





Grundwasserströmung und Nitrattransport

 INTERREG III A-Projekt MoNit "Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben"

Modélisation hydrodynamique et transport des nitrates

 INTERREG III A : MoNit "Modélisation de la pollution des eaux souterraines par les nitrates dans la vallée du Rhin Supérieur"



Ce projet est cofinancé
par l'Union Européenne
Dieses Projekt wird von der
Europäischen Union kofinanziert



Baden-Württemberg

Grundwasserströmung und Nitrattransport



INTERREG III A-Projekt MoNit „Modellierung der Grundwasserbelastung
durch Nitrat im Oberrheingraben“

Modélisation hydrodynamique et transport des nitrates



Projet d'INTERREG III A MoNit „Modélisation de la pollution des eaux
souterraines par les nitrates dans la vallée du Rhin Supérieur“

HERAUSGEBER/ PUBLICATION	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de
BEARBEITUNG / RÉALISATION	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Referat 42 – Grundwasser, Baggerseen mit Beiträgen von / <i>avec des contributions de</i> Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH, 70 182 Stuttgart Steinbeis-Transferzentrum Grundwassermodellierung, 69 168 Wiesloch Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, 67000 Strasbourg GIT HydroS Consult GmbH, 79 098 Freiburg Universität Karlsruhe Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, 76 128 Karlsruhe Bundesanstalt für Wasserbau, 76 187 Karlsruhe
REDAKTION / RÉDACTION	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Referat 42 – Grundwasser, Baggerseen
GEFÖRDERT DURCH COFINANCIÉ PAR	EU - INTERREG III A Programme Oberrhein Mitte-Süd und PAMINA / <i>UE - Programmes INTERREG III A Rhin Supérieur Centre-Sud et PAMINA</i>
BEZUG / DISTRIBUTION	Die Broschüre ist kostenlos erhältlich bei der Verlagsauslieferung der LUBW <i>La brochure est gratuite et peut être demandée auprès du distributeur de la LUBW</i> JVA Mannheim -Druckerei, Herzogenriedstr. 111, 68169 Mannheim Telefax 0621/398-370, bibliothek@lubw.bwl.de/
STAND / ETAT	Juli 2006, 1. Auflage / <i>Juillet 2006, 1ère édition</i>
BILDNACHWEIS / RÉFÉRENCE D'IMAGE	Titelbild / <i>Image de couverture</i> Reiner Steinmetz, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Reproduction – même partielle – autorisée seulement avec mention de l'origine et mise à disposition des exemplaires justifiés.

FINANZPARTNER / COFINANCEURS

Europäische Union – Gemeinschaftsinitiative INTERREG III A
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Région Alsace
Agence de l'eau Rhin-Meuse
Bureau de Recherches Géologiques et Minières
Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable
Regierungspräsidium Freiburg - Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg
Staatliche Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Augustenberg
Kanton Basel-Stadt
Kanton Basel-Landschaft
Schweizer Eidgenossenschaft

PROJEKTRÄGER / MAÎTRE D'OUVRAGE

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

Inhaltsverzeichnis

Sommaire

ZUSAMMENFASSUNG		11
RÉSUMÉ		
1	EINLEITUNG	21
	INTRODUCTION	
1.1	Aufgabenstellung und Ziel <i>Mission et objectis</i>	21
1.2	Untersuchungsgebiet <i>Domaine d'étude</i>	21
1.3	Vorgehensweise <i>Procédure</i>	25
2	HYDROGEOLOGISCHE VERHÄLTNISSE IM UNTERSUCHUNGSRAUM	27
	STRUCTURE HYDROGÉOLOGIQUE DU DOMAINE D'ÉTUDE	
2.1	Vertikale Gliederung der quartären Schichten <i>Structure verticale des alluvions quaternaires</i>	27
2.2	Horizontale Ausdehnung und Mächtigkeit der quartären Schichten <i>Repartition et épaisseur des couches quaternaires</i>	29
2.3	Durchlässigkeitsverhältnisse <i>Perméabilités</i>	30
3	ABFLUSSREGIONALISIERUNG	32
	RÉGIONALISATION DES ÉCOULEMENTS	
3.1	Einleitung <i>Introduction</i>	32
3.2	Vorgehensweise <i>Mise en oeuvre</i>	33
3.3	Analyse <i>Analyse</i>	35
3.4	Synthese <i>Synthèse</i>	37
3.5	Vergleich französischer und deutscher Datensätze <i>Comparaison des données francaises et allemandes</i>	40
4	WASSERSPIEGELLAGEN DES RHEINS ZWISCHEN BASEL UND MAXAU	42
	LIGNE D'EAU DU RHIN ENTRE BALE ET MAXAU	
4.1	Aufgabenstellung <i>Problème posé</i>	42
4.2	Datengrundlage <i>Données disponibles</i>	43
4.3	Beschreibung des angewandten Modell-Verfahrens <i>Description du modèle retenu</i>	45
4.4	Dokumentation Streckeneinteilung und Wasserspiegellagenermittlung <i>Documentation par troncon et calcul des lignes d'eau</i>	46
4.5	Ergebnisse <i>Resultats</i>	56

5	GESAMTABFLUSS UND GRUNDWASSEREUBILDUNG AUS NIEDERSCHLAG RUISSELLEMENT GLOBAL ET PRECIPITATIONS EFFICA-CES	59
5.1	Aufgabenstellung <i>Problème posé</i>	59
5.2	Methodik <i>Méthode</i>	60
5.3	Datengrundlagen und Validierung <i>Bases de données et validation</i>	62
5.3.1	Metereorologische Eingangsdaten <i>Données météorologiques</i>	62
5.3.2	Physiographische Eingangsdaten <i>Données physiographiques</i>	63
5.3.3	Validierung der Simulationsergebnisse <i>Validation des essais de simulation</i>	64
5.4	Ergebnisse der hydrologischen Modellierung <i>Resultats de la modélisation hydrologique</i>	66
5.4.1	Interpolation von Klimadaten <i>Interpolation des données climatiques</i>	66
5.4.2	Simulation von Bodenwasserhaushalt, Verdunstung und Sickerwassermenge <i>Modélisation du bilan hydrique du sol, de l'évaporation et de la recharge</i>	71
6	AUSTAUSCHPROZESSE ZWISCHEN FLUSS UND GRUNDWASSER PHÉNOMÈNES D'ÉCHANGES NAPPE - RIVIÈRE	78
6.1	Einführung <i>Introduction</i>	78
6.2	Resultate und Schlussfolgerungen <i>Resultats et consequences</i>	81
7	MODELLAUFBAU UND EICHUNG FÜR STATIONÄRE STRÖMUNGSVERHÄLTNISSE CONSTRUCTION DU MODELE ET ETALONNAGE EN RE-GIME PERMANENT	84
7.1	Übersicht <i>Introduction</i>	84
7.2	Horizontale Abgrenzung <i>Limite horizontale</i>	85
7.2.1	Modellgebiet <i>Domaine modelise</i>	85
7.2.2	Modellrandbedingungen <i>Conditions aux limites</i>	86
7.3	Horizontale Diskretisierung <i>La Discrétisation horizontale</i>	88
7.4	Vertikale Diskretisierung <i>Discrétisation verticale</i>	88
7.5	Grundwasserentnahmen <i>Puits de Pompage</i>	90
7.6	Unterirdische Zu- und Abflüsse <i>Entrée et perte d'eaux</i>	91
7.7	Oberirdische Gewässer <i>Les eaux de surface</i>	92
7.7.1	Rhein als Leakage-Randbedingungen mit vorgegebenen <i>Le Rhin comme condition aus limites du 3ème type</i>	94

7.7.2	Gewässernetz mit gekoppelter Bilanzbetrachtung <i>Réseau de surface couplé à la nappe</i>	94
7.7.3	Baggerseen mit gekoppelter Bilanzbetrachtung <i>Gravieres avec calcul couple de bilan</i>	95
7.8	Grundwasserneubildung aus Niederschlag <i>Recharge de nappe a partir des precipitations</i>	96
7.9	Vergleichsgrößen für die stationäre Modelleichung <i>Données de validation pour l'étalonnage en régime permanent</i>	98
7.10	Eichgrößen <i>Les paramètres d'étalonnage</i>	98
7.11	Ergebnis der stationären Strömungseichung <i>Résultats de l'étalonnage en régime permanent</i>	98
7.12	Piezometerhöhenverteilung 101 <i>R'partition des hauteurs</i>	100
7.13	Wasserbilanz <i>Bilanzen eau</i>	102
7.14	Austauschverhältnisse <i>Dynamique des échanges</i>	103
7.14.1	Austausch zwischen Neuenburg- und Breisgau-Formation <i>Echanges entre les formations du Neubourg et de Breisgau</i>	104
7.14.2	Austausch mit dem Gewässernetz <i>Echanges avec les eaux de surface</i>	106
7.15	Geeichte Aquiferkenngrößen <i>Les paramètres étalonnés</i>	108
7.15.1	Horizontale Durchlässigkeiten <i>Les permeabilites horizontales</i>	108
7.15.2	Leakagekoeffizienten der Oberflächengewässer <i>Les coefficients d'echange nappe-rivieres</i>	112
7.16	Ergebnis der Sensitivitätsstudie <i>Résultats de l'analyse de sensibilité</i>	114
8	INSTATIONÄRER MODELLAUFBAU UND STRÖMUNGSEICHUNG CONCEPTION DU MODELE EN REGIME TRANSITOIRE ET ETALONNAGE	116
8.1	Übersicht <i>Apercu</i>	116
8.2	Betrachtungszeitraum und Anfangsbedingungen <i>Période d'observation et conditions initiales</i>	116
8.3	Zeitdiskretisierung <i>Discrétisation en temps</i>	117
8.4	Grundwasserentnahmen <i>Les prélèvements</i>	117
8.5	Oberirdische Gewässer <i>Les eaux de surface</i>	118
8.6	Grundwasserneubildung <i>La recharge de nappe</i>	118
8.7	Vergleichsgrößen für die Modelleichung <i>Variables de comparaison pour l'étalonnage du modèle</i>	119

8.8	Eichgrößen <i>Les paramètres d'étalonnage</i>	119
8.9	Geeichte Piezometerhöhen <i>La piézométrie après étalonnage</i>	120
8.10	Geeichte Hohlräume <i>La porosité après étalonnage</i>	122
8.11	Wasserbilanz <i>Bilan en eau</i>	124
8.12	Sensitivitätsstudie <i>Analys de sensibilité</i>	126
9	STOFFTRANSPORTMODELLIERUNG MODELISATION DU TRANSPORT DE SOLUTE	128
9.1	Vorgehensweise <i>La démarche</i>	128
9.2	Berücksichtigung der ungesättigten Zone <i>Prise en compte de la zone non saturée</i>	131
9.3	Identifikation der Zustrombereiche zu den Messstellen <i>Identification des zones d'emprunt au niveau des points de mesure</i>	133
9.4	Tritiumsimulation <i>Simulation du transport du tritium</i>	136
9.4.1	Randbedingungen <i>Les conditions aux limites</i>	136
9.4.2	Modellkalibrierung <i>etalonnage du modèle</i>	138
9.4.3	Diskussion der Ergebnisse <i>Analyse des resultats</i>	140
9.5	Simulation des Sauerstofftransports <i>Etalonnage du modèle de transport d'oxygène dissous</i>	142
9.5.1	Randbedingungen <i>Les conditions aux limites</i>	142
9.5.2	Kalibrierung des Sauerstofftransports <i>Etalonnage du modèle de transport d'oxygène</i>	143
9.5.3	Diskussion der Ergebnisse <i>Interpretation des resultats</i>	147
9.5.4	Übertragung der Ergebnisse auf den Nitrattransport <i>Transfert des resultats à la simulation au transport des nitrates</i>	147
9.6	Simulation des Nitrattransports 1950 bis 2005 mit stationärem Strömungsfeld <i>Simulation du transport de nitrates de 1950 à 2005 avec un écoulement permanent</i>	149
9.6.1	Randbedingungen <i>Conditions aux limites</i>	149
9.6.2	Anfangsbedingung <i>Conditions initiales</i>	151
9.6.2	Vergleich gemessener und berechneter Nitratkonzentrationen <i>Comparaison entre concentrations en nitrates calculées et mesurées</i>	151
9.6.4	Ergebnisse <i>Résultats</i>	156
9.6.5	Sensitivitätsstudie <i>Analyse de sensibilité</i>	163

9.7	Simulation des Nitrattransports 1986 bis 2002 mit instationärer Strömung <i>Simulation du transport de nitrates de 1986 à 2002 avec un écoulement transitoire</i>	166
9.7.1	Randbedingungen <i>Conditions aux limites</i>	166
9.7.2	Ergebnisse <i>Résultats</i>	167
9.8	Prognosebetrachtungen <i>Simulations prévisionnelles</i>	168
9.8.1	Übersicht <i>Aperçu</i>	168
9.8.2	Ergebnisse des Bezugslaufs <i>Résultats concernant le calcul de référence</i>	168
9.8.3	Prognose für Sensitivitätslauf S 3 UND s \$ <i>Prévisions pour les calculs de sensibilités S 4 et S 4</i>	174
<hr/>		
	NAMEN UND ANSCHRIFTEN DER AUTOREN <i>NOM ET DIRECTIONS DES AUTEURS</i>	179
<hr/>		
	ABKÜRZUNGEN IM TEXT <i>ABRÉVIATIONS DANS LE TEXTE</i>	180
<hr/>		
	LITERATURVERZEICHNIS <i>BIBLIOGRAPHIE</i>	182
<hr/>		

Zusammenfassung

Résumé

Um die Nitratverhältnisse im Grundwasserleiter des Oberrheingrabens zwischen Karlsruhe und Basel zu erkunden, wurde ein numerisches Grundwassermodell aufgebaut. Ziel der Modellbetrachtung war es ein prognosefähiges Werkzeug bereitzustellen, mit dem die derzeitige Situation bewertet und die zukünftige Entwicklung der Nitratverhältnisse im Grundwasserleiter abgeschätzt werden kann. Dazu wurde das Projektgebiet anhand der oberirdischen Wasserscheiden des Oberrheingrabens abgegrenzt. Dieser Untersuchungsraum mit den oberirdischen Einzugsgebieten wird als äußeres Projektgebiet bezeichnet. Das innere Projektgebiet beinhaltet die quartäre Lockergesteinsfüllung, für die das Grundwassermodell aufgebaut wurde.

Für die Grundwassermodelluntersuchung wurden zunächst die hydrogeologischen Verhältnisse im inneren Projektgebiet anhand der vorhandenen Informationen neu bewertet und grenzüberschreitend ausgewertet. Diese vorbereitenden Arbeiten wurden von den Geologischen Diensten der beteiligten Länder durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind im Bericht „Hydrogeologischer Bau und hydraulische Eigenschaften“ und zusammenfassend in Kapitel 2 beschrieben. Aus hydrogeologischer Sicht lässt sich der quartäre Grundwasserleiter in zwei hydrogeologische Einheiten unterteilen. Dies sind im oberen Bereich die Neuenburg-Formation und darunter liegend die Breisgau-Formation. Dieser gut durchlässige Lockergesteinsgrundwasserleiter wird an seiner Basis durch die gering durchlässigen tertiären Ton- und Tonmergelsteine oder den überwiegend tonig-schluffigen Sanden der Iffezheim-Formation begrenzt. Die Neuenburg-Formation lässt sich aufgrund der hydraulischen Eigenschaften in einen oberen und einen unteren Bereich unterteilen. Generell ist der obere Teil der Neuenburg-Formation deutlich durchlässiger als der untere Teil. Die Breisgau-Formation ist wiederum geringer durchlässiger als

Un modèle numérique hydrogéologique a été élaboré pour analyser et quantifier la dynamique des nitrates dans le Fossé du Rhin Supérieur, entre Bâle et Karlsruhe. L'objectif de cette modélisation est la mise au point d'un outil de prévision, qui, calé sur la situation actuelle, sera susceptible d'évaluer la dynamique future des nitrates dans l'aquifère. Pour ce faire, les limites du domaine d'étude ont été établies à partir des lignes de partage des eaux définies pour les eaux de surface. Ce domaine contenant les bassins-versants ainsi définis est considéré comme le domaine d'étude global pour ce projet. Les alluvions quaternaires pour lesquelles le modèle hydrogéologique est établi constitue le domaine d'étude qui sera appelé la plaine du Rhin Supérieur.

Pour la modélisation hydrogéologique et dans un premier temps, les données disponibles ont fait l'objet de nouvelles analyses et ont été interprétées de manière transfrontalière. Cette première phase a été menée par les services géologiques des pays participants. Les résultats de ces travaux sont publiés dans le rapport 'Structure hydrogéologique et propriétés hydrodynamiques' et résumés dans le chapitre suivant (chapitre 2). D'un point de vue hydrogéologique, l'aquifère constitué d'alluvions du quaternaire peut être divisé en 2 unités hydrogéologiques : la formation du Neubourg pour sa partie supérieure, et la formation de Breisgau pour la partie inférieure. Ces alluvions très perméables reposent une formation moins perméable et constituée d'argile et de marnes ou sur la formation argilo-sableuse dite d'Iffezheim. La formation de Neubourg peut être divisée en une partie supérieure et une partie inférieure pour des raisons de caractéristiques hydrodynamiques. Dans l'ensemble, la partie supérieure de la formation de Neubourg est plus perméable que la partie inférieure. La formation du Breisgau est elle, encore moins perméable. On

die Neuenburg-Formation, so dass sich nach der Tiefe hin abnehmende Durchlässigkeiten ergeben.

Die wichtigste Zuflussgröße für den Lockergesteinsaquifer ist die Grundwasserneubildung aus Niederschlag. Diese wurde mit GWN-BW, einem deterministischen, flächendifferenzierten Modell zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und zur Bestimmung der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge berechnet. Die Berechnung erfolgte in Tagesschritten, die zu den für die Grundwassermodelluntersuchung relevanten Zeitskalen aggregiert wurden. Die Simulationsergebnisse wurden anhand von gemessenen Sickerständen an Lysimeterstandorten und gemessenen Abflüssen in oberirdischen Gewässern validiert. Die Ergebnisse hierzu sind in Kapitel 5 beschrieben.

Im inneren Projektgebiet befinden sich zahlreiche oberirdische Gewässer, die über den Grabenrand in das Gebiet des Grundwassermodells eintreten. Für diese oberirdischen Einzugsgebiete wurden mittels Abflussregionalisierung Zuflusszeitreihen mit monatlicher Auflösung für das Grundwassermodell erstellt. Der Regionalisierungsansatz beruht auf Regressionsgleichungen, mit denen die Abfluss-Kennwerte als Funktion geeigneter Gebietskenngrößen berechnet werden. Die wesentlichen Gebietskenngrößen sind dabei die Größe des betrachteten Einzugsgebiets, die Fließlängen in dem Gebiet, das gewogene Gefälle, die Flächennutzung, der mittlere Gebietsniederschlag und ein empirisch ermittelter Landschaftsfaktor, der insbesondere die landschaftsräumlichen Gegebenheiten erfasst. Die Modellergebnisse wurden durch gemessene Abflussganglinien an verschiedenen Pegelstandorten verifiziert. Die Ergebnisse der Abflussregionalisierung sind in Kapitel 3 beschrieben.

Der Rhein mit den Kanalstrecken ist der größte Vorfluter im Untersuchungsraum. Dieser steht in direktem hydraulischen Kontakt zum Grundwasserleiter. Die Grundwasserströmung im Nahbereich des Rheins wird durch die Rheinwasserspiegel dominiert. Der Rhein stellt damit eine wichtige Randbedingung für

peut donc considérer que, globalement, la perméabilité diminue avec la profondeur.

Les apports les plus importants pour cet aquifère sédimentaire est la recharge générée par les précipitations. Cette recharge de nappe est calculée à l'aide du modèle hydrologique GWN-BW. GWN-BW est un modèle déterministe distribué qui permet le calcul de l'évapotranspiration réelle, de la variation de stock d'eau dans le sol et le flux d'eau percolant au-delà de la zone racinaire. Le calcul se fait au pas de temps journalier, calcul qui est ensuite intégré à un pas de temps pertinent pour le modèle hydrogéologique. Les résultats des simulations sont validés à l'aide de mesures provenant soit de flux d'infiltration mesurés au niveau de lysimètres ou de flux d'eau de surface. Les résultats correspondants sont présentés dans le chapitre 5.

De très nombreux cours d'eau se trouvent dans la plaine du Rhin Supérieur, cours d'eaux qui entrent dans la plaine à travers les limites du Graben. Pour la modélisation hydrogéologique, des chroniques de débits au pas de temps mensuel ont été reconstituées à partir des flux spatialisés au niveau des bassins versants correspondants. Cette méthode de régionalisation repose sur des régressions permettant d'estimer des débits à partir de caractéristiques liées au site. Les principales caractéristiques sont la taille du bassin-versant étudié, la longueur des cours d'eau dans le domaine, une pente moyenne, l'occupation du sol, les précipitations moyennes au niveau du site et un coefficient dit de paysage, coefficient empirique lié à la variabilité de l'occupation du sol dans le bassin. Les résultats ont été vérifiés par comparaison aux chroniques de données limnimétriques mesurées en différents cours d'eau. Les résultats de la spatialisation des débits des cours d'eau sont présentés dans le chapitre 3.

Le Rhin avec son canal d'accompagnement est le plus grand cours d'eau dans le domaine d'étude. Il est en contact hydraulique direct avec l'aquifère. De ce fait, les écoulements souterrains sont fortement influencés par la surface libre du Rhin qui constitue donc, une importante condi-

den Grundwasserleiter dar. Deshalb wurden die instationär schwankenden Rheinwasserstände anhand von numerischen 1D Modellen für die Rheinstrecke zwischen Basel und Karlsruhe bestimmt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4 dokumentiert.

Parallel zu der großräumigen Grundwassermodelluntersuchung wurde in drei kleinräumigen Untersuchungsgebieten in der Schweiz der Austausch zwischen Grundwasser und oberirdischen Gewässern detailliert untersucht. Die Untersuchungsgebiete liegen im Birstal, in der Wieseebene und im Bereich MuttENZ-Pratteln. Diese Detailuntersuchungen bildeten die Basis für die Eichung der Leakagekoeffizienten im inneren Projektgebiet und gaben Anhaltswerte für die Bandbreite der Austauschraten zwischen Grundwasser und oberirdischen Gewässern. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind ausführlich im Bericht „Fluss-Grundwasser-Interaktion“ beschrieben, eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Kapitel 6 enthalten.

Für die Simulation der Strömungsverhältnisse wurde das vom United States Geological Survey entwickelte Programmsystem MODFLOW2000 verwendet. Die Transportsimulationen wurden mit Hilfe des von Zeng und Wang (1999) entwickelten Programmsystems MT3DMS durchgeführt. Beide Programmsysteme wurden von der LUBW so modifiziert, dass diese für die Verhältnisse im Oberrheingraben bestmöglich anwendbar sind. Mit diesem System erfolgten im Rahmen der Modelluntersuchung folgende Arbeitsschritte:

- Modellaufbau unter Berücksichtigung der verfügbaren Informationen zur Hydrogeologie und zu den hydraulischen Randbedingungen
- Modelleichung für stationäre Strömungsverhältnisse
- Modelleichung für instationäre Strömungsverhältnisse
- Transportbetrachtungen mit folgenden Arbeitsschritten
- Simulation der Tritiumverhältnisse
- Simulation der Sauerstoffverhältnisse
- Simulation des Nitrattransports

tion aux limites pour l'aquifère. De ce fait, les fluctuations transitoires du niveau du Rhin ont été calculées à l'aide d'un modèle d'hydraulique 1D pour le tronçon Bâle-Karlsruhe. Les résultats sont détaillés dans le chapitre 4.

En parallèle au développement du modèle hydrogéologique, les échanges eaux de surface-eau souterraine ont été étudiés en détails sur 3 sites localisés en Suisse. Ces études ont été menées dans la vallée de Birst, dans la plaine de la Wiese et dans le secteur de MuttENZ-Pratteln. Ces travaux très détaillés constituent une base pour l'étalonnage du coefficient d'échange nappes-rivière (leakage) et ont permis de déterminer des ordres de grandeur de ce coefficient pour le modèle de la plaine du Rhin Supérieur. Ces résultats sont détaillés dans le rapport intitulé « Interactions eaux de surface-eau souterraine ». Un résumé de ces travaux se trouve dans le chapitre 6.

Le logiciel MODFLOW2000 développé par le Service Géologique des Etats-Unis a été utilisé pour simuler l'hydrodynamique des eaux souterraines. Le transport est simulé à l'aide du logiciel MT3DMS développé par Zeng et Wang (1999) Compte tenu des caractéristiques de l'aquifère du Rhin Supérieur, ces 2 logiciels ont été adaptés par le LUBW pour permettre son utilisation optimale. A l'aide de ce système informatique, les étapes suivantes ont été abordées dans le cadre de ce travail :

- Construction du modèle sur la base des informations hydrogéologiques disponibles et des conditions aux limites pour l'hydrodynamique
- Etalonnage du modèle en régime permanent
- Etalonnage du modèle en régime transitoire
- Simulation du transport avec les étapes suivantes
- Simulation du transport du Tritium
- Simulation du transport de l'oxygène dissous
- Simulation du transport des nitrates

MODELLAUFBAU

Basierend auf den vorbereitenden Ergebnissen zur Hydrogeologie und Hydrologie wurde das Grundwassermodell für den Lockergesteinsaquifer im Oberrheingraben zwischen Basel und Karlsruhe aufgebaut. In horizontaler Richtung wird das Modellgebiet im Osten und Westen durch den Rand des Lockergesteinskörpers begrenzt. Im Süden und Norden wurde der Rand quer zum Oberrheingraben entlang bekannter Grundwassergleichen gelegt. Im Süden findet ein unterirdischer Zustrom und im Norden ein Abstrom statt. Im numerischen Modell wurden die beiden dominierenden hydrogeologischen Einheiten, Neuenburg- und Breisgau-Formation beim vertikalen Modellaufbau berücksichtigt. Beiden hydrogeologischen Einheiten wurden jeweils 5 Modellschichten zugeordnet. Damit ergeben sich in vertikaler Richtung insgesamt 10 Modellschichten. Diese vergleichsweise feine vertikale Unterteilung ist notwendig, um die vertikalen Transportprozesse der Nitratverlagerung nachzubilden. Für die horizontale Diskretisierung wurde ein Finite-Differenzen-Netz mit quadratischen Modellzellen der Seitenlänge 100 m verwendet, das nach Norden ausgerichtet ist.

Das Strömungsmodell wurde unter Berücksichtigung folgender hydraulischer Randbedingungen aufgebaut:

- Grundwasserneubildung aus Niederschlag als flächenhafte Zuflussrandbedingung.
- Leakagerandbedingung an dem feinmaschigen Netz der Fließgewässer und Baggerseen mit jeweils gekoppelter Wasserbilanzbetrachtung
- Leakagerandbedingung für den Rhein und den Rheinseitenkanal mit vorgegebenem Potenzial aus der numerischen Wasserspiegelsberechnung
- Grundwasserentnahmen als Randbedingung 2. Art.
- Unterirdischer Zufluss an den Grabenrändern, der über eine Bilanzierung der angrenzenden oberirdischen Einzugsgebiete bestimmt wurde

CONSTRUCTION DU MODÈLE

Le modèle hydrogéologique pour les alluvions du Rhin Supérieur de Bâle à Karlsruhe a été construit à partir des résultats des études hydrogéologiques et hydrologiques. Sur un plan horizontal, les limites Est et Ouest se situent à la limite des alluvions. Au Sud et au Nord, des limites transversales au Fossé du Rhin Supérieur ont été localisées sur des lignes isopièzes connues. De ce fait, un flux d'eau entre par la limite Sud et sort par la limite Nord. Les deux principales structures géologiques Neubourg et Breisgau ont été prises en compte dans la discrétisation verticale du domaine. Chacune de ces structures a été discrétisée en 5 couches. Dix couches constituent donc la discrétisation verticale de l'aquifère. Cette relative fine discrétisation verticale est nécessaire à une bonne représentation des phénomènes verticaux de transport de nitrates. La discrétisation horizontale, orientée vers le Nord, est de type différences finies et est constituée de mailles carrées de 100 m de côté.

Les conditions aux limites suivantes sont prises en compte pour la modélisation de l'écoulement :

- La recharge de nappe issue des précipitations est imposée comme source surfacique
- Des conditions d'échange nappe-rivières pour le dense réseau hydrographique et pour les gravières, couplés à des calculs de bilan
- Des conditions d'échange nappe-rivières pour le Rhin et son canal d'accompagnement, avec des niveaux du Rhin et du canal obtenus par le calcul numérique
- Les pompages sont considérés comme des conditions aux limites de 2ème type (flux imposés)
- Les flux entrant au niveau des limites du Fossé Rhénan sont estimés par un calcul de bilan au niveau des bassins-versants situés sur ces limites.

EICHUNG DER STATIONÄREN STRÖMUNG

Das Strömungsmodell wurde zunächst für stationäre mittlere Verhältnisse geeicht. Als Vergleichsgrößen standen gemessene Piezometerhöheninformationen für den Stichtag 20.10.1986 zur Verfügung. Im Rahmen der Modelleichung wurden die Durchlässigkeitsverhältnisse im oberen und unteren Teil der Neuenburg-Formation und die Durchlässigkeiten der Breisgau-Formation sowie die Leakagekoeffizienten an den Gewässern variiert. Die Ausgangsverteilungen der Durchlässigkeiten wurden der hydrogeologischen Auswertung entnommen. Diese wurde im Verlauf der Modelleichung weiter verfeinert. Insbesondere in den Grabenrandbereichen hat sich eine etwas geringere Durchlässigkeitsverteilung in der Modelleichung ergeben, als sich diese aus den Pumpversuchsergebnissen ableiten lässt. Die generelle Struktur und die vertikale Differenzierung mit nach der Tiefe abnehmenden Durchlässigkeiten konnte beibehalten werden.

