2010: Emissions- und Erfolgskontrolle im Grundwasserschutz. Bodenkundliche Dokumentation und bodenphysikalische Analytik der Versuchsstandorte. Untersuchungsbericht. Freiburg, Solum, Büro für Boden und Geologie
- [32] Sturm S., Kiefer J., Rödelsperger M. 2004: Validierung und Weiterentwicklung eines standortunabhängigen Bodenkontrollverfahrens in Kombination mit einfachen Nitratauswaschungs-Modellrechnungen zur quantitativen Ermittlung der Nitratauswaschung aus Böden durch vergleichende Anwendung verschiedener Methoden der Bodenwasser- und Sickerwasseruntersuchung. Veröffentlichungen aus dem Technologiezentrum Wasser Karlsruhe Bd. 26, 1-110. ISSN 1434-5765
- [33] UBA. 05.10.2010: Beitrag einer nachhaltigen Landwirtschaft zum Klimaschutz. <http://www.umweltbundesamt.de/landwirtschaft/nahrungsmittelproduktion/klimaschutz.htm> 5.10.2010.
- [34] van Genuchten M. T. 1980: Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal 44[5], 892-898.
- [35] van Groenigen J. W., Kasper G. J., Velthof G. L., van den Pol-van Dasselaar A., Kuikman P. J. 2004: Nitrous oxide emissions from silage maize fields under different mineral nitrogen fertilizer and slurry applications. Plant Soil 263, 101-111.
- [36] van Ittersum M. K., Leffelaar P. A., van Keulen H., Kropff M. J., Bastiaens L., Goudriaan J. 2003: On approaches and applications of the Wageningen crop models. Eur J Agronomy 18 , 201-234.
- [37] Wang E. 07.07.1997: Development of a Generic Process-Oriented Model for Simulation of Crop Growth. Technische Universität München, Institut für Landwirtschaftlichen und Gärtnerischen Pflanzenbau, Fachgebiet für Ackerbau und Informatik im Pflanzenbau

