
Nitrathaushalt und Eintragspotentiale der Trinkwassergewinnungsgebiete

– Auskunftsplattform Gewässerschutz

Zusammenfassender Abschlußbericht

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

Bearbeitung:

Dirk Betting	(badenova)
Martin Selz	(badenova)
Andreas Morhard	(HydroS Consult)
Franz-Josef Kern	(HydroS Consult)
Stephen Schrempp	(HydroS Consult)

Freiburg im Breisgau, November 2006

Inhaltsverzeichnis

1	<u>EINLEITUNG & ZIELSETZUNG</u>	1
2	<u>METHODIK</u>	1
2.1	FLÄCHENHAFTE GRUNDWASSERNEUBILDUNG	2
2.2	RANDBEDINGUNG OBERFLÄCHENGEWÄSSER	3
2.3	BODENWASSERHAUSHALTS- UND –STICKSTOFFMODELLIERUNG	3
2.4	NUMERISCHE GRUNDWASSERMODELLE	4
3	<u>STAUFENER BUCHT</u>	5
3.1	MODELL- UND UNTERSUCHUNGSGEBIET	6
3.2	FLÄCHENHAFTE GRUNDWASSERNEUBILDUNG	8
3.3	AGRAR – ÖKOSYSTEM - MODELLIERUNG	8
3.4	WASSER- UND STICKSTOFFBILANZ STAUFENER BUCHT	10
4	<u>ZARTENER BECKEN</u>	14
4.1	MODELL- UND UNTERSUCHUNGSGEBIET	14
4.2	FLÄCHENHAFTE GRUNDWASSERNEUBILDUNG	16
4.3	AGRAR - ÖKOSYSTEM - MODELLIERUNG	16
4.4	WASSER- UND STICKSTOFFBILANZ ZARTENER BECKEN	17
6	<u>ERGEBNISSE UND ABSCHLIEBENDE ZUSAMMENFASSUNG</u>	21
7	<u>LITERATURANGABEN</u>	23

1 Einleitung & Zielsetzung

Die badenova setzt seit vielen Jahren konsequent auf eine vorbeugende, flächendeckende Gewässerschutzstrategie auf der Grundlage eines Kooperations- und Partizipationsansatzes in den Wassergewinnungsgebieten. Der Umfang sowohl hinsichtlich Grundlagen- und Ursachenermittlung, des Monitorings, als auch der landwirtschaftlichen Kooperation reicht hierbei weit über die Anforderungen und Verpflichtungen gemäß Wassergesetz und Schutzgebiets- und Ausgleichsverordnung (SchALVO) hinaus. Nach wie vor bildet die Belastung durch überhöhte Stickstoffeinträge, vorwiegend durch Nitratauswaschung unter landwirtschaftlichen Kulturflächen ein zentrales Thema.

Die Konzeption einer vorsorgenden Gewässerschutzstrategie erfordert die Kenntnis und Überwachung der bestehenden Gefährdungspotentiale und ihrer Entwicklung, sowie die Möglichkeit zur belastbaren Bewertung von Eingriffs- und Steuerungsoptionen (Prognose).

Das Gesamtvorhaben mit seinen drei, sich ergänzenden bzw. aufeinander aufbauende Teilprojekten wurde mit dem Ziel durchgeführt, die einzelnen **Bilanzglieder des Wasser- und Nitrathaushaltes** in hoher räumlicher, zeitlicher und Kulturart spezifischer Auflösung in Abhängigkeit ihrer naturräumlichen und klimatischen Steuergrößen zu beschreiben und in einer **geschlossenen Systembeschreibung** (Modell) für die Hauptgewinnungsgebiete Zartener Becken und Staufferer Bucht zusammenzuführen und auszuwerten.

Hierfür wurde ein methodischer Ansatz evaluiert, der im Kern auf der Kopplung einer Standort bezogenen Agrar-Ökosystemmodellierung (Expert-N) mit einem numerischen Grundwassermodell beruht und zukünftig als Werkzeug zur Prognose von Entwicklungen und Bewertung von Maßnahmen für die Kooperationsgebiete zur Verfügung steht und auch auf andere Gebiete übertragen werden kann.

Mit der parallelen Entwicklung einer **Internet basierten Auskunftsplattform** wurden die erweiterten Grundlagen und Ergebnisse in das zukünftige Kooperationsmanagement und die landwirtschaftliche Beratung integriert.

2 Methodik

Die im Rahmen des Projektes zur Untersuchung „Nitrathaushalt und Eintragspotentiale der Trinkwassergewinnungsgebiete“ entwickelte und angewandte Methodik basiert im Kern auf einer kombinierten Anwendung von vier Modellen bzw. eigenständigen modelltechnischen Untersuchungen.

Im Teilprojekt „**Wasserhaushalt und numerische Grundwassermodelle**“ werden die Bilanzgrößen des Grundwasserhaushaltes für die jeweiligen Modell- bzw. Untersuchungsgebiete beschrieben und sowohl das langfristig verfügbare Dargebot, als auch die zeitliche Variabilität der Wasserumsätze ausgewiesen. Besondere Relevanz in Bezug auf die Fragestellung besitzen die beiden Randbedingungen der **flächenhaften Grundwasserneubildung** aus Niederschlag sowie der Wasseraustausch zwischen den Oberflächengewässern und den Grundwassersystemen (**Uferfiltrat**). Die Ableitung der Randbedingung der flächenhaften Grundwasserneubildung erfolgt auf Grundlage des seitens der LUBW in Baden-Württemberg landesweit eingesetzten **Programmsystems GWN-BW**, die Modellierung der Interaktion zwischen den Oberflächengewässern und Grundwasser wurde anhand eines Gerinnehydraulischen Ansatzes mit dem

Simulator RIP-INF realisiert. GWN-BW und RIP-INF sind Entwicklungen der HydroS Consult.

Die numerische Modellierung der Strömungs- und Transportprobleme selbst erfolgte unter Einsatz des Finite Element Subsurface Flow and Transport Modeling System „**FEFLOW**“ der WASY GmbH, Berlin.

Während sich die Nitratkonzentrationen in den Oberflächengewässern und den Zuströmen über die Modellränder, anhand der vorliegenden Datengrundlagen des Monitorings, relativ gut bestimmen lassen, bildet der an die flächenhafte Grundwasserneubildung gekoppelte Austrag von Nitrat insbesondere unter landwirtschaftlich genutzten Flächen die zentrale Problemstellung. Auf Grund seines komplexen, hoch dynamischen Prozessgefüges in Abhängigkeit zahlreicher Steuerfaktoren sind die verfügbaren Datengrundlagen (z.B. Nmin-Kontrollen) nicht ausreichend, die an die Grundwasserneubildung gekoppelten Nitratausträge in ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität zu quantifizieren. Einen **Lösungsansatz** verspricht der Einsatz komplexer **Agrar Ökosystem Modelle** mit erklärenden Pflanzenmodellen.

Das Teilprojekt „Nitrathaushalt und Eintragspotentiale“ setzt daher auf den Einsatz Kulturart spezifische Agrar-Ökosystem-Modelle unter Verwendung des **Modellbaukastens EXPERT-N** der GfS in München für einzelne repräsentative Ackerstandort in Verbindung mit einem **Regionalisierungsansatz**.

Den **numerischen Grundwassermodellen** kommt im Rahmen der Bearbeitung eine zweifache Funktion zu. Einerseits erlauben die Verknüpfung *a priori* vorliegender Kenntnisse zu Wasserumsätzen und Materialeigenschaften des Grundwasserleiters im numerischen Strömungsmodell und der Abgleich simulierter und beobachteter Potentialhöhen während der Modellkalibrierung eine indirekte Identifikation der Größenordnung weiterer, zuvor nicht oder nur ungenau bekannter Parameter (*e.g. hydraulische Durchlässigkeit*) und Bilanzgrößen (*e.g. Zu-/Abstrom über die Grenzen des Modellgebietes*). Andererseits ermöglichen spezielle Modellanwendungen beispielsweise die Bestimmung von Fließwegen, Fließ- und Verweilzeiten. Durch Verknüpfung der **Bilanzgrößen des Wasserhaushalts** mit den zugehörigen **Stofffrachten**, wie sie im Teilprojekt zur Ermittlung der Nitratfrachten aus dem Boden ermittelt werden, oder mit den beobachteten Nitratkonzentrationen kann schließlich eine Stickstoffbilanz für das bewirtschaftete Grundwassersystem aufgestellt werden.

2.1 Flächenhafte Grundwasserneubildung

Die Randbedingung der flächenhafte Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag wurde für alle Gewinnungsgebiete schlagspezifisch durch Simulation des Bodenwasserhaushalts auf Basis von **Tageswerten** der meteorologischen Eingangsdaten für den **Zeitraum 1987 bis 2003** durchgeführt.

Dazu wurde das in Baden-Württemberg landesweit eingesetzte **Programmsystem GWN-BW** verwendet, für die Verdunstungsberechnung allerdings eine von den Standardeinstellungen abweichende alternative Konfiguration gewählt. Diese erlaubte bei vermindertem Genauigkeitsanspruch der zeitlichen Auflösung (*die Ergebnisse wurden auf Monatswerte aggregiert*) eine relativ detaillierte Unterscheidung des Transpirationsverhaltens einzelner Ackerkulturen.

In Abhängigkeit von der simulierten Sättigung des Bodens (*Wasserangebot*) und saisonal variablen, empirischen Pflanzenfaktoren (*Pflanzeigenschaften und phänologische Entwicklung*) erfährt die potentielle Verdunstung eine Modifikation zur aktuellen Evapotranspiration. Diese bleibt im Sommer, bei geringer Sättigung

und mithin begrenzter Wasserverfügbarkeit meist deutlich hinter der potentiellen Verdunstung zurück, kann bei guter Wasserversorgung und üppiger Vegetation aber auch über der Referenzgröße liegen. Darüber hinaus werden Bereiche mit geringem Grundwasserflurabstand über eine Abschätzung der Wirksamkeit des kapillaren Aufstiegs berücksichtigt.

2.2 Randbedingung Oberflächengewässer

Neben der flächenhaften Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag wird der Grundwasserhaushalt häufig in starkem Maße durch den Wasseraustausch mit oberirdischen Fließgewässern bestimmt. Dabei kann es je nach Grundwasser- und Wasserstand im Oberflächengewässer sowohl zur Infiltration eines Teils der von Flüssen und Bächen transportierten Abflussmenge als auch zu einem Übertritt von Grundwasser in den Vorfluter kommen.

Die hydraulische Berechnung von **Wasserspiegellagen** und benetztem Umfang entlang der gesamten Oberflächengewässer erfolgte unter Anwendung des Gerinnemodells **RIPINF** auf Basis von **Tageswerten** der Abflüsse, unter der Annahme stationärer Verhältnisse und ohne Berücksichtigung der zeitlichen Translation entlang der Fließstrecke.

Die Berechnung der Austauschraten erfolgt in Abhängigkeit der Grundwasserspiegellagen in Monatsschritten. Realisiert wurde dies durch eine direkte **Kopplung** der **Gerinnemodelle** mit den **Grundwassermodellen**.

2.3 Bodenwasserhaushalts- und -stickstoffmodellierung

Für die Beschreibung der Randbedingung des räumlich und zeitlich aufgelösten, flächenhaften Nitratreintrages in Abhängigkeit von Standortbedingungen (Boden, Klima, Landnutzung) und der Bewirtschaftung (Fruchtart, Düngung, Bodenbearbeitung und ggf. Beregnung) unter landwirtschaftlich genutzten Flächen wurde ein kombinierter Modellansatz gewählt. Er verbindet eine **Ackerschlag orientierte Modellierung** auf der Grundlage eines Agrar-Ökosystemmodells für **gebietsspezifische Referenzflächen** über einen **Regionalisierungsansatz** mit der flächenhaften Grundwasserneubildungsmodellierung (s. Kap 2.1)

Als Agrar-Ökosystemmodell wurde das komplexe, deterministische Agrar-Ökosystemmodell **Expert-N** (E. Priesack, C. Bauer, 2003) in der Version 3.0.10 gewählt, wie es von der GSF in München weiterentwickelt und gepflegt wird.