Zwischen gemessenen und berechneten Piezometerhöhen konnte eine mittlere Abweichung von 0,61 m erzielt werden. Diese mittlere Abweichung ist deutlich kleiner als 1% des Piezometerhöhenunterschieds von ca. 100 m im zentralen Teil des Oberrheingrabens. Das Anpassungsergebnis ist somit als sehr gut zu bezeichnen. Die wichtigste Auswertung des stationären Strömungsergebnisses ist die Wasserbilanz. Der Gesamtumsatz im numerischen Modell beträgt 86 m³/s. Die hauptsächliche Zuflusskomponente ist die Grundwasserneubildung mit 32 m³/s. Die Summe der Zu- und Abflüsse für das Gewässernetz beträgt – 23 m³/s. Die Grundwasserentnahmen haben einen Anteil von 25% am Gesamtumsatz für den Untersuchungsraum.

EICHUNG DER INSTATIONÄREN STRÖMUNG

Nach der stationären Eichung wurde das Strömungsmodell einer detaillierten instationären Modelleichung für den Zeitraum 01.01.1986 bis 31.12.2002 unterzogen. Mit einer monatlichen Zeitdiskretisierung konnten die saisonalen und langjährigen Schwankungen im numerischen Modell erfasst wer-

ETALONNAGE EN REGIME PERMANENT

Le modèle hydrodynamique a d'abord été étalonné en régime permanent en moyennes eaux. Les données mesurées sont les hauteurs piézométriques établies le 20.10.1986. L'étalonnage a consisté à estimer les conductivités hydrauliques des couches supérieures et inférieures de la formation du Neubourg, les conductivités hydrauliques de la formation de Breisgau et les coefficients d'échange nappe-rivières. L'étalonnage des perméabilités a été mené à partir de la distribution spatiale initiale fournie par les services géologiques. La distribution spatiale initiale des perméabilités a été affinée au cours de l'étalonnage. En particulier, les perméabilités en bordure de nappe ont été diminuées par rapport à celles estimées par les pompages d'essai. La structure initiale et les différenciations verticales avec des perméabilités décroissantes selon la profondeur, ont pu être conservées lors de l'étalonnage.

L'écart moyen atteint entre piézométrie mesurée et calculée est de l'ordre de 0.61 m. Cet écart est nettement plus petit que 1% des différences de piézométrie mesurée qui est d'environ 100 m pour la partie centrale du Fossé du Rhin Supérieur. L'étalonnage ainsi obtenu peut être considéré comme très bon. Le bilan en eau est le résultat le plus important concernant l'écoulement permanent. La somme des flux d'entrée ou de sortie calculée par le modèle numérique est de 86 m³/s. L'apport d'eau le plus important est dû à la recharge de nappe avec un débit d'entrée de 32 m³/s. Le bilan des flux entrées/sorties par les eaux de surface est de –23 m³/s. Les prélèvements représentent 25% des débits sortant dans le domaine d'étude.

ETALONNAGE EN RÉGIME TRANSITOIRE

Après l'étalonnage en régime permanent, le modèle hydrogéologique a été affiné par un étalonnage en régime transitoire sur la période de 01.01.1986 au 31.12.2002. Les variations saisonnières et à plus long terme ont pu être représentées avec un pas de temps mensuel pour le mo-

den. Folgende Randbedingungen wurden instationär angesetzt:

- Monatliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag
- Monatlicher Zufluss in den oberirdischen Gewässern am Grabenrand
- Mittlere monatliche Wasserspiegel im Rhein und Rheinkanal
- Monatliche bzw. auch jährliche Grundwasserentnahmen in Abhängigkeit der verfügbaren Daten

Als Vergleichsgrößen lagen Ganglinien an 1.533 Messstellen zur Verfügung. Im Rahmen der instationären Modelleichung wurden die Durchlässigkeiten und Leakagekoeffizienten überprüft und geringfügig gegenüber dem stationären Eichergebnis modifiziert. Detailliert bestimmt wurde die Verteilung des speichernutzbaren Hohlraumanteils. Mit Hilfe des Modells konnten die wichtigsten dynamischen Verhältnisse im Grundwasserleiter simuliert werden. So werden in Rheinnähe die kurzfristigen Schwankungen infolge der Wasserspiegellagenänderungen im Rhein und am Grabenrand die ausgeprägten saisonalen Schwankungen sehr gut nachgebildet. Auch regionale Unterschiede und die Einflüsse vom Austausch mit den Gewässern konnten im numerischen Modell identifiziert werden. Die hauptsächlich saisonale Dynamik erhält der Grundwasserleiter durch die Schwankungen der Grundwasserneubildung zwischen 0 und 175 m³/s für das Gesamtgebiet. Die Gesamtbilanz schwankt zwischen 60 und 200 m³/s.

Vor der Transportmodellierung wurde für den Eintrag von Stoffen wie z.B. Nitrat über die Geländeoberfläche die Verweilzeit in der ungesättigten Zone anhand der Informationen für die Deckschichten abgeschätzt. Diese betragen im zentralen nördlichen Modellgebiet aufgrund der geringen Flurabstände lediglich 0 bis 2 Jahre. In den Randbereichen mit mächtigen Lössablagerungen steigen die Verweilzeiten lokal auf bis zu 30 Jahre an.

dèle numérique. Les conditions aux limites suivantes ont été retenues pour l'étalonnage :

- Une recharge de nappe au pas mensuel déterminée à partir des précipitations
- Un débit d'entrée mensuel pour les eaux de surface en bordure de nappe.
- Des niveaux moyens mensuels pour les eaux du Rhin et du canal
- Des prélèvements mensuels ou annuels selon les données disponibles.

Des chroniques piézométriques en 1 533 points de mesure étaient disponibles à titre de comparaison. Les perméabilités et les coefficients d'échange nappe-rivières obtenus lors de l'étalonnage en régime permanent ont été validés ou légèrement modifiés lors de l'étalonnage en régime transitoire. La distribution des porosités a été estimée avec précision. Les principales caractéristiques de la dynamique de l'aquifère ont pu être simulées à l'aide du modèle hydrogéologique. A proximité du Rhin, les fréquentes fluctuations piézométriques liées aux variations de niveau du Rhin ont pu être reproduites de manière très satisfaisante, de même que les importantes variations saisonnières aux limites du domaine. Le modèle numérique a également permis de différencier à l'échelle régionale les échanges nappe-rivière et de quantifier leurs influences sur la nappe. La principale variation saisonnière de la dynamique de la nappe est liée à la recharge qui varie de 0 à 175 m³/s pour l'ensemble du domaine. L'ensemble des volumes échangés varie entre 60 et 200 m³/s.

Pour les apports surfaciques en solutés comme les nitrates par exemple, les temps de parcours dans la zone non saturée ont été estimés à partir des informations disponibles sur la couverture du sol et la zone non saturée avant la modélisation du transport. Dans la partie centre-nord du domaine d'étude, ces temps de parcours sont de l'ordre de 0 à 2 ans compte tenu de la faible profondeur de la nappe. En bordure du domaine, où l'épaisseur des loess est importante, ces temps de parcours peuvent atteindre 30 ans.

TRANSPORTMODELLIERUNG

Mit dem Transportmodell wurde zunächst auf der Basis des stationären Strömungsmodells der Transport von Tritium simuliert. Dazu wurde gemäß der gemessenen Eintragsfunktion der Tritiumtransport zwischen 1963 und 1997 berechnet. Als Vergleichsgrößen standen ca. 500 Messwerte vorwiegend aus den 90er-Jahren zur Verfügung. Die Tritiumsimulation diente dazu, den durchflusswirksamen Hohlraumanteil, der einen entscheidenden Einfluss auf die Verweilzeiten hat, zu bestimmen. Diese wurde im Rahmen der Eichung auf 25% als durchschnittlicher Wert für den gesamten Grundwasserleiter ermittelt. In Sensitivitätsstudien konnte aufgezeigt werden, dass die vertikale Anisotropie der Durchlässigkeiten keinen Einfluss auf das Eichergebnis hat sondern vielmehr die Größe der horizontalen Durchlässigkeiten in den Breisgau-Schichten. Diese Erkenntnisse wurden im Strömungsmodell mitberücksichtigt.

Bevor die Nitratverhältnisse mit Hilfe des Modells nachgebildet werden konnten, mussten die Bereiche mit Nitratabbau identifiziert werden. Es wurde davon ausgegangen, dass ein mikrobieller Abbau von Nitrat nur in den Bereichen mit geringen Sauerstoffkonzentrationen stattfinden kann. Aus diesem Grund mussten zunächst die Sauerstoffverhältnisse im numerischen Modell nachgebildet werden. Dazu wurde ein flächenhafter Eintrag von sauerstoffreichem Wasser (10 mg/l) über die Grundwasserneubildung und ein Sauerstoffeintrag von 7 mg/l über die oberirdischen Gewässer entsprechend den Messwerten angenommen. Weiterhin wurde davon ausgegangen, dass die Sauerstoffverteilung keinen zeitlichen Schwankungen aufgrund der gleich bleibenden Eintragsfunktion unterliegt. Im Rahmen einer Modelleichung wurde durch Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sauerstoffkonzentrationen die Abbauratenverteilung von Sauerstoff im Grundwasserleiter bestimmt. Dabei hat sich gezeigt, dass nur in der obersten Modellschicht eine differenzierte Abbauratenverteilung mit Abbauraten von bis zu 7 mg/l anzusetzen ist. In den tieferen Modellschichten wurde ein geringerer Abbau von 0,17 mg/l ermittelt.

Da dem Abbau von Nitrat die selben mikrobiologi-

MODÉLISATION DU TRANSPORT

La simulation du transport du Tritium a été menée à partir du champ d'écoulement obtenu en régime permanent. Le transport de Tritium a été simulé en tenant compte des infiltrations estimées entre 1963 et 1997. 500 valeurs de concentrations mesurées pendant les années 1990 ont été utilisées à titre de comparaison. La simulation du Tritium avait pour objectif la détermination de la porosité efficace, porosité qui joue un rôle prépondérant sur les temps de transfert. Cette porosité a été estimée à 25% en moyenne pour l'ensemble de l'aquifère. Les analyses de sensibilité ont montré que l'anisotropie verticale des perméabilités n'a aucune influence sur les résultats de l'étalonnage, au contraire de la perméabilité horizontale de la couche de Breisgau, qui a une influence importante sur les résultats. Ces informations ont été prises en compte dans le modèle hydrodynamique.

Afin de pouvoir mener à bien la simulation du transport de nitrates, les zones ayant des capacités de dénitrification ont été déterminées. Il est supposé que la dégradation microbienne n'existe que dans des zones à faibles teneurs en oxygène dissous. Un modèle décrivant le comportement de l'oxygène dissous a donc été mis en œuvre. Pour ce faire, la concentration en oxygène dissous de la recharge de nappe a été estimée à 10 mg/l et celle des eaux de surface à 7 mg/l, conformément aux valeurs mesurées. Il est aussi supposé que les teneurs en oxygène dissous ne varient pas au cours du temps, compte tenu des concentrations d'entrées considérées comme constantes. Lors de l'étalonnage du modèle de transport d'oxygène dissous, les cinétiques de dégradation de l'oxygène ont été estimées à partir de la comparaison entre valeurs simulées et mesurées des concentrations en oxygène. Une dégradation significative et différenciée n'existe que pour la première couche avec une cinétique allant de 0 à 7 mg/l/an. Une cinétique constante de 0.17 mg/l/an a été déterminée pour les couches plus profondes.

Comme la dégradation microbienne de l'azote se

schen Prozesse zu Grunde liegen wie dem Sauerstoffabbau, wurde diese Abbauverteilung für Sauerstoff unter Berücksichtigung der stöchiometrischen Beziehungen mit dem Faktor 1,55 umgerechnet und als Nitratbaauratenverteilung in den Bereichen angesetzt, in welchen die berechnete Sauerstoffkonzentration kleiner als 3 mg/l ist. Unter Verwendung dieser Abbauratenverteilung erfolgte die Simulation des Nitrattransports. Für den Eintrag standen die im Teilprojekt Nirtatverlagerung ermittelten Nitrateintragsverteilungen für 1980, 1990 und 2000 zur Verfügung. Darüber hinaus wurde noch eine anthropogen unbelastete Eintragsverteilung für 1950 erstellt. Zwischen diesen 4 Eintragsverteilungen wurde linear für jedes Jahr interpoliert und unter Berücksichtigung der Verweilzeiten in der ungesättigten Zone die instationäre Eintragsfunktion für das Nitratmodell bestimmt. Die Nitratstartverteilung wurde über eine 30-jährige Simulation mit dem Nitrateintrag von 1950 bestimmt. Daraus hat sich eine Anfangsmasse im Grundwasserleiter von 150 kt NO₃ ergeben.

Die langjährigen Nitrattransportrechnungen wurden für den Zeitraum 1950 bis 2005 durchgeführt. Anhand von gemessenen Nitratganglinien und den Bestandsaufnahmen für 1997 und 2003 wurden die Modellergebnisse überprüft. Es hat sich gezeigt, dass zwar die Differenz zwischen gemessenen und berechneten Nitratkonzentrationen für die einzelnen Messwerte eine vergleichsweise große Streuung aufweisen, im statistischen Mittel aber eine gute Anpassung mit Abweichungen von 2,6 mg/l für 1997 bzw. 4,5 mg/l für 2003 erzielt werden konnte, wenn nur die Messstellen berücksichtigt werden, die zu beiden Zeitpunkten Messwerte aufweisen. Werden alle Messwerte berücksichtigt, sind die Abweichungen sogar unter 1.5 mg/l. Auch der Verlauf der Ganglinien und die lateralen Unterschiede in der Entwicklung der Nitratganglinien konnten mit dem numerischen Modell nachvollzogen werden, so dass von einem geeichten und prognosefähigen Werkzeug für die Abschätzung der zukünftigen Nitratverhältnisse im Grundwasser des Untersuchungsgebietes ausgegangen werden kann.

fait avec les mêmes types de processus que la dégradation de l'oxygène, la répartition spatiale de cette dégradation est identique à celle de l'oxygène avec un facteur de conversion de 1.55 conformément à la stœchiométrie. La dégradation est supposée active uniquement dans les zones où les concentrations en oxygène sont inférieures à 3 mg/l. Cette caractérisation de la dégradation est mise en œuvre dans le modèle de transport de nitrates. La répartition des flux d'entrée en nitrates a été établie pour les années 1980, 1990 et 2000 dans le cadre du sous-projet 'pollution par les nitrates' De plus, des flux ont été estimés pour 1950 en supposant l'absence d'effets anthropiques. Les entrées d'azote sont alors estimées chaque année par interpolation linéaire entre ces dates de référence et en tenant compte des temps de parcours dans la zone non saturée. La distribution des nitrates pour 1950 a été estimée par une simulation préliminaire sur 30 années en prenant pour entrées les flux estimés en 1950. Cette simulation a permis d'estimer une masse initiale présente dans l'aquifère de 150 kt NO₃.

La simulation du transport des nitrates a été menée sur la période allant de 1950 à 2005. Le modèle a été vérifié à l'aide de chroniques de concentrations en nitrates et des campagnes de mesure de 1997 et 2003. Les écarts entre valeurs mesurées et calculées pour chaque point de mesure présentent une dispersion du même ordre de grandeur, mais le comportement moyen est en bonne adéquation avec une différence de 2.6 mg/l en 1997 et 4.5 mg/l en 2003, pour les points de mesure ayant été analysés pour ces deux dates. Si l'on prend en compte l'ensemble des points de mesure, cet écart est inférieur à 1.5 mg/l. Le modèle numérique a aussi permis de bien représenter les chroniques de concentrations mesurées et la répartition spatiale présente dans l'aquifère. Le modèle peut donc être considéré comme étant bien étalonné et comme un outil de calcul prédictif pour estimer la dynamique future des nitrates dans les eaux souterraines au niveau du domaine étudié.

Die Bilanzierung der Nitratverhältnisse im Grundwasserleiter zeigt, dass die maximal gespeicherte Nitratmasse im Grundwasserleiter 1.000 kt NO₃ beträgt. Dieses Maximum wurde in der zweiten Hälfte der 90er-Jahre erreicht. Der hauptsächliche Nitrataustrag findet über das Gewässernetz statt. Für 2005 liegt der Nitrataustrag des Gewässernetzes bei 32 kt NO₃ pro Jahr. Der Abbau ist mit 11 kt NO₃ pro Jahr deutlich kleiner und liegt in derselben Größenordnung wie der Austrag über die Grundwasserentnahmen von 8 kt NO₃ pro Jahr. Seit Mitte der 90er-Jahre überwiegt der Nitrataustrag aus dem System gegenüber dem Eintrag. Im Jahr 2005 ist der Austrag um 18 kt NO₃ pro Jahr größer als der Eintrag.

Sensitivitätsuntersuchungen haben gezeigt, dass die maximale Sauerstoffkonzentration zwischen 1,5 und 3 mg/l für den Nitratabbau eine untergeordnete Rolle für das Ergebnis spielt. Ebenso hat der Verlauf des Nitrateintrags in den 80er-Jahren, in denen die größten Eintragsraten vorgelegen haben, einen geringen Einfluss auf die aktuellen Nitratkonzentrationen, falls das Nitrateintragsmaximum nicht nur 1980 sondern noch bis 1987 vorgelegen hat.

Einen deutlichen Einfluss haben allerdings die Nitrateintragsraten der letzten 15 Jahre auf die aktuelle berechnete Nitratverteilung. So zeigt eine Sensitivitätsrechnung mit anhaltend hohen Nitrateinträgen von 1980 bis 2005, dass die Nitratkonzentrationen im Grundwasserleiter dann deutlich überschätzt würden. Eine weitere Sensitivitätsrechnung, bei der der Nitrateintrag von 1990 konstant bis 2005 angesetzt wurde liefert eine bessere Approximation an die gemessenen Nitratkonzentrationen für 2003 als bei Verwendung der Nitrateintragsverteilung für 2000 aus dem Teilprojekt Nitratverlagerung.

Die Simulationsergebnisse mit dem stationären Strömungsfeld wurden auch noch für den Zeitraum 1986 bis 2002 unter Berücksichtigung des instationären Strömungsmodells verifiziert. Hier hat sich erwartungsgemäß gezeigt, dass die instationären Strömungsschwankungen lediglich zu geringen Nitrat-schwankungen führen, so dass der stationär gemittel-

Les calculs de bilan pour la dynamique des nitrates montrent que la masse maximale stockée dans l'aquifère est de 1 000 kt NO₃. Ce maximum a été atteint pendant la deuxième moitié des années 1990. L'essentiel des pertes de nitrates se fait par les eaux de surface. Cette perte est évaluée à 32 kt de NO₃/an pour 2005. Les pertes dues à la dégradation microbienne évaluées à 11 kt de NO₃/an sont significativement plus réduites et de même ordre de grandeur que celles estimées au niveau des prélèvements soit 8 kt de NO₃/an. Depuis le milieu des années 1990, les pertes de nitrates sont supérieures aux apports au niveau de l'aquifère. Pour l'année 2005, les pertes sont supérieures aux apports de 18 kt NO₃/an.

Les analyses de sensibilité effectuées ont montré qu'une limite de concentration maximale en oxygène dissous fixée à 1.5 ou 3 mg/l pour le déclenchement de la dégradation microbienne n'influence pas les résultats de manière significative. De même, les apports les plus importants de nitrates évalués pour les années 1980 ont peu d'influence sur les teneurs actuelles, même si ces apports maximaux sont étendus jusqu'en 1987.

Les flux d'entrée de nitrates lors des 15 dernières années ont une influence marquée sur les teneurs actuelles. L'analyse de sensibilité consistant à maintenir les apports de nitrates de 1980 constants jusqu'en 2005 conduit à une surestimation importante des concentrations. Une autre analyse de sensibilité qui a consisté à maintenir des flux estimés en 1990 constants jusqu'en 2005 a permis d'obtenir une meilleure simulation des teneurs en nitrates observées en 2003 par rapport à la simulation menée avec des flux estimés pour l'année 2000 dans le cadre du projet 'pollution par les nitrates'

Les résultats obtenus avec un écoulement permanent ont également été vérifiés en prenant en compte un écoulement transitoire pour la période de 1986 à 2002. Comme prévu, les variations du champ d'écoulement conduisent à de faibles fluctuations des concentrations en nitrates. La démarche consistant à utiliser un champ

te Ansatz sowohl für die Nachbildung der bisherigen Verhältnisse als auch für Prognosebetrachtungen gerechtfertigt ist.

Mit Hilfe des Modells wurden nach der Eichung und Überprüfung auch Prognoserechnungen bis 2050 durchgeführt. Die Ergebnisse der Prognoserechnungen sind im Bericht „Prognosen zur Entwicklung der Nitratbelastung“ dokumentiert. Als Referenzsituation wurde die Modellrechnung definiert, bei der die Nitrateintragsverhältnisse zwischen 2000 und 2050 konstant bleiben. In diesem Fall reduziert sich die gespeicherte Nitratmasse auf 800 kt NO₃ im Jahr 2050. Weitere Prognoserechnungen wurden für die beiden Sensitivitätsrechnungen mit konstantem Nitrateintrag ab 1980 bzw. 1990 durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass mittlere Nitratkonzentrationen von 44 mg/l im Jahr 2050 vorliegen würden, falls der Nitrateintrag von 1980 nicht reduziert worden wäre. Nimmt man den Eintrag von 1990 über die nächsten 60 Jahre an, so ergibt sich bis 2050 keine deutliche Änderung der Nitratverhältnisse. D.h., dass die im Bezugslauf prognostizierte Verringerung der Nitratkonzentrationen nur auf den angenommenen Rückgang des Nitrateintrags zwischen 1990 und 2000 zurückzuführen ist.

d'écoulement moyen permanent pour le calcul des teneurs en nitrates actuelles et les calculs prévisionnels est donc validée.

Des simulations prévisionnelles ont été menées jusqu'en 2050 après l'étalonnage et la vérification du modèle. Les résultats sont détaillés dans le rapport intitulé 'Prévision de l'évolution de la charge en nitrates'. La situation de référence a été définie en supposant les apports de nitrates comme constants de l'année 2000 à l'année 2050. Dans ce cas, le stock de nitrates diminue pour atteindre 800 kt de NO₃ en 2050. D'autres scénarios ont été analysés en supposant les flux d'entrée constants avec des valeurs estimées pour les années 1980 et 1990. Les résultats montrent qu'une teneur moyenne de 44 mg/l sera atteint en 2050 si les apports de nitrates de 1980 ne sont pas diminués. On n'observe pas de différences significatives pour les teneurs en nitrates si l'on considère que les entrées sont celles de 1990 et maintenues constantes pendant 60 années. Le calcul de référence a montré une réduction des teneurs en nitrates jusqu'en 2050 compte tenu de la baisse estimée des apports entre 1990 et 2000 alors que les concentrations ne changent plus jusqu'en 2050 si les apports estimés pour 1990 sont maintenus constants jusqu'en 2050.

1 Einleitung

Introduction

1.1 AUFGABENSTELLUNG UND ZIEL

Eine wesentliche Beeinträchtigung der natürlichen Wasserqualität in unseren Grundwasservorkommen stellt, auch nach mehr als 20-jähriger Anwendung von Schutzmaßnahmen, noch immer die Nitratbelastung dar. Das Grundwasser hat wegen seiner sehr langsamen Zirkulation ein langes Gedächtnis. Wasserinhaltsstoffe, die in der Vergangenheit durch anthropogene Aktivität in das Grundwasser eingetragen wurden, werden noch lange Zeit nach dem Eintrag darin aufgefunden.

Mit dem INTERREG III - Projekt "Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrhein-graben" (MoNit) werden Grundlagen und Werkzeuge zur Bewertung der Wirksamkeit und damit zur Priorisierung von Maßnahmen zur Reduzierung der Grundwasserbelastung im Oberrheingebiet zwischen Basel und Wissembourg-Rastatt bereitgestellt. Der Projektfokus war die z. Z. dominierende großräumige Belastung durch Nitrat, das hauptsächlich über die Geländeoberfläche in das Grundwasser eingetragen wird.

Im Projekt MoNit wurde ein weitgehend modularisierter und damit komponentenbasierter Ansatz verfolgt, um die Prozesse mit Hilfe von Modellen nachzubilden. Eine direkte Kopplung der Einzelmodelle erfolgte nur teilweise. Wesentlich ist, dass alle Teilmodelle von unterschiedlichen Institutionen über die Laufzeit des Projektes hinweg in unterschiedlicher Kombination und als Einzelmodelle verwendet werden.

1.2 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Der Oberrheingraben erstreckt sich im geographischen Sinne von Basel im Süden bis zu den Mittelgebirgen im Norden bei Mainz. Im Rahmen von MoNit wird der Oberrheingraben nur bis zur Grenze des

1.1 MISSION ET OBJECTIFS

Malgré les mesures de protection prises depuis plus de 20 ans, la pollution par les nitrates constitue l'une de principaux facteurs d'altération de la qualité des eaux souterraines. La nappe phréatique a une longue mémoire du fait des faibles vitesses d'écoulement. Les substances introduites dans la nappe sous l'effet des activités humaines sont retrouvées dans les eaux souterraines des années après leur introduction.

Le projet INTERREG III de "modélisation de la pollution de la nappe phréatique du Rhin Supérieur par les nitrates" (MoNit) a permis de développer des outils d'évaluation de l'efficacité et donc de priorisation des mesures pour la réduction de la pollution de la nappe phréatique du Rhin Supérieur entre Bâle et Wissembourg - Rastatt. Le projet est focalisé sur la pollution dominante par les nitrates, infiltrés dans les eaux souterraines à partir de la surface du sol.

Le projet MoNit est un système modulaire composé de différentes composantes permettant de simuler chaque processus à l'aide d'un modèle. Les divers modèles élémentaires n'ont pas été couplés de façon systématique. Point essentiel: tous les modèles développés sont et seront mis en œuvre par différentes institutions en propre ou en les combinant même après la clôture du projet.

1.2 DOMAINE D'ÉTUDE

D'un point de vue géographique, le fossé du Rhin Supérieur s'étend entre Bâle au Sud et les massifs montagneux anciens au Nord près de Mayence. La zone d'emprise du projet MoNit s'arrête au ni-

Elsass zu Rheinland-Pfalz und der Fortsetzung dieser Linie auf deutscher Seite betrachtet. Linksrheinisch stellt also die Lauter und rechtsrheinisch der Landkreis Rastatt die nördliche Begrenzung dar (Abb. 1.2.1). Im Projektgebiet liegen damit die Départements Bas Rhin und Haut Rhin, welche zusammen die Région Alsace bilden, die Schweizer Kantone Basel Stadt und Basel Land und das Bundesland Baden-Württemberg. Die Grundgebirgssockel des Schwarzwaldes und der Vogesen begrenzen den Rheingraben im Westen und Osten. Im Süden erfolgt der Abschluss durch den Schweizer Jura. Die Längsausdehnung des Untersuchungsgebiets beträgt rheinparallel etwa 170 km, die durchschnittliche Breite etwa 30 km.

veau de la frontière entre l'Alsace et Rhénanie - Palatinat et le prolongement de cette ligne au Pays de Bade. La Lauter constitue la frontière en rive gauche du Rhin, le Landkreis de Rastatt en rive droite (fig. 1.2.1). Le domaine d'étude englobe donc les départements du Bas-Rhin et du Haut-Rhin, dont la réunion constitue la Région Alsace, les cantons suisses de Bâle-ville et Bâle-campagne et le Land allemand du Bade-Wurtemberg. Les zones de piémont des Vosges et de Forête Noire constituent les limites Ouest et Est de la zone d'étude. Le Jura Suisse constitue la limite du domaine au Sud. Le domaine s'étend sur une longueur d'environ 170 km le long du Rhin avec une largeur moyenne de l'ordre de 30 km.