Abbildungen und Tabellen zu Kapitel 2 und 3

Tabelle B2.1: Legende und Profilbeschriebe Pedotope

Legenden- bez.	Beschreibung	Horizont	Mächtigkeit in cm	Typ	Porosität in %	Feld- kapazität	Permanenter Weilkepunkt in %	gesättigte Leitfähig- keit in cm/d
3	Auenbraunerde, untergeordnet Brauner Auenboden aus kiesig-steinigem sandigem Lehm bis sandig-lehmigem Schluff über Kies	1	18	Ah	53	36	13	200
		2	20	Cv	33	24	13	44
		3	12	Cv	31	18	8	60
		4	50	Cv	26	9	4	130
4	Brauner Auenboden und Gley - Brauner Auenboden aus lehmigem Schluff bis schluffigem Lehm teilweise mit geringen Kiesgehalten, über kiesig, lehmigem Sand oder Kies	1	33	Ap	48	40	13	25
		2	52	M-fGo	44	36	11	25
		3	15	fGro	45	36	17	25
5	Brauner Auenboden und Gley - Brauner Auenboden aus lehmigem Schluff über schluffigem Lehm, vereinzelt tonreichere Unterböden	1	33	Ap	46	36	14	25
		2	17	Bt-M	45	36	17	25
		3	25	Cv-Bt-M	48	41	25	25
		4	25	C	44	36	11	25
6	Brauner Auenboden und Gley - Brauner Auenboden aus sandigem bis schluffigem Lehm, teilweise Unterböden aus tonigem Lehm bis lehmigem Ton - dann pseudovergleyt	1	28	Aph	46	36	14	25
		2	22	fGro	44	36	11	25
		3	21	fGro	48	41	25	25
		4	29	fGor	48	41	25	25
7	Auenregosol-Gley, Brauner Auenboden - Gley und Gley aus kies- und steinreichem sandigem Lehm bis sandig-lehmigem Schluff über Sand und Kies	1	31	Ap	48	36	14	27
		2	24	M	40	29	14	60
		3	35		25	3	0,6	200
8	Brauner Auenboden - Gley und Gley aus kiesigem und steinigem lehmigem Sand bis sandig-lehmigem Schluff bis sandigem Lehm über Kies	1	32	Ap	48	40	13	27
		2	17	M	43	34	10	34
		3	16	M-fG	25	20	5	165
		4	35	fG	25	20	5	200
10	Brauner Auenboden - Gley und Gley aus lehmigem Schluff bis schluffigem Lehm über kiesig-lehmigen Sand, teilweise Unterböden aus tonigem Lehm bis lehmigem Ton - dann pseudovergleyt	1	25	Ah	55	40	13	70
		2	15	Sd	41	38	27	0,5
		3	20	Sd	41	38	27	0,5
		4	15	Sd	41	38	27	0,5
		5	25	Cv	28	15	101	120
11	überdeckte Pararendzina aus schluffigem Lehm bis schluffig-tonigem Lehm über Schluff (Löß, Schwemmlöß)	1	35	Ap	46	36	14	27
		2	27	Al	45	36	17	25
		3	18	Bt	48	41	25	25
		4	10	Bt-Cv	45	36	17	25
		5	10	C	44	36	11	25
12	überdeckte Parabraunerde aus kiesig-lehmigem Sand bis sandigem Lehm über kiesig-sandig-tonigem Lehm und Kies (Rheinniederterrasse)	1	15	Ah	57	43	15	70
		2	10	M-Go	30	20	10	100
		3	10	M-Go	30	20	4	50
		4	65	Cv	30	20	4	50
14	Pararendzina, Parabraunerde und Kolluvium aus Löß und Schwemmlöß	1	23	Ap	48	40	13	25
		2	34	Al	44	36	11	25
		3	23	Bt	45	36	17	25
		4	20	C	44	33	11	25
15	Parabraunerde aus Kiesen und Sanden der Rheinniederterrasse Örtlich Gley-Parabraunerde und Parabraunerde- Braunerde Rheinniederterrasse Oberrheinisches Tiefland und Hochrheingebiet	1	15	Ah	57	40	15	200
		2	15	Sd	36	30	16	6
		3	10	Sw	42	26	10	70
		4	60	Cv	26	9	4	130
Z	Pararendzina, mittel- bis mäßig tiefgründig, aus lehmigem Schluff (0-5 dm) über Lehm; Kalkführung ab GOF	1	28	Ap	48	40	13	25
		2	72	C	44	33	11	25
L1	Parabraunerde, mäßig tiefgründig bis tiefgründig, aus schluffig bis schluffig-tonigem Lehm (6- >10 dm) über Schluff; Kalkführung ab 6 bis > 10 dm u. GOF	1	33	Ap	46	36	14	25
		2	42	Bt	45	36	17	25
		3	25	Cn	44	33	11	25

Tabelle B2.2: Übersicht zu den Ergebnissen der Grunduntersuchungen auf den Projektbeobachtungsflächen (Probenahme: Februar 2009; Analyse durch das LTZ Augustenberg, Karlsruhe nach VDLUFA Standardmethoden)