Durch seinen Aufbau als modulares Modellsystem erlaubt Expert-N durch Kombination von geeigneten Pflanzenwachstums-, Wasserhaushalts- und Stickstofftransformationsmodellen die Erstellung von Kulturart- bzw. Fruchtfolge spezifischen Simulationsmodellen, die eine **Beschreibung** des gesamten Prozessgefüges des **Nitratkreislaufes** bzw. **-haushaltes ganzjährig** auf Tagesschrittbasis im System Boden-Pflanze für Monokulturarten und Fruchtfolgen auf einem landwirtschaftlich genutzten Standort leisten.

Entscheidendes Kriterium für die Wahl bildete die Möglichkeit **erklärende Pflanzenmodelle**, d.h. Pflanzenmodelle die in der Lage sind, die phänotypische Pflanzenentwicklung und damit den Nährstoffentzug und die Ertragsleistung auf einem Standort auf Grundlage des aktuellen Energie-, Nährstoff- und Wasserhaushaltes zu beschreiben, einzusetzen. Weiteres Kriterium war die Fähigkeit der Abbildung des Bodenwasser- und -wärmehaushaltes als Motor für die im Boden ablaufenden Prozesse des Stickstoffhaushaltes.

Für die Hauptfruchtarten **Mais**, **Weizen**, **Gerste**, **Kartoffeln** und **Zuckerrüben**, sowie extensives und intensives **Grünland** konnten geeignete, erklärende Pflanzenwachstumsmodellansätze auf Basis der Modellansätze CERES, SPASS, SUCROS ausgewählt und eingesetzt werden.

Für andere Fruchtarten wie z.B. Sonderkulturen **Tabak** und **Spargel** waren keine erklärenden Pflanzenwachstumsmodelle verfügbar. Diese Kulturarten wurden über einen modifizierten Modellansatz LEACHN (Hutson & Wagenet, 1992) und dem Ansatz vorgegebener Wachstumskurven und Ernteerträge abgebildet.

Um die unterschiedlichen Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen in den Wasserschutzgebieten abzubilden und die Standort bedingten Unterschiede auszuweisen, wurden alle Fruchtarten bzw. Fruchtfolgen jeweils mit einer **Standardbewirtschaftung** (Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngung, Ernte, Termine) über den Zeitraum der verfügbaren Wetterdaten (1986-2002) auf ausgewählten Referenzstandorten simuliert. Die **Referenzstandorte** berücksichtigten die unterschiedlichen Bodeneigenschaften im Gebiet und unterschiedliche hydroklimatische Bedingungen. Die parametrisierten Bewirtschaftungsregime wurden i.W. durch den Schutzgebietsberater der badenova aufgrund langjähriger Erfahrung und gezielter Befragungen festgelegt.

Im Zuge des Projektes konnten für alle relevanten Fruchtart/Fruchtfolge–Referenzstandort - Kombinationen der Untersuchungsgebiete erfolgreich **Modellsimulationen auf Tageswertbasis** umgesetzt werden. Das Ergebnis bilden **Zeitreihen mittlerer Erwartungswerte** zu den einzelnen **Wasserhaushaltsgrößen**, Pflanzenwachstum und Ertragsbildung, sowie insbesondere zu den **Nitrat-haushaltsgrößen** (i.e. N-Frachten im Sickerwasser) im jeweiligen System Boden-Pflanze. Die langjährige Auswertung liefert die **Standort spezifischen Eintragspotentiale**, die Variabilität der Nitratauswaschung im Jahresvergleich ein gutes Risikomaß.

Die erzielten Simulationsergebnisse wurden insbesondere anhand der Wasserhaushaltsgrößen und der prognostizierten Ernteerträge (Biomasse) auf **Plausibilität** hin geprüft. Sie zeigen (in Abhängigkeit der jeweiligen Standortqualität und klimatischen Verhältnisse) überwiegend gute Ergebnisse im Bereich der Erfahrungs- und Erwartungswerte, differenzieren gleichzeitig gut die erwartete Abhängigkeit von Standort spezifischer Bonitäten hinsichtlich Bodenausstattung und Klimaverhältnisse (Niederschlag).

Insbesondere die Modellansätze mit erklärenden Pflanzenmodellen bilden die jahresspezifisch auftretende zeitliche Abfolge von Mangel- und Überschusssituationen (Wasser- und /oder Stickstoff) gut ab.

2.4 Numerische Grundwassermodelle

Mit Abschluss der Projektbearbeitung liegen für die Gewinnungsgebiete **Staufener Bucht** (*Grundwassereinzugsgebiete der Wasserwerke Hausen, Tuniberggruppe und ZV Krozinger Berg*) und **Zartener Becken** (*Wasserwerk Ebnet*) instationäre, dreidimensionale numerische Grundwassermodelle vor, welche die Strömungssituation der Jahre **1987 bis 2002** beschreiben. Einen unmittelbaren Nutzen entwickeln diese Modelle durch die in ihnen stattfindende Integration der über das bewirtschaftete Grundwassersystem vorliegenden Kenntnisse und deren Zusammenführung zu einer in sich konsistenten Systembeschreibung. Diese erlaubt eine wechselseitige Plausibilisierung der vorliegenden Messwerte, der Abschätzungen zu Bilanzgrößen und Systemeigenschaften sowie das Aufdecken

verbleibender Kenntnislücken und Unsicherheiten. Darüber hinaus wird eine deutlich verbesserte Interpretation der im Rahmen der Schutzgebietsüberwachung (*Monitoring*) erhobenen Daten möglich. Zuletzt können die Modelle zur zukünftigen Risikoabschätzung und Szenarienbetrachtung, etwa bezüglich der Auswirkungen geplanter Eingriffe in den Grundwasserhaushalt, eingesetzt werden.

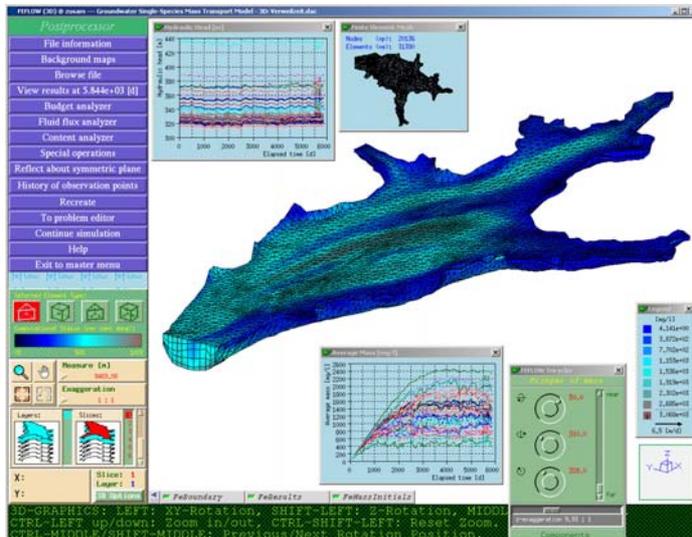


Abb. 2.4.1 Modell Zartener Becken

Für die **Staufener Bucht** konnte das bestehende Modell (*Morhard, 2001*) zeitlich fortgeschrieben werden; darüber hinaus wurden wesentliche Veränderungen bei der Berechnung der flächenhaften Grundwasserneubildung sowie bei der Abschätzung der Nitratauswaschung aus den landwirtschaftlichen Kulturf lächen vorgenommen, während die Parametrisierung der übrigen Randbedingungen und Systemeigenschaften (*hydraulische Durchlässigkeiten, Speicherkoefizienten*) nur sehr geringfügig überarbeitet werden musste.

Demgegenüber erfolgte für das **Zartener Becken** eine weitgehende Neuerstellung des Grundwassermodells. Beide Modelle basieren nunmehr auf einer identischen Konzeption und einheitlichen methodischen Beschreibung der Randbedingungen.

In beiden Fällen handelt es sich um **instationäre Simulationen**. Die Aquifergeometrie wurde jeweils dreidimensional aufgelöst, wobei die gesamte **vertikale Abfolge der Quartärsedimente** beschrieben wird. Die Wasserumsätze und die wasserwirtschaftliche Nutzung finden überwiegend in den jungquartären Ablagerungen statt; das Altquartär tritt jedoch, trotz geringer Durchlässigkeiten und Austauschraten, in Folge der enormen gespeicherten Wasservolumina als bedeutender Umsatzraum für Stofftransportvorgänge in Erscheinung.

3 Staufener Bucht

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsprojektes im Hinblick auf die zentrale Fragestellung des Wasser- und Nitrathaushaltes für das Trinkwasserschutzgebiet der badenova in der Staufener Bucht zusammengefasst. Hierbei wird auf eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse der instationären 3D-Modellentwicklung und Anwendung zur Bestimmung von Wasserkomponenten und Wasseralter ebenso wie auf eine detaillierte Diskussion der Gebietsausstattung (Boden, Klima, Hydrogeologie, etc.) verzichtet und auf den Modellbericht verwiesen.

3.1 Modell- und Untersuchungsgebiet

Das Modellgebiet des numerischen Grundwassermodells Staufener Bucht umfasst mit seiner Gesamtfläche von rund 100 km² den Lockergesteinsaquifer der gesamten Staufener Bucht und deckt die mit einem zusammenhängenden Lockergesteinsaquifer ausgestatteten **Grundwassereinzugsgebiete** der Wasserwerke **Hausen** (badenova), der **Tuniberggruppe** und des Zweckverbandes **Krozinger Berg** vollständig ab. Die gemeinsam ausgewiesenen Schutzgebiete und damit der Untersuchungsraum umfassen zusätzlich Teilbereiche mit einer Fläche von 6,7 km² der Mengener Brücke und den Nordwesthang des Batzenberges.

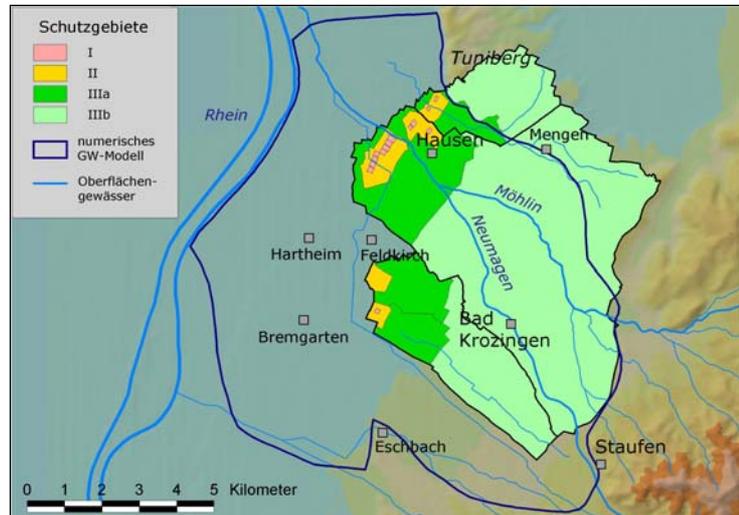


Abb. 3.1.2 Modell- und Untersuchungsgebiet Staufener Bucht

Das Modellgebiet gliedert sich deutlich in zwei Teilräume mit jeweils eigener Charakteristik. Seine südöstliche Hälfte wird durch die topographisch wie hydrogeologisch klar begrenzte Staufener Bucht eingenommen, während die westlichen und nördlichen Bereiche der inneren Grabenzone zuzurechnen sind. Die Abgrenzung beider Teilräume erfolgt durch die Grabenrandschollen Biengener Berg, Krozinger Berg und das Tunsler Bergle, welche ihrerseits unmittelbar auf der tektonischen Störungslinie der inneren Rheingrabenverwerfung liegen.