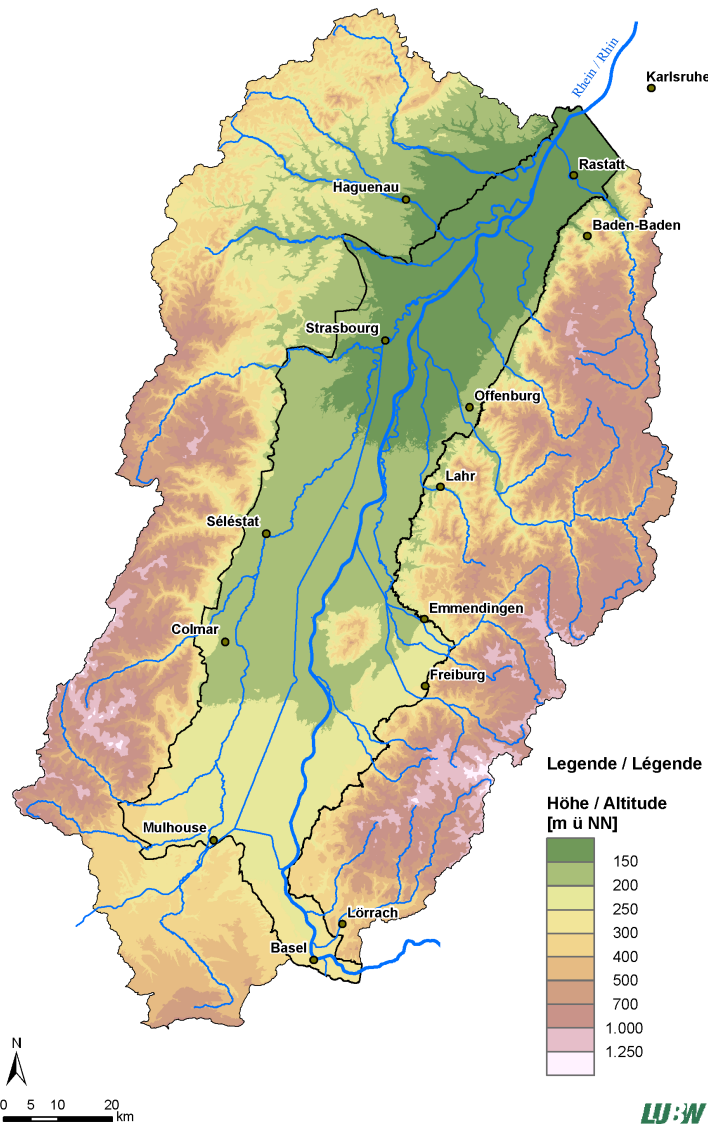


Abbildung. 1.2.1: Inneres und äußeres Projektgebiet MoNit
 Figure 1.2.1: *Domaine d'étude intérieur et extérieur du projet MoNit*

Der Oberrheingraben wurde eiszeitlich durch alpine Kiese und Sande verfüllt. Der heutige Rhein hat sich unter Ausbildung einer Talaue etwa 5 m bis 15 m in die Niederterrassenschotter eingegraben. Durch die Rheinkorrekturen und die Uferverbauung im 19. und 20. Jahrhundert wurde der Rhein in ein kanalartiges Bett gezwängt. Eine Begleiterscheinung davon war die Grundwasserabsenkung die zum Austrocknen der Altrheinarme in der Markgräfler Rheinebene südlich des Kaiserstuhls führte. Nördlich des Kaiserstuhls bis etwa Straßburg grenzen die Stromniederung und die eigentliche Ebene in fast gleicher Höhe aneinander

Daher ist das Grundwassergefälle von den Vorbergen zum Rhein hin sehr schwach und der Grundwasserspiegel liegt in diesem Teil sehr viel näher an der Erdoberfläche als südlich des Kaiserstuhls und den nördlich anschließenden Hardtebenen. Den größten Teil dieses Abschnittes nehmen grundwasserfeuchte und zeitweise überschwemmte Niederungen ein. Charakteristisch sind die immerfeuchten mit Auewald bedeckten Rheinniederungen. Nördlich von Straßburg bildete der Rhein vor der Korrektur große Mäander und änderte seinen Lauf ständig. Bedingt durch den hohen Grundwasserstand und die regelmäßigen Überschwemmungen konnten die flussnahen Flächen nicht landwirtschaftlich genutzt werden

weshalb der ursprüngliche Auewald bis heute weitgehend erhalten blieb. Die angrenzenden höher liegenden trockenen Flächen wurden schon früh landwirtschaftlich bewirtschaftet und sind damit weitgehend waldfrei.

Le fossé rhénan a été comblé durant l'ère glaciaire par des sables et graviers charriés depuis les Alpes. Le Rhin actuel a creusé son chenal de 5 à 15 m de profondeur dans les alluvions de la basse terrasse. Les corrections du Rhin et les aménagements des berges au cours des 19^{ème} et 20^{ème} siècles ont confiné le fleuve dans un lit canalisé. Un effet de ces aménagements a été la baisse du niveau de la nappe phréatique qui a conduit notamment à l'assèchement des anciens bras du Rhin dans le Markgräfler Land au Sud du Kaiserstuhl. Au Nord du Kaiserstuhl jusqu'à Strasbourg environ, les emprises de la basse terrasse et de la plaine à proprement parler sont quasi identiques.

C'est la raison pour laquelle le toit de la nappe a une pente très faible entre la zone de piémont et le Rhin et se situe à une profondeur plus faible qu'au Sud du Kaiserstuhl ou que dans la zone de plaine plus au Nord. Des zones de remontées phréatiques et des basses terrasses régulièrement inondées occupent une grande partie de cette zone. Des forêts alluviales humides sont caractéristiques. Au Nord de Strasbourg avant sa correction, le lit du Rhin et ses méandres changeaient sans cesse. La faible profondeur de la nappe et les inondations régulières ne permettaient pas une utilisation des terres en bordure du fleuve à des fins agricoles. Voilà pourquoi, les forêts alluviales originelles sont encore bien conservées de nos jours. Les zones de hautes terrasses - sèches - contiguës constituent des zones agricoles depuis longtemps et sont en cela faiblement boisées.

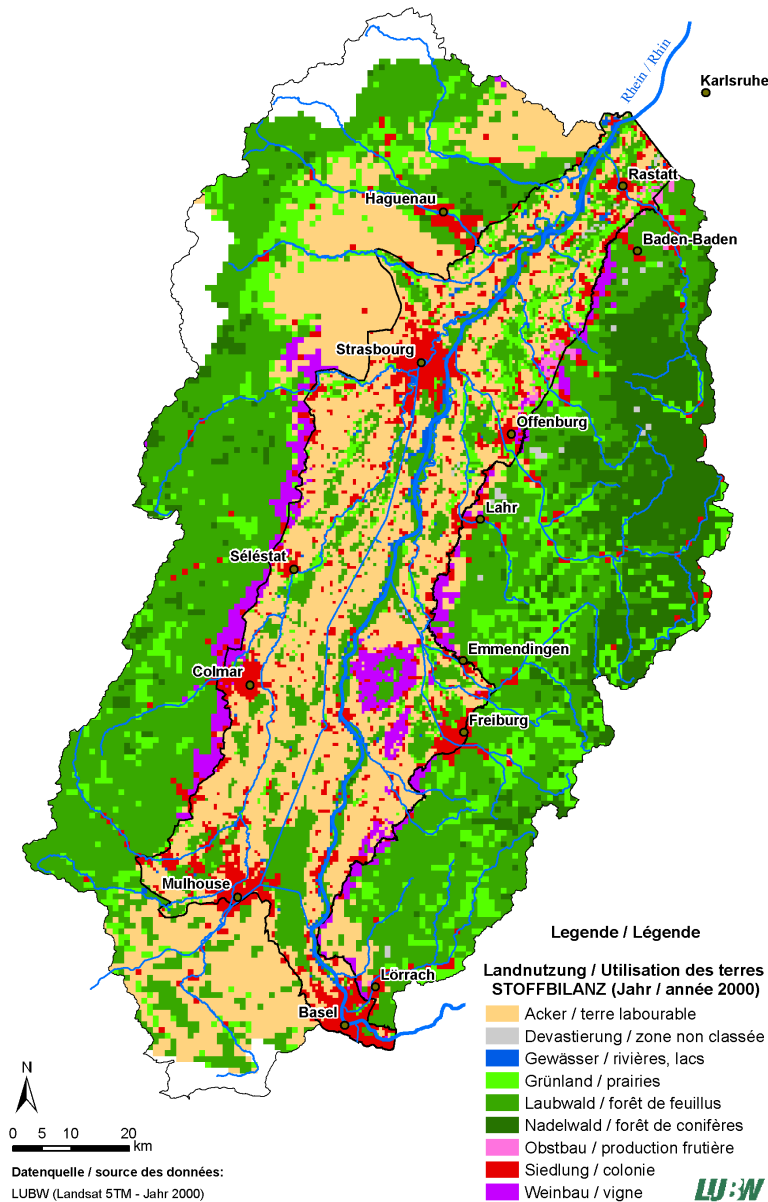


Abbildung. 1.2.2: Landnutzungsverteilung im Jahr 2000 im inneren und äußeren Projektgebiet
Figure 1.2.2: Occupation des sols en l'an 2000 et limites intérieures et extérieures de la zone d'étude

Die aktuelle Landnutzung im Untersuchungsgebiet ist nach Hauptnutzungsarten in Abbildung 1.2.2 und Tabelle 1.2.1 dargestellt. Sie ist im inneren Projektgebiet durch landwirtschaftlich genutzte Flächen dominiert, im äußeren Teil des Untersuchungsgebiets überwiegt der Laubwald.

L'occupation actuelle des sols dans la zone d'étude est représentée dans la figure 1.2.2 et dans le tableau 1.2.1. Les usages agricoles sont dominants dans la partie intérieure du domaine, les forêts de feuillus étant les plus importants dans la zone extérieure.

Tabelle 1.2.1: Hauptlandnutzungen im inneren und äußeren Projektgebiet

Tableau 1.2.1: principales occupations du sol dans les zones intérieures et extérieures du domaine d'étude

Hauptnutzungsform utilisation principale	Jahr 2000 innen [%] année 2000 intérieur	Jahr 2000 aussen [%] année 2000 extérieur	Jahr 2000 gesamt [%] année 2000 total
Siedlung agglomérations	16,09	3,17	7,59
Laubwald forêt de feuillu	20,28	48,48	38,84
Nadelwald forêt de résineux	0,06	14,49	9,56
Acker terre cultivée	48,79	16,14	27,30
Weinbau viticulture	3,02	3,22	3,15
Obstbau cultures maraîchères	0,55	0,21	0,32
Grünland herbages	8,03	14,02	11,97
Gewässer cours d'eau	2,97	0,01	1,02
Devastierung dévastation	0,20	0,27	0,24

Das innere Projektgebiet wird durch den mit Lockergestein gefüllten Oberrheingraben gebildet. Für dieses Projektgebiet wurde ein Grundwassermodell aufgebaut, mit dem die Strömungsverhältnisse und der Nitrattransport nachgebildet werden. Es umfasst eine Fläche von rd. 4.300 Km², die Geländehöhen reichen von 104 m_{üNN} im Norden bis 340 m_{üNN} im Südwesten. Das äußere Untersuchungsgebiet umfasst die oberirdischen, direkt an den Grundwassermodellrand angrenzenden Einzugsgebiete in den Vogesen, im Jura sowie im Schwarzwald. Es umfasst eine Fläche von rd. 9.400 Km², die Geländehöhen reichen hier bis 1.494 m_{üNN}.

1.3 VORGEHENSWEISE

Entscheidende Faktoren für eine erfolgreiche Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung des Nitratreintrags ins Grundwasser sind sozioökonomische Aspekte. Im Modul Sozio-Ökonomie wurden hierzu mikro-ökonomische Modelle auf Einzelbetriebsebene zur Prognose der Reaktion der Landwirte auf veränderte Rahmenbedingungen erstellt und angewendet.

Im Modul Nitratreintrag wurde eine flächenhafte N-Bilanz mit dem Modell STOFFBILANZ (GEBEL, 2003) realisiert. Fragen zur Bewirtschaftungspraxis und der Einfluss der Klimavariabilität und der Bodeneigenschaften auf das Pflanzenwachstum wurden mit Hilfe des Simulationsmodell STICS (BRISSEAU)

L'intérieur du domaine d'étude est constituée par la partie alluviale du fossé rhénan. Un modèle hydrodynamique des eaux souterraines a été constitué pour ce secteur pour évaluer les écoulements et le transport des nitrates. Le modèle englobe une surface de 4300 km² avec des altitudes comprises entre 104 m_{+NN} au Nord et 340 m_{+NN} au Sud-Ouest. La partie extérieure du modèle est constituée par les bassins versants des Vosges, du Jura et de Forêt Noire. Sa superficie est de l'ordre de 9400 km² avec des altitudes maximales de 1494 m_{+NN}.

1.3 PROCEDURE

Les aspects socio-économiques sont essentiels pour la mise en œuvre de mesures destinées à réduire les apports de nitrates dans la nappe. Le module socio-économique s'est attaché à mettre en place des modèles micro-économiques à l'échelle des exploitants pour prévoir la réactions des agriculteurs suite à une modification de certaines conditions d'exploitation.

Le module de transfert des nitrates a permis d'établir une bilan d'azote régional grâce au modèle STOFFBILANZ (GEBEL, 2003). Les questions relatives aux pratiques culturales ainsi l'influence des variations climatiques et la variabilité du type de sol sur la croissance des plantes a été simulé

ET AL., 2003) untersucht. Aus den von STOFFBILANZ berechneten Nitratfrachtverteilungen wurde die Nitrateintragskonzentration für das Grundwassermodell ermittelt.

Im Teilprojekt Hydrogeologie wurde die aktuelle hydrogeologischen Vorstellung zum Aufbau der Lockergesteinsfüllung im Oberrheingraben und damit die Grunddaten des mathematischen Grundwassermodells erarbeitet. Zur weiteren Erkundung wurden auch neue flusseeismische Methoden angewandt. Damit konnte der Untergrund direkt unterhalb des Rheins und seiner Nebenflüsse bis zu einer Tiefe von 300 bis 400 m "durchleuchtet" werden.

Im Modul Grundwasser wurden mit den Programmen MODFLOW2000 (HARBAUGH ET AL., 2000) und MT3D die wesentlichen dreidimensionalen Strömungs- und Nitrattransportprozesse im Grundwasser des Oberrheingrabens simuliert. Die monatliche Grundwasserneubildung und die Randzuflüsse aus dem Schwarzwald und den Vogesen wurden mit Hilfe des Modells GWN-BW [Grundwasserneubildung, MENZEL, 1997, MENZEL, 1999, ARMBRUSTER et al. 2000, ARMBRUSTER 2002] und einem im Rahmen des Projektes entwickelten Regionalisierungsansatz für die oberirdischen Gewässer ermittelt. Die Wasserspiegellage des Rheins und seiner Kanalstrecken wurde mit instationären, eindimensionalen hydrodynamischen Teilabschnittsmodellen ermittelt. Die gerade im Oberrheingebiet aufgrund des dichten Gewässernetzes für die Wasser- und Stoffbilanz relevante Interaktion zwischen oberirdischen Gewässern und dem Grundwasser wurde mit detaillierten Grundwassermodellierungen und adäquaten Messaktivitäten in drei Gebieten in der Schweiz untersucht.

Die im Projekt realisierte Kopplung der Modelle bzw. der Datenfluss zwischen den Einzelmodellen ist im Bericht "Modellsystem MoNit zur Prognose der Nitratbelastung" dokumentiert.

avec le modèle STICS (BRISSEON ET AL., 2003). Les volumes de nitrates calculés avec le modèle STOFFBILANZ ont permis de déterminer les concentrations en nitrates des eaux de percolation pour le modèle hydrodynamique.

Les connaissances actuelles sur la structure hydrogéologique des alluvions du fossé du Rhin Supérieur ont été traitées dans le cadre du sous-projet hydrogéologie. Les données ont permis la construction du modèle hydrodynamique. Des études sismiques ont notamment été menées pour compléter les données existantes. Elles ont permis de "radiographier" le sous-sol au niveau du Rhin et de ses principaux affluents sur une profondeur de 300 à 400 m.

Les écoulements tridimensionnels et le transport des eaux souterraines dans l Rhin Dupérieur ont été traités dans le module eaux souterraines avec les modèles MODFLOW2000 (HARBAUGH ET AL., 2000) et MT3D. Les valeurs mensuelles des précipitations efficaces et les apports en zones de bordure issus des Vosges et de Forêt Noire ont été déterminés à l'aide du modèle GWN-BW (Grundwasserneubildung, Menzel, 1997, Menzel, 1999, Armbruster et al., 2000; Armbruster, 2002) et d'une méthode de régionalisation des débits des eaux superficielles développée dans le cadre du projet. Les lignes d'eau du Rhin et des canaux latéraux ont été estimées par modélisation hydrodynamique unidimensionnelle en régime transitoire par tronçons. Les échanges nappe-rivière sont particulièrement importants dans le Rhin Supérieur du fait de la densité du réseau hydrographique. Elles ont été appréhendées dans le cadre de modélisations locales et de campagnes de mesure dans trois secteurs suisses.

Le couplage des différents modèles et les transferts de données réalisés dans le cadre du projet sont documentés dans le rapport "système de modèle MoNit pour la prévision de la pollution par les nitrates".

2 Hydrogeologische Verhältnisse im Untersuchungsraum

Structure hydrogéologique du domaine d'étude

Im Teilprojekt „Hydrogeologie“ wurden im Untersuchungsgebiet die geologischen und hydrogeologischen Grundlagen für den quartären Kiesgrundwasserleiter erarbeitet. Die Ergebnisse stellen wichtige Eingangsdaten für das Grundwasserströmungs- und -transportmodell dar. Hierzu wurde die Aquifergeometrie ermittelt, hydrogeologisch relevante Grenzflächen kartiert und den hydrogeologischen Einheiten hydraulische Parameter zugewiesen. Die Ergebnisse sind im Teilprojektbericht "Hydrogeologischer Bau und hydraulische Eigenschaften" ausführlich erläutert.

Das Arbeitsgebiet liegt im südlichen und mittleren Oberrheingraben. Es umfasst das Verbreitungsgebiet der pliozänen und quartären Kiese und Sande die den Hauptgrundwasserleiter im Oberrheingraben bilden. Das Untersuchungsgebiet wird in mehrere Großräume unterteilt: die Rheinebene südlich des Kaiserstuhls, die Rheinebene nördlich des Kaiserstuhls, die Freiburger Bucht im Osten und das elsässische Kalibecken im Westen.

Die Gliederung der Lockersedimente erfolgte aufgrund lithologischer Unterschiede (Unterschiede im Sand/Schluff-Gehalt, in der Lagerungsdichte und anhand von Groblagen). Außerdem wurde die Herkunft des Materials (Alpen, Vogesen, Schwarzwald) und der Zersetzungsgrad der Gerölle berücksichtigt.

2.1 VERTIKALE GLIEDERUNG DER QUARTÄREN SCHICHTEN

Folgende hydrogeologische Einheiten wurden im Lockergesteinsaquifer des Oberrheingrabens unterschieden (Abbildung 2.1.1):

Le module "Hydrogéologie" avait pour but de préparer les données géologiques et hydrogéologiques sur l'aquifère des alluvions quaternaires dans le secteur étudié. Ces informations constituent la base nécessaire à la création du modèle hydrodynamique : elles comprennent notamment la géométrie de l'aquifère (profondeur du substratum), la cartographie des interfaces entre corps sédimentaires d'intérêt hydrogéologique, ainsi que la définition de leurs paramètres hydrodynamiques. Les résultats sont documentés dans le sous-rapport "structure hydrogéologique et propriétés hydrauliques".

La zone étudiée appartient aux parties sud et moyenne du Fossé rhénan supérieur.. Elle correspond au remplissage du Fossé par les alluvions pliocènes et quaternaires, qui constituent l'aquifère principal de la vallée du Rhin supérieur. Dans la zone étudiée on distingue plusieurs grands secteurs : la plaine au Sud du Kaiserstuhl, la plaine au Nord du Kaiserstuhl, le bassin de Fribourg à l'Est et le bassin potassique alsacien à l'Ouest.

Dans la cartographie de ces unités hydrogéologiques on a tenu compte des caractéristiques lithologiques des alluvions (contenu en sable et en silt, compaction, présence d'horizons grossiers), ainsi que de l'origine des matériaux (Alpes, Vosges, Forêt-noire) et du degré d'altération des galets.

2.1 STRUCTURE VERTICALE DES ALLUVIONS QUATERNAIRES

Les principales unités hydrogéologiques prise en compte sont les suivantes (figure 2.1.1):

Die Neuenburg-Formation ist hoch durchlässig. Von Straßburg/Offenburg aus nach Norden schalten sich in die Kiese vermehrt geringer durchlässige sandig schluffige Einheiten ein. Im südlichen Teil des Untersuchungsgebiets lässt sich die Neuenburgformation eindeutig in einen oberen vergleichsweise hoch durchlässigen und einen unteren Bereich mit geringerer Durchlässigkeit unterteilen. Für diesen oberen Teil lässt sich eine mittlere Mächtigkeit von ca. 20 m definieren. In Richtung Norden ist diese eindeutige Zweiteilung der Durchlässigkeitsverhältnisse teilweise nicht mehr erkennbar. Ebenfalls im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets finden sich feinklastische Zwischenhorizonte, wobei nur der Horizont 4 zu einer flächenhaften hydraulischen Trennung zwischen der Neuenburg- und der darunter liegenden Breisgau-Formation führt.

Die Breisgau-Formation ist im Allgemeinen geringer durchlässig als die Neuenburg-Formation. Nördlich von Lahr geht die Breisgau-Formation in die Ortenau-Formation über.

Die Aquiferbasis besteht meist aus tertiären Ton- und Tonmergelsteinen oder den überwiegend tonig schluffigen Sanden der Iffezheim-Formation.

Les alluvions quaternaires récentes très perméables (formation de Neuenburg) ; vers le Nord, à partir du secteur Strasbourg-Offenburg, elles comprennent des intercalaires sablo-silteux fins peu perméables. Dans la partie Sud du secteur étudié, la formation de Neuenburg est clairement subdivisée en une couche supérieure plus perméable et une couche inférieure moins perméable. Les couches supérieures ont une épaisseur de l'ordre de 20 m. Cette structuration des perméabilités diminue vers le Nord. Au Nord du secteur d'étude, une couche intercalaire faiblement perméable apparaît au niveau de l'horizon 4 suffisamment continue pour que des différences hydrauliques apparaissent entre la formation de Neuenburg et les couches de Breisgau plus profondes.

Les alluvions quaternaires anciennes (formation de Breisgau au Sud, formation d'Ortenau au Nord) sont généralement moins perméables que la formation de Neuenburg.

Le substratum de l'aquifère est constitué soit par les marnes tertiaires soit par les sables argileux du Pliocène final (formation d'Iffezheim).

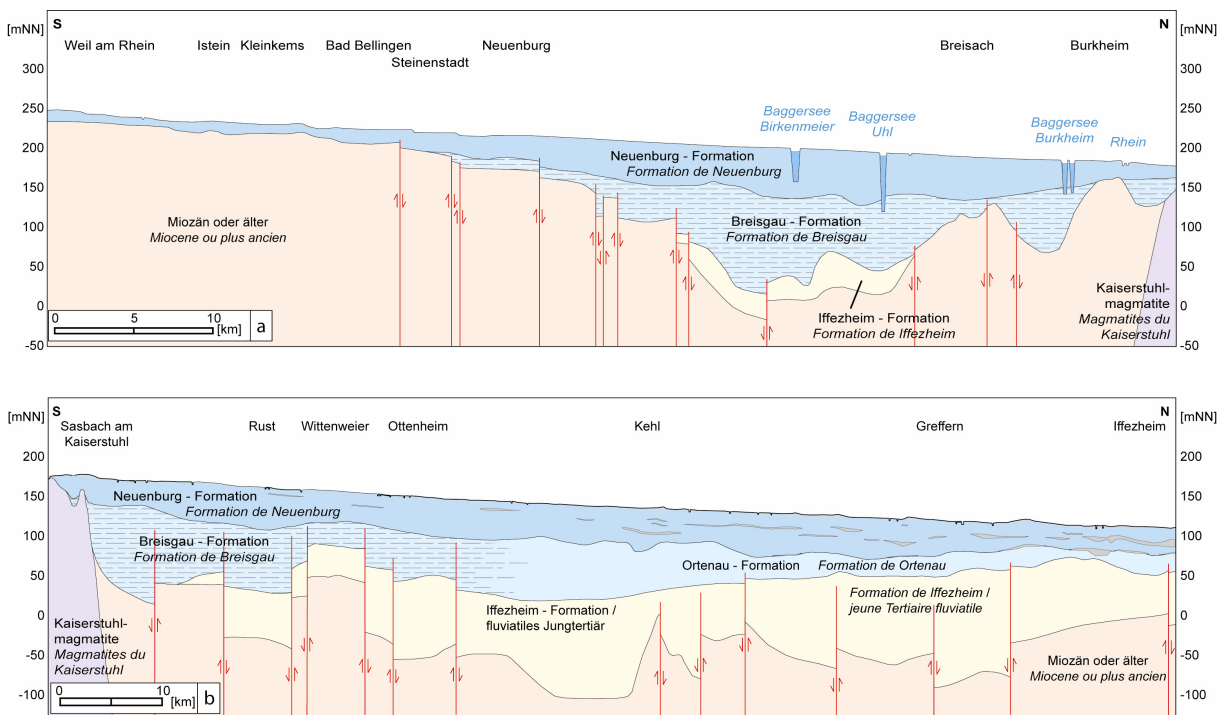


Abbildung 2.1.1: Hydrogeologische Längsschnitte etwa entlang des heutigen Rheinverlaufs von Basel bis an den südlichen Kaiserstuhl (a) bzw. vom nördlichen Kaiserstuhlrund bis Rastatt (b)

Figure 2.1.1: Coupes hydrogéologiques longitudinales le long du cours actuel du Rhin de Bâle jusqu'au Sud du Kaiserstuhl (a) et du Nord du Kaiserstuhl jusqu'à Rastatt (b).

2.2 HORIZONTALE AUSDEHNUNG UND MÄCHTIGKEIT DER QUARTÄREN SCHICHTEN

Für die Neuenburg-Formation, die Ostrheinschotter und die Breisgau-Formation wurden Isolinienpläne der Basis (Abbildung 2.2.1) sowie Verbreitungs- und Mächtigkeitskarten erstellt. Für den Riegel-Horizont und die gering durchlässigen feinklastischen Horizonte im Raum Strasbourg/Offenburg und nördlich davon wurden Isolinienpläne der Oberfläche konstruiert. Die feinklastischen Einschaltungen wurden entsprechend ihrer lithologischen Ausbildung klassifiziert.

2.2 REPARTITION ET EPAISSEUR DES COUCHES QUATERNAIRES

Les cartes de répartition et des isocontours des unités hydrogéologiques suivantes ont été réalisées: base et épaisseur de la formation de Neuenburg, du chenal oriental du Rhin, et de la formation de Breisgau. Le toit de l'horizon de Riegel et des intercalaires peu perméables du secteur de Strasbourg-Offenburg et plus au Nord ont fait l'objet de cartographies en courbes de niveau (isohypses). Ces intercalaires ont également été classés en fonction de leur lithologie dominante.

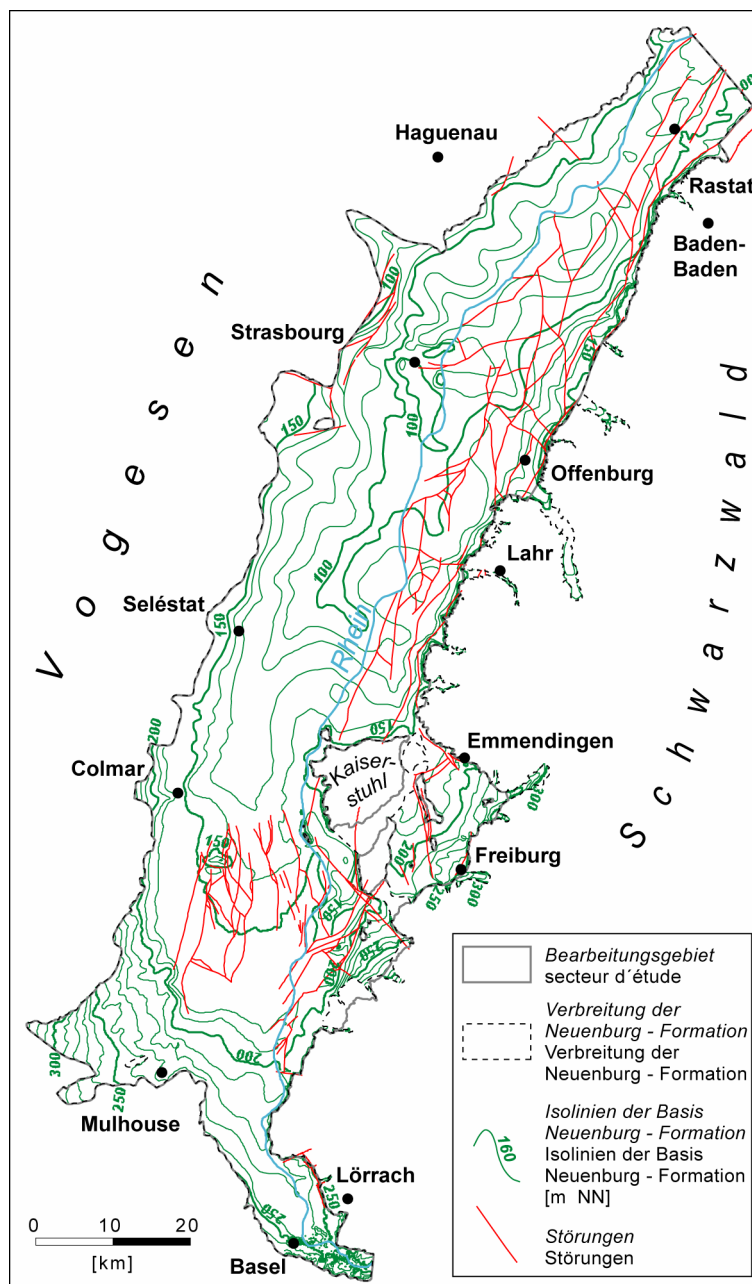


Abbildung 2.2.1: Verbreitung und Isolinienplan der Basis der Neuenburg-Formation
 Figure 2.2.1: Répartition et isocontours de la base de la formation de Neuenburg

2.3 DURCHLÄSSIGKEITSVERHÄLTNISSE

Im letzten Auswerteschritt wurde aus Pumpversuchsergebnissen für den oberen und unteren Abschnitt der Neuenburg-Formation die regionale Verteilung der Durchlässigkeitswerte erstellt. Wegen der geringen Datendichte in dem darunter folgenden oberen und unteren Abschnitt Breisgau-Formation konnten hier lediglich die Belegpunkte mit den zugehörigen Durchlässigkeitswerten zusammengestellt werden. Die Verteilung der Durchlässigkeiten im oberen Abschnitt der Neuenburgformation ist in Abbildung 2.3.1 dargestellt. Die höchsten Durchlässigkeiten liegen mit bis zu 10^{-2} m/s in Rheinnähe und im zentralen Teil des Oberrheingrabens auf französischer Seite vor. Zum Grabenrand nehmen die Durchlässigkeiten generell ab.

2.3 PERMEABILITES

La dernière étape a consisté à effectuer la répartition régionale des perméabilités des Couches de Neuenburg supérieures et inférieures a été cartographiée en plages d'isovaleurs sur la base des résultats de pompages d'essai. En ce qui concerne les Couches de Breisgau, supérieures et inférieures, seules les valeurs des perméabilités aux points de mesure ont pu être cartographiées en raison de la densité d'information insuffisante. La répartition des perméabilités des couches supérieures de la formation de Neuenburg est donnée dans la figure 2.3.1. Les valeurs les plus élevées de l'ordre de 10^{-2} m/s sont observées aux abords du Rhin et en centre plaine de la partie française. Les perméabilités diminuent généralement en direction des zones de piémont.