H- Bezeichnung badenova	Humus %	Gesamt-N %	Umrechnungsfaktor r Humus > C : 0,58	C/N Verhältnis	Ton	Schluff	Sand	Nutzung	Bodenart	Kalk			Phosphor		Kalium		Magnesium	
					(<2 µm)	(2-63 µm)	(0,06-2 mm)			pH-Wert	pH-Klasse	Bedarf (CaO) dt/ha	P ₂ O ₅ (mg/100 g)	Gehaltsklasse	K ₂ O (mg/100 g)	Gehaltsklasse	Mg (mg/100 g)	Gehaltsklasse
H 22	1,7	0,10	0,58	9,9	17,7	40,7	41,6	A	uL	6,9	C	17	22	C	25	C	11	C
H 35	1,9	0,11	0,58	10,0	20,7	53,8	25,5	A	uL	6	B	30	15	C	34	D	13	C
H 48	1,6	0,10	0,58	9,3	21,5	62,8	15,7	A	uL	6,8	C	17	16	C	22	C	12	C
H 52	3,9	0,24	0,58	9,4	27,1	51,8	21,1	A	uL	6,8	C	17	16	C	12	B	23	F
H 69	2,3	0,13	0,58	10,3	22,2	54,4	23,4	A	sL	6,2	B	18	11	B	25	C	13	C
H 80	1,5	0,09	0,58	9,7	18,9	49,5	31,6	A	sL	6,2	B	18	9	B	32	D	12	C
H 116	1,8	0,11	0,58	9,5	16,6	38,7	44,7	A	sL	6,7	C	17	48	E	26	D	10	C
H 124	1,8	0,11	0,58	9,5	18,3	43,1	38,6	A	sL	5,6	B	53	13	C	12	B	9	C
H 129	1,2	0,08	0,58	8,7	17,8	47,2	35,0	A	sL	6,3	C	17	17	C	18	C	12	C
H 135	1,7	0,11	0,58	9,0	17,3	54,0	28,7	A	sL	5,7	B	47	15	C	30	D	11	C
H 137	1,8	0,11	0,58	9,5	16,1	55,6	28,3	A	sL	6	B	30	20	C	36	E	13	C
H 138	1,9	0,12	0,58	9,2	15,9	54,6	29,5	A	sL	5,6	B	53	17	C	40	E	10	C
H 142	1,3	0,09	0,58	8,4	20,4	54,0	25,6	A	sL	6,3	C	17	18	C	24	C	11	C
H 155	1,4	0,09	0,58	9,0	21,0	55,5	23,5	A	uL	6,8	C	17	18	C	20	C	12	C
H 198	1,4	0,09	0,58	9,0	20,1	56,6	23,3	A	t'L	6,8	C	20	19	C	25	C	11	C
H 209	1,5	0,09	0,58	9,7	14,9	53,5	31,6	A	sL	6,6	C	17	18	C	20	C	9	C
H 217	1,5	0,11	0,58	7,9	19,1	52,1	28,8	A	uL	6,7	C	17	23	C	19	C	11	C
H 226	3,6	0,24	0,58	8,7	27,3	52,0	20,7	A	uL	6,3	C	17	14	C	9	B	20	E
H 240	2,8	0,17	0,58	9,6	22,7	44,2	33,1	A	uL	6,4	C	17	24	C	24	C	15	D
H 290	1,6	0,10	0,58	9,3	17,1	58,7	24,2	A	uL	6,7	C	17	18	C	19	C	15	D
H 385	1,7	0,10	0,58	9,9	16,9	62,8	20,3	A	uL	5,8	B	41	11	B	18	C	15	D
H 463	2,8	0,17	0,58	9,6	24,3	46,6	29,1	A	uL	6,6	C	17	16	C	13	B	14	D
H 475	1,4	0,10	0,58	8,1	22,0	40,6	37,4	A	sL	6,7	C	17	22	C	24	C	14	D
H 481	1,4	0,10	0,58	8,1	16,6	36,5	46,9	A	sL	6,9	C	17	38	E	25	C	11	C
H 483	1,4	0,10	0,58	8,1	15,7	33,1	51,2	A	sL	6,4	C	17	34	D	27	D	13	C
H 537	1,6	0,11	0,58	8,4	16,5	66,0	17,5	A	uL	6,8	C	17	28	D	26	D	11	C
H 618	1,8	0,11	0,58	9,5	14,5	66,9	18,6	A	uL	7,2	D	0	31	D	25	C	9	C
H 765	1,5	0,10	0,58	8,7	16,0	73,8	10,2	A	uL	7,3	D	0	25	D	26	D	8	C
H 1271	1,3	0,09	0,58	8,4	14,1	34,4	51,5	A	sL	6,4	C	17	22	C	17	C	9	C
H 1457	1,6	0,11	0,58	8,4	21,0	71,5	7,5	A	uL	7,2	D	0	33	D	27	D	9	C
H 2202	1,5	0,10	0,58	8,7	17,4	52,8	29,8	A	uL	6,6	C	17	22	C	27	D	11	C
H 2203	1,3	0,09	0,58	8,4	17,4	56,3	26,3	A	uL	6,6	C	17	23	C	24	C	15	D
H 2209	1,3	0,08	0,58	9,4	17,5	58,3	24,2	A	uL	6,7	C	17	30	D	26	D	13	C
H 2218	1,4	0,09	0,58	9,0	19,5	51,3	29,2	A	uL	6,4	C	17	20	C	25	C	14	D
H 2291	1,8	0,11	0,58	9,5	18,4	60,4	21,2	A	t'L	6,7	C	20	18	C	20	B	12	C
H 639	1,4	0,10	0,58	8,1	18,0	74,0	8,0	A	uL	7,2	D	0	29	D	22	C	9	C
H 2318	2,1	0,12	0,58	10,2	20,4	72,7	6,9	A	uL	6,5	C	17	19	C	36	E	12	C
H 320	1,9	0,14	0,58	7,871	21,4	45,3	33,3	A	t'L	6,2	B	36	5	A	7	A	14	C
H 1262	1,8	0,13	0,58	8,031	21,7	69,7	8,6	A	uL	7	C	17	27	D	30	D	10	C
H 2319	1,8	0,13	0,58	8,031	20,1	71	8,9	A	t'L	7,4	D	0	32	D	40	D	8	B
Min	1,2	0,08		7,871	14,1	33,1	6,9			5,6		0	5		7		8	
Max	3,9	0,24		10,26	27,3	74	51,5			7,4		53	48		40		23	