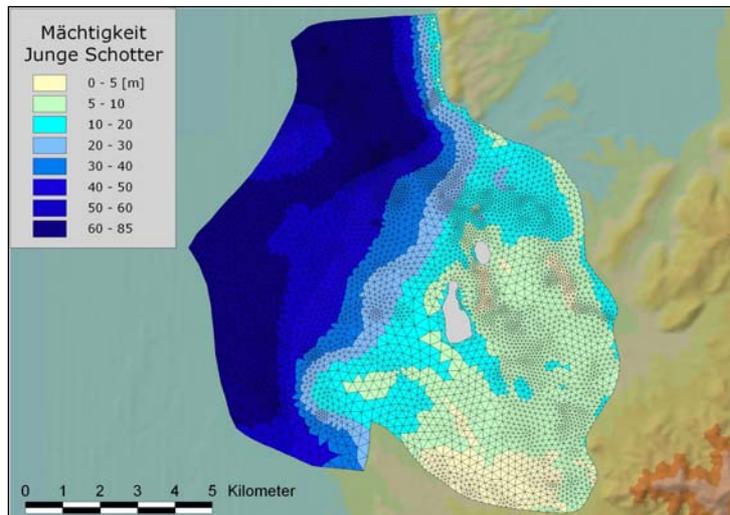


Abb. 3.1.3 Mächtigkeiten des jungquartären Hauptaquifers

Auf Grundlage einer flächendeckenden Erfassung und Auswertung der seitens des Finanzamtes Freiburg Land zur Verfügung gestellten Bodenschätzungskarten und Grablochbeschreibungen wurde im Rahmen des Projektes eine für den Untersuchungsraum flächendeckend und **flurstückscharfe Beschreibung** der **Bodenverhältnisse** hinsichtlich Bodenarten und Auswertung der Bodenkenwerte realisiert.

Die Verteilung der nutzbaren Feldkapazität weist die auf Löß und Schwemmlöß entwickelten Böden (Pararendzinen bis Parabraunerden) mit ausgesprochen hohen nutzbaren Feldkapazitäten (200-240 mm/m) aus, während der typische Boden der Niederterasse als Bodenentwicklung auf carbonathaltigen Schottern mit einer 20-40 cm Deckschicht aus Hochflutlehm und fehlender Lößauflage (rötliche Parabraunerde) durch ein deutlich ungünstigeres Wasserspeicher-

vermögen mit nutzbaren Feldkapazität zumeist im Bereich von 80 – 120 mm/m charakterisiert wird. Aufgrund der gleichzeitig verringerten Niederschläge im Bereich der Niederterrasse handelt es sich um trockene Standorte mit substratbedingt dürrtiger Ausstattung mit Nährstoffreserven und erhöhter Auswaschungsgefährdung. Darüber hinaus finden sich, abgesehen von der Rheinaue selbst, entlang der holozänen Talungen der Oberflächengewässer zumeist reliktsche Auebodenbildungen (sand- und kiesreiche Vegen und Paternien) mit ebenfalls im Vergleich zu den umliegenden Lößböden deutlich verringerten nutzbaren Feldkapazitäten (80-100mm/m).

Für die standort-/schlagbezogene Modellierung des Bodenwasser- und Nitrathaushalts wurden entsprechend folgende charakteristische, **repräsentative Standorte** ausgewählt und auf entsprechenden Parameterobjekten für die AGRAR-Ökosystemmodellierung abgebildet (Tab. 3.1.1):

Tab. 3.1.1 Standortsszenarien (K: WSG Bad Krozingen, H: WSG Hausen)

Bodenbezeichnung nach Bodenschätzung	nFK	Wetterdaten
K10433	ca 65 mm (B/G Gzahl 34)	Station 1 (N 765 mm, 200 m ü. NN, 11°C mittl. Jahrestemp.)
K40107	ca 100 mm	
K40083	ca 140 mm (B/G Gzahl 62)	
H10210	ca. 170 mm (B/G Gzahl 66)	Station 9 (N 976 mm, 300 m ü. NN, 10,7°C mittlere Jahrestemp.)
H20306	ca. 210 mm (B/G Gzahl 74)	
K50258	ca. 240 mm	

Im Rahmen dieses Projektes wurden anhand einer **flurstückscharfen Realnutzungskartierung** für die Situation 2003 die Nutzungsanteile sowohl für das Wasserschutzgebiet Hausen (38.8 km²), als auch für das gemeinsam ausgewiesene Wasserschutzgebiet für die Brunnen Bremgarten und ZV Krozinger Berg (11.4 km²) ausgewertet.

Knapp 65% der Gebietsfläche werden ackerbaulich genutzt. Während hiervon der **Maisanbau** fast zwei Drittel beansprucht, dienen weniger als zehn Prozent für den Anbau konventioneller **Getreidesorten** (etwa 40% Weizen und 60% Gerste). Unter den mit knapp sieben Prozent Flächenanteil vertretenen **Hackfrüchten** sind fast 70% Kartoffeln (*überwiegend Frühkartoffeln*) und knapp 30% Rüben (*Futter- und Zuckerrüben*). Hervorzuheben ist der mit fast 13% ausgesprochen hohe Flächenanteil von **Sonderkulturen** (300ha, davon 83% Spargel, 13% Tabak, 4% Erdbeeren) und der mit 4.4 Prozent vertretene Gemüseanbau.

Auf dieser Grundlage, verbunden mit der Auswertung von Expertenbefragungen, wurden für die Modellierung von Bodenwasserhaushalt, Pflanzenwachstum und Nitrataustrag auf den ausgewählten Referenzflächen folgende relevante Fruchtarten/Fruchtfolgen identifiziert. (Tab. 3.1.2)

Tab. 3.1.2 Bewirtschaftungsszenarien

Fruchtart	Modellierung als	Modellansatz
Mais	Körnermais Monokultur	CERES, maize.gtp
	Silomais Monokultur	CERES, maize.gtp
Weizen	Winterweizen in Fruchtfolge nach Körnermais	CERES, wheat.gtp
Gerste	Sommergerste in Fruchtfolge nach Körnermais	CERES, barley.gtp
Kartoffeln	Frühkartoffeln in Fruchtfolge nach 2-jährig Körnermais, bewässert	SPASS, potato(früh).gtp
	Spätkartoffeln in Fruchtfolge nach 2-jährig Körnermais	SPASS, potato(late).gtp
Zuckerrüben	In Fruchtfolge nach 2-jährig Körnermais	SUCROS, sugarbeet.gtp
Spargel	Ertragslage, Monokultur	LEACHN
Tabak	Tabak Virgin Monokultur	LEACHN
	Tabak dunkel (Geudertheimer) Monokultur	LEACHN

3.2 Flächenhafte Grundwasserneubildung

Im Vorfeld des Wasserwerkes Hausen beträgt die **mittlere jährliche Grundwasserneubildung** unter den **landwirtschaftlichen Kulturflächen** überwiegend **190 bis 230 mm/a**. Jenseits der inneren Rheingrabenverwerfung (*Biengen*) liegen die Werte im oberen Bereich dieser Spanne, östlich der B3 häufig bei 250 bis 275 mm/a. Die höchsten Sickerwassermengen innerhalb des WSG Hausen werden mit gut 350 mm/a für Rebflächen des Batzenberges ermittelt. Die höchsten Werte im gesamten Untersuchungsgebiet finden sich vor dem Eingang des Münstertals am östlichen Ende des WSG Krozinger Berg, wo zugleich hohe Niederschläge und leichte Böden angetroffen werden. Bei etwa 900 mm Jahresniederschlag beträgt die Grundwasserneubildung dort meist 350 bis 400 mm/a.

Neben ihrer räumlichen Differenzierung unterliegt die Grundwasserneubildung einer starken **zeitlichen Variabilität**. Im Vergleich zu den langfristigen Mittelwerten weisen die **Einzeljahre** erhebliche Abweichungen auf. So variiert die jährliche Grundwasserneubildungsrate, bei Niederschlägen zwischen 650 und 1050 mm/a, zwischen knapp 100 und mehr als 300 mm.

Die Jahre 1989 bis 1993 fallen als besonders trockene Periode auf, in welcher die Niederschläge nur 85 Prozent, die Grundwasserneubildung sogar nur knapp 60 Prozent des jeweiligen langjährigen Mittelwertes erreichten. Auffällig sind auch die hohen sommerlichen Sickerwassermengen der Jahre 1994/95, 1999 und 2002, welche auf dem Niveau niederschlagsarmer Winterhalbjahre liegen.

3.3 Agrar – Ökosystem - Modellierung

Für jeden Referenzstandort (Tab. 3.1.1) wurden für alle relevanten Fruchtart/Fruchtfolge- Bewirtschaftungsszenarien **Simulationen** für den **Zeitraum 1987-2002 auf Tagesbasis** durchgeführt, plausibilisiert und ausgewertet. Im Ergebnis stehen Zeitreihen sowohl für die **Wasserhaushaltsglieder** (Boden-

speicher, Sickerwasser, Verdunstung, etc.) als auch den unterschiedlichen **N-Bilanzgliedern** (N_{min} Bodenwasser, N-Aufnahme Pflanze, Mineralisierungsrate, Immobilisierungsrate) sowie zu den **Pflanzenparametern** (Biomasse Wurzel, Stengel, Blatt, Frucht etc.) in MS-Excel Tabellen zusammengefasst zur Verfügung. Die mittleren jährlichen, Kulturart spezifischen Erwartungswerte der Stickstoffausträge für das Untersuchungsgebiet zeigen erwartungsgemäß die insgesamt deutliche Abhängigkeit vom Speicher- und Rückhaltevermögen der Böden, als auch vom Niederschlagsangebot.

Tab. 3.3.1 Modellerte mittlere N-Austräge [kg N /ha*a] der verschiedenen Fruchtarten/-folgen – in Abhängigkeit von Boden und Klimastandort

Boden	nFK	Klima	Kmais	Smais	SoGerste	WiWeizen	FrühKarto	SpätKarto	Zuckerübe	Spargel	Tabak Vir	Tabak dur
10433	65mm	st9	79	65	67	91						
10433	65mm	st1	83	70	69	86	143	83		44	19	98
40107	100mm	st9	54	46	49	62						
40107	100mm	st1	55	42	52	52	103	63		40	16	86
40083	140mm	st9	43	38	44	44						
40083	140mm	st1	37	32	39	30	80	41		35	12	81
10210	170mm	st9	20	18	27	31			19			
10210	170mm	st1	12	9	18	17	38	19		19	9	34
20306	210mm	st9	31	27	36	40			33			
20306	210mm	st1	22	18	29	29	64	32		36	11	87
50258	240mm	st9	30	26	38	43			35			

Beispielhaft lässt sich das **unterschiedliche Standortverhalten** eines mächtigen Lössbodens (Parabraunerde, Mais Monokultur) im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes mit ca. 700mm mittlerem Jahresniederschlag und das Standortverhalten auf einem kiesigen Rohboden im Bereich der Vorbergzone mit einem mittleren Jahresniederschlag von ca. 950 mm vergleichen (s. Anh. A1). Bei vergleichbarer Verdunstungshöhe (ca. 600mm) zeigt der Standort des mächtige Lössboden eine Grundwasserneubildung von 0 -150 mm/a und daran gekoppelt eine jährlichen Nitratauswaschung („Nleach“) von <<10 kg/ha*a bis ca. 20kg/ha*a gegenüber Grundwasserneubildungsraten von 200 - 300 mm/a gekoppelt mit Nitratausträgen von 40 bis 80 kg/ha*a. Der Vergleich der einzelnen Jahre eines Standortes untereinander verdeutlicht den erheblichen **Einfluss der natürlichen Variabilität der Klimafaktoren** bei ansonsten unveränderten Randbedingungen.

Betrachtet man die **Variabilität des N-Austrages** auf einem gegebenem Standort über den Untersuchungszeitraum hinweg bei gleich bleibender Bewirtschaftungsweise, so verdeutlicht die Spannweite eines Standortes die Sensibilität auf die natürliche Variabilität klimatischer Parameter und bildet damit ein gutes Risikomaß für ein Verfehlen der Qualitätsziele des Grundwasserschutzes auf einem Standort.