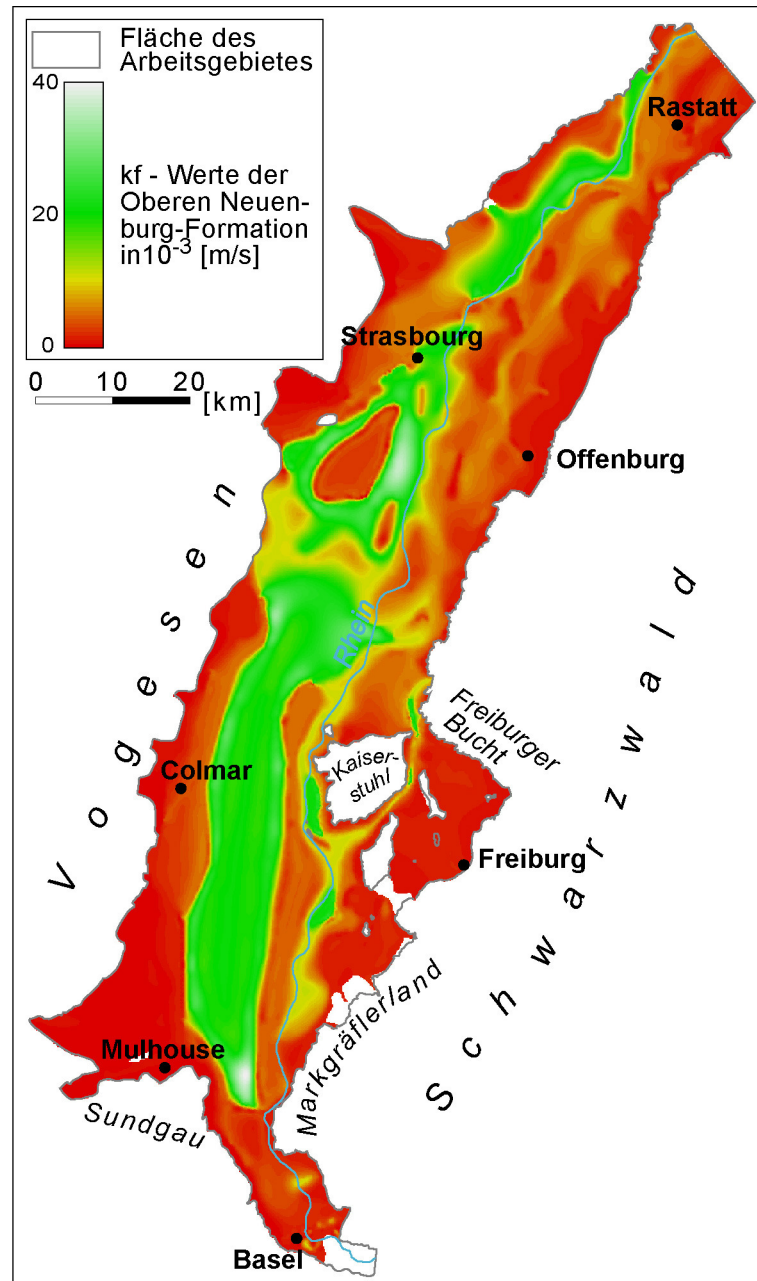


Abbildung 2.3.1: Räumliche Verteilung der Durchlässigkeiten im oberen Abschnitt der Neuenburg-Formation (Tiefenstufe 0-20 Meter)
 Figure 2.3.1: répartition géographique des perméabilités dans les couches supérieures de la formation de Neuenburg (profondeur de 0 à 20 m)

3 Abflussregionalisierung

Régionalisation des écoulements

3.1 EINLEITUNG

Das Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK) der Universität Karlsruhe hat flächendeckend für Baden-Württemberg einen Regionalisierungsansatz für verschiedene Abfluss-Kennwerte zwischen dem Niedrigwasserabfluss und dem Hochwasserabfluss entwickelt. Dieser Regionalisierungsansatz beruht auf Regressionsgleichungen, mit denen die Abfluss-Kennwerte als Funktion geeigneter Gebietskenngrößen berechnet werden. Die wesentlichen Gebietskenngrößen sind dabei die Größe des betrachteten Einzugsgebiets, die Fließlängen in dem Gebiet, das gewogene Gefälle, die Flächennutzung, der mittlere Gebietsniederschlag und ein empirisch ermittelter Landschaftsfaktor, der insbesondere die landschaftsräumlichen Gegebenheiten erfasst. Für die Bearbeitung dieser Regionalisierungsaufgabe standen aus dem Datenarchiv der LUBW zahlreiche digitale Datensätze für Baden-Württemberg zur Verfügung, mit denen die erforderlichen Gebietskenngrößen mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems abgeleitet werden konnten.

Auf der Basis dieser Vorarbeiten wurde insbesondere der Regionalisierungsansatz für die Hochwasserabfluss-Kennwerte auf die Einzugsgebiete der Oberrheinebene weiterentwickelt, um die Zuflüsse aus den rechtsrheinischen Teileinzugsgebieten des Oberrheins für die Modellierung der Grundwasserhältnisse abzuleiten, da die LUBW für den gesamten Oberrheingraben zwischen Basel und der Region nördlich von Mannheim großräumige Grundwassermodelle betreibt. Diese Weiterentwicklung des Regionalisierungsansatzes hatte sehr gute Ergebnisse erzielt, so dass mit der modifizierten Regressionsvariante nicht nur ausgewählte Abfluss-Kennwerte betrachtet werden können, sondern auch Abflusszeitreihen mit Zeitschritten von Monaten bzw. Dekaden.

3.1 INTRODUCTION

L'institut de gestion des eaux et de techniques culturelles (Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, IWK) de l'université de Karlsruhe a mis au point une méthode de régionalisation des grandeurs caractéristiques du débit valables entre les régimes de basses et de hautes eaux. Le procédé a été appliqué sur toute la superficie du Land du Bade-Wurtemberg. Il repose sur des équations de régression permettant de calculer le débit en fonction de certaines caractéristiques du bassin versant, notamment sa superficie, la longueur des cours d'eau, la pente, l'occupation des sols, les précipitations et un facteur empirique lié au type de paysage considéré. Le traitement par système d'information géographique des nombreuses données numériques fournies par la LUBW pour l'ensemble du Bade-Wurtemberg a permis d'effectuer la régionalisation et de déduire les grandeurs caractéristiques des bassins versants.

La poursuite de ces travaux préparatoires s'est attachée principalement à la régionalisation des situations de hautes eaux dans les bassins versants du Rhin Supérieur, l'objectif étant de déterminer des conditions aux limites de débit qui puissent être utilisés par les modèles hydrodynamique des eaux souterraines gérés par la LUBW dans le fossé rhénan entre Bâle et le Nord de Mannheim. L'évolution de la méthode de régionalisation a donné des résultats probants. La version modifiée est en mesure de fournir non seulement des débits caractéristiques pour des situations données, elle est désormais utilisable pour constituer des historiques du débit avec des valeurs par décade ou par mois.

3.2 VORGEHENSWEISE

Im Rahmen des grenzübergreifenden INTERREG III Projektes MoNit wurde nun der weiterentwickelte Regionalisierungsansatz auf die aus französischen Einzugsgebieten zufließenden Gewässer, vornehmlich den Vogesen und deren Vorland, erweitert. Dafür wurden nun auch Datensätze von der französischen Seite des Oberrheingrabens mit in die Regionalisierung übernommen und sowohl Zuflussdaten für französische Teileinzugsgebiete generiert, als auch auf deutscher Seite die Zuflusswerte den aktuellen Datensätzen und Modellgrößen bzw. Eingangsdaten angepasst.

Das Ziel der Bearbeitung war die Bestimmung von mittleren Monatsabflüssen von Bächen und Flüssen an definierten Stellen auf der Grundwassermodellgrenze (Abb. 3.2.1). Hierzu musste das System zunächst anhand vorhandener Abflussmesswerte analysiert werden (Analyse). Anschließend konnten für beliebige Gebiete mit Hilfe der ermittelten mathematischen Funktion, der Regionalisierungsparameter und den Gebietsniederschlägen die monatlichen Zuflüsse errechnet werden (Synthese).

3.2 MISE EN OEUVRE

Le modèle de régionalisation existant a été élargi aux bassins versants français des Vosges dans le cadre du projet INTERREG III MoNit. Les apports ont englobé les données issues de la partie française du fossé rhénan, ce qui a permis de reproduire les débits pour la partie française, et une actualisation des données et des conditions aux limites du modèle pour la partie allemande.

L'étude avait pour objet de reproduire les débits mensuels moyens des cours d'eau à l'endroit précis de leur embouchure dans la zone d'emprise du modèle des eaux souterraines (figure 3.2.1). Pour ce faire, il s'agissait d'analyser les valeurs disponibles au préalable (analyse). Dès lors que la fonction mathématique, les paramètres de la régionalisation et les précipitations étaient définis, le calcul des débits mensuels était possible (synthèse).

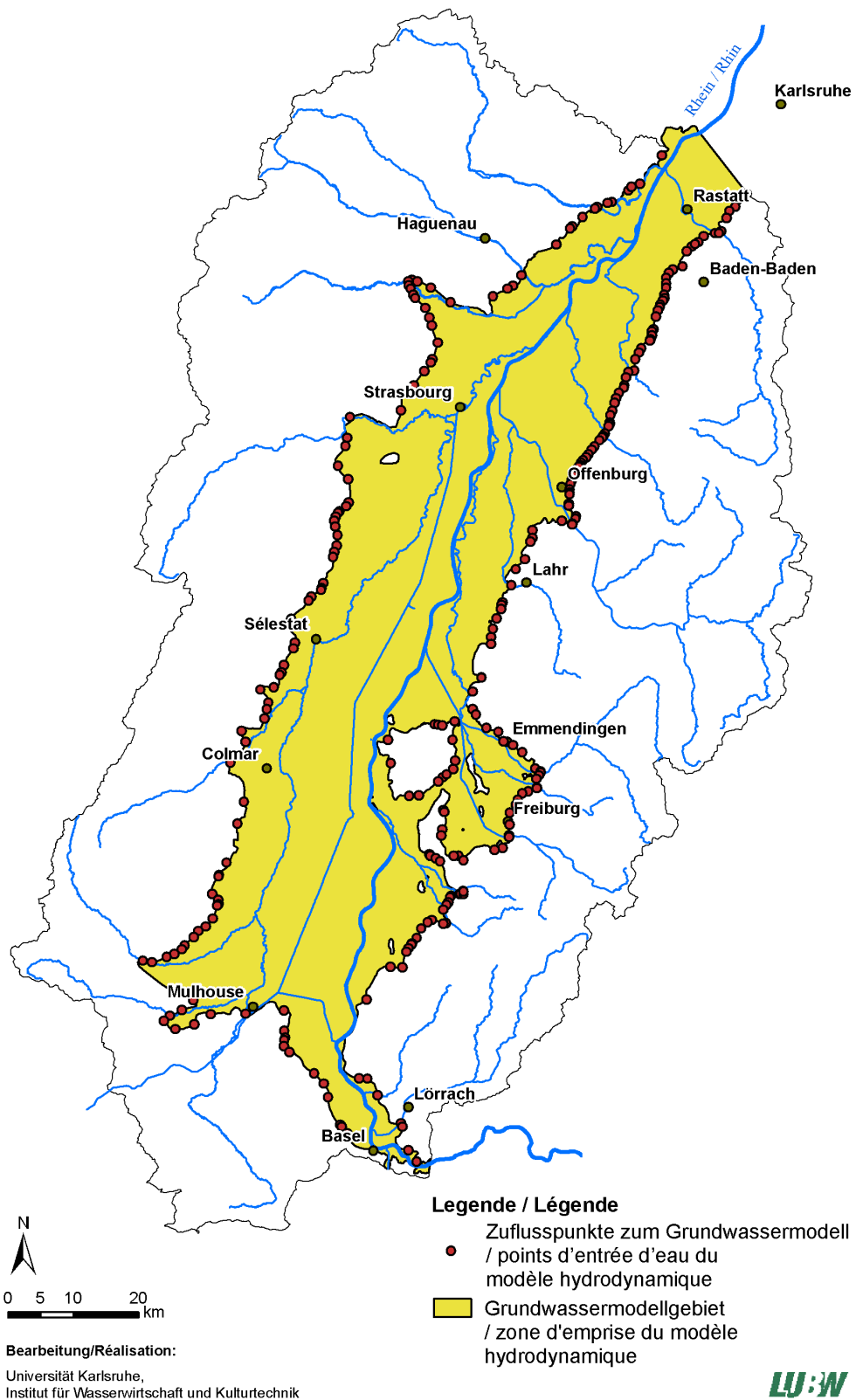


Abbildung 3.2.1: Einzugsgebietsgrenze der Zuflussgebiete und deren Zuflusspunkte zum Grundwassermodell.
 Figure 3.2.1: limite des bassins versants et localisation des embouchures dans le modèle des eaux souterraines.

3.3 ANALYSE

Für die rechtsrheinischen baden-württembergischen und die linksrheinischen elsässischen Abflusspegel wurden die Einzugsgebiete (Abb. 3.3.1) mit Hilfe des digitalen Höhenmodells (DHM) ermittelt. Hierbei wurden alle zur Verfügung stehenden Pegel verwendet. Lediglich der Pegel Equisheim auf französischer Seite wurde aufgrund sehr geringer Datensätze nicht verwendet. Für die Pegeleinzugsgebiete wurden die maßgeblichen Gebietsparameter bestimmt, welche die topographische und hydrologische Charakteristik der Gebiete beschreiben. Als Einflussgrößen konnten folgende Parameter identifiziert werden:

- Größe des Einzugsgebietes A_E
- maximale Fließlänge L
- Fließlänge vom Flächenschwerpunkt bis zum Gebietsauslaß L_c
- gewogenes Gefälle I_G
- Waldanteil W
- Bebauungsanteil S
- superficie du bassin versant A_E
- distance maximale d'écoulement L
- distance d'écoulement entre le centre de gravité du bassin et l'exutoire L_c
- déneviée normalisée I_G
- pourcentage de forêt W
- pourcentage de zone urbaine S

Zur Berechnung der Gebietsniederschläge wurde ein Gitternetzraster (500 m x 500 m) der monatlichen Niederschläge im Grundwassermodellgebiet und der oberirdischen Zuflussgebiete zur Verfügung gestellt. Zur Übertragung der Niederschläge auf die Pegeleinzugsgebiete wurden diese mit dem Gitternetzraster mit Hilfe des geographischen Informationssystem ARC/INFO verschnitten. Aufgrund der hohen Auflösung des Gitternetzrasters wurde auf eine Flächengewichtung verzichtet und eine direkte Zuordnung der im Gebiet liegenden Punkte zum jeweiligen Gebietsniederschlag vorgenommen.

Der Zusammenhang zwischen gemessenen mittleren, monatlichen Abflüssen, Gebietsparametern und Gebietsniederschlag kann durch folgenden Ansatz beschrieben werden:

$$\ln(\overline{Q}_{Monat}) = C_0 + C_1 \ln(A_E) + C_2 \ln(L) + C_3 \ln(L_c) + C_4 \ln(I_G) + C_5 \ln(S + 1) + C_6 \ln(W + 1) + C_7 \ln(\overline{N}_{Monat})$$

3.3 ANALYSE

Les bassins versants des stations de jaugeage du Bade-Wurtemberg en rive droite du Rhin et des stations alsaciennes en rive gauche ont été délimités avec un modèle numérique de terrain (MNT). Toutes les échelles disponibles ont été utilisées à l'exception de la station alsacienne d'Equisheim en raison du volume de données trop faible. Les paramètres caractéristiques de la topographie et de l'hydrologie ont été définis pour le bassin versant de chaque station. Les paramètres suivants entrent en ligne de compte :

Un maillage carré de 500 m avec les précipitations mensuelles dans la zone d'emprise et les bassins versants fourni a permis de calculer les précipitations sur l'ensemble de la zone d'étude. Le report des informations pluviométriques maillées sur les bassins versants a été mis en œuvre avec le système d'information géographique ARC/INFO. En raison de la petite taille des mailles, les valeurs ponctuelles des précipitations au centre des mailles carrées ont été prises telles quelles pour la détermination du cumul pour le bassin versant sans pondération préalable selon que la maille était concernée en tout ou partie.

La correspondance entre les débits mensuels moyens mesurés, les caractéristiques du bassin versant et les précipitations est décrit dans la formule suivante :

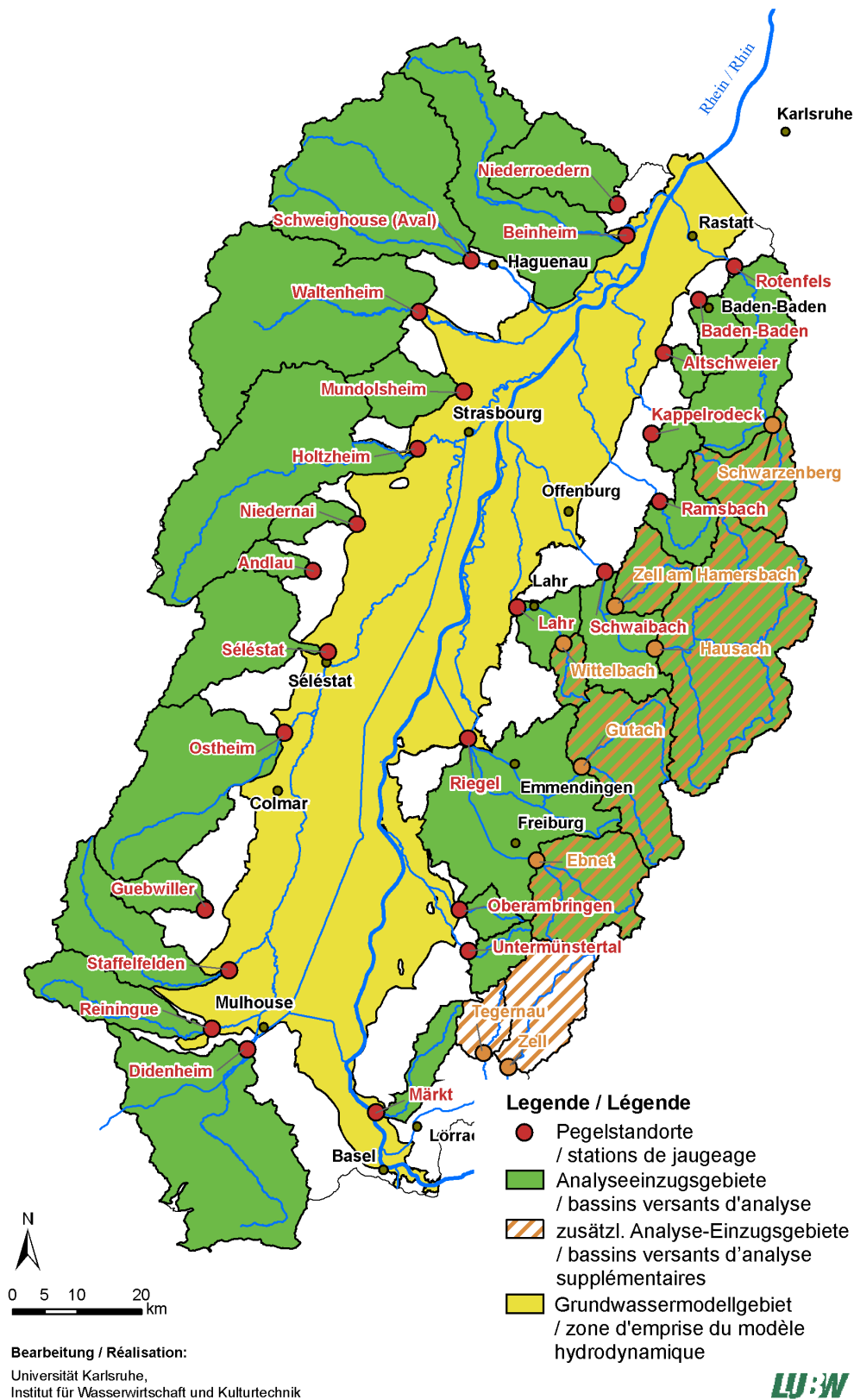


Abbildung 3.3:1

Für die Analyse verwendete Einzugsgebiete mit dem jeweiligen Pegelstandort. Zusätzliche Einzugsgebiete wurden auf deutscher Seite zur Verbesserung der Regionalisierungsparameter beigefügt.

Figure 3.3.1:

Bassins versants considérés et station limnimétrique correspondante. Un nombre plus important de bassins versants a été utilisé en partie allemande pour améliorer l'ajustement des paramètres de régionalisation.

3.4 SYNTHÈSE

Mit Hilfe des ermittelten funktionalen Zusammenhangs zwischen Gebietsniederschlag, Regionalisierungsparameter und Abflüssen ist es nunmehr möglich für unbeobachtete Gebiete die Zuflüsse zum Grundwassermodell zu bestimmen. Die Festlegung, welche Flüsse im Grundwassermodell berücksichtigt werden, erfolgte in Abstimmung mit der LUBW unter Berücksichtigung der Angaben über Gewässerläufe aus der TK 50 und DGK 5 auf deutscher Seite und entsprechender digitaler Informationen auf französischer Seite. Für diese unbeobachteten Gebiete wurden ebenfalls die Gebietsparameter mit Hilfe geographischer Daten im GIS ermittelt. Die Berechnung der Einzugsgebiete und der topographischen Informationen basieren auf einem DHM, das aus französischen und deutschen Datensätzen zusammengefügt wurde. Hierzu wird ausgehend von der Schnittstelle Tiefenlinie - Grundwassermodellrand das Einzugsgebiet bestimmt. Da die Tiefenlinien oftmals nicht mit den Gewässerläufen in den topographischen Datensätzen übereinstimmen, wurde für die Schnittpunkte mit dem Modellrand eine Zuordnungstabelle entwickelt. Hierin werden die Verknüpfungen zwischen Informationen über die Zuflussgebiete und denen der Gewässer des Grundwassermodells hergestellt. Für die Berechnung der Gebietsniederschläge wurde das von der LUBW zur Verfügung gestellte Gitternetzraster verwendet. Die Zuordnung des Gitternetzrasters und den Zuflussgebieten erfolgte im geographischen Informationssystem ARC/INFO. Mit Hilfe der mehrfachen multiplen Regressionsbeziehung lassen sich nunmehr die Abflüsse an den Grenzen des Grundwassermodells errechnen. Zwei Analyse-Gebieten auf deutscher Seite und einem Gebiet auf französischer Seite wurden manuell ein Niederschlagsrasterpunkt zugeordnet, da aufgrund deren geringen Größe kein spezifischer Punkt dem jeweiligen Gebiet automatisch zugeordnet wurde.

Die Regionalisierung mit den vorliegenden Datensätzen erforderte bei der Bearbeitung zwei Anpassungen des Modells. Die morphologische Charakteristik der Analyse- Einzugsgebiete ist in vielen Fällen deutlich von den Synthese-Einzugsgebieten unterschiedlich. Dies bedeutet, dass große, das gesamte Gebirge um-

3.4 SYNTHÈSE

Les liens de causalité entre les précipitations, les paramètres de régionalisation et les débits permettent désormais de déterminer les conditions aux limites de débit du modèle des eaux souterraines dans le cas de secteurs inobservés. Les cours d'eau retenus dans le modèle hydrodynamique ont été choisis en accord avec la LUBW au regard des géométries des cours d'eau présentés dans les cartes topographiques au 50000^{ème} (TK 50) et au 5000^{ème} en rive droite du Rhin et sur la base des données numériques en Alsace. Les caractéristiques des bassins versants inobservés ont également été estimées à l'aide des données géographiques du SIG. La délimitation des bassins versants et les informations topographiques sont issues d'un modèle numérique de terrain (MNT) par combinaison d'un modèle français avec un modèle allemand. Les limites des bassins versants sont définies par rapport à l'intersection des lignes de vallée avec les limites du modèle. Malheureusement, les lignes de vallée ne coïncident pas toujours avec le tracé des cours d'eau dans les cartes topographiques. C'est la raison pour laquelle un tableau de correspondance a été mis en place pour rétablir le lien entre les informations sur le bassin versant et celles du cours d'eau. Les précipitations ont été calculées sur la base du maillage de la LUBW. La concordance entre maillage et bassin versant a été réalisée grâce au système d'information géographique ARC/INFO. La méthode de régression linéaire multiple permet de calculer les débits aux limites du modèle. Une valeur des précipitations a été attribuée manuellement sur deux secteurs d'étude en partie allemande et un secteur en partie française car il n'existait pas de point correspondant du fait de la petite taille de ces secteurs.

Deux modifications du modèle ont été nécessaires pour mener à bien la régionalisation des données d'entrée. Les caractéristiques morphologiques des zones analysées sont parfois sensiblement différentes des zones de synthèse. Par conséquent, les grandeurs caractéristiques retenues pour certains

spannende Analyse-Einzugsgebiete für kleine Einzugsgebiete am Gebirgsrand die Parametersätze liefern müssen. Dies kann zu Unstimmigkeiten der Parametersätze führen. Des Weiteren ist die Zahl der vorhandenen Analyse-Datensätze relativ gering. Für frühere Regionalisierungen der Zuflüsse im Ober-rheingebiet wurde z.B. der gesamte baden-württembergische Datenbestand verwendet. Im vorliegenden Fall standen nur 14 Pegel-Datensätze auf französischer Seite und 19 Datensätze auf deutscher Seite zur Verfügung. Bei ungleich verteilten Niederschlags-Szenarien kann dies zu unplausiblen Parametersätzen führen, vor allem in Kombination mit dem oben genannten Punkt. Weitere Datensätze konnten nicht einbezogen werden, da die Bearbeitungsgrenze, vor allem auf französischer Seite durch den Niederschlagsdatensatz begrenzt wird. Daher wurde der Regionalisierungsansatz auf zwei Parameter (Fläche und Niederschlag) reduziert, um sowohl für die französische als auch deutsche Seite konsistente und plausible Ergebnisse erzielen zu können.

In der Abbildung 3.4.1 sind die Zuflussgebiete für die eine Abflussregionalisierung durchgeführt wurde mit der jeweiligen Zuordnung zum Analyse-Pegel dargestellt.

petits bassins versants sont issues de considérations réalisées sur des bassins versants beaucoup plus étendus. Des incohérences sont donc possibles. Le volume de données d'analyse est en outre assez réduit. L'ensemble des données hydrométriques du Land du Bade-Wurtemberg avait été utilisé dans le cadre des études précédentes sur le bassin rhénan. Seuls 14 stations hydrométriques en partie française et 19 stations en partie allemande ont pu être utilisées cette fois. Pour les cas où les précipitations sont inégalement réparties, il s'ensuit des incertitudes des paramètres, surtout en combinaison avec la situation précédente. Il n'a pas été possible de retenir un plus grand nombre de stations, la zone d'emprise de l'étude étant limitée – principalement sur le territoire français – par la répartition des données pluviométriques disponibles. Pour cette raison, la régionalisation s'est résumée aux deux paramètres superficie et quantité de précipitations dans la mesure où il était dès lors possible de fournir des résultats cohérents sur les deux parties allemande et française.

Les bassins versants définis pour la régionalisation et les stations hydrométriques correspondantes sont présentés dans la figure 3.4.1.

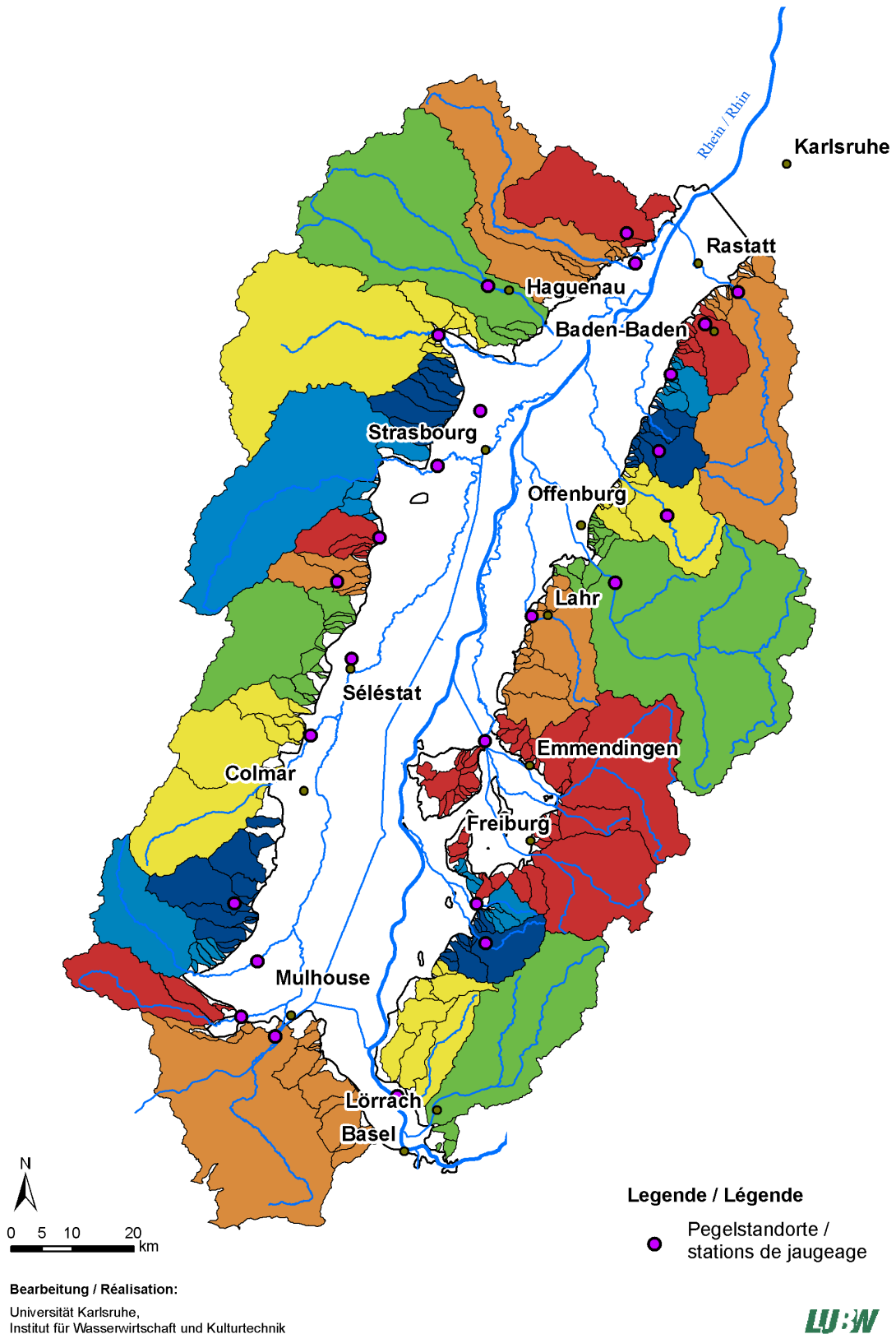


Abbildung 3.4.1: Zuflussgebiete mit der jeweiligen Zuordnung zum Analyse-Pegel, Gebiete einer Farbstufe sind einem Analyse-Pegel zugeordnet.
 Figure 3.4.1: Bassins versants et stations hydrométriques correspondantes. Les couleurs permettent de différencier les stations d'analyse utilisées.