Tabelle B2.3 Beispiel für einen Erhebungsbogen zur Schlagdatei (Auszug)

Schlagkartei

Entwurf und Erstellung durch Agentur ANNA

Seite 1

Erhebung von Schlagdaten auf Projektflächen 2010

Bewirtschafter*	Gemeinde*		Gemarkung*	Feldkirch
Flurst.-Nr.*		Flurst.-Name*:		
Projektfläche	155			
Angaben zum Schlag:		Ackerzahl:	schon erhoben	
1. Fruchtfolge	Jahr	Kultur	Zwischenfrucht	
1.1	2009	Zierkürbisse		
1.2	2008	Winterweizen	Feldsalat	
1.3	2007			

2. **Angaben zu langjährig wirksamen Maßnahmen** schon erhoben

2.1 ehemaliges Grünland ja nein

2.2 bis wann? (ca. Jahr) 19_____ unbekannt:

2.3 langjährige organische Düngung: ja nein

2.4 Stallmist: bis: _____ Menge/ha /Jahr ca.: _____

2.5 Gülle : bis: _____ Menge/ha /Jahr ca.: _____

3. **Analysen** schon erhoben

3.1 Grunduntersuchung: ja nein

3.2 Bodentyp (ausfüllen ANNA): _____

3.3 Monat und Jahr der Untersuchung : _____ 3 _____ 2007

Ergebnis:	Bodenart	ph-Wert	P2O5	K2O	Mg	B
schon erhoben						

3.4 Nmin Untersuchung ja nein

3.5 Datum: _____

3.6 Nmin 30 (kg) Nmin 60(kg) Nmin 90(kg)

Angaben zur Bewirtschaftung 2009

Seite 2

4. **KULTUR** auch Begrünung/ Zwischenfrucht

Hauptfrucht	Zierkürbisse	Folgefrucht	Begrünung
Sorte	Hokkaido	Sorte	Art(en)
Saattermin	20.5.2010	Saattermin	Saattermin
Ablagetiefe(cm)		Ablagetiefe(cm)	Saatechnik
Dichte (Pfl./ha)		Dichte (Pfl./ha)	(kg/ha)
Ertragsziel (dt/ha)		Ertragsziel (dt/ha)	Mulchtermin
Erntedatum	01.09. - 14.10.10	Erntedatum	
Handelsertrag (dt/ha)	130	Handelsertrag (dt/ha)	
Erntefeuchte		Erntefeuchte	
Stroh eingearbeitet			
Stroh abgefahren			

5. **FELDKARBEITEN (alle Maßnahmen oder Überfahrten seit Ernte der Vorfrucht auflisten)**