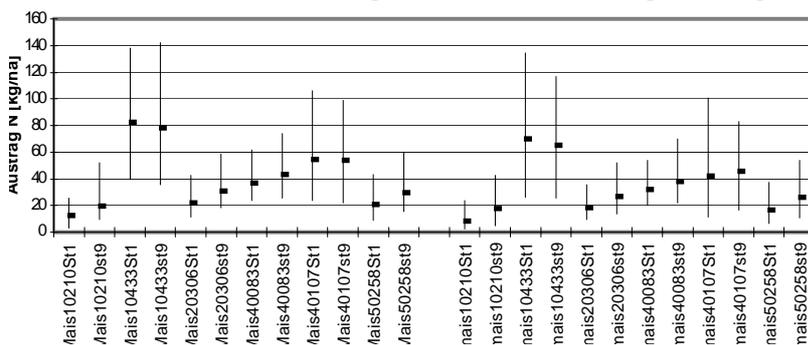


Abb. 3.3.4 Mittelwerte und Spannweiten der N - Austräge p.a. von 1987 -2002 für unterschiedliche Standorte.

Vergleicht man für ein und dieselbe Kulturart, Bewirtschaftung und Klimaszenario das Austrags- und Ertragsverhalten von Standorten unterschiedlicher Bodenausstattung wird das gute Erklärungspotential des gewählten Agrar Ökosystemmodellansatzes hinsichtlich der Wechselwirkung von Boden, Klima und Bewirtschaftung aufgezeigt und gleichzeitig die Unzulänglichkeit von mittleren N-

Salden oder Faustzahlen zur Abschätzung der tatsächlichen Nitrataustragsituation verdeutlicht.

Die Ergebnisse des Standort- und Kulturart spezifischen Nitrataustrages sind, unter der Annahme von gebietstypischen Bewirtschaftungsszenarien, als **mittlere Erwartungswerte für Standorte mit vergleichbarer Ausstattung** zu interpretieren.

3.4 Wasser- und Stickstoffbilanz Staufferer Bucht

3.4.1 Wasserbilanz

Das **Grundwassereinzugsgebiet des Wasserwerkes Hausen** (ebenso der Tuniberggruppe und des Wasserwerkes Krozinger Berg) erhält seinen Zustrom vollständig aus dem östlich der inneren Rheingrabenverwerfung gelegenen Bereich der inneren Staufferer Bucht, sowie durch Uferfiltrat und Randzuflüsse aus den oberirdisch angrenzenden Einzugsgebieten im Schwarzwald und auf der Mengener Brücke. Die **Strömungsrichtung** ist von den Vorbergen des Schwarzwaldes und den Talausgängen von Neumagen und Möhlin nach Nordwesten gerichtet; sie erfährt erst im Abstrom der Wasserschutzgebiete eine deutliche Ablenkung in nördliche Richtung.

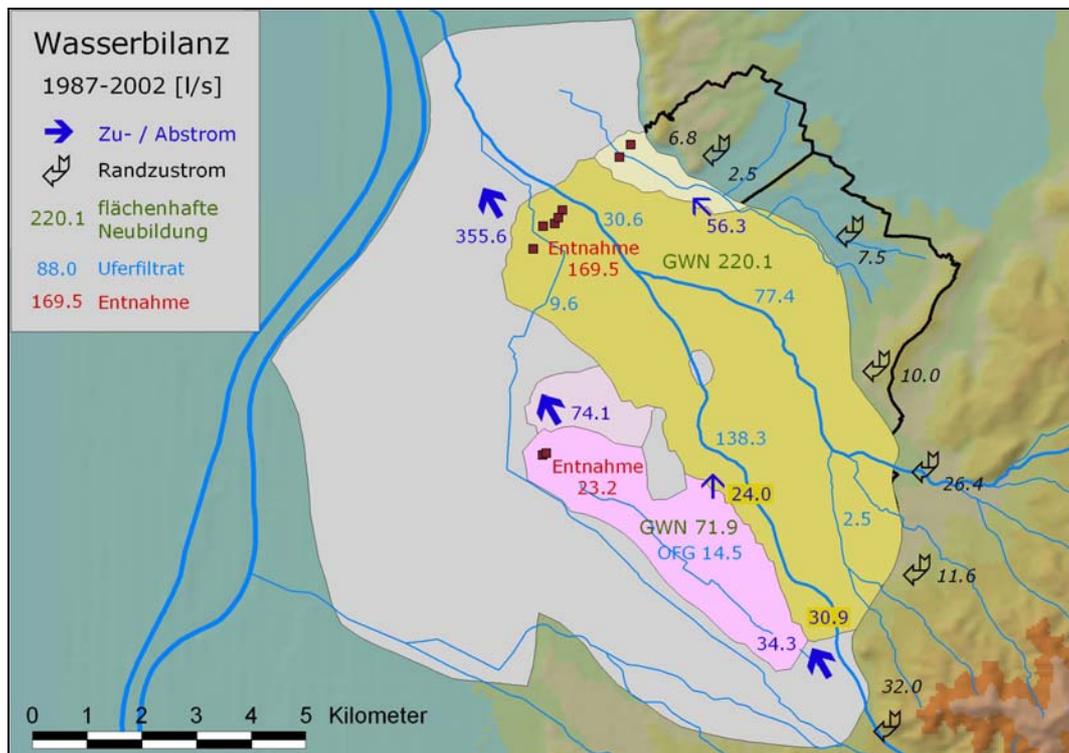


Abb. 3.4.5 Mittelwerte Bilanzgrößen Grundwasserhaushalt Zeitraum 1987 - 2003

In Abbildung 3.4.5 sind die **langjährigen Mittelwerte der Bilanzgrößen** des Grundwasserhaushaltes für die Wasserschutzgebiete Hausen und Krozinger Berg dargestellt. Sie entstammen der Auswertung des numerischen Grundwassermodells.

Von der Auswertung ausgenommen sind die Teilbereiche auf der Mengener Brücke und am Batzenberg, die keinen zusammenhängenden Lockergesteinsaquifer aufweisen, sowie die (*verkarsteten*) Festgesteinsschollen vom Biengener Berg und Krozinger Berg. Im Falle des WSG Krozinger Berg wurde darüber hinaus ein rund 2.1 km² umfassender Bereich ausgeschlossen, welcher nur für den nicht mehr in Betrieb befindlichen Tiefbrunnen Bremgarten von Bedeutung ist.

Im Grundwassereinzugsgebiet des Wasserwerkes Hausen trägt die **flächenhafte Grundwasserneubildung** mit 220 l/s zu den **positiven Bilanzgrößen** bei. Sie bleibt damit hinter der **Uferfiltration** aus den Schwarzwaldflüssen Möhlin und Neumagen (*einschließlich kleinerer Nebengewässer*) mit **knapp 260 l/s** zurück. Die unterirdischen Randzuflüsse aus Bereichen außerhalb des Modellgebietes wurden zu 55 l/s abgeschätzt. Von den ebenfalls mit 55 l/s ausgewiesenen unterirdischen Zuströmen, welche aus angrenzenden Bereichen des Lockergesteinsaquifers in das Wasserschutzgebiet gelangen, strömen 30 l/s bei Staufen über die Gebietsgrenze; unter den restlichen 25 l/s dürfte allerdings ein nicht unerheblicher Anteil den Krozinger Berg durchströmen, anstatt ihn, wie im Modell angenommen, östlich zu umfließen – die Bilanzgrößen für das WSG Hausen müssten in diesem Fall um etwa 10 bis 20 l/s nach unten korrigiert werden.

In der Summe stammen etwa **50 %** des Grundwassers im WSG Hausen aus **Uferfiltrat** (*auch wesentliche Anteile des bei Staufen zuströmenden Grundwassers*), **40 %** direkt aus der **flächenhaften Grundwasserneubildung** im Bilanzgebiet und knapp 10 % aus unterirdischen Randzuflüssen, welche ihrerseits dem Sickerwasser unter Mengener Brücke, Batzenberg und Schwarzwaldvorbergen gespeist werden. Als **negative Bilanzgrößen** treten die Entnahmen an den Tiefbrunnen mit 169.5 l/s (*davon allein 163.2 l/s am Wasserwerk Hausen*) sowie der nach Nordwesten gerichtete Grundwasserabstrom von insgesamt 410 l/s in Erscheinung.

3.4.2 Stickstoffhaushalt

Die Bestimmung der Bilanzglieder des Stickstoffhaushaltes im Grundwassersystem des Wasserschutzgebiets Hausen erfolgte über die **Auswertung** des entwickelten **Nitrattransportmodells Staufener Bucht** und der Regionalisierung der Ergebnisse der Agrarökosystemmodellierung zur Formulierung der flächenhaften, an die Grundwasserneubildung gekoppelten Nitratrandbedingung.

In Tabelle 3.4.2 sind zu den positiven Bilanzgrößen die zugehörigen mittleren Nitratkonzentrationen sowie die jährlichen **Stickstoffeinträge in den Grundwasserkörper** angegeben. Für das aus den Oberflächengewässern versickernde Uferfiltrat liegen zuverlässige Beobachtungsdaten der Nitratkonzentration vor. Demgegenüber mussten die Stoffkonzentrationen im zuströmenden Grundwasser sowie für die Randzuflüsse aus den Zeitreihen geeigneter Messstellen abgeschätzt werden.

Tab. 3.4.2: Mittlere Bilanzgrößen des Stickstoffhaushalts im WSG Hausen

Bilanzgröße	Q [l/s]	NO3 [mg/l]	kg N / a	Anteil N [%]
GW-Neubildung	220.1	52.1	81764	66.2
Uferfiltrat	271.3	10.0	19323	15.6
Randzuflüsse	55.2	32.0	12606	10.2
GW-Zustrom	54.9	25.3	9895	8.0
Summe	601.5		123588	

Aus wasserwirtschaftlicher Sicht zeigt sich die Bedeutung des hohen Uferfiltratanteils aus Möhlin und Neumagen. Der aus weitgehend bewaldeten Einzugsgebieten stammende Abfluss weist geringe Nitratkonzentration um 10 mg/l mit einem nur geringfügigen Jahresgang auf. Insbesondere der Grundwasserzuströmung bei Staufen, aber auch die anderen Zuflüsse am Hangfuß des Schwarzwaldes und des Talausganges der Möhlin entstammen aus vergleichbar ausgestatteten Einzugsgebieten und bestehen zu erheblichen Teilen aus Uferfiltrat. Auch sie sind aufgrund ihrer Nitratkonzentrationen von unter 20 mg/l als

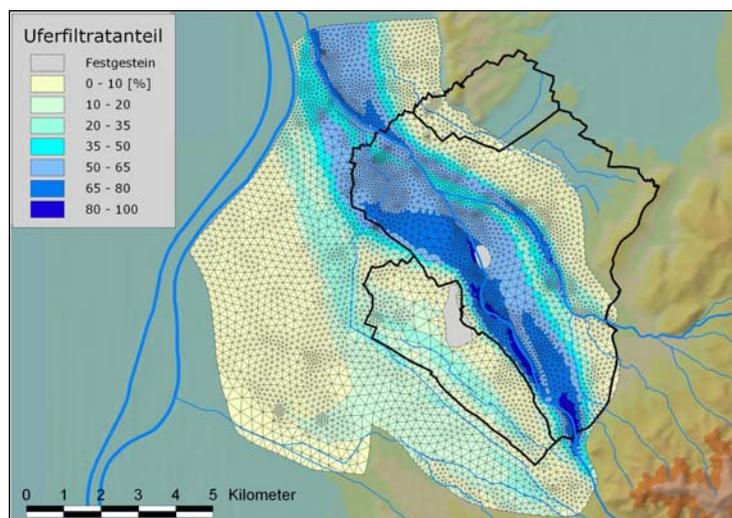


Abb. 3.4.6 Modellierter Uferfiltratanteil im oberflächennahen Grundwasser

Gunstfaktoren zu werten. Für das vom Batzenberg zusickernde Wasser müssen höhere Nitratkonzentrationen unterstellt werden, deren Wert entsprechend der im Rahmen der Bearbeitung angestellten N-Salden-Betrachtung aktuell bei etwa 35 mg/l liegen dürfte; für das Sickerwasser aus dem Bereich der Mengener Brücke liegen die Spitzenwerte bei bis zu 100 mg/l. Den in qualitativer Hinsicht problematischen Werten der beiden zuletzt genannten Randzuströme steht jedoch ihre geringe quantitative Bedeutung gegenüber.