3.5 VERGLEICH FRANZÖSISCHER UND DEUTSCHER DATENSÄTZE

Die über den Betrachtungszeitraum von Januar 1985 bis Dezember 2002 gemittelten Niederschlagsjahressummen liegen auf französischer Seite bei etwa 70 % der gemittelten Niederschlagsjahressummen auf deutscher Seite. Bei den Abflüssen zeigt sich der Unterschied wesentlich deutlicher: Die mittlere jährliche Abflussspende liegt bei französischen Pegeln bei etwa 50 % der mittleren jährlichen Abflussspende der deutschen Seite. Die geringeren Niederschlagssummen auf französischer Seite sind sicherlich auf die naturräumlichen Gegebenheiten zurückzuführen. Die elsässischen Einzugsgebiete liegen überwiegend im Regenschatten der Vogesen bzw. in deren östlichem Vorland, die baden-württembergischen Einzugsgebiete sind durch Steigungsniederschläge am Schwarzwaldrand stärker betroffen. Zusätzlich ist das gewogene Gefälle (IG) im Elsass geringer als im Schwarzwald (Abbildung 3.5.1 oben). Der Pegel Mundolsheim zeigt die auffälligsten Unterschiede im Abflussverhalten zu den anderen Pegeln, dies liegt an dessen geringem Bewaldungsgrad und der Lage des Einzugsgebietes, das fast vollständig im Vorland der Vogesen Strasbourg vorgelagert ist (Abbildung 3.5.1 unten). Die Pegel Didenheim und Niederroedern zeichnen sich ebenfalls durch einen geringen Waldanteil aus. Eine erweiterte Regionalisierung mit Hilfe eines Landschaftsfaktors wurde geprüft, aber da aufgrund oben genannter Unterschiede im Niederschlags-Abflussverhalten und der bestimmten Parameter der Landschaftsfaktor auf französischer Seite zu stark von dem auf deutscher Seite abwich, wurde dieser nicht mit in das Modell aufgenommen. Auf deutscher Seite zeigte der Einsatz des Landschaftsfaktors keine wesentlichen Verbesserungen. Die Regionalisierung erfolgte für die französische und die deutsche Seite mit getrennten Datensätzen, das Ergebnis aufgrund der vorhandenen Gebietsunterschiede ließ sich damit verbessern.

3.5 COMPARAISON DES DONNEES FRANÇAISES ET ALLEMANDES

Les précipitations annuelles moyennes calculées sur la partie française pour la période de janvier 1985 à décembre 2002 représentent 70 % des précipitations annuelles moyennes en partie allemande. L'écart est encore plus important pour les débits : les débits moyens annuels cumulés atteignent en partie française à peine 50 % des valeurs calculées en partie allemande. Le faible volume de précipitations en Alsace est certainement à mettre en relation avec sa situation géographique. Les bassins versants alsaciens à l'abri des Vosges sont souvent épargnés par la pluie alors que les bassins versants du pays de Bade sont beaucoup plus arrosés par des pluies de condensation sur les contreforts de la Forêt Noire. De plus, les pentes normalisées (IG) sont plus faibles en Alsace qu'en Forêt Noire (figure 3.5.1 haut). L'échelle de Mundolsheim présente les différences de comportement les plus notables avec les autres stations, sans doute en raison de la faible portion boisée de son bassin versant et de sa localisation dans les collines sous vosgiennes à l'Ouest de Strasbourg (figure 3.5.1 bas). Les stations de Didenheim et de Niederroedern se distinguent également par la faible fraction boisée de leur bassin versant. Une régionalisation modifiée avec un nouveau facteur de paysage n'a pas été retenue car les résultats alsaciens différaient trop sensiblement des paramètres du modèle badois du fait des relations particulières pluies – débit. L'introduction du facteur de paysage en partie allemande n'apporta pas d'amélioration significative. La régionalisation a été mise en œuvre séparément pour les parties française et allemande sachant que les disparités entre les bassins versants ont permis une amélioration globale du résultat.

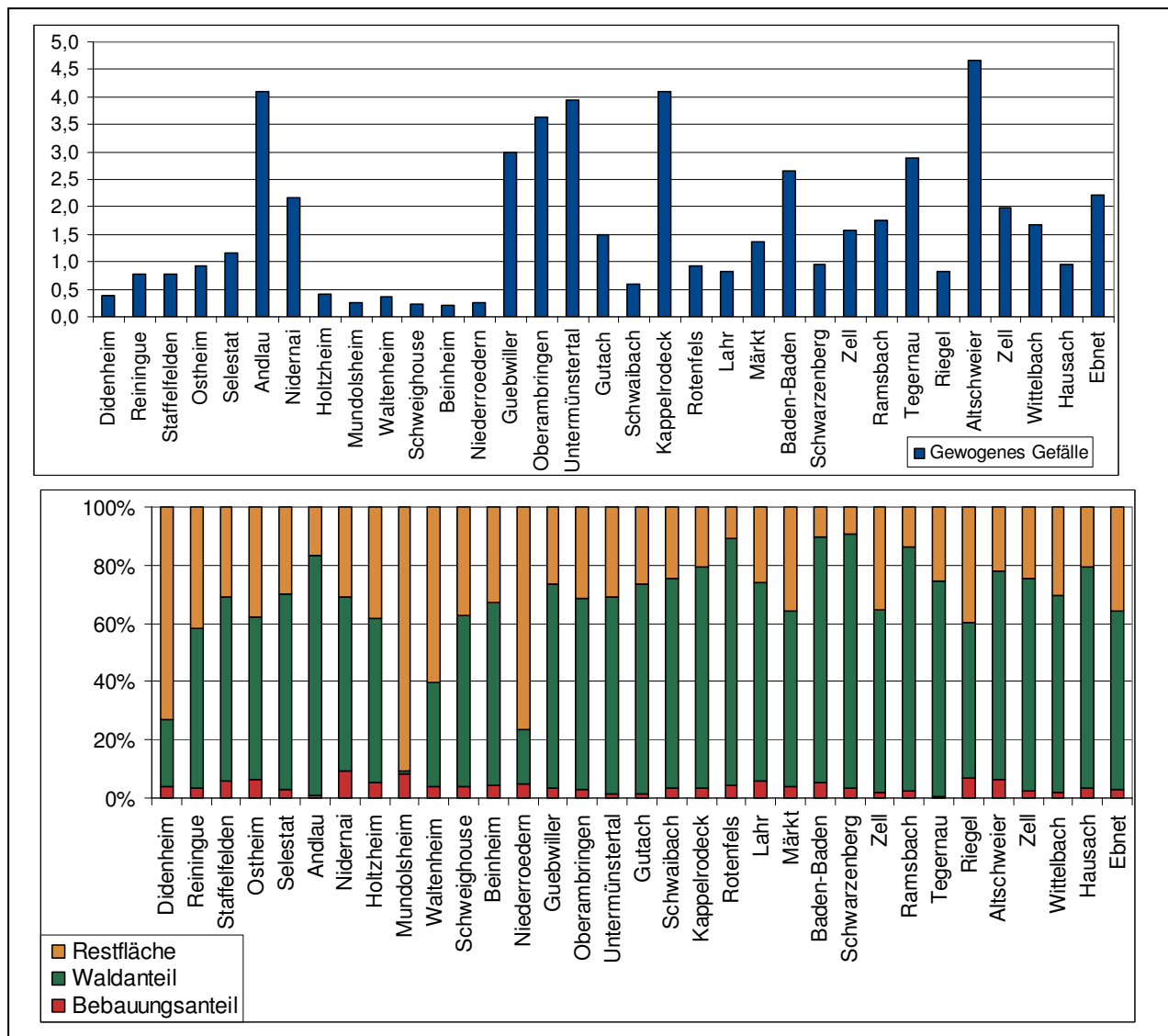


Abbildung 3.5.1: Gewogenes Gefälle IG sowie Wald-, Stadt-, und Restanteil französischer und deutscher Analyse-Einzugsgebiete
 Figure 3.5.1: *Pente normalisée IG et pourcentages de forêts, de zones urbaines et autres dans les bassins versants d'analyse*

4 Wasserspiegellagen des Rheins zwischen Basel und Maxau

Ligne d'eau du Rhin entre Bâle et Maxau

4.1 AUFGABENSTELLUNG

Beim Aufbau des instationären Grundwasserströmungsmodells spielt der Rheinwasserspiegel, aufgrund seiner bereichs- und zeitweise starken Schwankung (Abb. 4.1.1), bei der Berücksichtigung der oberirdischen Gewässer eine wichtige Rolle. Deshalb war die Berechnung der Wasserspiegellagen des Rheins und der Rhein-Seitenkanäle für den Bereich zwischen Basel und Karlsruhe im Zeitraum vom 01.01.1986 bis 31.12.2002 auf Tagesbasis erforderlich.

4.1 PROBLÈME POSÉ

Les variations rapides et importantes de la ligne d'eau du Rhin jouent un rôle important lors de la modélisation hydrodynamique des eaux souterraines en régime transitoire. C'est la raison pour laquelle les variations des niveaux d'eau du Rhin et des canaux latéraux entre Bâle et Karlsruhe ont été déterminées à pas de temps journalier pour la période entre le 01.01.1986 et le 31.12.2002.

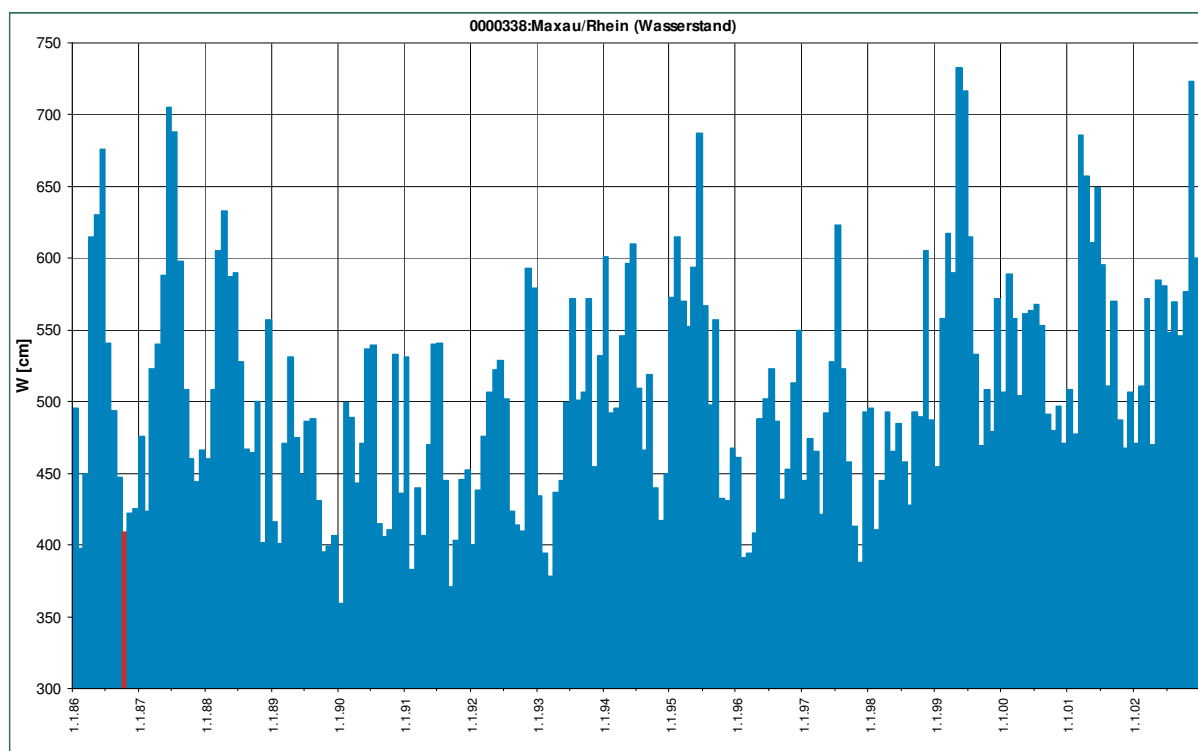


Abb. 4.1.1: Wasserstandsschwankung am Pegel Maxau, Monatsmittelwerte aus Messung, hervorgehoben Oktober 1986
Figure 4.4.1: niveaux mensuels moyens du Rhin à la station de jeaugeage de Maxau, octobre 1986 est figuré en rouge

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde daher auf Grundlage einer am 10.12.2003 in Kraft getretenen Vereinbarung beauftragt, die Ermittlung der Wasserspiegellagen des Rheins und der Kanal-

La Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) s'est engagée dans le cadre d'une convention du 10.12.2003 à fournir la ligne d'eau du Rhin et des canaux latéraux entre les stations hydromé-

strecken zwischen dem Wehr Basel-Birsfelden (Rhm 163,820) und dem Pegel Karlsruhe-Maxau (Rhm 362,300) mit Hilfe von instationären, eindimensionalen HN-Teilabschnittsmodellen durchzuführen. Für Bereiche, in denen wegen unzureichender geometrischer oder hydraulischer Daten eine derartige Berechnung nicht möglich war, wurden die Wasserspiegelmittelwerte ingenieurmäßig ermittelt. Das bedeutet, dass für die jeweiligen Streckenabschnitte unter Berücksichtigung aller verfügbarer Teilinformationen (Pegelinformationen für einzelne Abflusszustände, Wasserspiegelfixierungen und -höhen aus vorliegenden Modellen für Teilstrecken, bekannte Randwasserstände aus Naturmessungen etc.) der Streckenabschnitt hydraulisch bewertet wird. Anhand verlässlich eingeschätzter Stützwerte wurden die Wasserspiegellagen für diese Teilbereiche dann inter- bzw. extrapoliert.

4.2 DATENGRUNDLAGE

Die verwendete Datengrundlage ist nachfolgend nach Art und Herkunft zusammengestellt.

triques de Bâle-Birsfelden (PK 163,820) et de Maxau (PK 362,300) calculées sur des tronçons successifs à l'aide de modèles numériques unidimensionnels en régime transitoire. Les secteurs dans lesquels la connaissance de la géométrie ou de l'hydraulique était insuffisante, les niveaux ont été déterminés avec les méthodes de l'ingénieur classiques. Chaque tronçon a donc été traité en utilisant l'ensemble des données disponibles (relevés d'échelles pour différentes conditions de débit, lignes d'eau issues des modèles existants sur les différents tronçons, niveaux limites connus par des observations de la nature, etc...). Les niveaux ainsi déterminés dans les règles de l'art ont été interpolés et extrapolés sur les tronçons concernés.

4.2 DONNÉES DISPONIBLES

L'origine et le type de données utilisées sont synthétisés dans le tableau suivant.

Tab. 4.2.1: Datengrundlage nach Art und Herkunft
 Tab.: 4.2.1: *Origine et type de données*

Datenart <i>Type de données</i>	Bereich <i>secteur</i>	Herkunft (Anschrift s. nachstehende Adressliste /x/) <i>Origine</i> (adresses cf. liste jointe)
Geometrie / Géométrie		
Querprofilgeometrie <i>Coupes transversales</i>	Rhein im deutschen Bereich <i>Rhin en partie allemande</i>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Freiburg /1/ ■ Gewässerdirektion Südlicher Oberrhein/Hochrhein, Lahr /2/
Sohlgeometrie - <i>radier</i>	Rhein im Schweizer Bereich <i>Rhin en partie suisse</i>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Basel /3/
Längsschnitte <i>Profils en long</i>	Rhein	<ul style="list-style-type: none"> ■ WSA Freiburg /1/
Geländemodelle <i>Modèle de terrain</i>	Flussbett mit Vorländern <i>Lit du fleuve et abords</i>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gewässerdirektion Südlicher Oberrhein/Hochrhein, Lahr /2/
Längs- und Querprofile <i>Profils en long et en travers</i>	im Grand Canal d'Alsace und in den Schlingen <i>Grand Canal et biefs</i>	<ul style="list-style-type: none"> ■ EDF (Electricité de France) /4/
Bauwerksdarstellungen <i>Description des ouvrages</i>	Staustufen <i>Barrages</i>	<ul style="list-style-type: none"> ■ EDF (Electricité de France) /4/
<ul style="list-style-type: none"> ■ Hydraulik / hydraulique: 		
Pegeldaten (W, Q) <i>Données limnimétriques (H, Q)</i>	Rhein u. Rheinzuflüsse <i>Rhin et affluents</i>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Landesanstalt f. Umweltschutz (LfU) Baden-Württemberg, Karlsruhe /5/ Ref. 42 und 43 ■ Hydrologische Datenbank (HYDABA) der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz /6/ ■ Wasserwirtschaftliches Informations-system der Wasser- und Schifffahrts-verwaltung des Bundes, Bereich der Wasser- und Schifffahrts-direktion(WSD) Südwest, Mainz /7/ ■ Deutsche Gewässerkundliche Jahrbücher Rheingebiet, Teil I Hoch- und Oberrhein (Hrg: Wasserwirtschafts-verwaltung Baden-Württemberg) ■ Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern (CH) /8/
Wasserspiegellagen aus hydr. Berechnungen <i>Lignes d'eau issues de calculs hydrauliques</i>		<ul style="list-style-type: none"> ■ EDF (Electricité de France) /4/ ■ Ing. Büro Dr. Ludwig, Karlsruhe /9/ ■ ARCADIS Consult, Karlsruhe /10/ ■ Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe /11/
Wasserspiegelfixierungen <i>Campagnes de relevé d'échelles</i>		<ul style="list-style-type: none"> ■ WSA Freiburg /1/
Karten, Luftbilder: <i>Cartes, photos aériennes:</i>		
Digitale Bundeswasserstraßenkarten M = 1:2000 <i>Carte numérique des voies navigables fédérales éch. 1 :2000</i>		<ul style="list-style-type: none"> ■ WSD Südwest, Fachstelle Vermessung, Karten /7/
Luftbilder <i>Photos aériennes</i>		<ul style="list-style-type: none"> ■ WSD Südwest ■ Fachstelle Vermessung, Karten /7/
Orthofotos <i>orthophotos</i>	entlang des Oberrheingrabens <i>le long du fossé rhénan</i>	Räumliches Informations- und Planungssystem (RIPS) Baden-Württ. bereitgestellt von der LfU, Karlsruhe /5/
Topografische Karten <i>Cartes topographiques</i>	deutsches Rheingebiet <i>partie allemande</i>	Landesvermessungsamt Baden-Württ., Stuttgart /12/
Sonstiges / divers:		
Steuerungs- und Regelungsvorschriften <i>Règlement de pilotage des ouvrages</i>	Kraftwerksanlagen <i>Centrales électriques</i>	EDF (Electricité de France) /4/

4.3 BESCHREIBUNG DES ANGEWANDTEN MODELL- VERFAHRENS

Mit dem BAW-eigenen Programmsystem CASCADE kann eine instationäre Betrachtung eines vernetzten Modellsystems durchgeführt werden. Dabei werden auf der Grundlage von finiten Differenzen iterativ die beiden hydraulischen Grundgleichungen für Kontinuität [1] und dynamische Bewegung [2] nach BARRÉ DE SAINT-VENANT gelöst.

4.3 DESCRIPTION DU MODÈLE RETENU

Le logiciel CASCADE développé par la BAW permet de simuler un réseau de modèle en régime transitoire. Les équations de continuité [1] et l'équation dynamique complète de l'écoulement de BARRÉ DE SAINT-VENANT [2] sont résolues itérativement par la méthode des différences finies.

$$\frac{1}{B} \frac{dQ}{dx} + \frac{dy}{dt} = 0 \quad [1]$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{\gamma\alpha}{2} \frac{dv^2}{dx} + g \frac{dy}{dx} + g \frac{Q|Q|}{K^2} = 0 \quad [2]$$

mit / avec

B (x,y)	Wasserspiegelbreite / largeur au miroir [m]
g	Erdbeschleunigung / accélération de la pesanteur [m/s ²]
K (x,y)	Konveyance-Faktor, spezifischer Abflusswert / facteur de débit spécifique [-]
Q (x,t)	Durchfluss / Débit [m ³ /s]
t	Zeit / temps [s]
v (x,t)	Fließgeschwindigkeit / vitesse d'écoulement [m/s]
x	Fließrichtung / direction d'écoulement [m]
y (x,t)	Wassertiefe / tirant d'eau [m]
α	Koeffizient zur Berücksichtigung ungleichmäßiger Geschwindigkeitsverteilung im Fließquerschnitt / coefficient d'hétérogénéité du champ de vitesse dans la section [-]
γ	Energiehöhenverlustbeiwert infolge Einengung/Aufweitung / perte de charge en cas de variation de la section mouillée [-]

Der komplizierte mehrdimensionale Strömungsvorgang wird vereinfacht als eindimensionales Problem behandelt, d.h. alle Strömungsparameter sind als Mittelwerte über die durchströmte Fläche zu verstehen. Er lässt sich somit für jedes Querprofil mit Hilfe der zwei o.g. Bilanzgleichungen darstellen.

Zur Berechnung muss das hydro-numerische Modell räumlich und zeitlich diskretisiert werden. Dazu wird es räumlich in tiefen- und breitengemittelte Rechenpunkte (Querprofile und Knotenpunkte) unterteilt. Die für die unterschiedlichen Abflusszustände zugehörigen Randbedingungen Wasserstand und Durch-

Les écoulements ne sont pas simulés en version multidimensionnelle mais monodimensionnelle par souci de simplification, c'est-à-dire que les paramètres d'écoulement sont des moyennes valables pour l'ensemble de la section mouillée. Cette hypothèse permet de résoudre les écoulements dans chaque profil en travers.

Le modèle hydronumérique est alimenté par des données spatiales et temporelles discrétisées. Les points de calcul sont représentatifs des tirants d'eau et du périmètre mouillé (profils en travers et point singuliers). Les conditions aux limites de débit et de niveau valables dans des conditions

flussmenge werden einer begrenzten Anzahl von Zeitschritten zugewiesen.

Die analytisch nicht lösbareren Differential-Grundgleichungen werden in ein System von Differenzgleichungen umgewandelt, für die durch Iterationsrechnungen mit den gleichungslösenden Randbedingungen zeitlich diskretisierte Gesamtlösungen ermittelt werden. Die Lösung erfolgt mittels des impliziten PREISSMANN-Schemas.

Die Gesamtfließverluste gehen über den Konveyance-Faktor K in die Berechnung mit ein.

$$K = k_{St} \cdot A \cdot r_{hy}^{2/3} \quad [m^3/s] \quad [3]$$

mit / avec:

- k_{St} summarischer Rauheitsbeiwert nach MANNING-STRICKLER / rugosité hydraulique selon MANNING-STRICKLER [$m^{1/3}/s$]
- A durchströmte Fläche / section mouillée [m^2]
- r_{hy} Hydraulischer Radius / rayon hydraulique [m]

Lokale Verluste können über die Koeffizienten α und γ mit in die Rechnung einbezogen werden. Der α -Beiwert berücksichtigt die Ungleichförmigkeit der Strömung im Querprofil. Der Kontraktions- und Expansionsbeiwert γ soll mögliche Fließverluste infolge plötzlicher Änderungen des Fließquerschnitts berücksichtigen.

Als Ergebnis einer instationären Rechnung auf der Basis dieser hydraulisch-numerischen Grundlagen werden für jeden definierten Zeitschritt an jedem Rechenpunkt

- die breitengemittelte Wasserspiegellage $H(x,t)$ [$m + NN$]
- der Durchfluss $Q(x,t)$ [m^3/s]
- und die mittlere Fließgeschwindigkeit $v(x,t)$ [m/s]

ermittelt. Alle weiteren hydraulischen Größen müssen im Zusammenhang mit den Eingabewerten aus diesen Ergebnissen berechnet werden.

4.4 DOKUMENTATION STRECKENEINTEILUNG UND WASSERSPIEGELLAGENERMITTLUNG

Die gesamte zu untersuchende Rheinstrecke wurde in 9 Teilabschnitte unterteilt. Die Kanalstrecken wurden separat betrachtet.

hydrauliques données sont adoptées pour un nombre limité de pas de temps.

Les équations différentielles de base n'ont pas de solution mathématique et sont transformées en un système d'équations résolu par des itérations successives qui prennent en compte les conditions aux limites de temps. Le calcul est effectué d'après la méthode du schéma implicite de PREISSMANN.

Les pertes de charges par frottement sont calculées avec le facteur K suivant :

Les pertes locales sont prises en compte dans les facteurs α et γ . Le terme α permet de caractériser l'hétérogénéité du champ de vitesses. Le terme γ décrit les pertes de charge dues à des variations brusques (augmentation et réduction) de la section mouillée.

La modélisation hydronumérique en régime transitoire permet de calculer pour chaque pas de temps et à chaque point du modèle

- la hauteur d'eau moyenne sur la largeur au miroir $H(x,t)$ [$m + NN$]
- le débit $Q(x,t)$ [m^3/s]
- et la vitesse moyenne $v(x,t)$ [m/s].

Ces paramètres constituent la base pour la détermination des autres grandeurs hydrauliques.

4.4 DOCUMENTATION PAR TRONÇON ET CALCUL DES LIGNES D'EAU

La portion du Rhin à étudier a été subdivisée en 9 tronçons. Les canaux ont été traités distinctement.

Die Berechnung der Wasserspiegellagen im Hauptstrom erfolgte - soweit ausreichendes Datenmaterial zur Verfügung stand - mit eindimensionalen HN-Teilmodellen, die sowohl für sich, als auch aneinander gekoppelt über mehrere Abschnitte betrieben werden können. Für Flussbereiche, in denen wegen fehlender bzw. lückenhafter geometrischer oder hydraulischer Daten keine exakte Berechnung möglich war, wurden die Wasserspiegelmittelwerte anhand der Auswertung der verfügbaren Unterlagen anderweitig bestimmt. Ebenso wurde für die Wasserstände in den Rhein-Seitenkanälen verfahren.

La ligne d'eau dans le lit principal a été calculée – dans la mesure de données disponibles suffisantes – à l'aide du modèle hydronumérique monodimensionnel, qui permet non seulement de traiter chaque tronçon séparément, mais également de coupler plusieurs tronçons. Les secteurs sur lesquels les données étaient insuffisantes pour permettre leur calcul, des niveaux d'eau moyens ont été déterminés différemment en utilisant les documents disponibles. Le procédé a été le même dans le cas des contre-canaux.

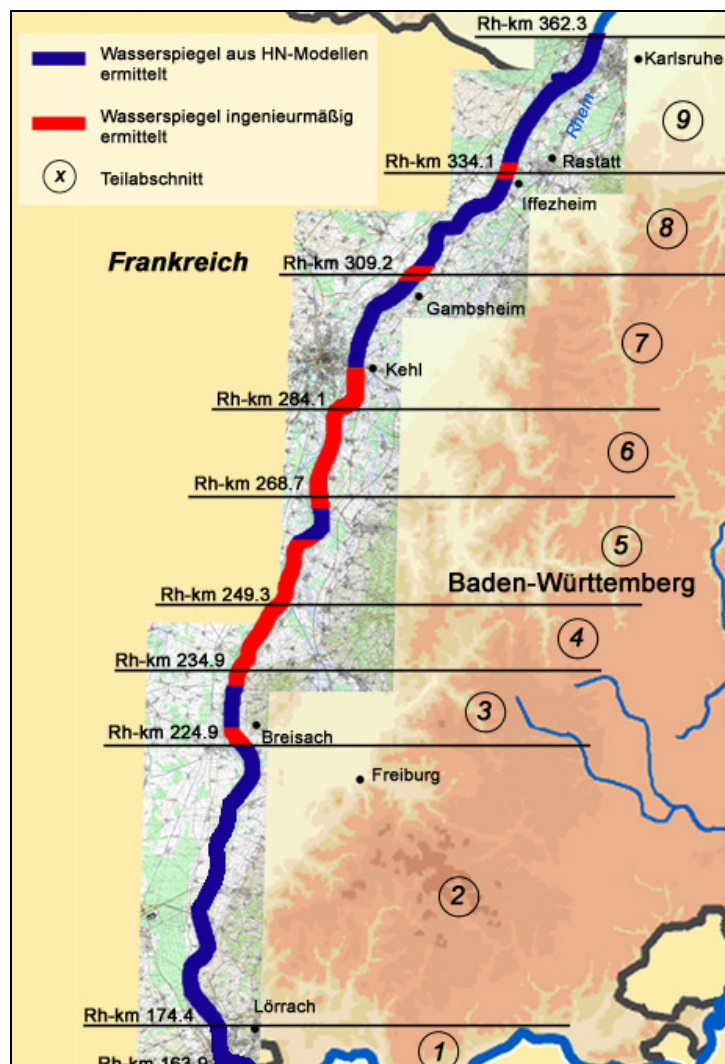


Abb. 4.4.1: Übersicht über die modellierte Rheinstrecke mit Teilabschnitten
 Fig. 4.4.1: Vue générale de la portion du Rhin modélisée et des tronçons

In der nachfolgenden Darstellung der einzelnen Teilabschnitte werden die Streckencharakteristik sowie die jeweiligen Methoden zur Ermittlung der Wasser-

Les caractéristiques de chaque tronçon et la méthode retenue pour la détermination de la ligne d'eau sont brièvement exposées plus loin. Les

spiegellagen kurz beschrieben. Die verwendeten Abkürzungen Q und W für die Randbedingungen der HN-Modelle stehen für Abfluss bzw. Wasserstand.