Datum (TT.MM.JJ)	Arbeitsgang	Gerät (möglichst genau)	Arbeitstiefe	Anz. Überfahrten
19.05.10	Kreisseln	Kreisselegge	15	1
20.05.10	Folien legen mit Tropfschlauch und Dünger		10	1
20.05.10	Aussaat			1
14.06.10	Hacken	Handarbeit	10cm	1
14.10.10	Bodenbearbeitung mit Sche	Scheibenegge	10	1
30.11.10	Pflugfurche	Pflug	30	1

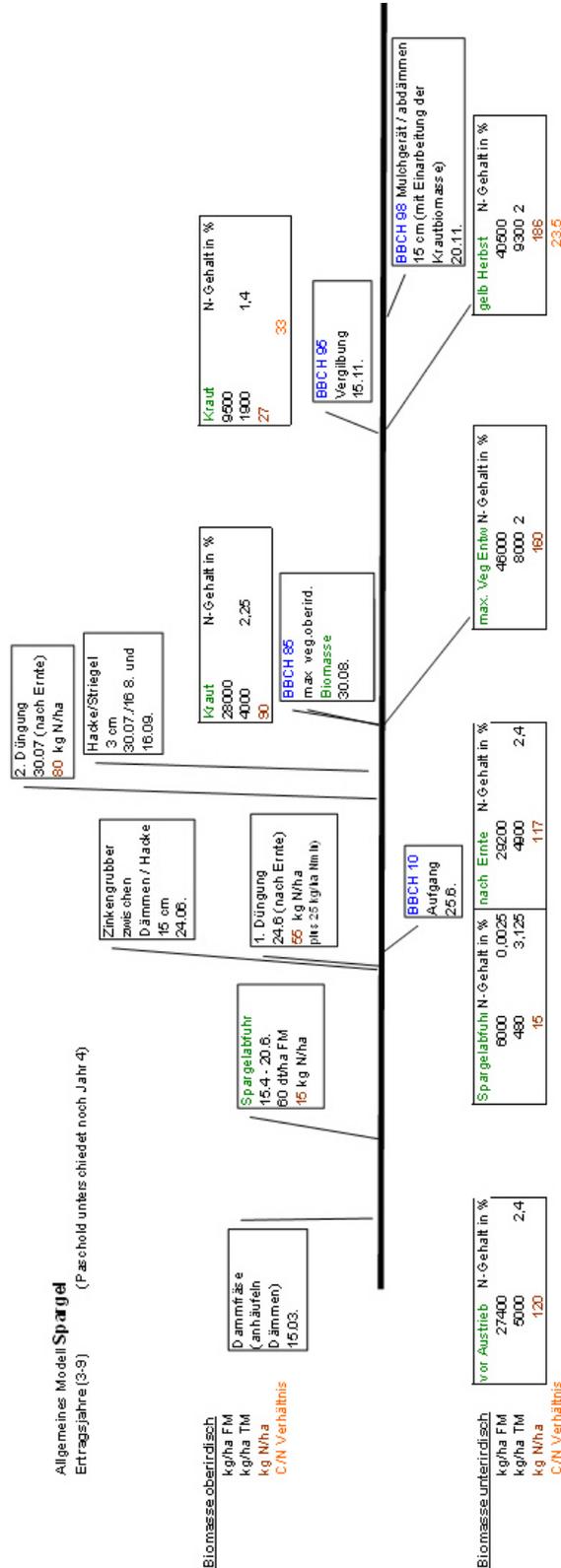
6. **DÜNGER:** Grunddünger, Kalkung, Unterfuß, N Düngung *)

Seite 3

7. **PFLANZENSCHUTZ** (Herbizide, Insektizide, Trichogramma)

8. **BEREGNUNG**

Abbildung A3.1: Dynamik und Beschreibung der unterschiedlichen Biomasse- und N-Pools im Jahresablauf für Spargel im dritten Anbaujahr (inhaltlich identisch zu Abb. 3.2 im Text)