Den weitaus größten Anteil am Stickstoffeintrag in das bewirtschaftete Grundwassersystem liefert allerdings erwartungsgemäß, mit rund zwei Dritteln der jährlich zugeführten Menge, die flächenhafte Grundwasserneubildung, deren durchschnittliche Nitratkonzentration nach den vorliegenden Ergebnissen auch im Bereich des WSG Hausen geringfügig über dem Grenzwert nach Trinkwasserverordnung (50 mg/l) liegt.

Die weitere Differenzierung hinsichtlich der Bedeutung unterschiedlich genutzter Flächenanteile erfolgt anhand einer Auswertung der ermittelten Nitratrandbedingung des Jahres 1998 mit weitgehend mittleren Verhältnissen für den Zeitraum 1987 – 2002. Die entsprechenden Werte, welche sich auf das gesamte Schutzgebiet des Wasserwerkes Hausen (also einschließlich der Teilbereiche auf Mengener Brücke und Batzenberg) beziehen, sind in Tabelle 3.4.3 zusammengestellt.

Die weitere Differenzierung hinsichtlich der Bedeutung unterschiedlich genutzter Flächenanteile erfolgt anhand einer Auswertung der ermittelten Nitratrandbedingung des Jahres 1998 mit weitgehend mittleren Verhältnissen für den Zeitraum 1987 – 2002. Die entsprechenden Werte, welche sich auf das gesamte Schutzgebiet des Wasserwerkes Hausen (also einschließlich der Teilbereiche auf Mengener Brücke und Batzenberg) beziehen, sind in Tabelle 3.4.3 zusammengestellt.

Tab. 3.4.3: Nitrat im Sickerwasser im WSG Hausen (Jahr 1998)

Nutzung	Fläche [ha]	GWN [mm]	Nitrat [mg/l]	Tsd. m ³	kg N
Acker	2551.7	260.5	54.8	6647	82271
Grünland	278.3	254.3	11.0	708	1762
Siedlung	702.8	115.7	20.0	813	3671
Rebflächen	200.3	271.6	34.9	544	4285

Es zeigt sich, dass ca. 89 % des Nitratreintrag im Wasserschutzgebiet Hausen über die flächenhaften Grundwasserneubildung unter ackerbaulich genutzter landwirtschaftlicher Fläche (66% Flächenanteil) erfolgt. Aus der weiter

differenzierten Auswertung der Ackerfläche nach Kulturart ergeben sich folgende mittlere Beiträge bzw. Zahlen:

Tab. 3.4.4: Nitrat im Sickerwasser unter ackerbaulich genutzten Flächen im WSG Hausen (Jahr 1998)

Acker	Fläche [ha]	GWN [mm]	Nitrat [mg/l]	Tsd. m ³	kg N
Mais	1577.4	262.4	48.9	4139	45699
Getreide	338.8	259.4	58.4	879	11577
Hackfrüchte	113.3	243.0	61.5	275	3823
Futterpflanzen	9.8	290.6	40.3	29	260
Gemüse	98.2	281.4	63.5	276	3963
Sonderkulturen	249.1	247.1	82.9	615	11522
nicht kartiert	165.1			434	5427

Die weitergehende Differenzierung nach Kulturarten zeigt, dass für keine der ausgewiesenen Gruppen, mit Ausnahme der Futterpflanzen, integriert über alle Standorte im Gebiet, mit Sicherheit Konzentrationen im Sickerwasser deutlich unterhalb des SchALVO Grenzwertes von 50 mg/l unterstellt werden können. Der Anbau von Futterpflanzen schneidet vor allem deshalb relativ günstig ab, weil darunter auch Klee und Klee gras subsumiert wurden; er bleibt aber mit einem Flächenanteil von weniger als einem halben Prozent bedeutungslos. Unter den konventionellen Feldfrüchten sind bei resultierenden Sickerwasserkonzentrationen um 60 mg/l keine nennenswerten Unterschiede zu erkennen. Der produktive Maisanbau (*i.e. Anbau von Körner- oder Silomais, nicht aber die Saatmaisvermehrung*) schneidet unter der für das Schutzgebiet unterstellten sorgsamem Bewirtschaftung günstiger ab und könnte in den letzten Jahren gerade eben die Einhaltung einer mittleren Nitratkonzentration um etwa 50 mg/l im Sickerwasser oder knapp darunter erlauben. Deutlich erhöhte Stickstoffverluste müssen demgegenüber für die Sonderkulturen Spargel, Erdbeeren und (*stark sortenabhängig*) Tabak unterstellt werden.

Bei der Interpretation ist zu beachten, dass es sich hierbei um eine integrale Auswertung über alle im Schutzgebiet befindlichen Kulturflächen handelt, der einzelne Standort aber ein deutlich unterschiedliches N-Austragsverhalten aufweisen kann.

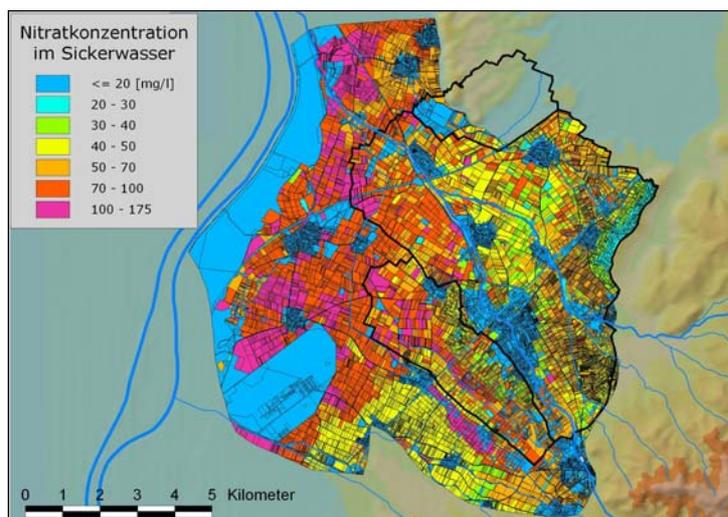


Abbildung 3.4.7 zeigt die räumliche Verteilung der mittleren Nitratkonzentration im Sickerwasser, wie sie sich auch über die Grenzen des WSG Hausen hinaus im langjährigen Mittel für die Jahre 1987 bis 2002 ergibt.

Abb. 3.4.7 Nitratkonzentration im Sickerwasser

Dabei fällt vor allem die deutliche **Übereinstimmung** mit dem **Verteilungsmuster der nutzbaren Feldkapazität** als bedeutsamer Kenngröße für die Wasserkapazität der Böden auf. Hohe Nitratkonzentrationen über 70 mg/l werden im Wesentlichen unter Standorten mit geringer Wasserkapazität ermittelt, wie sie im inneren Rheingraben und entlang von Tunselgraben und Neugraben verbreitet sind. Bei **günstigen Bodeneigenschaften** – insbesondere unter den Lößböden der inneren Staufener Bucht – bleiben die **mittleren Nitratkonzentrationen** im Sickerwasser demgegenüber häufig auf einem Niveau zwischen **40 bis 50 mg/l**. Im Idealfall werden dort sogar Werte zwischen 35 und 40 mg/l erreicht.

Innerhalb des WSG Hausen sei auf die deutliche Differenzierung zwischen den Teilbereichen links und rechts des Neumagen hingewiesen. Der mit leichteren und stärker auswaschungsgefährdeten Böden ausgestattete Bereich südwestlich des Neumagen (*bzw. der Möhlin nach der Vereinigung beider Gewässer*) befindet sich im unmittelbaren Vorfeld der Tiefbrunnen, dürfte dabei allerdings die weiter südlich gelegenen Brunnen der Reihe B etwas stärker beeinflussen als jene der Reihe A.

4 Zartener Becken

Im Kapitel Zartener Becken werden die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsprojektes im Hinblick auf die Fragestellung des Wasser- und Nitrathauhaltes in diesem Trinkwasserschutzgebiet zusammengefasst. Auf die detaillierte Darstellung der Modellentwicklung und -ergebnisse sowie der Gebietsausstattung wird verzichtet und auf die Modellberichte verwiesen.

4.1 Modell- und Untersuchungsgebiet

Das Modellgebiet des Grundwassermodells Zartener Becken umfasst mit einer **Fläche von 20 km²** das gesamte intramontane Becken zwischen dem Freiburger Stadtteil Ebnet im Westen und dem Talaustritt des Höllentals im Osten sowie der Gemeinde Oberried im Südosten.

Der mit dem Modellgebiet identische **Untersuchungsraum** wird mit Ausnahme des am weitesten westlich gelegenen Bereiches (0,75 km²) und des Talaustrittes des Kappler Tals (ca. 0,25 km²) vollständig von den für die Gewinnungsanlagen der badenova ausgewiesenen Wasserschutzgebieten und den darin eingebetteten oder unmittelbar angrenzenden Schutzzonen für die Tiefbrunnen der Gemeinden Stegen, Kirchzarten (Brühl) und Buchenbach (WV Himmelreich) eingenommen.

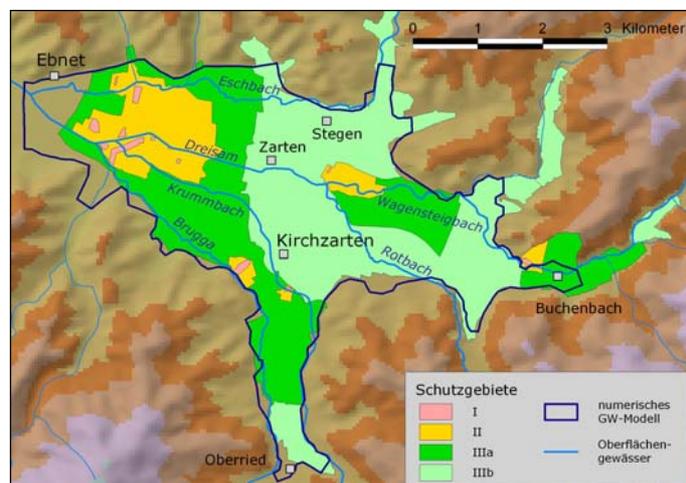


Abb. 4.1.1 Das Untersuchungsgebiet Zartener Becken

Entlang von Eschbach, Ibenbach und Wagensteigbach reichen die Schutzgebiete sogar noch etwas weiter in die von Norden bzw. Osten einmündenden Seitentäler hinein.

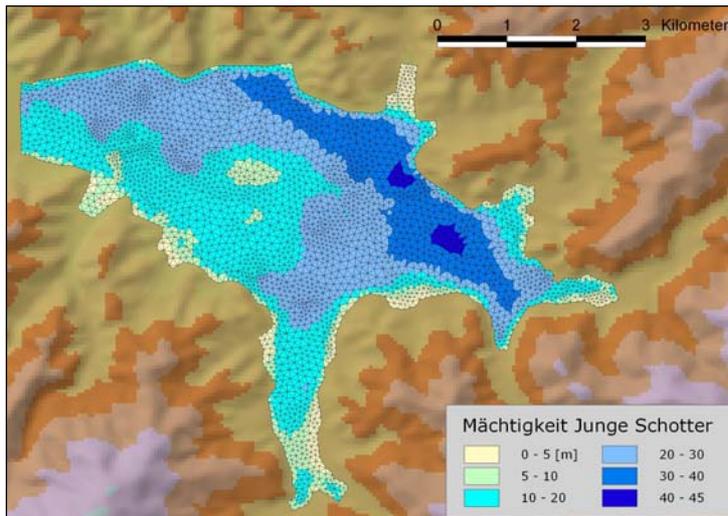


Abb. 4.1.2 Mächtigkeitsverteilung der „Jungen Schotter“

Während die überwiegend aus vergrusten Gneisen bestehende **Aquiferbasis** im zentralen Teil des Zartener Beckens als **wannenartige Erosionsform** ausgebildet ist, welche mit gleichmäßigem Gefälle nach Westen einfällt, kann an ihrem Nordrand östlich von Stegen eine markante, hochdurchlässige **Rinnenstruktur** lokalisiert werden. Diese lässt sich auch in der Mächtigkeitsverteilung der quartären Schotterfüllung an den dort größeren Mächtigkeiten sowohl der risseiszeitlichen als auch der unterliegenden altquartären Sedimente erkennen. Zugleich besteht innerhalb der **jungpleistozänen Sedimente** ein deutlicher Kontrast zwischen den im Bereich der Nordrinne abgelagerten, an Feinmaterial armen Schottern und stärker schluffhaltigem Material im Südteil.