Die Wasserstandswerte der für die einzelnen Abschnitte relevanten Pegel sind der Datenbank WISKI (Wasserwirtschaftliches Informationssystem der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes) entnommen.

TEILABSCHNITT 1: BIRSFELDEN - MÄRKT (RH-KM 163,900 - 173,900)

Das Modell, das den Verlauf des Hochrheins im sog. "Dreiländereck" abbildet, beginnt unterhalb des Wehrs Birsfelden und endet oberhalb des Wehrs Märkt. Da für diesen Bereich die Datengrundlage lückenhaft war, mussten für eine rechnerische Ermittlung der Wasserspiegellagen einige vereinfachende Annahmen getroffen werden. Aufgrund fehlender Naturmessungen konnte keine Validierung der Berechnung vorgenommen werden, lediglich die Wasserstände an den Pegeln Basel-Rheinhalle (Rh-km 165,900) und Weil (bei Rh-km 172,900) sind durch Pegelaufzeichnungen belegt. Die restlichen Werte sind unter Ansatz einer mittleren Sohlrauheit über die gesamte Strecke ermittelt, der Verlauf der Wasserspiegel unterhalb des Pegels Weil bis zum Wehr Märkt wurde aufgrund der Rückstauwirkung als horizontal angesetzt. Für höhere Wasserstände konnte aufgrund teilweise unvollständiger Geometriedaten eine Vorlandüberströmung nicht berücksichtigt werden.

Als hydraulische Randbedingungen des Modells wurden angesetzt:

Q (bei Rh-km163,900) aus Schlüsselkurve Pegel Basel-Rheinhalle, bzw. für den Zeitraum vor dem 01.10.1995 den Angaben des Bundesamts für Wasser und Geologie, Bern (CH) für den Pegel Basel-Schiffslände entnommen;

W (bei Rh-km 165,900) nach dem 01.10.1995 aus den Pegelaufzeichnungen Basel-Rhein-halle und für den Zeitraum davor aus Abfluss-Wasserstands-Beziehungen ermittelt;

- W (bei Rh-km 172,900) aus Aufzeichnungen am Pegel Weil.

abréviations Q et W représentent les conditions aux limites du modèle hydronumérique de débit et de niveau d'eau.

Les niveaux d'eau des échelles hydrométriques sont issus de la banque de donnée WISKI (Wasserwirtschaftliches Informationssystem der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes).

TRONÇON 1: BIRSFELDEN - MÄRKT (PK 163,900 - 173,900)

Le modèle qui décrit les écoulements du Rhin dans la région des « trois frontières » a son origine à l'aval de l'échelle de Birsfelden et aboutit à l'amont de l'échelle de Märkt. Les données incomplètes ont nécessité de recourir à des simplifications pour la détermination de la ligne d'eau. En outre, comme il n'existe pas de laisses de crue, uniquement les données des échelles de de Bâle-Rheinhalle (PK 165,900) et Weil (PK172,900) ont pu être utilisées pour confirmer le calcul. Une valeur moyenne de la rugosité unique sur l'ensemble du tronçon a permis de qualifier les autres points, sachant que la partie comprise entre les échelles de Märkt et de Weil a été considéré comme étant horizontale en raison du reflux de la retenue de Kembs. Le calcul des niveaux élevés n'a pas pu prendre compte des débordements du Rhin faute de connaissances topographiques suffisantes.

Les conditions aux limites suivantes ont été utilisées pour la modélisation :

Q (au niveau du PK 163,900) issu de la courbe de tarage de l'échelle de Bâle-Rheinhalle. Avant le 01.10.1995, les informations fournies par le Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern (CH) à l'échelle de Bâle-Schiffslände

W (au niveau du PK 165,900) après le 01.10.1995 les hauteurs d'eau à l'échelle de Bâle-Rheinhalle et avant cette date à partir de la courbe de tarage.

- W (au niveau du PK 172,900) d'après les niveaux mesurés à l'échelle de Weil.

TEILABSCHNITT 2: MÄRKKT - BREISACH (RH-KM 174,000 - 224,800)

In diesem Bereich wird der Rhein geprägt durch den parallel verlaufenden Rhein-Seitenkanal (Grand Canal d'Alsace), der oberhalb des Wehrs Märkt abzweigt und erst nach ca. 53 km bei Breisach wieder einmündet. Die Wasserstände im sog. "Restrhein" sind abhängig von der Abflussmenge, die für den Betrieb der Kraftwerke am Seitenkanal entnommen wird. Der Abschnitt umfasst die Strecke von unterhalb des Wehrs Märkt bis zum Kulturwehr Breisach, für die Berechnung wurde er noch einmal in drei Teilmodelle untergliedert.

Vom UW des Wehrs bis zum Beginn des ersten Teilmodells Märkt – Neuenburg (es reicht von Rh-km 174,400 - 199,500) wurde auf Grund der Stauwirkung ein horizontal verlaufender Wasserspiegel in Höhe des ermittelten Anfangs-Wasserstandes angenommen. Die hydraulischen Randbedingungen des Modells sind:

- Q (bei Rh-km 174,400) aus Schlüsselkurve Pegel Rheinweiler;
- W aus Pegel Rheinweiler (bei Rh-km 186,180);
- W aus Pegel Neuenburg (bei Rh-km 199,500).

Daran schließen sich an, das Teilmodell Neuenburg - Hartheim (Rh-km 199,500 - 214,200) mit den Randbedingungen:

- Q (bei Rh-km 199,500) aus Schlüsselkurve Neuenburg;
- W aus Pegel Neuenburg (bei Rh-km 199,500);
- W aus Pegel Hartheim (bei Rh-km 214,200),
- und das Teilmodell Hartheim - Breisach (Rh-km 214,200 - 224,800) mit folgenden Randbedingungen:
- Q (bei Rh-km 214,200) aus Schlüsselkurve Pegel Hartheim;
- W aus Pegel Hartheim (bei Rh-km 214,200);
- W aus Pegel Kapfenhod (bei Rh-km 218,960);
- W aus Pegel Wehr Breisach OW (bei Rh-km 224,800).

TRONÇON 2: MÄRKKT - BREISACH (PK 174,000 - 224,800)

Le Grand Canal d'Alsace résulte d'une dérivation du Rhin qui coule parallèlement au lit majeur depuis l'amont de l'échelle de Märkt jusqu'à Breisach près de 53 km en aval. La ligne d'eau du « Rhin naturel » est fonction du débit d'alimentation prélevé pour les centrales électriques. Le tronçon entre l'aval de l'échelle de Märkt et le barrage agricole de Breisach a été subdivisé en 3 modèles.

La ligne d'eau entre l'aval de l'échelle de Märkt et le premier modèle Märkt - Neuenburg (entre les PK 174,400 et 199,500) est considérée comme étant horizontale du fait de la retenue de Kembs. Les conditions aux limites du modèle sont les suivantes :

- Q (au PK 174,400) par la courbe de tarage de l'échelle de Rheinweiler ;
- W à l'échelle de Rheinweiler (PK 186,180)
- W à l'échelle de Neuenburg (PK 199,500).

Les conditions aux limites du second modèle entre Neuenburg et Hartheim (PK 199,500 à 214,200) sont les suivantes :

- Q (au PK 199,500) par la courbe de tarage de l'échelle de Neuenburg ;
- W à l'échelle de Neuenburg (PK 199,500) ;
- W à l'échelle de Hartheim (PK 214,200).
- Le troisième modèle entre Hartheim et Breisach (PK 214,200 à 224,800) respecte les conditions aux limites suivantes :
- Q (au PK 214,200) par la courbe de tarage de l'échelle de Hartheim ;
- W à l'échelle de Hartheim (PK 214,200) ;
- W à l'échelle de Kapfenhod (PK 218,960) ;
- W à l'échelle de Breisach (PK 224,800).

TEILABSCHNITT 3: BREISACH - BURKHEIM (RH-KM 224,900 - 234,800)

Dieser und die nachfolgenden Abschnitte bis Straßburg umfassen den Bereich der sog. „Schlingenlösung“, d. h. die zugehörigen Schleusen- und Kraftwerksanlagen liegen jeweils an eigens angelegten Kanälen. Der Abschnitt reicht vom UW des Wehrs Breisach bis zum Oberwasser (OW) des Wehrs Burkheim (auch als Wehr Marckolsheim bezeichnet). Eine exakte Berechnung des Bereichs im Unterwasser (UW) des Kulturwehrs Breisach (von Rh-km 224,900 - 226,400) ist wegen fehlender Daten über Wasserstände bzw. den Zufluss aus dem Rhein-Seitenkanal (Grand Canal d'Alsace) nicht möglich. Deshalb wurde vom UW des Wehrs bis zur Einmündung des Seitenkanals bei Rh-km 226,500 auf Grund des Rückstaus durch die Einmündung ein horizontaler Wasserspiegel angenommen. Die Wasserspiegel an der Einmündung wurden aus den berechneten Randwerten des anschließenden numerischen Modells linear extrapoliert.

Als dessen Randbedingungen wurden angesetzt:

- Q (bei Rh-km 226,500) aus Schlüsselkurve Pegel Breisach;
- W aus Pegel Breisach (bei Rh-km 227,500);
- W aus Pegel Burkheim (bei Rh-km 234,300).

Vom Pegel Burkheim, der im Staubereich des Wehrs liegt, bis zum Abschnittsende wurde ein horizontal verlaufender Wasserspiegel angenommen.

TEILABSCHNITT 4: BURKHEIM - WEISWEIL (RH-KM 234,900 - 249,200)

Dieser Bereich umfasst die Strecke zwischen den Wehren Burkheim und Rheinau (in Höhe des rechtsrheinischen Weisweil). Da in diesem Abschnitt keine ausreichenden Abflussdaten - weder für den Seitenkanal noch den Restrhein - vorlagen, war eine exakte Berechnung der Wasserspiegel nicht möglich. Sie wurden anhand von Pegelaufzeichnungen sowie der Einbeziehung verschiedener Wasserspiegelfixierungen bzw. -ermittlungen - wie nachfolgend beschrieben - bestimmt.

Die Tagesmittelwerte wurden unter der Annahme eines strömenden Abflusses (Sohlgefälle = Energieli-

TRONÇON 3: BREISACH – BURKHEIM (PK 224,900 – 234,800)

Ce tronçon et ceux qui vont suivre jusqu'à Strasbourg englobe les aménagements dits « en feston », dans lesquels l'eau du Rhin est dérivée dans un canal d'aménée comportant la centrale et l'écluse. Ce tronçon s'étend de l'aval de l'échelle de Breisach jusqu'à l'amont de l'échelle de Burkheim (parfois appelée échelle de Marckolsheim). Un calcul précis à l'aval du barrage agricole de Breisach (entre PK 224,900 et 226,400) n'a pas été réalisé faute d'informations concernant les niveaux et débits sur le Grand Canal d'Alsace. C'est pourquoi il a été admis une ligne d'eau horizontale entre l'aval de l'échelle et la confluence du Grand Canal au PK 226,500 en raison du reflux occasionné par cette confluence. La ligne d'eau au niveau de la confluence a été déterminée par extrapolation linéaire des valeurs calculées de part et d'autre.

Les conditions aux limites suivantes ont été adoptées :

- Q (au PK 226,500) par la courbe de tarage de l'échelle de Breisach ;
- W à l'échelle de Breisach (PK 227,500) ;
- W à l'échelle de Burkheim (PK 234,300).

Une ligne d'eau horizontale a été admise entre l'échelle de Burkheim, située dans la zone de reflux du barrage, et la fin du tronçon.

TRONÇON 4: BURKHEIM – WEISWEIL (PK 234,900 – 249,200)

Ce tronçon s'étend entre les échelles de Burkheim et de Rheinau (à hauteur de Weisweil en rive droite). Un calcul précis de la ligne d'eau n'a pas été réalisé faute d'informations concernant les débits dans le Rhin naturel et dans le bief. Les niveaux ont été déterminés à l'aide des historiques hydrométriques et de campagnes de mesures comme suit.

Les moyennes journalières sont évaluées dans l'hypothèse d'un courant turbulent (pente du lit =

niengefälle) und der Berücksichtigung zweier fester Schwellen abschnittsweise folgendermaßen ermittelt:

- für die Wasserstände vom UW des Wehrs Burkheim (Rh-km 234,900) bis zur Sohlschwelle Jechtingen (bei Rh-km 238,000) wurde ein mittleres Sohlgefälle bestimmt und die Werte linear vom Ausgangswert OW Schwelle extrapoliert;
- die Wasserstände an OW und UW der Schwelle Jechtingen sind ab dem 01.07.1999 bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes in Pegelaufzeichnungen dokumentiert, für die Zeit davor wurden sie in Anlehnung an die vorliegenden Daten bestimmt;
- zwischen den Schwellen Jechtingen und Sasbach (bei Rh-km 240,400) wurden die Zwischenwerte linear interpoliert;
- für den UW-Stand der Schwelle Sasbach lagen Pegelaufzeichnungen von 01.01.1986 - 31.10.1990 und 01.07.1996 - 31.08.1999 vor, für den übrigen Zeitraum wurden sie in Abhängigkeit von den anderen Daten bestimmt;
- die Wsp-Werte von der Schwelle Sasbach bis zum Pegel Wyhl (bei Rh-km 242,700) und von dort weiter bis zum Pegel Weisweil (bei Rh-km 248,700) wurden linear interpoliert, für diese beiden Pegel standen vollständige Aufzeichnungen über den gesamten Betrachtungszeitraum zur Verfügung;
- im weiteren Verlauf bis zum Abschnittsende am OW Wehr Rheinau wurde auf Grund der Stauwirkung ein horizontaler Wasserspiegel angesetzt.

TEILABSCHNITT 5: WEISWEIL – OTTENHEIM (RH-KM 249,300 - 268,600)

Dieser Abschnitt erstreckt sich vom UW des Wehrs Rheinau bis zum OW des Wehrs Gerstheim (beim rechtsrheinischen Ottenheim). Wegen fehlender hydrologischer Randbedingungen war hier eine Berechnung der Wasserstände erst ab dem OW des Pegels Kappel (Rh-km 260,900) möglich. Für die übrige Strecke wurden sie unter Auswertung der vorliegenden Grundlagen (Pegelaufzeichnungen, Wasserspie-

perte de charge) et en tenant compte de deux seuils noyés de la manière suivante :

- la ligne d'eau entre l'aval de l'échelle de Burkheim (PK 234,900) et le seuil noyé de Jechtingen (PK 238,000) a été estimée par interpolation linéaire de la pente moyenne du lit à partir du niveau d'eau au droit du seuil ;
- des historiques des niveaux d'eau amont et aval du seuil de Jechtingen existent depuis le 01.07.1999, l'évolution antérieure a été expertisée 'a l'aide des données existantes ;
- une interpolation linéaire a été effectuée entre les seuils de Jechtingen et de Sasbach (autour du PK240,400) ;
- des historiques de mesure existent pour le niveau aval du seuil de Sasbach pour les périodes 1986 - 31.10.1990 et 01.07.1996 - 31.08.1999. Les autres intervalles ont été tranchés sur la base de données différentes ;
- la ligne d'eau entre le seuil de Sasbach et l'échelle de Weisweil (PK 248,700) en passant par l'échelle de Wyhl (PK 242,700) a été déterminée par interpolation linéaire des données hydrométriques disponibles sur l'ensemble de la période d'étude ;
- Une ligne d'eau horizontale a été mise en place sur le dernier secteur jusqu'à l'amont du barrage de Rhinau pour cause de reflux.

TRONÇON 5:WEISWEIL – OTTENHEIM (PK 249,300 – 268,600)

Ce tronçon s'étend entre le secteur aval du barrage de Rhinau et l'amont du barrage de Gerstheim (Ottenheim en rive droite). La modélisation n'a pu être effectuée à l'amont de l'échelle de Kappel (PK 260,900) faute de données suffisantes. Dans ce secteur, la ligne d'eau a dû être estimée d'après les informations existantes (historiques hydrométriques, campagnes de mesure, résultats de modèles

gelfixierungen sowie Wasserspiegellagen aus vorliegenden Modellrechnungen) bestimmt.

Die Tagesmittelwerte wurden unter der Annahme strömenden Abflusses (Sohlgefälle = Energieliniengefälle) und der Berücksichtigung von drei festen Schwellen abschnittsweise folgendermaßen ermittelt:

- für die gesamte Strecke wurden mittlere Sohlgefälle bestimmt und die Wasserstände, ausgehend von den Pegelwerten Rust (bei Rh-km 254,200) bzw. den Randhöhen bei Rh-km 260,400 aus dem angrenzenden numerischen Teilmodell linear extrapoliert;
- die Wasserspiegeldifferenzen zwischen OW und UW der drei Sohlschwellen (bei Rh-km 251,500, 253,630 und 256,520) wurden jeweils aufgrund von Auswertungen bekannter Wasserspiegellagen und Pegelaufzeichnungen bestimmt.

Das numerische Teilmodell Rheinau – Ottenheim umfasst den Bereich zwischen Rh-km 260,400 und Rh-km 267,900. Ihm zu Grunde liegen die Randbedingungen:

- Q (bei Rh-km 260,400) aus Schlüsselkurve Pegel Kappel;
- W aus Pegel Kappel (bei Rh-km 260,900);
- W aus Pegel Nonnenweier (bei Rh-km 267,900).

Auf Grund der Rückstauwirkung wurde oberhalb des Wehrs Gerstheim zwischen Rh-km 268,000 und dem Abschnittsende ein horizontaler Wasserspiegelverlauf in Höhe der aufgezeichneten Wasserstände am Pegel Nonnenweier angenommen.

TEILABSCHNITT 6: OTTENHEIM - STRAßBURG (RH-KM 268,700 - 284,000)

Auch in diesem Abschnitt, von unterhalb des Wehrs Gerstheim bis oberhalb des Wehrs Straßburg, war eine Berechnung der Wasserstände wegen fehlender hydrologischer Randbedingungen nicht möglich. Für den gesamten zu untersuchenden Zeitraum standen lediglich die Aufzeichnungen der W-Pegel Ottenheim (bei Rh-km 270,600) und Meissenheim (bei Rh-km 275,000) zur Verfügung, außerdem ab dem 01.08.1992 zusätzliche Aufzeichnungen für den W-Pegel Altenheim (Rh-km 280,250). Zudem lagen erst

ultérieurs).

Les moyennes journalières sont évaluées dans l'hypothèse d'un courant turbulent (pente du lit = perte de charge) et en tenant compte de deux seuils noyés de la manière suivante :

- la ligne d'eau a été estimée sur tout le tronçon par interpolation linéaire de la pente moyenne du lit à partir du niveau d'eau à l'échelle de Rust (PK 254,200) et au PK 260,400 avec les résultats du modèle numérique attendant ;
- Les différences de niveau aval – amont pour les trois seuils (PK 251,500, 253,630 et 256,520) ont été estimées au regard des historiques d'observation disponibles.

Le modèle numérique Rheinau – Ottenheim concerne le secteur du PK 260,400 au PK 267,900 avec les conditions aux limites suivantes :

- Q (au PK 260,400) par la courbe de tarage de l'échelle de Kappel ;
- W à l'échelle de Kappel (PK 260,900) ;
- W à l'échelle de Nonnenweier (PK 267,900).

Une ligne d'eau horizontale a été admise dans la zone de reflux en secteur amont du barrage de Gerstheim, entre le PK 268,000 et la fin du tronçon à hauteur de l'échelle de Nonnenweier.

RONÇON 6: OTTENHEIM – STRASBOURG (PK 268,700 – 284,000)

Le calcul de la ligne n'a pu être réalisé faute de conditions aux limites suffisantes entre les retenues de Gerstheim et de Strasbourg. Les seules données sur la période d'étude étaient constituées par les historiques hydrométriques des échelles de Ottenheim (PK 270,600) et de Meissenheim (PK 275,000) ainsi que de l'échelle de Altenheim à compter du 01.08.1992. Les caractéristiques du lit n'étaient pas disponibles à l'amont du PK 272,400. Dans ce secteur comme sur le tronçon précédent, la

ab Rh-km 272,400 überhaupt Geometriedaten vor. So wurden für die gesamte Strecke die Wasserspiegel wie schon in den vorangegangenen Teilabschnitten unter Betrachtung der vorliegenden Pegelaufzeichnungen und Wasserspiegelfixierungen sowie Wasserspiegellagen aus vorliegenden Modellrechnungen - wie nachfolgend beschrieben - bestimmt.

Die Tagesmittelwerte wurden auch hier wieder unter der Annahme strömenden Abflusses (Sohlgefälle = Energieliniengefälle) sowie der Berücksichtigung von zwei festen Sohlschwellen abschnittsweise ermittelt:

- für die Strecke bis zum Pegel Meissenheim wurden mittlere Sohlgefälle (analog des Gefälles zwischen den Pegeln Meissenheim und Altenheim) bestimmt und die Wasserspiegellagen ausgehend von den aufgezeichneten Pegelwerten linear extrapoliert;
- die Wasserspiegeldifferenzen zwischen OW und UW der Schwellen (bei Rh-km 270,400 und 272,000) wurden aufgrund von Auswertungen bekannter Wasserspiegellagen und der Pegelaufzeichnungen Ottenheim und Meissenheim bestimmt,
- die Wasserstände zwischen den Pegeln Meissenheim und Altenheim wurden für den Zeitraum ab 01.08.1992 bis Ende 2002, für den vollständige Aufzeichnungen vorlagen, linear interpoliert und die Wasserspiegel von 1986 bis 31.07.1992 dementsprechend bestimmt;
- unterhalb des Pegels Altenheim bis zum OW Wehr Straßburg wurden die Zwischenwerte für den gesamten Zeitraum extrapoliert.

TEILABSCHNITT 7: STRAßBURG - GAMBSHEIM (RH-KM 284,100 - 309,100)

Dieser Abschnitt reicht vom UW des Wehrs Straßburg bis zum OW des Wehrs Gamsheim. Die Wasserspiegelwerte bis zu Rh-km 291,600 (Einmündung des Seitenkanals Straßburg) wurden ausgehend von den Randwerten des angrenzenden numerischen Teilmodells linear extrapoliert.

Dem numerischen Modell Kehl – Gamsheim liegen folgende Randbedingungen zu Grunde:

- Q (bei Rh-km 291,600) aus Schlüsselkurve

lignee d'eau a dû être estimée d'après les informations existantes (historiques hydrométriques, campagnes de mesure, résultats de modèles ultérieurs) comme suit .

Les moyennes journalières sont évaluées dans l'hypothèse d'un courant turbulent (pente du lit = perte de charge) et en tenant compte de deux seuils noyés de la manière suivante :

- la pente moyenne du lit a été utilisée jusqu'à l'échelle de Meissenheim (par analogie avec la pente entre les échelles de Meissenheim et de Altenheim) a permis de fixer une ligne d'eau par extrapolation linéaire à partir des données hydrométriques existantes ;
- les différences de niveau entre amont et aval pour les seuils noyés (PK 270,400 et 272,000) ont été déterminés par comparaison avec des situations connues et en utilisant les données hydrométriques des stations de Ottenheim et Altenheim),
- La ligne d'eau entre les échelles de Meissenheim et Altenheim ont été interpolées linéairement sur la période de 01.08.1992 et fin 2002, sur laquelle les données étaient disponibles, ce qui a permis de déduire les valeurs entre 1986 et le 31.07.1992.
- La ligne d'eau entre l'aval de l'échelle de Altenheim et le barrage de Strasbourg a été extrapolée sur toute la période d'étude.

TRONÇON 7: STRASBOURG - GAMBSHEIM (PK 284,100 – 309,100)

Ce tronçon s'étend entre le secteur aval du barrage de Strasbourg et l'amont du barrage de Gamsheim. La ligne d'eau jusqu'au PK 291,600 (confluence du canal latéral de Strasbourg) a été obtenue par extrapolation linéaire des données calculées dans le modèle numérique limitrophe.

Le modèle numérique Kehl – Gamsheim utilise les conditions aux limites suivantes :

- Q (au PK 297,600) par la courbe de tarage

Pegel Kehl-Kronenhof;

- W aus Pegel Hafenmole Kehl (bei Rh-km 297,600);
- W aus Pegel Freistett (bei Rh-km 307,700).

TEILABSCHNITT 8: GAMBSHEIM - IFFEZHEIM (RH-KM 309,200 - 334,000)

Der Teilabschnitt erstreckt sich vom UW des Wehrs Gamsheim bis zum OW des Wehrs Iffezheim. Sowohl diese als auch die nachfolgende Stauhaltung ist durch seitliche Dämme kanalisiert, Wehr, Kraftwerk und Schleuse liegen jeweils im Rhein. Die Wasserspiegelwerte bis zu Rh-km 312,000 (Einmündung des Seitenkanals Gamsheim) wurden ausgehend von den Randwerten des angrenzenden Teilmodells linear extrapoliert.

Das numerische Modell endet am Pegel Iffezheim/OW. Ihm liegen folgende Randbedingungen zu Grunde:

- Q (bei Rh-km 312,000) aus Schlüsselkurve Pegel Grauelsbaum,
- W aus Pegel Helmlingen (bei Rh-km 312,800);
- W aus Pegel Grauelsbaum (bei Rh-km 316,300);
- W aus Pegel Hügelsheim (bei Rh-km 331,000);
- W aus Pegel Iffezheim/OW (bei Rh-km 333,700).

Die Wasserspiegel zwischen Pegel Iffezheim und dem Wehr Iffezheim wurden als horizontal verlaufend angesetzt.

TEILABSCHNITT 9: IFFEZHEIM - MAXAU (RH-KM 334,100 - 362,300)

Der Teilabschnitt reicht von unterhalb der letzten Rheinstaustufe Iffezheim bis zum Ende der Untersuchungsstrecke bei Karlsruhe-Maxau. Der Rhein ist ab hier ein freifließendes Gewässer, die Sohlbildung unterhalb von Iffezheim wird durch Geschiebezugabe beeinflusst. Die Wasserspiegelwerte zwischen UW Wehr und Rh-km 336,200 (Einmündung des Schleusenkanals) wurden ausgehend von den Randwerten des angrenzenden Teilmodells linear extrapoliert.

de l'échelle de Kehl - Kronenhof ;

- W à l'échelle de Kehl II (PK 297,600) ;
- W à l'échelle de Freistett (PK 307,700).

TRONÇON 8: GAMBSHEIM - IFFEZHEIM (PK 309,200 – 334,000)

Ce tronçon s'étend entre l'aval de la chute de Gamsheim et l'amont de la chute de Iffezheim. Les deux barrages sont canalisés par des digues latérales, le barrage, l'usine hydroélectrique et les écluses sont construits dans le lit du fleuve. La ligne d'eau jusqu'au PK 312,000 (confluence du canal de dérivation de Gamsheim) a été obtenue par extrapolation linéaire des données calculées dans le modèle numérique limitrophe.

La modélisation numérique s'achève à l'amont de l'échelle de Iffezheim. Il utilise les conditions aux limites suivantes :

- Q (au PK 312,000) par la courbe de tarage de l'échelle de Grauelsbaum ;
- W à l'échelle de Helmlingen (PK 312,800) ;
- W à l'échelle de Grauelsbaum (PK 316,300) ;
- W à l'échelle de Hügelsheim (PK 331,000) ;
- W à l'échelle de Iffezheim - amont (PK 333,700).

La ligne d'eau entre l'échelle de Iffezheim et la chute de Iffezheim a été considérée comme étant horizontale.

TRONÇON 9: IFFEZHEIM - MAXAU (PK 334,100 – 362,300)

Ce tronçon s'étend entre l'aval de la dernière chute sur le Rhin à Iffezheim et la fin du secteur d'étude à Karlsruhe – Maxau. Le Rhin s'écoule à courant libre à partir de Iffezheim. Le lit du fleuve est stabilisé par des apports de cailloux calibrés à l'aval de Iffezheim. La ligne d'eau depuis l'aval de la chute jusqu'au PK 336,200 (confluence du canal de navigation) a été obtenue par extrapolation linéaire des données calculées dans le modèle numérique limitrophe.

Dem numerischen Modell liegen folgende Randbedingungen zu Grunde:

- Q (bei Rh-km 336,200) aus Schlüsselkurve Pegel Iffezheim/UW;
- W aus Pegel Plittersdorf (bei Rh-km 340,220);
- W aus Pegel Neuburgweier (bei Rh-km 354,110);
- W aus Pegel Maxau (bei Rh-km 362,320).

RHEIN-SEITENKANÄLE

Die Rhein-Seitenkanäle verlaufen jeweils parallel zum Flussbett, dienen als Verkehrswege für die Schifffahrt und in bzw. an ihnen liegen die Staustufen und die dazugehörigen Kraftwerke. Die Abflüsse in den Kanälen werden durch den Kraftwerksbetrieb geregelt, die vorhandenen Aufzeichnungen sind daher an dessen Bedürfnisse angepasst und zur Ermittlung der Tageswasserspiegellagen nur unzureichend geeignet.