Abbildungen und Tabellen zu Kapitel 6

Tabelle B6.1: Standardbewirtschaftungen der Gebietsregionalisierung

Schlagkartei	Kultur	Hauptfrucht	Hauptfrucht Saat	Hauptfrucht Saatsstärke (Körner/qm)	Hauptfrucht Saattiefe				
Düngung	„		Datum	Gesamt-Düngermenge kg/ha	Mineraldüngung	Gesamt-Düngerm. kg N/ha	Gesamt-N Gehalt (Gew.-%)	Nitrat-N Gehalt (Gew.-%)	Ammonium -N Gehalt (Gew.-%)
Bodenbearb.	„		Datum	Tiefe (cm)	Bodenbearb.				
Schlagkartei	Brache	Start	01.03.2008						
Schlagkartei	Brache	Ende	01.09.2008						
Schlagkartei	Erdbeeren	Start	17.11.2007						
Düngung	„		30.03.2008		Eigenmischung	20		50 % ¹⁾	50% ¹⁾
Bodenbearbeitung	„		20.04.2008	5	Striegelegge				
Düngung	„		25.06.2008	74	Kalkammonsalp.	20	27 %	13,5 %	13,5 %
Bodenbearbeitung	„		01.07.2008	15	Fräse				
Düngung	„		25.07.2008	74	Kalkammonsalp.	20	27 %	13,5 %	13,5 %
Schlagkartei	Erdbeeren	Ende	15.11.2008						
Schlagkartei	Feldsalat Winter	Saat	20.09.2007						
Bodenbearbeitung	„		19.09.2007	20	Kreiselegge				
Düngung	„		28.09.2007	100	Kalkammonsalp.	27	27 %	13,5 %	13,5 %
Bodenbearbeitung	„		16.02.2008	25	Volldrehpflug				
Schlagkartei	Feldsalat Winter	Ernteende	15.02.2008						
Schlagkartei	Kartoffeln	Pflanzung	28.03.2008	4	10 cm				
Bodenbearbeitung	„		12.12.2007	25	Volldrehpflug				
Bodenbearbeitung	„		23.03.2008	20	Saatlegge				
Düngung	„		30.03.2008	500	Kalkammonsalp.	135	27 %	13,5 %	13,5 %
Schlagkartei	Kartoffeln	Ernte	30.07.2008						
Schlagkartei	Körnermais	Saat	28.04.2008	8	4,5 cm				
Bodenbearbeitung	„		27.11.2007	25	Volldrehpflug				
Bodenbearbeitung	„		27.04.2008	7	Federzinkenegge				
Düngung	„		28.04.2008	160	Diammonphosphat	29	18 %		
Düngung	„		29.05.2008	300	Harnstoff	138	46 %		
Schlagkartei	Körnermais	Ernte	23.10.2008						