Die im Zartener Becken anzutreffenden Böden sind typischer Weise **Braunerden**, wie sie sich im Bereich der Niederterrasse auf den während periodischer Überflutung abgelagerten Auen- und Hochflutlehmen entwickeln konnten. Bei Zarten sind aufgrund des dort vorhandenen Lößanteils auch Übergangsformen zwischen Braunerde und Parabraunerde ausgebildet. Die **Wasserkapazität** der auf schluffig-lehmigem bis sandig-kiesigem Substrat entwickelten Böden beträgt im flächengewichteten Mittel nur 115 mm/m, Werte kleiner 90 oder größer 150 mm/m bleiben auf Ausnahmefälle beschränkt.

Auf Grundlage der aus der Bodenschätzung gewonnenen Verteilung der Bodenkennwerte wurden folgende **Referenzstandorte** ausgewählt:

Tab. 4.1.1 Standortsszenarien WSG Ebnet

Bodenbezeichnung nach Bodenschätzung	nFK	Wetterdaten
E00606	ca 173 mm (B/G Gzahl 65)	Station Ebnet (N 1220 mm, 340 m ü. NN, 9,6°C mittl. Jahrestemp.)
E20503	ca. 111 mm (B/G Gzahl 52)	
E40611	ca. 76 mm (B/G Gzahl 33)	

Es wurde eine **flurstückscharfe Realnutzungskartierung** für das Modellgebiet Zartener Becken (1.958,5 ha) durchgeführt. Deutliche Unterschiede im Vergleich zum Wasserschutzgebiet Hausen zeigt die Auswertung der landwirtschaftlichen Nutzung. So dominiert hier mit einem Anteil von **40,1%** an der Gesamtfläche **bewirtschaftetes Grünland** zur Futtermittelproduktion bei vorherrschender Rind- bzw. Milchviehwirtschaft. Die ackerbauliche Nutzung beansprucht hingegen lediglich 27,3% (672,4ha) der Fläche gegenüber einem Anteil von 64,9% des Wasserschutzgebiets Hausen.

Während im Wasserschutzgebiet Hausen der Maisanbau dominiert und der Getreideanbau mit 9,4% an der **ackerbaulich genutzten Fläche** eine untergeordnete Bedeutung hat, nimmt hier der **Getreideanbau** (60% Gerste, je 20% Hafer und Weizen) einen Anteil von **53,6%** ein. Nur knapp 37% der Ackerfläche hingegen werden für den Anbau von Mais, vorherrschend Silomais genutzt.

Insbesondere die Grünland- und Maisanbauflächen unterliegen in der Regel **organischer Düngung**. Insofern wurden die bisherigen Modellansätze aus der Staufferer Bucht um einen Modellansatz für Grünland ergänzt und für den Maisansatz ein Bewirtschaftungsszenario unter organischer Düngung (Rindergülle) aufgestellt.

4.2 Flächenhafte Grundwasserneubildung

Außerhalb der Siedlungen bleibt die räumliche Differenzierung der Sickerwassermenge im Hauptteil des Zartener Beckens bei mittleren jährlichen Niederschlagshöhen um 1200 mm und einem nur schwach ausgeprägten Gradienten zwischen Ebnet und Buchenbach gering. Sowohl unter den **Grünland-** als auch unter den **Ackerflächen** beträgt die **Grundwasserneubildung** im langjährigen Mittel zumeist **525 bis 650 mm/a** und liegt damit im Vergleich zu den Gewinnungsgebieten im Oberrheingraben auf etwa dem doppelten Niveau. Noch höhere Werte finden sich in Folge der auf etwa 1400 mm/a ansteigenden Niederschlagsmenge in dem nach Oberried führenden Seitenarm.

Die Grundwasserneubildung unterliegt einer ausgeprägten **saisonalen Variabilität**. Bei einem mittleren Jahresniederschlag von 1210 mm und einer Verdunstung von rund 550 mm wurde für das Zartener Becken unter Reduktion um den als Direktabfluss von versiegelten Flächen abgeführten Anteil eine durchschnittliche jährliche Grundwasserneubildung von rund 535 mm ermittelt. Davon entfallen **390 mm** auf das **Winterhalbjahr** und immerhin knapp **150 mm** auf die **Sommermonate**. In den **Einzeljahren** können allerdings erhebliche Abweichungen von den langfristigen Mittelwerten auftreten. So variiert auch die jährliche Grundwasserneubildungsrate bei Niederschlägen zwischen 950 und 1500 mm/a zwischen knapp 350 und 750 mm.

4.3 Agrar - Ökosystem - Modellierung

Analog zur Vorgehensweise in der Staufferer Bucht wurden auch für das Zartener Becken für jeden Referenzstandort jede relevante Fruchtart/Fruchtfolge - Standort - Kombination Zeitreihen in täglicher Auflösung für die Wasserhaushalts- und N-Bilanzglieder, sowie den Pflanzenparametern berechnet, plausibilisiert und ausgewertet. Aufgrund der Bedeutung wurde ergänzend zu den bisherigen Modellansätzen ein weiterer **Modellansatz für bewirtschaftete Grünlandstandorte** auf Grundlage des erklärenden Pflanzenmodells SPASS (Wang, 1997) eingesetzt.

Die gewählten **Bewirtschaftungsszenarien für intensives Grünland** (4 Schnitte) und **Silomais** berücksichtigen die gebietsübliche organische Düngung mit Rindergülle. Für die extensive Grünlandbewirtschaftung mit drei Schnitten wird eine Festmistgabe von 100 dt / ha Mitte April angesetzt.

In Tabelle 4.3.2 sind zusammenfassend die mittleren jährlichen Austräge an Nitrat-Stickstoff für Grünland und Silomais in Abhängigkeit der Bodenverhältnisse unterschiedlicher Standorte aufgeführt.

Tab. 4.3.2 Mittlere N-Austräge in Abhängigkeit der Landnutzung und des Bodens

Boden-Profil	B/G ¹ G.-Zahl	nFk (mm/m)	Mais	Grünland extensiv	Grünland intensiv
E00606	65	173	24	24.2	27.3
E20503	52	111	36.3	30.2	33.5
E40611	33	76	51.4	46.6	53.3

Die durchgeführte Plausibilisierung der Simulationsergebnisse ergab in Abhängigkeit der klimatischen Randbedingungen eine Schätzung der Ernterträge im Bereich der jeweiligen, standortspezifischen Erwartungswerte. Der erklärende Pflanzenmodellansatz SPASS vermag insofern die phänologische Pflanzenentwicklung für Grünland und damit den verbundenen Stickstoffentzug in Abhängigkeit der Steuerfaktoren Wasser- und Nährstoffversorgung, sowie Energieangebot realitätsnah abzubilden.

Einschränkend muss jedoch angemerkt werden, dass im Rahmen dieses Projektes für eine gebietsspezifische Kalibrierung des Pflanzenmodells keine geeigneten Datengrundlagen verfügbar waren und darüber hinaus der aktuelle Modellansatz für Grünland (SPASS) aufgrund der 3-4 Grünlandschnitte für bewirtschaftete Standorte an seine Grenzen stößt. Die Modellergebnisse für die Grünlandstandorte sind daher insbesondere im Vergleich mit den erklärenden Modellansätzen für andere Kulturarten eher als relative Größe für die unterschiedlichen Standorte zu werten, denn als Kontrolle für die erwartete absolute N-Austragshöhe.

4.4 Wasser- und Stickstoffbilanz Zartener Becken

Die Regionalisierung der Standortsimulationen in Verbindung zur Ableitung der flächenhaften, Nitratrandbedingung für die Grundwassermodelle, als auch die Ableitung der übrigen Massen- und Stoffrandbedingungen zur Parametrisierung der Grundwassermodelle wird im Kapitel 2 dargestellt. Die folgenden Ergebnisse beruhen im Wesentlichen auf Auswertungen des im Rahmen dieses Projektes weiterentwickelten, instationären Grundwassermodells „Zartener Becken“ für den Zeitraum 1987-2002.

4.4.1 Wasserbilanz Zartener Becken

Der einzige **unterirdische Abstrom** aus dem Zartener Becken erfolgt nach Westen hin in das Dreisamtal, wo die Grenze des Modell- und Bilanzgebietes bewusst auf Höhe des Dreisampegels Ebnet gelegt wurde. Da der quartärere Schotterkörper nahezu in seiner gesamten Ausdehnung abgebildet wird, erfolgen in das Modellgebiet hinein nur geringe **unterirdische Randzuflüsse** aus den einmündenden Seitentälern. Als schwer zu erfassende Größe erweist sich allerdings die entlang weiter Teile der äußeren Modellgrenze am Hangfuß stattfindende Zusickerung aus den dort auslaufenden periglazialen Schuttdecken. Die im Zartener Becken zusammenlaufenden **Flüsse und Bäche** entwässern ein oberirdisches Einzugsgebiet von knapp 240 km² und führen dem Modellgebiet im Mittel (1987-2002) eine Wassermenge von etwa 6.0 bis 6.5 m³/s zu. Im Bereich der Lockergesteinsfüllung bedingt das dichte, schwebende Gewässernetz, erhebliche Infiltrationsverluste entlang der Gewässerverläufe. Im Abstrombereich zwischen „Sammler I“ und dem sich verengenden Abstromquerschnitt am

¹ Boden /Grünlandgrundzahl der Bodenschätzung

Talausgang treten in Abhängigkeit des Grundwasserstandes zwischen In- und Exfiltration wechselnde Verhältnisse auf.

Aus der Auswertung des numerischen Grundwassermodells für den Zeitraum 1987 - 2002 ergeben sich die in Abb. 4.4.3 ermittelten **langjährigen Mittelwerte der Bilanzgrößen des Grundwasserhaushaltes** im Zartener Becken.