(a) Grand Canal d'Alsace (Rh-km 173,800 - 226,300)

Der Kanal zweigt bei Märkt ab und verläuft bis Breisach über ca. 53 km auf französischem Territorium neben dem sog. Restrhein. In ihm befinden sich die Staustufen Kembs, Ottmarsheim, Fessenheim und Vogelgruen. Die Tagesmittelwerte für die Wasserspiegellagen im Ober- und Unterlauf des Kanals wurden, ausgehend von den in den Teilabschnitten 1 bzw. 3 ermittelten Werten an Abzweig bzw. Einmündung und unter Ansatz eines analog der Sohlneigung verlaufenden Wasserspiegelgefälles bestimmt. Innerhalb der Kanalstauhaltungen wurde die jeweilige Normalstauhöhe im Unterwasser angesetzt und die Wasserstände wieder unter der Annahme Wasserspiegelgefälle = Sohlgefälle ermittelt.

Ebenso erfolgte die Ermittlung der Wasserspiegellagen in den nachstehend aufgeführten Schleusenkanälen, ausgehend von den bekannten Werten an Abzweig bzw. Einmündung. Die Wasserspiegelgefälle im Ober- und Unterwasser der Schleusen wurden jeweils aus den zur Verfügung stehenden Unterlagen bestimmt.

Les conditions aux limites suivantes ont été adoptées :

- Q (au PK 336,200) par la courbe de tarage de l'échelle de Iffezheim - amont ;
- W à l'échelle de Plittersdorf (PK 340,220) ;
- W à l'échelle de Neuburgweier (PK 354,110) ;
- W à l'échelle de Maxau (PK 362,320).

CANAUX LATÉRAUX DU RHIN

Les canaux latéraux ont été construits parallèlement au cours du lit majeur pour assurer la navigation. Les centrales hydroélectriques et les écluses ont été construites le long de ces ouvrages. Le débit des canaux est fonction de la production d'électricité et est suivi par des relevés hydrométriques, qui ne permettent de ce fait pas nécessairement de calculer les niveaux d'eau à pas de temps journalier.

Grand Canal d'Alsace (PK 173,800 – 226,300)

Le canal dérive du Rhin au niveau de Märkt et parcourt plus de 53 km sur le territoire français parallèlement au Rhin naturel. Les centrales de Kembs, Ottmarsheim, Fessenheim et Vogelgruen ont été construites sur son cours. Les valeurs journalières de la ligne d'eau dans les secteurs amont et aval du Canal ont été déterminés d'après les résultats acquis sur les tronçons 1 et 3 en considérant et en considérant la pente du radier. Sur les secteurs des écluses, les cotes avales et la pente du radier ont permis d'évaluer la ligne d'eau en faisant l'hypothèse que la ligne d'eau et le fond du canal présentent la même déclivité.

La même démarche a été effectuée dans les biefs suivants à partir des cotes connues dans les zones de dérivation et de confluence. La chute entre les canaux d'amenée et de fuite a pu être déterminée d'après les informations disponibles.

- | | |
|--|--|
| <p>(b) Schleusenkanal Marckolsheim (Rh-km 234,400-241,900)
 Abzweig: vor dem Wehr Burkheim (Teilabschnitt 3)
 Einmündung: im Teilabschnitt 4 (Burkheim – Weisweil)</p> | <p>Chute de Marckolsheim (PK 234,400 – 241,900)
 Dérivation: zone amont du barrage de Burkheim (tronçon 3)
 Confluence : tronçon 4 (Burkheim – Weisweil)</p> |
| <p>(c) Schleusenkanal Rheinau (Rh-km 249,000-259,900)
 Abzweig: vor dem Wehr Rheinau (Teilabschnitt 4)
 Einmündung: im Teilabschnitt 5 (Weisweil – Ottenheim)</p> | <p>Chute de Rhinau (PK 249,000 – 259,900)
 Dérivation: zone amont du barrage de Rhinau (tronçon 4)
 Confluence : tronçon 5 (Weisweil - Ottenheim)</p> |
| <p>(d) Schleusenkanal Gerstheim (Rh-km 268,300-274,100)
 Abzweig: vor dem Wehr Gerstheim (Teilabschnitt 5)
 Einmündung: im Teilabschnitt 6 (Ottenheim – Straßburg)</p> | <p>Chute de Gerstheim (PK 268,300 – 274,100)
 Dérivation: zone amont du barrage de Gerstheim (tronçon 5)
 Confluence : tronçon 6 (Ottenheim - Straßburg)</p> |
| <p>(e) Schleusenkanal Straßburg (Rh-km 283,100-291,500)
 Abzweig: vor dem Wehr Straßburg (Teilabschnitt 6)
 Einmündung: im Teilabschnitt 7 (Straßburg – Gamsheim) bei Kehl-Kronenhof</p> | <p>Chute de Strasbourg (PK 283,100 – 291,500)
 Dérivation: zone amont du barrage de Strasbourg (tronçon 6)
 Confluence : tronçon 7 (Strasbourg - Gamsheim) au niveau de Kehl - Kronenhof</p> |
| <p>(f) Schleusenkanal Gamsheim (Rh-km 308,000-312,000)
 Abzweig: im Teilabschnitt 7
 Einmündung: im Teilabschnitt 8 (Gamsheim – Iffezheim)</p> | <p>Chute de Gamsheim (PK 308,000 – 312,000)
 Dérivation: tronçon 7
 Confluence : tronçon 8 (Gamsheim - Iffezheim)</p> |
| <p>(g) Schleusenkanal Iffezheim (Rh-km 332,800-335,600)
 Abzweig: im Teilabschnitt 8
 Einmündung: im letzten Teilabschnitt 9, der sich bis Karlsruhe - Maxau erstreckt.</p> | <p>Chute de Iffezheim (PK 332,800 – 335,600)
 Dérivation: tronçon 8
 Confluence : tronçon 9, qui se prolonge jusqu'à Karlsruhe - Maxau</p> |

4.5 ERGEBNISSE

Die modellinterne Berechnung basiert auf Werten, die zumeist alle 15 Minuten berechnet wurden. Sie wurden für unterschiedliche Situationen verifiziert

4.5 RESULTATS

Le logiciel effectuée en règle générale des calculs à pas de temps de 15 minutes. Les résultats du calcul ont été validés pour différentes situations et ont

und aus ihnen Tagesmittelwerte für die Abflussjahre 1986 - 2002 gewonnen. Die Ergebnisse der Wasserspiegellagenbestimmung für Hauptstrom und Seitenkanäle im Zeitraum vom 01.01.1986 bis 31.12. 2002 sind sowohl als Tagesmittelwerte im Abstand von zumeist 100 m aufgelistet, wie auch als Tagesminimum und -maximum für die mit den 1-D-Modellen berechneten Strecken. In den Abbildungen 4.5.1 und 4.5.2 ist die berechnete Wasserspiegellage am 20.10.1986 exemplarisch für 2 Abschnitte im Norden und Süden des Untersuchungsgebietes dargestellt.

permis l'extraction des moyennes journalières pour la période de 1986 à 2002. Les valeurs moyennes ainsi que les maxima et minima journaliers des lignes d'eau dans le Rhin naturel et dans les canaux latéraux entre le 01.01.1986 et le 31.12.2002 sont disponibles tous les 100 mètres sur les secteurs traités par la modélisation numérique monodimensionnelle. Un exemple de ligne d'eau calculée au 20.10.1986 est présentée dans les figures 4.5.1 et 4.5.2 pour deux secteurs au Nord et au Sud du domaine d'étude.



Abb. 4.5.1: Berechneter Wasserspiegel im Teilabschnitt 9 Iffezheim - Maxau (Rh-km 334,100 - 362,300) am 20.10.1986, Talweg, Pegel Plittersdorf, Neuburgweier und Maxau

Figure 4.5.1: ligne d'eau calculée sur le tronçon 9 Iffezheim - Maxau (PK 334,100 - 362,300) au 20.10.1986, Talweg, échelles de Plittersdorf, Neuburgweier et Maxau.

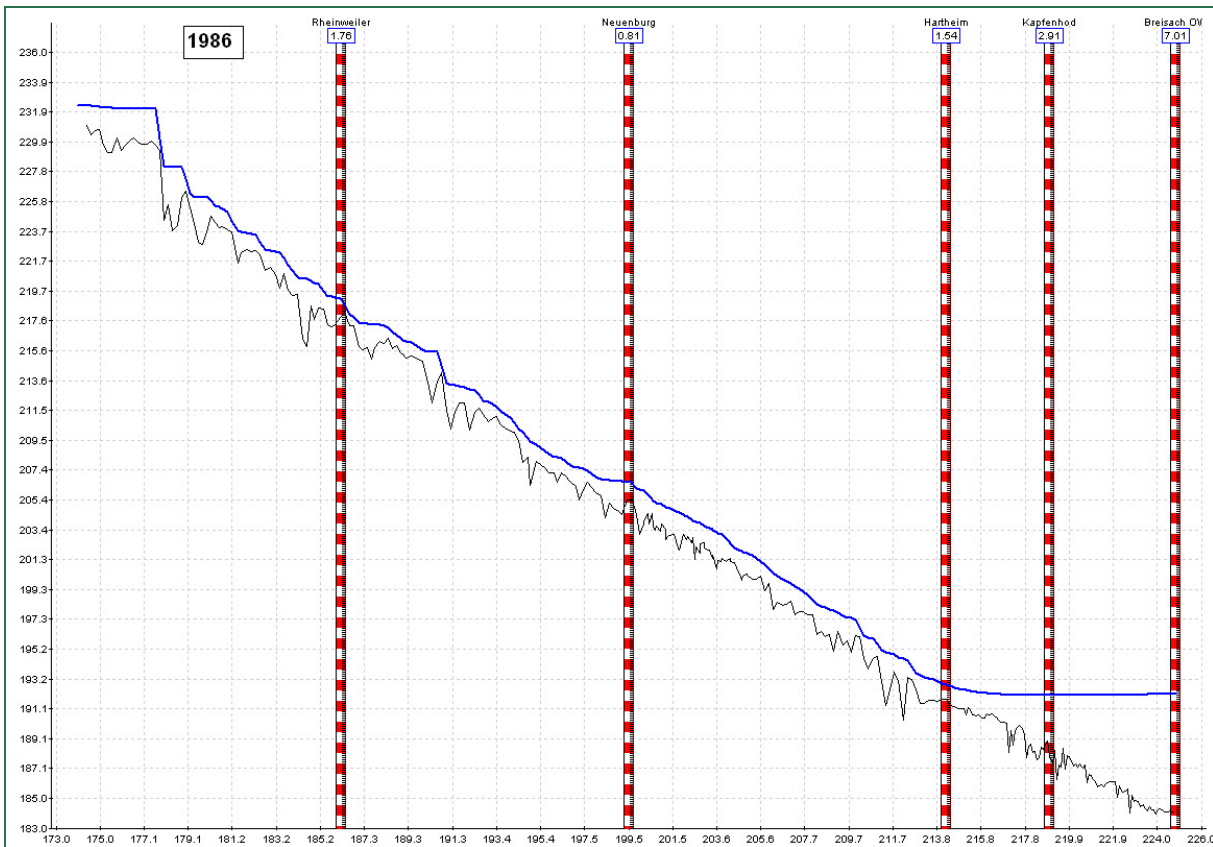


Abb. 4.5.2: Berechneter Wasserspiegel im Teilabschnitt 2 Märkt - Breisach (Rh-km 174,000 - 224,800) am 20.10.1986, Talweg, Pegel Rheinweiler, Neuenburg, Hartheim, Karpfenhod und Breisach OW
 Figure 4.5.2: ligne d'eau calculée sur le tronçon 2 Märkt - Neuf-Breisach (PK 174,000 - 224,800) au 20.10.1986, Talweg, échelles de Rheinweiler, Neuenburg, Hartheim, Karpfenhod et Breisach - amont.

5 Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Ruissellement global et précipitations efficaces

5.1 AUFGABENSTELLUNG

Zur Bestimmung von Gesamtabflussmenge und flächenhafter Grundwasserneubildung aus Niederschlag wurde das im Auftrag der LUBW am Institut für Hydrologie der Universität Freiburg entwickelte und von der GIT HydroS Consult GmbH erweiterte Modell GWN-BW eingesetzt. Dabei wurde im Rahmen des INTERREG III Projektes MoNit die Parametrisierung des Bodenwasserspeichers im Bereich der unterschiedlichen Naturräume und Staatsgebiete auf Grundlage der jeweils besten flächenhaft verfügbaren Bodendaten vorgenommen. Für den linksrheinischen Teil des Projektgebietes wurden erstmals Simulationen von Bodenwasserhaushalt, aktueller Verdunstung und Sickerwasserbildung mit GWN-BW durchgeführt.

Mit dem Einsatz der Software GWN-BW wurden zwei Zielsetzungen verfolgt. Zum einen die Regionalisierung meteorologischer Eingangsdaten auf Tageswertbasis für die Simulation des Bodenwasserhaushaltes selbst, aber auch für die übrigen Arbeitsgruppen innerhalb des Teilprojektes, insbesondere für die Simulation des Stickstoffaustrages unter landwirtschaftlichen Kulturfleichen sowie für die Regionalisierung der oberirdischen Zuflüsse aus den angrenzenden Einzugsgebieten. Zum anderen die Bereitstellung der flächenhaften Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Bereich des Oberrheingrabens als obere Randbedingung für das numerische Grundwasserströmungsmodell.

Die Ergebnisse wurden in unterschiedlichen zeitlichen Aggregierungsstufen (Tageswerte, Monatswerte, Jahreswerte) im 500 m Raster bereitgestellt. Regionalisierte Klimadaten wurden an die Arbeitsgruppen teilweise auch im 1 km Raster abgegeben, um die zu verarbeitende Datenmenge zu reduzieren. Darüber

5.1 PROBLÈME POSÉ

Le modèle GWN-BW développé à l'université de Freiburg et modifié par la société GIT HydroS Consult GmbH pour la LUBW a été mis en œuvre pour déterminer le ruissellement global et les précipitations efficaces. Pour ce faire, les caractéristiques hydrologiques des différents sols issus de paysages et de nations différents ont été paramétrées dans le cadre du projet INTERREG III MoNit d'après les meilleures données pédologiques disponibles dans chaque pays. Le modèle GWN-BW a été utilisé pour la première fois en rive gauche du Rhin pour calculer le bilan hydrique du sol, l'évapotranspiration réelle et les précipitations efficaces.

La mise en œuvre du logiciel GWN-BW répondait à deux objectifs. Il s'agissait d'une part de régionaliser les données météorologiques d'entrée à pas de temps journalier pour simuler le bilan hydrique du sol à proprement parler, mais également pour assister les autres groupes de travail du projet, notamment la simulation le transfert des nitrates en zones cultivées et la régionalisation des apports en eaux superficielles issus des bassins versants contigus. Il fallait d'autre part calculer les précipitations efficaces pour l'ensemble du fossé rhénan en tant que condition aux limites du modèle numérique hydrodynamique.

Les résultats sont disponibles pour chaque élément d'un maillage carré de 500 m de côté pour différentes unités temporelles (valeurs journalières, mensuelles, annuelles). Certaines données climatiques régionalisées ont été mises à disposition des groupes de travail pour des maillages de 1 km afin

hinaus wurden die langjährigen Mittelwerte der wichtigsten Modellgrößen auch in einer Auflösung vom 250 m verfügbar gemacht.

5.2 METHODIK

GWN-BW ist ein deterministisches, flächendifferenziertes Modell zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und zur Bestimmung der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge. In den Teilmodulen kommen überwiegend physikalisch basierte und konzeptionelle Ansätze zur Beschreibung der an den Vorgängen der Verdunstung und der Sickerwasserbildung beteiligten Prozesse zur Anwendung. Die Berechnung erfolgt auf der Basis von Tagesschritten (die Berechnung der Strahlungsbilanz zumeist auf Stundenbasis), während die räumliche Diskretisierung frei gewählt werden kann.

de réduire le volume de données à traiter. Par ailleurs, les moyennes pluriannuelles des paramètres essentiels du modèle ont été transmises pour des mailles carrées de 250 m.

5.2 MÉTHODE

GWN-BW est un modèle déterministe, qui permet pour chaque élément de surface de calculer l'évapotranspiration réelle, de faire le bilan hydrique du sol et d'évaluer la lame d'eau qui traverse la zone racinaire. Les modules élémentaires prennent en compte des processus physiques et des représentations conceptuelles des mécanismes liés à l'évaporation et à la recharge. Les calculs sont effectués en pas de temps journalier (le bilan du rayonnement est réalisé sur une base horaire), la discrétisation spatiale est à la discrétion de l'utilisateur.

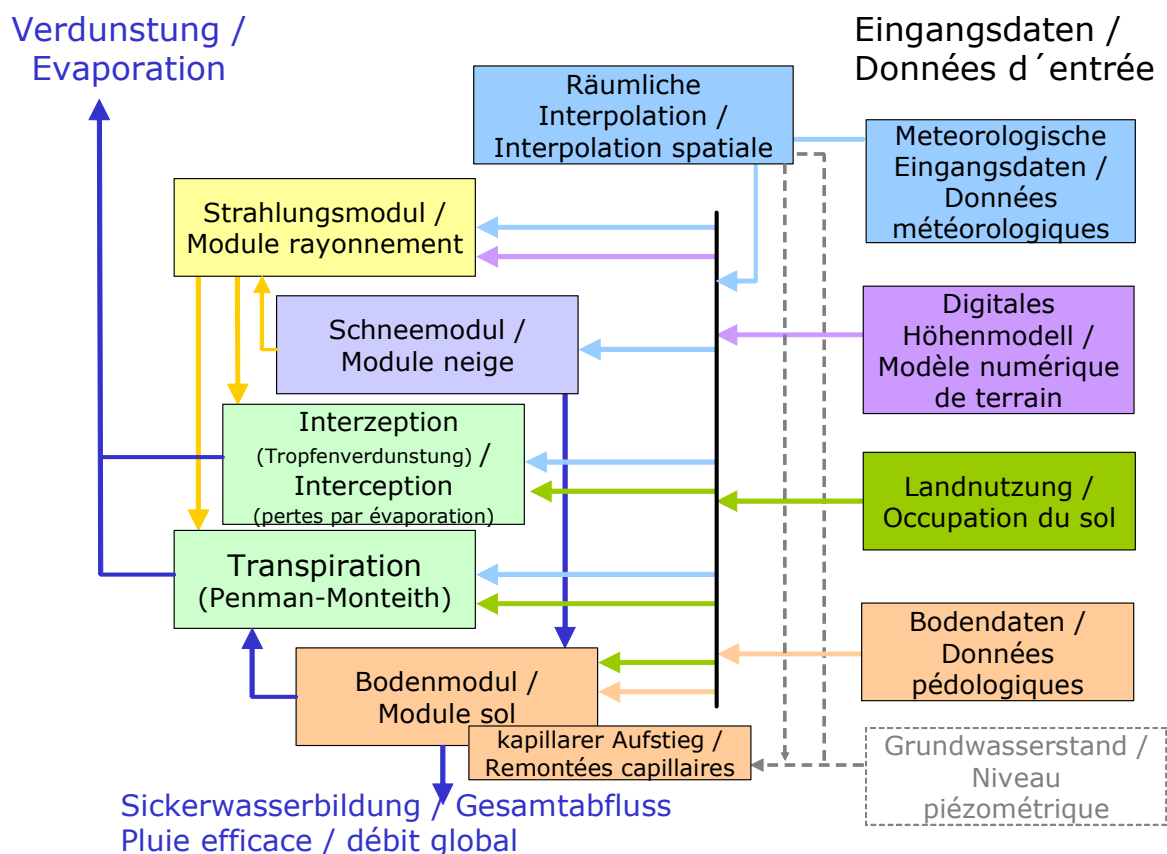


Abb. 5.2.1: Übersicht über die Module des Modells GWN-BW
Figure 5.2.1: Vue d'ensemble des modules du logiciel GWN-BW

Die in Form von Stationswerten vorliegenden meteorologischen Eingangsdaten (Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer und Windstärke) können wahlweise nach verschiedenen Verfahren zu Bestimmung von Distanzgewichten oder in einer Kombination aus der Berücksichtigung von Distanzgewichten und der Höhenabhängigkeit auf die Fläche interpoliert werden. Im Strahlungsmodul wird unter Berücksichtigung topographischer und himmelsmechanischer Gegebenheiten das nutzbare Energieangebot berechnet. Im Schneemodul werden der Schneedeckenaufbau und die Schneeschmelze (Temperatur-Index-Verfahren) simuliert. Das Interzeptionsmodul beschreibt die Interzeption von Niederschlagswasser in mehreren Schichten der Vegetationsdecke und auf versiegelten Flächen. Die Verdunstung aus dem Interzeptionsspeicher erfolgt entsprechend der bestandesinneren Variation der meteorologischen Größen aus jeder Vegetationsschicht mit unterschiedlicher Intensität. Im Transpirationsmodul wird die Pflanzentranspiration nach dem Verfahren von Penman-Monteith berechnet. Dabei wird der Bestandeswiderstand in Abhängigkeit vom Blattflächenindex, dem Bodenfeuchtedefizit und der Lufttemperatur ermittelt. Die Evaporation von schneebedeckten Oberflächen und aus Seen wird ebenfalls über den Penman-Monteith-Ansatz beschrieben. Das Bodenmodul zur Simulation der Auffüllung (durch Niederschlags- und Schneeschmelzwasser) und Entleerung (Transpiration und Perkolation) des Bodenspeichers wurde dem Niederschlag-Abfluss-Modell HBV entlehnt. Aufgrund seines einfachen konzeptionellen Charakters ist es auch für größere Untersuchungsräume auf einer Datengrundlage in kleinem Kartenmaßstab parametrisierbar. Für Flächen mit hohem Grundwasserstand kann der kapillare Aufstieg entsprechend den Angaben der bodenkundlichen Kartieranleitung abgeschätzt werden.

Differentes méthodes peuvent être utilisées pour régionaliser les données météorologiques par station (précipitation, température de l'air, humidité relative, durée d'ensoleillement et force du vent). Ces méthodes permettent de déterminer l'étendue de la zone d'influence de chaque station en y combinant ou non un facteur lié à l'altitude de la station. Le module « rayonnement » détermine la quantité d'énergie disponible en fonction des conditions topographiques et météorologiques. Le module « neige » permet de simuler la constitution du manteau neigeux et la fonte des neiges (méthode basée sur l'indexation des températures). Le module « interception » décrit le phénomène d'interception des eaux de pluie à différents niveaux du couvert végétal et dans le cas des sols imperméabilisés. L'évaporation est calculée séparément pour chaque couche végétale après adaptation de conditions météorologiques spécifiques. Le module « transpiration » simule le phénomène d'évapotranspiration par les plantes d'après la méthode de Penman-Monteith. La résistance à l'évapotranspiration est fonction de l'importance du feuillage, du déficit hydrique du sol et de la température. L'évaporation issue de surfaces enneigées et des plans d'eau est également déterminée par la méthode de Penman-Monteith. Le module « sol » simule le remplissage (sous l'effet des précipitations et de la fonte des neiges) et la vidange (transpiration et percolation) de la réserve en eau du sol. La méthode de calcul a été empruntée au modèle pluie-débit HBV. D'une conception simple, ce modèle peut être adapté à des domaines d'étude très étendus. Dans le cas de nappes profondes, les remontées capillaires peuvent être évaluées conformément aux indications données dans les cartes pédologiques.

5.3.1 METEOROLOGISCHE EINGANGSDATEN

Als meteorologische Eingangsdaten waren Zeitreihen der Parameter Niederschlag, Lufttemperatur (Tagesmittelwerte, teilweise auch Tagesminima und –maxima), relative Luftfeuchtigkeit, Windstärke / Windgeschwindigkeit und tägliche Sonnenscheindauer für den Zeitraum 1985-2002 aus fünf unterschiedlichen Messnetzen verfügbar. Die Anzahl der Stationen von Meteo France (MFR), Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt (DRAF), Deutschem Wetterdienst (DWD), Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg (UMEG) und Meteo Schweiz (MCH) ist in Tabelle 5.3.1 zusammengestellt. Die räumliche Verteilung der Klima- (hellblaue Quadrate) und Niederschlagsstationen (blaue Punkte) geht auch aus Abbildung 5.4.1 hervor. Auffällig ist dabei die deutlich geringere Stationsdichte auf der rund 30 Prozent größeren linksrheinischen Seite. Während das Messnetz des DWD innerhalb des Projektgebietes 125 Niederschlagsstationen (1 Station je 50 km²) und 42 Klimastationen (1 Station je 150 km²) umfasst, befinden sich im Messnetz von Meteo France nur 50 Niederschlagsstationen (1 Station je 150 km²) und 25 Klimastationen (1 Station je 300 km²), darunter allerdings nur sechs, an denen über die Lufttemperatur hinaus weitere Parameter erhoben werden.

5.3.1 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Les données météorologiques comprennent des historiques des précipitations, de la température (moyennes journalières, parfois minima et maxima journaliers), de l'humidité relative, de la force / vitesse du vent et de la durée d'ensoleillement journalière issue de 5 réseaux d'observation différents pour la période entre 1985 et 2002. Le nombre de stations issu de chaque réseau (Météo France (MFR), Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt (DRAF), Deutscher Wetterdienst (DWD), Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg (UMEG) et Meteo Schweiz (MCH)) est indiqué dans le tableau 5.3.1. Les répartitions spatiales des stations climatiques (carrés bleu ciel) et des stations pluviométriques (points bleu foncé) sont indiqués dans la figure 5.4.1. La densité de stations plus faible en rive gauche du Rhin – avec une surface de 30% supérieure – est frappante. Alors que le réseau du DWD comprend 125 stations pluviométriques dans la zone d'emprise (1 station pour 50 km²) et 42 stations climatiques (1 station pour 150 km²), le réseau de Météo France compte seulement 50 pluviomètres (1 station pour 150 km²) et 25 stations climatiques (1 station pour 300 km²), sachant que seules 6 stations enregistrent des paramètres autres que la température.

Tab. 5.3.1: Anzahl der Klima- und Niederschlagsstationen
Tab. 5.3.1: Nombre de stations pluviométriques et climatiques

Messnetz Réseau	Klimastationen Stations climatiques	Niederschlag pluviomètres
MFR	23 / 6 *	52
SRPV (DRAF)	8	8
DWD	65	165
UMEG	11	10
MCH	3	11

* 23 Stationen für Lufttemperatur

Alle aufbereiteten Zeitreihen wurden einer eingehenden Plausibilisierung unterzogen.

5.3.2 PHYSIOGRAPHISCHE EINGANGSDATEN

Die für die Regionalisierung meteorologischer Eingangsdaten und die Berechnung der kurzweiligen Einstrahlung benötigten topographischen Informationen (Geländehöhe, Hangneigung, Exposition) wurden aus den von den Vermessungsämtern der drei beteiligten Staaten bereitgestellten digitalen Geländemodellen abgeleitet. Die räumliche Verteilung unterschiedlicher Landnutzungsklassen basiert auf der Landnutzung des Jahres 2000 (Landsat TM).

Mit Blick auf die Bodendaten muss zwischen dem Oberrheingraben, als dem Anwendungsbereich, für welchen die Simulationsergebnisse des Modells GWN-BW direkt als Randbedingung des numerischen Grundwassermodells verwendet werden soll, und den angrenzenden Einzugsgebieten in Schwarzwald und Vogesen unterschieden werden. Da in den zuletzt genannten Bereichen für das INTERREG III Projekt MoNit primär nur die regionalisierten Wochensummen der Niederschläge weitere Verwendung finden sollen, wurde speziell in den Vogesen eine Simulation auf Grundlage wenig geeigneter Eingangsdaten als vertretbar angesehen. Während die räumliche Auflösung der für das Elsass vorliegenden Bodendaten im Oberrheingraben mit 1 : 100 000 (Baden-Württemberg 1 : 25 000 bis 1 : 50 000) zufriedenstellend ausfällt, musste für die Vogesen auf eine Übersichtskarte im Maßstab 1 : 1 Million zurückgegriffen werden, welche *per se* nur eine sehr beschränkte Auflösung der Bodeneigenschaften erlaubt. Die groben Kenntnisse bezüglich der Wasserkapazität der Böden lassen dort nur begrenzte Ansprüche an die Qualität der Simulationsergebnisse zu.

In Folge der abweichenden Definition der nutzbaren Feldkapazität (nFK) mussten die Werte aus den französischen Teildatensätzen vor ihrer Verwendung als Modelleingangsdaten einer Korrektur unterzogen werden, um sie Werten nach deutscher und schweizerischer Definition vergleichbar zu machen. Das Modell GWN-BW benötigt die nFK

L'ensemble des historiques a fait l'objet d'une validation minutieuse.

5.3.2 DONNÉES PHYSIOGRAPHIQUES

La régionalisation des données météorologiques et le calcul du rayonnement en ondes courtes requéraient l'utilisation de données topographiques (altitudes, pente du terrain, exposition) issues des modèles numériques de terrain fournis par les services géographiques des trois pays partenaires. Les classes d'occupation des sols reflètent l'occupation des sols en l'an 2000 (Landsat TM).

Du point de vue des données pédologiques, il s'agit de distinguer le fossé rhénan, la zone d'étude dans laquelle les résultats du modèle GWN-BW seront utilisés comme conditions aux limites du modèle numérique hydrodynamique, et les bassins versants attenants des Vosges et de Forêt Noire. Seuls les cumuls hebdomadaires des précipitations étant réellement utilisés dans le cadre du projet INTERREG III MoNit sur ces derniers secteurs, une simulation basée sur un nombre restreint de données a été jugée suffisante, notamment dans les Vosges. Si le degré de détail des connaissances disponibles dans la carte des sols à l'échelle 1 : 100.000 pour la partie alsacienne du fossé rhénan s'avérait suffisant (au Bade-Wurtemberg 1 : 50.000 voire 1 : 25 : 000), il en allait autrement dans les Vosges avec une échelle 1 : 1.000.000 trop grossière pour décrire les caractéristiques des sols avec suffisamment de précision. La connaissance trop sommaire des capacités de rétention d'eau des sols grève fortement la qualité des résultats du modèle dans ce secteur.