Fortsetzung Tabelle B6.1

Schlagkartei	Kultur	Hauptfrucht	Hauptfrucht Saat	Hauptfrucht Saatstärke (Körner/qm)	Hauptfrucht Saattiefe				
Düngung	"		Datum	Gesamt-Düngermenge kg/ha	Mineraldüngung	Gesamt-Düngerm. kg N/ha	Gesamt-N Gehalt (Gew.-%)	Nitrat-N Gehalt (Gew.-%)	Ammonium -N Gehalt (Gew.-%)
Bodenbearb.	"		Datum	Tiefe (cm)	Bodenbearb.				
Schlagkartei	Saatmais	Saat	04.05.2008	10	4,5 cm				
Bodenbearbeitung	"		07.12.2007	20	Volldrehpflug				
Düngung	"		30.04.2008	700	ENTEC 26	182	26 %	7,5 %	18,5 %
Bodenbearbeitung	"		30.04.2008	10	Federzinkenegge				
Bodenbearbeitung	"		04.05.2008	7	Saat egge				
Schlagkartei	Saatmais	Ernte	13.10.2008						
Schlagkartei	Senf	Saat	13.10.2007						
Bodenbearbeitung	"		10.10.2007	20	Kreiselegge				
Bodenbearbeitung	"		15.01.2008	25	Volldrehpflug				
Schlagkartei	Senf	Ende	15.01.2008						
Schlagkartei	Silomais (Tierhaltungsbetrieb)	Saat	15.04.2008	10	5 cm				
Schlagkartei		Auflaufen	25.04.2008						
Bodenbearbeitung	"		30.11.2007	26	Volldrehpflug				
Bodenbearbeitung	"		15.03.2008	7	Saat egge				
Düngung	"		05.04.2008		Eigenmischung	81			100% ¹⁾
Bodenbearbeitung	"		05.04.2008	7	Saat egge				
Düngung	"		15.04.2008	200	Eigenmischung	36	18 %		18 %
Bodenbearbeitung	"		15.04.2008	7	Saat egge				
Schlagkartei	Silomais	Ernte	01.10.2008						
Schlagkartei	Sommergerste	Saat	20.03.2008	300	2 cm				
Schlagkartei			02.04.2008						
Bodenbearbeitung	"		01.12.2007	25	Volldrehpflug				
Bodenbearbeitung	"		19.03.2008	15	Scheibenegge				
Düngung	"		23.03.2008	270	Kalkammonsalp.	73	27 %	13,5 %	13,5 %
Schlagkartei	Sommergerste	Ernte	22.07.2008						
Schlagkartei	Sommerweizen	Saat	10.03.2008	300	3 cm				
Schlagkartei		Auflaufen	20.03.2008						
Bodenbearbeitung	"		15.11.2007	26	Volldrehpflug				
Bodenbearbeitung	"		10.03.2008	8	Saat egge				
Düngung	"		20.03.2008		Eigenmischung	60		50 % ¹⁾	50 % ¹⁾
Düngung	"		30.05.2008		Eigenmischung	60		50 % ¹⁾	50 % ¹⁾
Schlagkartei	Sommerweizen	Ernte	22.08.2008						

Fortsetzung Tabelle B6.1

Schlagkartei	Kultur	Hauptfrucht	Hauptfrucht Saat	Hauptfrucht Saatstärke (Körner/qm)	Hauptfrucht Saattiefe				
Düngung	"		Datum	Gesamt-Düngermenge kg/ha	Mineraldüngung	Gesamt-Düngerm. kg N/ha	Gesamt-N Gehalt (Gew.-%)	Nitrat-N Gehalt (Gew.-%)	Ammonium -N Gehalt (Gew.-%)
Bodenbearb.	"		Datum	Tiefe (cm)	Bodenbearb.				
Schlagkartei	Spargel	Start	28.11.2007						
Bodenbearbeitung	"		30.11.2007	50	Dammfräse				
Düngung	"		24.06.2008	900	Eigenmischung	72	8 %		8 %
Bodenbearbeitung	"		24.06.2008	25	Grubber				
Bodenbearbeitung	"		30.07.2008	3	Hacke / Striegel				
Bodenbearbeitung	"		25.11.2008	10	Mulchgerät				
Schlagkartei	Spargel	Ende	26.11.2008						
Schlagkartei	Wintergerste	Saat	31.10.2007	320	3 cm				
Bodenbearbeitung	"		15.10.2007	26	Volldrehpflug				
Bodenbearbeitung	"		30.10.2007	8	Kreiselegge				
Schlagkartei		Auflaufen	10.11.2007						
Düngung	"		01.03.2008		Eigenmischung	50		50% ¹⁾	50% ¹⁾
Düngung	"		01.04.2008		Eigenmischung	30		50% ¹⁾	50% ¹⁾
Schlagkartei	Wintergerste	Ernte	01.07.2008						
Schlagkartei	Winterweizen	Saat	27.11.2007	350	3 cm				
Bodenbearbeitung	"		26.09.2007	25	Volldrehpflug				
Bodenbearbeitung	"		27.09.2007	10	Federzinkenegge				
Düngung	"		01.03.2008	260	Kalkammonsalp.	70	27 %	13,5 %	13,5 %
Düngung	"		17.05.2008	260	Kalkammonsalp.	70	27 %	13,5 %	13,5 %
Schlagkartei	Winterweizen	Ernte	25.07.2008						

¹⁾ Angabe in Prozent des Gesamt-N-Gehalts