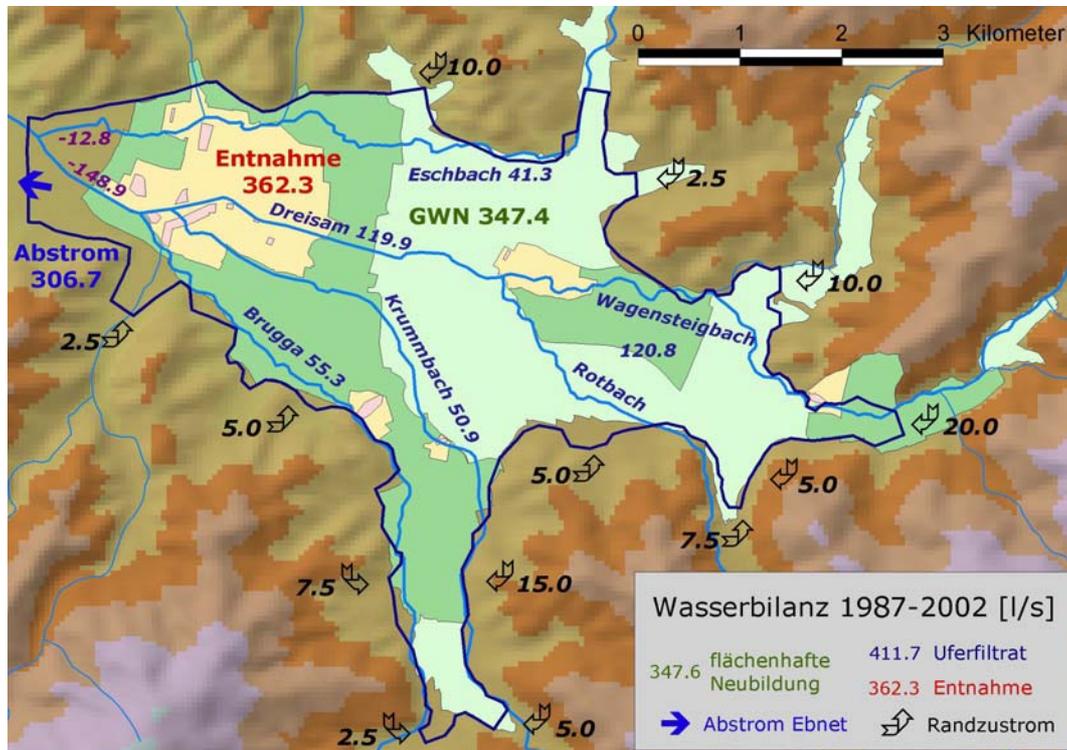


Abb. 4.4.3 Mittlere Bilanzgrößen des Grundwasserhaushaltes im Zartener Becken

Die **flächenhafte Grundwasserneubildung** trägt mit knapp 350 l/s wesentlich zu den **positiven Bilanzgrößen** bei, bleibt jedoch trotz ihres beachtlichen Umfangs deutlich hinter dem Beitrag der **Uferfiltration** aus den Oberflächengewässern (525 l/s) zurück. Aus früheren Untersuchungen und der Modellkalibrierung ergeben sich **unterirdische Randzuflüsse** von knapp 100 l/s. Etwas weniger als die Hälfte davon entfällt auf Grundwasserzutritte im Bereich der einmündenden Seitentäler, während die einigermaßen diffus entlang der Modellgrenze stattfindende Zusickerung aus den **Hangschuttdecken** mit 50 l/s abgeschätzt werden konnte.

Als **negative Bilanzgrößen** sind die **Entnahmen** an den Tiefbrunnen mit 360 l/s (davon knapp 345 l/s am Wasserwerk Ebnet) auszuweisen. Darüber hinaus findet im Bereich zwischen Sammler II und Talausgang in der Summe eine **Exfiltration** von rund 185 l/s in Dreisam und den Unterlauf des Eschbaches statt. Die verbleibenden ca. 300 l/s des **Grundwasserabstromes** treten in den Quartärkörper des Dreisamtals über.

4.4.2 Stickstoffhaushalt Zartener Becken

In Tabelle 4.4.3 sind zu den positiven Bilanzgrößen des Grundwasserhaushalts die zugehörigen mittleren Nitratkonzentrationen sowie die jährlichen **Stickstoffeinträge in den Grundwasserkörper** angegeben. Für das aus den Oberflächengewässern versickernde **Uferfiltrat** liegen zuverlässige und im Übrigen sehr konstante Beobachtungsdaten der Nitratkonzentration vor. Sie liegen an den einzelnen Messorten im Mittel zwischen 5.75 und 9.50 mg/l und weichen nur in Einzelfällen um mehr als 2 bis 3 mg/l vom jeweiligen Mittelwert ab. Die in der Bilanzbetrachtung für die Randzuflüsse angesetzte

Stoffkonzentration orientiert sich am mittleren Niveau der in den Flüssen und Bächen beobachteten Werte.

Tab. 4.4.3: Mittlere Bilanzgrößen des Stickstoffhaushalts im Zartener Becken

Bilanzgröße	Q [l/s]	NO3 [mg/l]	kg N / a	Anteil [%]
GW-Neubildung	347.6	24.1	59652	62.4
Uferfiltrat	526.0	8.3	31130	32.5
Randzuflüsse	97.5	7.0	4862	5.1
Summe	971.1		95644	

Auch im Zartener Becken stammt der größte Anteil des **Stickstoffeintrags** in das bewirtschaftete Grundwassersystem mit gut **60 %** der jährlichen Gesamtfracht aus der **flächenhaften Grundwasserneubildung**. Im Unterschied zur Situation im Schutzgebiet Hausen bleibt die durchschnittliche Nitratkonzentration nach den vorliegenden Ergebnissen jedoch weit unter dem Grenzwert nach Trinkwasserverordnung (50 mg/l) und bedingt keine Beeinträchtigung der Qualität des an den Fassungsanlagen geförderten Rohwassers.

Die unterschiedlichen Beiträge der Flächenanteile unterschiedlicher Nutzungen bzw. Kulturarten am Stickstoffeintrag über die Grundwasserneubildung werden im Folgenden anhand der Auswertung des Jahres 1998 dargestellt.

Tab. 4.4.4: Nitrat im Sickerwasser im Zartener Becken im Jahr 1998

Nutzung	Fläche [ha]	GWN [mm]	Nitrat [mg/l]	Tsd. m ³	kg N
Acker	672.4	618.8	26.2	4161	24588
Grünland	800.4	574.8	19.4	4601	20102
Siedlung	485.6	318.4	20.0	1546	6974
Gesamt	1958.5	526.3	22.2	10307	51664

Das Jahr 1998 weist für den Untersuchungszeitraum 1987 - 2002 nach Niederschlag (91 %), Sickerwassermenge (95 %) und Nitratauswaschung (91 %) etwa mittlere Verhältnisse auf.

47,6 % der an die flächenhafte Grundwasserneubildung gekoppelten Nitratedinträge stammen aus **Ackerflächen**, **38,9 %** entstehen unter **Grünlandnutzung**. In der weiteren Differenzierung der Grünland- und Ackerflächen lassen sich folgende mittlere Beiträge für das WSG Zartener Becken ausweisen:

Tab. 4.4.5: Nitrat im Sickerwasser unter Grünland- und Ackerflächen

Grünland	Fläche [ha]	GWN [mm]	Nitrat [mg/l]	Tsd. m ³	kg N
extensiv	59.1	544.1	11.4	321	830
bewirtschaftet	696.1	581.1	20.1	4045	18348
Golfplatz	45.2	517.8	<= 17.5	234	925

Acker	Fläche [ha]	GWN [mm]	Nitrat [mg/l]	Tsd. m ³	kg N
Mais	267.9	634.6	19.9	1700	7635
Getreide	290.0	613.0	33.6	1778	13463
Hackfrüchte	12.2	588.8	26.5	72	430
Futterpflanzen	84.6	595.1	19.0	503	2160
Erdbeeren	3.8	687.6	42.4	26	250
unbekannt	12.9			77	633

Die Betrachtung der Hauptflächennutzungen Grünland (*einschließlich naturnaher Flächen*), Siedlungs- und Verkehrsflächen und Ackerland weist für die mittlere Nitratkonzentration im Sickerwasser nur geringe Unterschiede im Bereich von 19,4 – 26,2 mg/l aus. Der für Grünland und naturnahe Flächen insgesamt geringfügig erhöhte Wert von 19,4 mg/l erklärt sich durch den dominierenden, bewirtschafteten Anteil zur Futtermittelproduktion.

Innerhalb der Ackerflächen zeigt eine Differenzierung nach Kulturarten, dass die ausgewaschene Stickstoffmenge aufgrund der hohen Sickerwassermengen unter mittleren Verhältnissen in allen Gruppen eine so starke Verdünnung erfährt, dass die resultierenden Nitratkonzentrationen im Jahresmittel zumeist deutlich unter 50 mg/l bleiben, - bei vergleichbarem bzw. leicht erhöhtem Niveau der N-Salden in kgN/h*a in Abhängigkeit der Ackerzahl.

Dies wird auch deutlich an den unter Mais und Hackfrüchten ermittelten mittleren Sickerwasserkonzentrationen von „Grundwasser schonenden“ 20 – 25 mg/l. Die höchsten Werte zeigen sich mit 30 bis 35 mg/l unter den Anbauflächen konventioneller Getreidesorten. Unter den Futterpflanzen finden sich zu 80 % Klee und Klee gras, welche bei sachgemäßer Bewirtschaftung ein dem bewirtschafteten Grünland vergleichbares, mittleres Konzentrationsniveau aufweisen.

Abbildung 4.4.4 erlaubt einen Blick auf die räumliche Verteilung der mittleren Nitratkonzentration im Sickerwasser, wie sie für die Jahre 1987 bis 2002

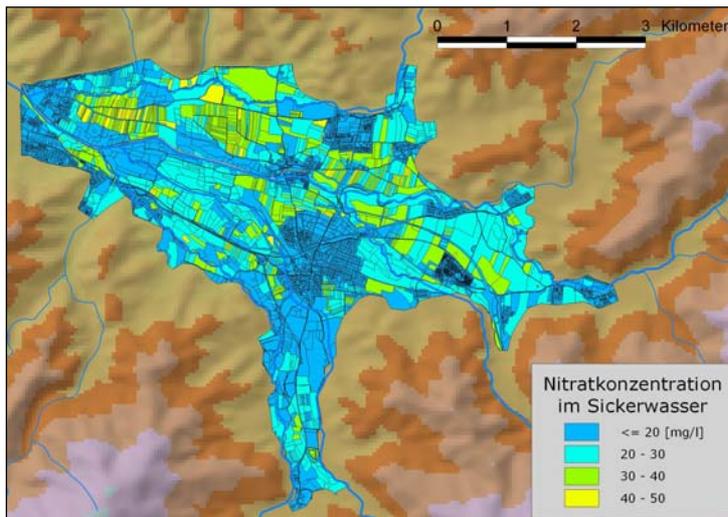


Abb. 4.4.4 Nitratkonzentration im Sickerwasser

ermittelt wurden. Die insgesamt günstige Situation zeigt sich an den nur sehr vereinzelt auftretenden Flächen mit mittleren Sickerwasserkonzentrationen zwischen 40 und 50 mg/l. Die Flächen mit Werten von 30-40 mg/l im nördlichen Teil des Beckens werden vornehmlich für Getreideanbau genutzt. Sie sind auf den erweiterten Zustrombereich der Hungerbrunnen konzentriert. Obwohl sie in ihrer aktuellen Ausdehnung keine nennenswerte Beeinträchtigung der

Rohwasserqualität induzieren, wird deutlich, welcher Stellenwert gerade im Vorfeld dieser beiden, aufgrund ihrer Ergiebigkeit für die Wasserversorgung so wichtigen Brunnen, dem Schutzgebietsmanagement sowie der Kooperation mit den Landwirten zukommt.

6 Ergebnisse und abschließende Zusammenfassung

Nitrathaushalt und Eintragspotentiale

Im Teilprojekt „Nitrathaushalt und Eintragspotentiale“ konnte erstmals eine in sich geschlossene, räumlich und zeitlich hoch auflösende modelltechnische Beschreibung des gekoppelten Wasser- und Nitrathaushaltes für die Boden - Grundwassersysteme der Gewinnungsgebiete realisiert werden. Die Modellierung umfasst den gesamten Zeitraum von 1987 bis 2002.

Das Modell GWN-BW wurde in modifizierter Form zur Berechnung der flächenhaft flurstückscharfen Grundwasserneubildung als wichtige Wasserbilanzgröße und zur Regionalisierung der Klimaparameter aus Stationsdaten eingesetzt.

Aufgrund der differenzierten Wahl erklärender Pflanzenmodelle für die unterschiedlichen Hauptkulturarten (Modellansätze SPASS, CERES, SUCROS) konnte trotz geringer Datengrundlagen (Erträge, Pflanzenparameter, etc.) eine gute und plausible Differenzierung des mittleren Austragsverhaltens unterschiedlicher Kulturarten in Bezug auf Standorteigenschaften und klimatische Bedingungen in den Untersuchungsgebieten erzielt werden, - gleichzeitig auch die Standort und Kulturart spezifische Variabilität des Austragsverhaltens aufgrund unterschiedlicher Witterungsverläufe im Jahresgang abgebildet werden.

Im Ergebnis der Agrar-Ökosystem-Modellierungen für die ausgewählten repräsentativen Standorte stehen für jede Fruchtart/Fruchtfolge – Boden – Standort Kombination Ergebnisse in Form von Zeitreihen (Tageswerte von 1987 – 2002) zu Boden- und Pflanzenparameter (i.e. Nitratfrachten) zur Verfügung.

Die Übertragung der Standortergebnisse (N-Auswaschungsfrachten) auf die Fläche des Untersuchungsgebiets erfolgte in Abhängigkeit der Realnutzung, Bodeneigenschaften und der Standort spezifischen Sickerwassermenge (GWN-BW) und liefert die flächenhaften Stoff- und Massenrandbedingungen des numerischen Grundwassermodells. Die Parametrisierung als flächenhafte Randbedingung der numerischen Grundwassermodelle zeigt, dass im Ergebnis die beobachteten Konzentrationsverteilungen in den Grundwassersystemen relativ gut nachgebildet werden können und erlauben im Sinne einer Validierung den Rückschluss, dass die abgeleiteten Randbedingungen und Auswertungen des Wasser- und Nitrathaushaltes eine realitätsnahe, belastbare Approximation darstellen.

Die Auswertung belegt die Bedeutung der Ackerflächen für den Nitrathaushalt der Grundwassersysteme. So lässt sich für das Wasserschutzgebiet Hausen ein an die flächenhafte Grundwasserneubildung gekoppelter Eintrag von ca. 92 Tonnen Stickstoff [N] pro Jahr abschätzen. Davon entstehen knapp 90% unter Ackerstandorten bei einer mittleren Sickerwasserkonzentration von ca. 55 mg/l. Auch während der Vegetationsperiode zeigen sich, je nach Standort und Witterungsverlauf bilanziell relevante Sickerwasserbildungen verbunden mit Nitrateinträgen.

Die Verfahren zur Ableitung und Parametrisierung der Randbedingungen der weiteren Strömungs- und Transportrandbedingungen sind weitgehend automatisiert und erlauben eine zukünftige Modellpflege, weitgehend auf der Grundlage standardmäßig erhobener Monitoringdaten bzw. Anpassung auf zu bewertende Maßnahmenzenarien.

Nachhaltiger Gewässerschutz

Insgesamt konnte mit diesem Projekt neben den erzielten, umfangreichen neuen Ergebnissen zum Stickstoffhaushalt der Wassergewinnungsgebiete (z.B. Beitrag einzelner landwirtschaftlicher Kulturarten) ein Modell basiertes Werkzeug für zukünftige Aufgaben und Fragestellungen entwickelt werden, das alle wesentlichen aktuellen Bilanzglieder des Wasser- und Stickstoffhaushaltes in ihrem Wirkungsgefüge zu beschreiben vermag.

Aufgrund der gegebenen Prognosefähigkeit des Modell basierten Werkzeuges können zukünftig Auswirkungen von Maßnahmen (Szenarien) oder sich ändernder Randbedingungen besser abgeschätzt bzw. quantifiziert und bewertet (Kosten / Nutzen) werden. Damit verspricht das vorliegende Projektergebnis einen wertvollen, nachhaltigen Beitrag für die weitere Umsetzung der langfristigen Gewässerschutzstrategie.

So erfolgte bereits eine erste wasserwirtschaftliche Anwendung des Modellsystems zur Beantwortung der Fragestellungen, welche Entwicklung der Nitratbelastung im Rohwasser der Brunnengalerie Hausen unter den heutigen Verhältnissen zu erwarten ist.

Das Erklärungspotential der Agrar-Ökosystem-Modellierung mit seinen expliziten Pflanzenmodellen verspricht bei zukünftiger Fortführung der Standortsimulationen einen wertvollen Bewertungshintergrund für die Diskussion der Ergebnisse der Nmin Kontrollen im Herbst, wie auch für die Beratung und kann damit einen wertvollen Beitrag zur Versachlichung der Diskussion und Vermittlung von Sachverhalten leisten.

Die Ergebnisse dieses Projektes, insbesondere der Modellierungsansatz, lassen sich zukünftig auf andere Untersuchungsgebiete übertragen.

Internet- Auskunftsplattform

Die einzelnen Informationen, ebenso wie die wesentlichen Ergebnisse, werden in der zentralen Geodatenbank des Smallworld GIS basierten Wasser- und Qualitätsinformationssystems der badenova „WAQIS“ zusammengeführt und bieten eine deutlich erweiterte und standardisierte Informationsbasis für die Aufgaben Monitoring, Kooperationsmanagement und Auskunft in allen bewirtschafteten Wasserschutzgebieten.

Die Fortführung bzw. Pflege und Beauskunftung der Datengrundlagen erfolgt über spezifische Fachanwendungen zu den Themen Monitoring (Grundwasser), Kooperations-Management (Landwirtschaft) und Boden.

Zur Verbesserung des Zugriffs auf die aktuellen Daten- und Informationsgrundlagen des „WAQIS“ erfolgte die Entwicklung und Integration einer Internet basierten Auskunftslösung auf Basis der Smallworld Internet Applikation Server Technologie (SIAS). Somit steht badenova nun ein System zur Verfügung, mit dem alle zuständigen Personen über Intranet auf Gewässerschutz relevanten Daten zugreifen können. Durch den modularen Aufbau kann das System grundsätzlich auch für externe Dritte geöffnet werden. Der kontrollierte Zugriff erfolgt Anwender spezifisch über einen beliebigen Internetbrowser und verlangt auf Client Seite keine besonderen Hard- oder Softwareanforderungen.

7 Literaturangaben

Gamer, W & J. Zeddies (2002): Bilanzen von potentiell umweltbelastenden Nährstoffen (N, P, K und S) der Landwirtschaft in Baden-Württemberg. Forschungsauftrag des Ministeriums Ländlicher Raum, Baden-Württemberg. Universität Hohenheim.

Goode, D. J. (1996): Direct simulation of groundwater age. Water Resources Research 32, 2, 289 - 296.

Marotz, G. (1968): Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund. Schr. R. KWK, 18, Hamburg.

Morhard, A. (2001): Stofftransport und Stickstoffdynamik in Grundwassereinzugsgebiet der Staufener Bucht. Diplomarbeit. Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau.

Priesack, E. & C. Bauer (2003): Expert-N. Datenmanagement. FAM-Bericht 59. GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, München

Schröder, R. (1994): Technische Hydraulik. Kompendium für den Wasserbau. Springer-Verlag, Berlin.

Schulz, K.-P. (1988): Untersuchung von Grundwasserstand-Beeinflussungen anhand von Beispielen aus der Freiburger Bucht. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau.

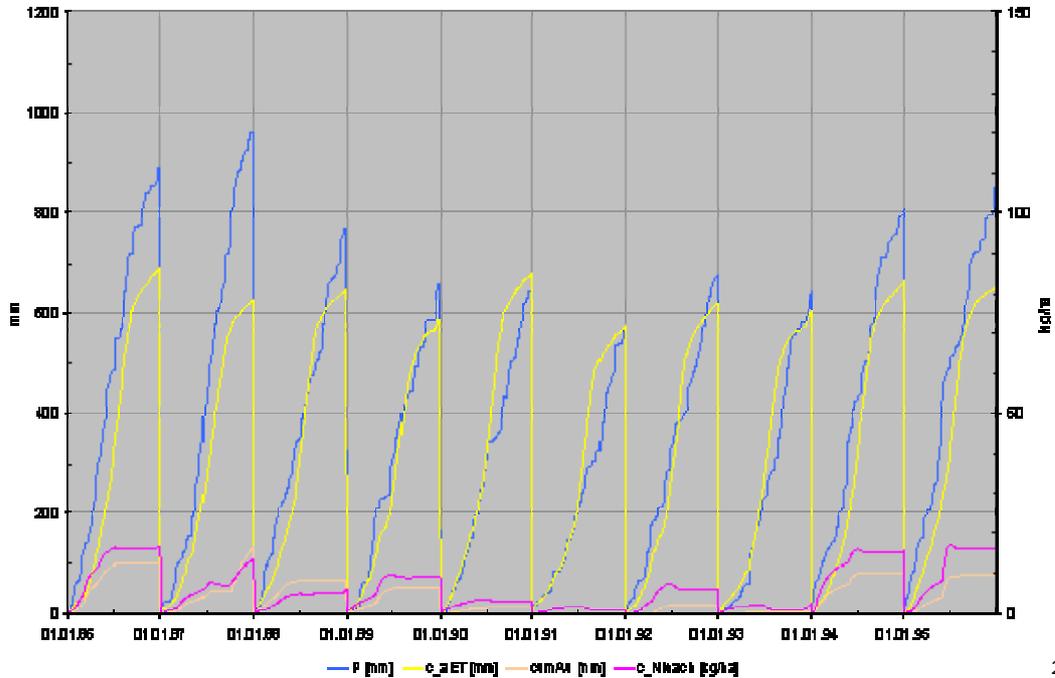
Spass, Wang, Enli (1997): Development of a Generic Process-Oriented Model for Simulation of Crop Growth. Dissertation. Institut für Landwirtschaftlichen und Gärtnerischen Pflanzenbau, Technische Universität München.

Turc, L. (1961): Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle. Ann. Agron. Paris 12, 13-49.

Anhang

Beispielhaft lässt sich das **unterschiedliche Standortverhalten** eines mächtigen Lößbodens (Parabraunerde, Mais Monokultur) im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes mit ca. 700 mm mittlerem Jahresniederschlag

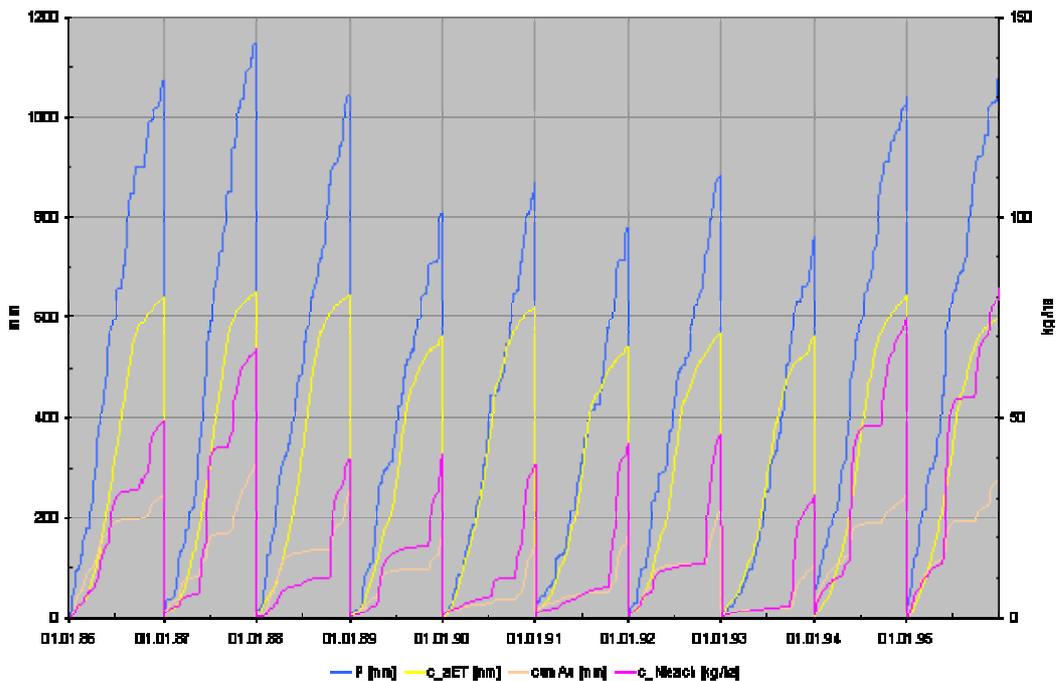
Mais, B50250_St1



2

gegenüber einem kiesigen Rohboden im Bereich der Vorbergzone mit einem mittleren Jahresniederschlag von ca. 950 mm darstellen

Mais, B10433_St0



² P: Niederschlag kumuliert mm/a (blau); c_aET: kumulierte aktuelle Evapotranspiration mm/a (gelb) und c_leach: Nitratauswaschung in kg/ha*a (violett) cum A: kumulierte Sickerwassermenge [mm/a] (orange)