En raison de définitions différentes de la réserve utile (RU), il fallut mettre en cohérence les valeurs françaises avec les définitions suisses et allemandes avant de les introduire dans le calcul. Le modèle GWN-BW est calé sur des variations de la réserve utile entre les valeurs de pression pF de 1,8 et 4,2 alors que la définition française

als Wassergehalt zwischen pF 1.8 und 4.2, während in Frankreich auf pF 2.8 bis 4.2 Bezug genommen wird.

Für die Abschätzung des kapillaren Aufstieges, welcher neben dem Bodenwassergehalt und der Korngrößenverteilung des Substrates vom Abstand zwischen durchwurzelter Bodenzone und Grundwasserspiegel abhängt, wurde vereinfachend auf den Flurabstand zu einem Stichtag mit geringem aber nicht extrem geringem Grundwasserstand zurückgegriffen.

5.3.3 VALIDIERUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE

Armbruster (2001) führte eine umfangreiche Validierung der simulierten Sickerwassermenge an Lysimeterstandorten in Baden-Württemberg durch, von denen 15 im Oberrheingraben, davon sechs im Projektgebiet liegen. Dabei lagen zwei Drittel der simulierten mittleren Jahreswerte innerhalb eines Fehlerbereiches von ± 10 Prozent und im Querschnitt über alle 20 Standorte hinweg hoben sich die positiven und negativen Abweichungen zwischen Simulation und Messung auf. Ein Vergleich simulierter und beobachteter Abflusshöhen aus Einzugsgebieten von 10 bis 125 km² ergab demgegenüber eine leichte Überschätzung der beobachteten Gesamtabflüsse um durchschnittlich etwa acht Prozent.

Aufgrund der teilweise abweichenden Eingangsdaten (v.a. Bodeninformationen, Niederschlagsdaten) wurde im Rahmen der Projektbearbeitung eine zusätzliche Validierung für ausgewählte Einzugsgebiete in Schwarzwald und Vogesen sowie an den Lysimeterstandorten auf der rechtsrheinischen Seite des Oberrheingrabens vorgenommen. Unter den im Projektgebiet befindlichen Lysimetern konnte der Bodenwasserspeicher in zwölf Fällen auf Grundlage einer detaillierten Profilaufnahme parametrisiert werden, in einem weiteren liegt eine zuverlässige Angabe aus der Standortbeschreibung vor. Der Abgleich der simulierten und beobachteten Sickerwassermenge für die Dekade 1991-2000 ergab im Mittel eine deutliche Überschätzung um 17,7 Pro-

cent, während in Frankreich auf pF 2.8 bis 4.2 Bezug genommen wird.

Les remontées capillaires dépendent de la teneur en eau du sol, de la granulométrie du substrat ainsi que de la distance entre la zone racinaire et le toit de la nappe. Par souci de simplification, elles ont été évaluées pour un niveau de nappe bas.

5.3.3 VALIDATION DES ESSAIS DE SIMULATION

Armbruster (2001) a effectué une validation détaillée des valeurs calculées pour les eaux d'infiltration par comparaison avec les valeurs observées au niveau de lysimètres du Bade-Wurtemberg. 15 lysimètres sont localisés dans le fossé rhénan, dont 6 dans la zone d'emprise du projet. Deux tiers des moyennes annuelles calculées se situaient dans une tolérance de ± 10 % par rapport aux valeurs mesurées, la somme des écarts positifs et négatifs pour l'ensemble des 20 lysimètres considérés s'annulant. En comparant le ruissellement issu de bassins versants dont la taille est comprise entre 10 et 125 km², il s'avère que les valeurs calculées sont légèrement supérieures aux valeurs observées de l'ordre de 8 % en moyenne.

L'utilisation de données d'entrée actualisées (principalement les données pédologiques et pluviométriques) a nécessité une nouvelle validation du modèle dans certains bassins versants des Vosges et de Forêt Noire et pour les lysimètres en rive droite du Rhin. Les caractéristiques des sols de 12 lysimètres ont pu être paramétrés sur la base de profils pédologiques existants et dans un cas à l'aide d'une description détaillée du site concerné. La comparaison entre les valeurs calculées et observées sur la période des 10 années comprises entre 1991 et 2000 mit en évidence une surestimation nette des mesures de 17,7 %. Seuls 4 lysimètres présentent des différences inférieures à 10 % et sont convenablement modéli-

zent. Nur vier Standorte werden mit einer Abweichung von ± 10 Prozent gut simuliert. Unter den 13 Lysimeterstandorten finden sich sieben, welche auch im Zuge der Modellkalibrierung von Armbruster (2001) verwendet wurden und seiner Zeit für den Zeitraum April 1987 bis März 1991 eine Überschätzung der Sickerung von durchschnittlich 6,6 Prozent (jetzt 18,7 %) aufwiesen. Ein Blick auf die von Armbruster (2001) ausgewiesenen Niederschlagshöhen legt nahe, dass die Unterschiede in erster Linie auf die 7,3 Prozent höheren Niederschläge zurückzuführen sind, welche im Rahmen der Projektbearbeitung verwendet wurden. Die durchschnittlich 60 mm/a höheren Niederschläge werden in rund 45 mm/a höhere Sickerwassermengen transformiert.

Auffällig ist auch die räumliche Verteilung besser und schlechter simulierter Standorte. Gut simuliert werden die am Rand des Oberrheingrabens gelegenen Lysimeter (Elgersweier, Lahr, St. Georgen), schlechter jene am Rhein (Weisweil, Schwarzach, Kappel), i.e. in den Bereichen mit geringem Niederschlag.

Unter je vier ausgewählten Einzugsgebieten in Schwarzwald und Vogesen konnte eine Gruppe von fünf Gebieten ausgewiesen werden, für welche die Simulation innerhalb eines Schwankungsbereiches von 100 bis 120 % im Mittel eine leichte Überschätzung der beobachteten Gesamtabflüsse um durchschnittlich etwa 10 Prozent ergab. Für die drei übrigen Gebiete (darunter zwei in den Vogesen), ließ die Anordnung der umliegenden Niederschlagsstationen keine ausreichend zuverlässige Abschätzung des Gebietsniederschlages zu.

Als Ergebnis der im Rahmen der Projektbearbeitung vorgenommenen Validierung muss festgehalten werden, dass die mit GWN-BW unter Verwendung der nach Sevruk (1989) korrigierten Stationsdaten des Niederschlages simulierten Sickerwassermengen etwa 15 Prozent zu hoch liegen.

sés. Parmi les 13 lysimètres utilisés, 7 avaient été utilisés par Armbruster (2001) en affichant des surestimations de la mesure de 6,6 % en moyenne (18,7 % à l'heure actuelle) entre avril 1987 et mars 1991. Il se trouve que les quantités de précipitations sur cette période étaient inférieures de 7,3 % à celles de la décade 1991-2000. Les 60 mm/a supplémentaires engendrent 45 mm/a de recharge supplémentaire.

Il est également intéressant de considérer la répartition géographique des lysimètres selon la qualité de l'ajustement. L'ajustement est de meilleure qualité pour les stations localisées en zone de bordure de nappe (Elgersweier, Lahr, Sankt Georgen), que dans le cas des stations proches du Rhin (Weisweil, Schwarzach, Kappel) moins arrosée.

Cinq secteurs ont été retenus parmi 4 bassins versants de Forêt Noire et 4 bassins versants des Vosges pour lesquels les simulations réalisées pour des variations de 100 à 120 % ont abouti à une légère surestimation des débits mesurés de l'ordre de 10 % en moyenne. Les 3 zones non retenues (dont 2 dans les Vosges) ne présentaient pas de bases de données suffisantes pour une évaluation correcte des précipitations.

Le résultat de la validation du modèle démontre que la mise en œuvre du modèle GWN-BW avec des données pluviométriques corrigées selon la méthode de Sevruk (1989) aboutit à une surestimation des précipitations efficaces de l'ordre de 15 %.

5.4 ERGEBNISSE DER HYDROLOGISCHEN MODEL- LIERUNG

5.4.1 INTERPOLATION VON KLIMADATEN

Für die räumliche Interpolation meteorologischer Eingangsdaten wurde ein Segmentverfahren gewählt, bei welchem zu jedem Zeitschritt in sechs Kreissegmenten mit je 60° Öffnungswinkel die zum Zielpunkt jeweils nächst gelegene Station mit gültigem Beobachtungswert ausgewählt wird. Die in den Segmenten gefundenen Beobachtungswerte werden einer inversen Gewichtung nach dem Quadrat der Distanz zum Zielpunkt unterzogen. Für solche Parameter, für welche eine Höhenabhängigkeit belegt ist (Niederschlag, Lufttemperatur) wird zusätzlich der Höhengradient zwischen den umliegenden Beobachtungspunkten analysiert und bei deutlichem Zusammenhang zwischen Merkmalsausprägung und Geländehöhe die Höhenabhängigkeit zusätzlich zum Ergebnis der Distanzgewichtung berücksichtigt. Dabei wird die Gewichtung des aus der Höhenlage des Zielpunktes geschätzten Wertes um so stärker, je stärker die Korrelation zwischen Merkmalsausprägung und Geländehöhe innerhalb des Kollektivs der Nachbarstationen ausfällt.

Unter den für die übrigen Arbeitsgruppen bereitgestellten Zeitreihen und Verteilungen sind, neben Tagesmittelwerten für Lufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Tagessummen des Niederschlages, insbesondere die regionalisierten Tagesminima und -maxima der Lufttemperatur sowie die im Strahlungsmodul von GWN-BW berechneten Tageswerte der Globalstrahlung zu nennen. Die Ergebnisse für die, über eine Regressionsbeziehung aus dem Quotienten zwischen beobachteter und maximal möglicher Sonnenscheindauer abgeleitete, Globalstrahlung wurden gegen die Beobachtungen an der REKLIP Station Bremgarten validiert. Dabei konnte das beobachtete Niveau der Jahre 1992 bis 1995 von durchschnittlich 130.6 W/m^2 durch die berechneten Werte mit 129.1 W/m^2 (98.8 %) sehr zuverlässig abgebildet werden.

5.4 RESULTATS DE LA MODELISATION HYDROLO- GIQUE

5.4.1 INTERPOLATION DES DONNEES CLIMATIQUES

L'interpolation spatiale des données météorologiques est réalisée par segmentation. Pour ce faire, l'environnement d'une station est divisé en 6 arcs de cercle d'ouverture respective 60° . La méthode d'interpolation consiste à choisir – à chaque pas de temps – le point de mesure le plus proche dans chaque secteur. Les points retenus sont interpolés en utilisant la méthode de l'inverse de la distance au carré. Les différences d'altitude entre les points retenus sont également pris en compte pour les paramètres soumis à des variations liées à l'altitude (précipitations, température) au cas où des différences significatives sont avérées entre les différents points. Une observation faite à une altitude – relativement aux autres points d'interpolation retenus – proche de celle du point recherché aura un poids d'autant plus important que les corrélations entre le paramètre recherché et l'altitude sont nettes au sein du contingent constitué par les points d'interpolation.

Les historiques et répartitions mises à disposition des différents groupes de travail comportent non seulement de valeurs journalières de température, d'humidité relative, de cumuls de précipitations, mais aussi les minima et maxima journaliers de la température et – dans le cas du module « rayonnement – du rayonnement global. Les valeurs du rayonnement global ont été validées par comparaison avec les résultats de la station Bremgarten (programme REKLIP) par ajustement à la droite de régression entre la durée d'ensoleillement observée et la durée astronomique possible d'insolation. Le niveau moyen observé entre 1992 et 1995 de $130,6 \text{ W/m}^2$ est très bien approximé par la valeur calculée de $129,1 \text{ W/m}^2$ (98,8%).

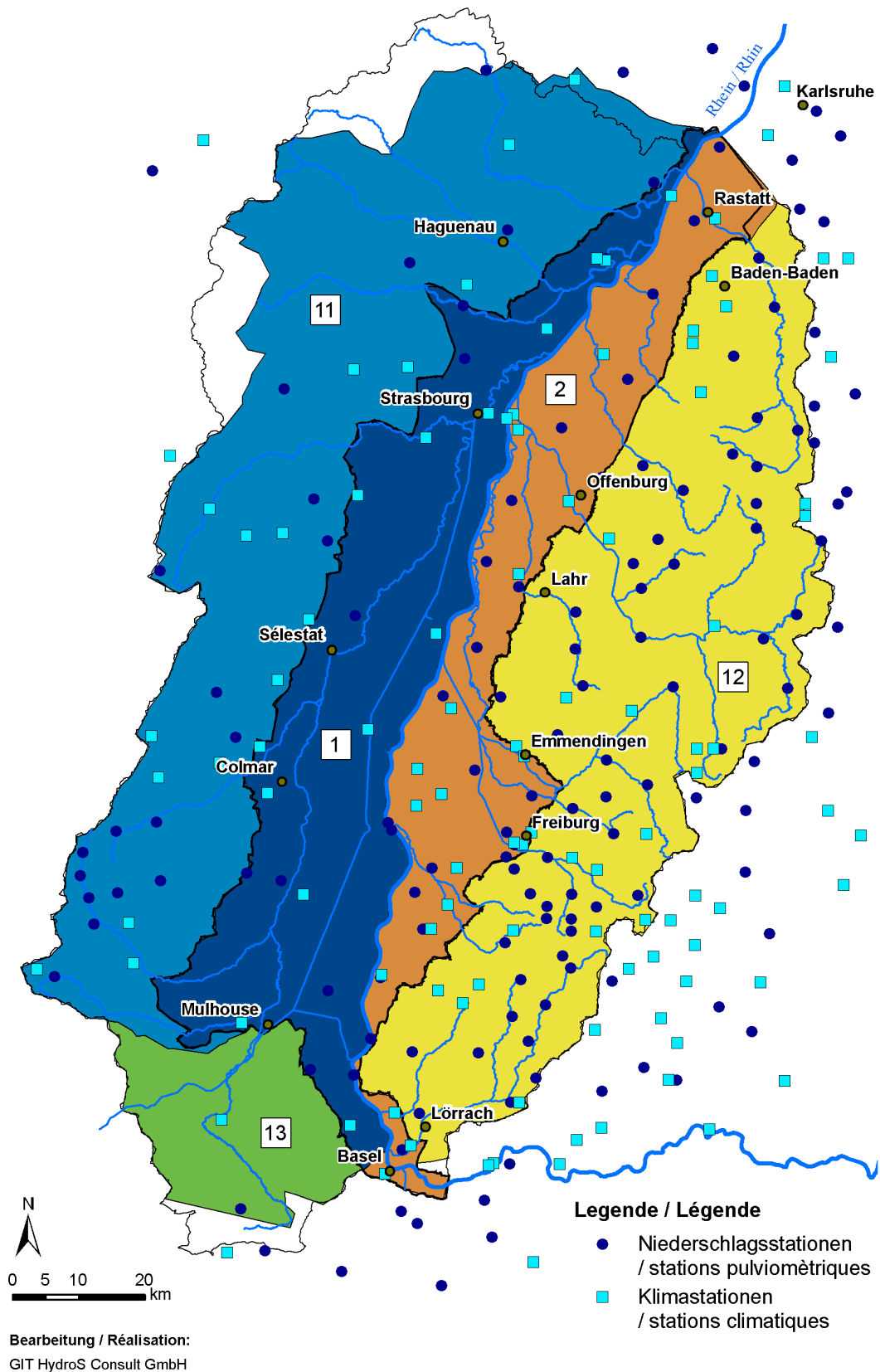


Abb. 5.4.1: Übersicht über das Projektgebiet (Projektteilgebiete siehe Tab. 5.4.1) und die Verteilung der Niederschlags- und Klimastationen
 Figure 5.4.1: Vue générale de la zone d'emprise du projet (secteurs d'étude cf. Tab. 5.4.1) et répartition des station pluviométriques et climatiques

Die wichtigsten Charakteristika der räumlichen Verteilung sowie der zeitlichen Variabilität der Niederschlagshöhen im Projektgebiet sollen, ebenso wie nachfolgend die Ergebnisse der Simulation für Verdunstung und Sickerwassermenge, unter Bezug auf fünf Teilgebiete dargestellt werden, welche in Abbildung 5.4.1 dargestellt sind. Das innere Modellgebiet, für welches das numerische Grundwassermodell erstellt und Untersuchungen des Stickstoffhaushaltes angestellt wurden, umfasst rund 4.660 km², davon 2.740 km² im Elsass [1] und 1.920 km² in Baden-Württemberg und dem Stadtgebiet von Basel [2]. Im Unterschied dazu dienen die Regionalisierung meteorologischer Eingangsdaten und die Simulation von Bilanzgrößen des Wasserhaushalts in den angrenzenden oberirdischen Einzugsgebieten in erster Linie der Abschätzung der Randbedingungen für die zuvor genannten detaillierten Untersuchungen im Bereich des inneren Modellgebietes. In den Vogesen umfassen diese im Bereich des Projektgebietes in den Oberrheingraben entwässernden Einzugsgebiete eine Gesamtfläche von gut 4.170 km². Die größten Vorfluter sind Lauter, Sauer, Moder, Zorn, Bruche, Ehn, Andlau, Giessen, Fecht, Lauch, Thur und Doller [11]. Im Süden schließen sich die Einzugsgebiete von Largue, Ill amont und Augraben mit einer Fläche von 745 km² an [13]. Die wichtigsten Einzugsgebiete im Schwarzwald sind jene von Murg, Rench, Kinzig, Schutter, Elz, Glotter, Dreisam, Möhlin / Neumagen, Kander und Wiese, welche zusammen mit einigen kleineren Gebieten eine Gesamtfläche von 4.000 km² bedecken [12]. Aus Abbildung 5.4.1 wird zugleich die räumliche Verteilung der Klima- (hellblaue Quadrate) und Niederschlagsstationen (blaue Punkte) ersichtlich.

Les caractéristiques essentielles des variations spatiale et temporelle des précipitations dans la zone d'emprise du projet – ainsi que par la suite des résultats de la modélisation de l'évaporation et de la recharge – ont été représentés dans les 5 domaines présentés dans la figure 5.4.1. La partie centrale de la zone d'étude, qui a fait l'objet de la modélisation hydrodynamique et de transport des nitrates, présente une superficie de 4660 km², dont 2740 km² en Alsace [1] et 1920 km² au Bade-Wurtemberg et en Suisse [2]. Les régionalisations des données météorologiques et les simulations des différentes composantes du bilan hydraulique effectuées dans les autres domaines servent essentiellement à fournir au modèle élaboré en partie centrale les conditions aux limites issues des bassins versants contigus. Les bassins versants vosgiens attenants occupent une superficie totale de 4170 km². Les bassins principaux sont ceux de la Lauter, Sauer, Moder, Zorn, Bruche, Ehn, Andlau, Giessen, Fecht, Lauch, Thur et Doller [11]. Les versants de la Largue de l'Ill amont et de l'Augraben les complètent au Sud [13]. Côté Forêt Noire, Murg, Rench, Kinzig, Schutter, Elz, Glotter, Dreisam, Möhlin / Neumagen, Kander et Wiese forment les principaux bassins versants et représentent avec quelques autres petits secteurs une superficie totale de 4000 km² [12]. Les différences de climat (carrés bleu ciel) et les pluviomètres (points bleu) sont également représentés dans la figure 5.4.1.

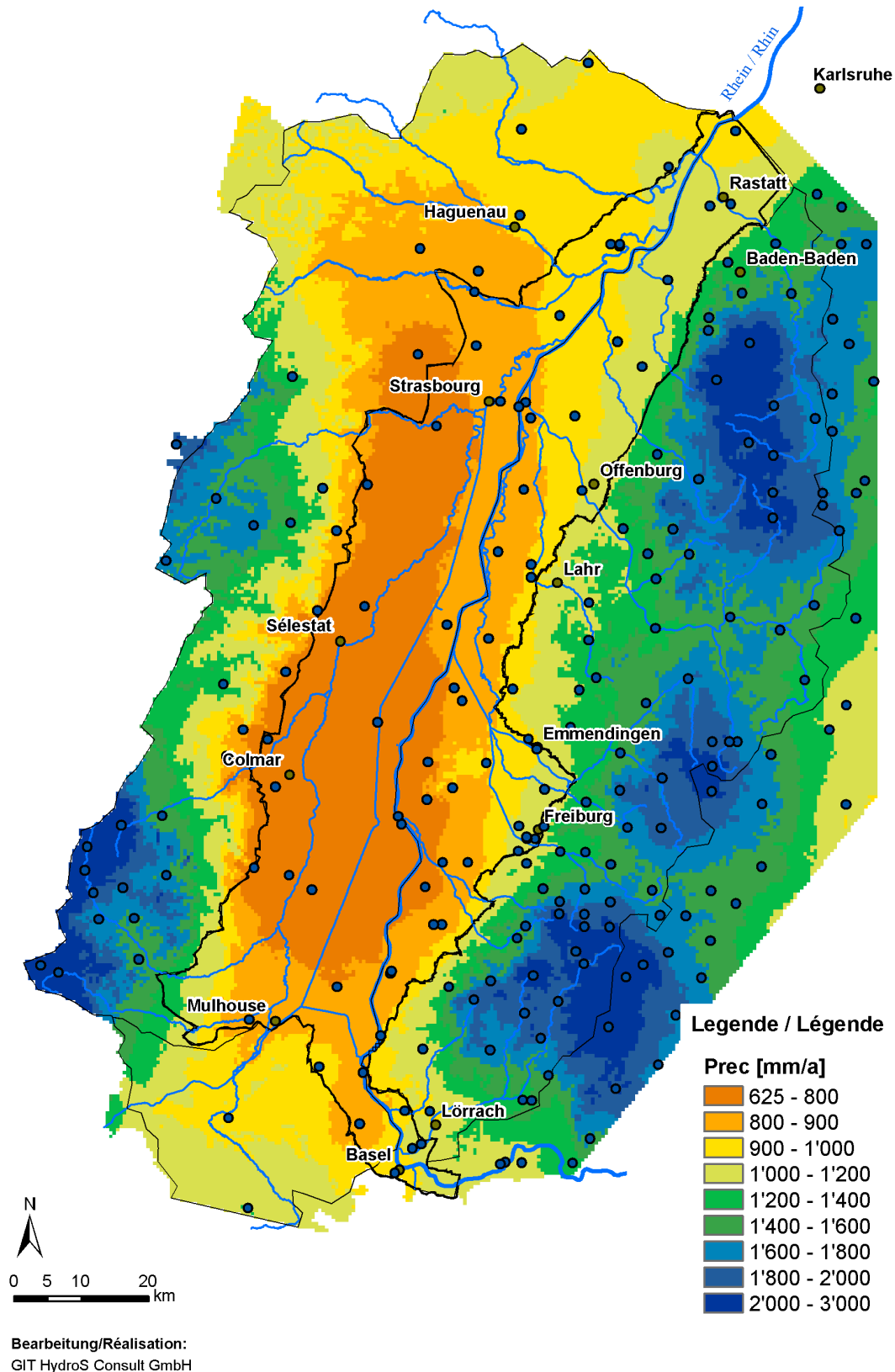


Abbildung 5.4.2: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe, korrigiert nach Sevrük [mm/a]
 Figure 5.4.2: Précipitations pluriannuelles moyennes corrigées selon Sevrük [mm/a]

Da die Messung des Niederschlages mit systematischen Fehlern behaftet ist, welche in erster Linie aus der Störung des Windfeldes durch das Auffanggerät

La mesure des quantités de précipitation est soumise à des erreurs systématiques, qui sont liées principalement à la perturbation du champ de vent

selbst resultieren, wurden die gemessenen Rohdaten vor der Regionalisierung einer Korrektur unterzogen [SEVRUK 1989]. Die mittleren Jahreswerte erhöhen sich dabei je nach Lage der Station und dem Anteil fester Niederschläge um etwa 7,5 bis 10,5 Prozent.

Die räumliche Verteilung der Niederschlagshöhe ist im Projektgebiet deutlich an die Topographie angelehnt. Die höchsten Jahressummen werden dabei mit 1.500 bis über 2.000 mm/a in den Hochlagen von Schwarzwald und Vogesen beobachtet. Werte zwischen 1.000 und 1.500 mm/a sind in den tiefen und mittleren Lagen der Mittelgebirgsregionen weit verbreitet.

Im Tiefland des Oberrheingrabens liegen die mittleren Jahreswerte nur zwischen etwa 600 und 1.000 mm/a, wobei ein deutlicher Gradient von Westen nach Osten feststellbar ist. Sehr geringe Niederschläge werden dabei im Luv der Vogesen beobachtet. Sie steigen von etwa der Mitte des Oberrheingrabens nach Osten hin kontinuierlich an. Entsprechend deutlich unterscheiden sich auch die langjährigen Mittelwerte für das linksrheinische (800 mm/a) und das rechtsrheinische (940 mm/a) Teilgebiet.

Auch die Jahressummen der Teilgebiete in Vogesen (1.167 mm/a) und Schwarzwald (1.567 mm/a) unterscheiden sich deutlich, was bei vorherrschend westlicher Windrichtung teilweise auf Lee-Effekte am Ostabfall der Vogesen und Steigungsregen am Westabfall des Schwarzwaldes zu erklären ist, zu Teilen aber auch auf die allgemein geringeren Gipfelhöhen in den nördlichen Vogesen zurückzuführen sein dürfte.

Im Oberrheingraben fallen 57 Prozent des Jahresniederschlags in den Sommermonaten (Mai bis Oktober). In Schwarzwald und Vogesen dagegen ist die innerjährliche Verteilung bei leichter Dominanz der Wintermonate (52 %) weitgehend ausgeglichen.

Mit Blick auf die Einzeljahre reicht die Spannweite im Bereich des Oberrheingrabens von 658 mm/a im Jahr 1991 (als Durchschnitt über das gesamte innere Modellgebiet) bis knapp über 1.000 mm/a im Jahr 1999. Im trockensten Sommerhalbjahr 1989 lag die Niederschlagsmenge bei knapp 340 mm, im feuchtesten Sommer (1987) bei 675 mm.

créée par l'appareil de mesure lui-même et ont été corrigées avant régionalisation [SEVRUK 1989]. Les précipitations moyennes annuelles sont augmentées de l'ordre de 7,5 à 10,5 % selon la localisation de la station et la part de précipitations solides.

La répartition géographique des quantités de précipitations est liée à la topographie dans la zone d'étude. Les cumuls annuels les plus élevés, qui oscillent entre 1500 et 2000 mm/a plus fortes, sont observés sur les hauteurs des Vosges et de Forêt Noire. Des valeurs voisines de 1000 à 1500 mm/a sont fréquentes en zone de moyenne montagne et dans les vallées.

Les cumuls annuels varient entre environ 600 et 1000 mm/a en plaine avec une nette augmentation d'Est en Ouest. Des valeurs très faibles sont mesurées sur les pentes des Vosges exposées au vent. Elles augmentent régulièrement à partir du centre plaine vers l'Est. Les moyennes pluriannuelles de 800 mm/a en rive gauche du Rhin et de 940 mm/a en rive droite reflètent clairement ces différences.

Les cumuls annuels dans les Vosges (1167 mm/a) et en Forêt Noire (1567 mm/a) sont aussi très différents et s'expliquent d'une part par le vent dominant de secteur Ouest qui met les versants Est des Vosges sous le vent et provoque des pluies de condensation sur le versant ouest de Forêt Noire et d'autre part par les sommets des Vosges du Nord moins élevés.

57 % des précipitations annuelles s'abattent dans le fossé rhénan au cours des mois estivaux (mai à octobre). Les Vosges et la Forêt Noire se distinguent par une légère prépondérance de la période hivernale (52 %).

Au sein du fossé rhénan, les années prises individuellement présentent des fourchettes de 658 mm en 1991 (valeur moyenne sur la zone d'emprise du modèle) jusqu'à 1000 mm en 1999. L'été 1989 a été le plus sec avec environ 340 mm, l'été 1987 le plus humide avec 675 mm.

5.4.2 SIMULATION VON BODENWASSERHAUSHALT, VERDUNSTUNG UND SICKERWASSERMENGE

Die mit GWN-BW simulierte Verdunstung zeigt unter den betrachteten Bilanzgrößen die geringste räumliche Variabilität und relativ geringe Schwankungen zwischen den Einzeljahren, weist aber einen ausgeprägten Jahresgang auf. Geringe Werte treten in den Siedlungsgebieten mit hohem Anteil versiegelter Flächen in Erscheinung, ebenso linksrheinisch im südlichen Oberrheingraben in Folge geringer Niederschläge und geringer Wasserkapazität der Böden. Besonders hohe Werte finden sich demgegenüber in den Waldgebieten der Mittelgebirge und in den aufgrund geringer Flurabstände optimal mit Wasser versorgten Feuchtgebieten im Oberrheingraben.

Bei Betrachtung des gesamten inneren Modellgebietes beläuft sich die berechnete Jahressumme der aktuellen Verdunstung auf rund 550 mm/a. Sie weist allerdings in Folge des ungleich verteilten Niederschlagsdargebotes erhebliche Unterschiede zwischen dem im Elsass gelegenen (515 mm/a) und dem rechtsrheinischen Teilgebiet (590 mm/a) auf. Die Jahressummen der Evapotranspiration in Schwarzwald und Vogesen liegen bei guter Wasserversorgung durch ganzjährig hohe Niederschläge und hohem Waldanteil mit 600 bis 630 mm/a deutlich höher.

Allen Teilgebieten und Vegetationsformen ist der ausgeprägte Jahresgang der Verdunstung gemeinsam. Im Mittel liegen die täglichen Wasserumsätze im Winter bei 0,3 bis 0,5 mm/d, in den Sommermonaten zwischen 2,5 und 3,5 mm/d. Die höchsten Werte treten im Oberrheingraben schon zu Beginn des Sommers im Mai auf, während sie im Hochsommer in Folge der weitgehenden Entleerung des Bodenwasserspeichers trotz höherem Energieangebot leicht abnehmen. Im deutlich besser mit Wasser versorgten Schwarzwald wird das Maximum demgegenüber erwartungsgemäß im Juni und Juli erreicht.

Im reliefarmen Lockegesteinsbereich des inneren Modellgebietes treten praktisch keine schnellen lateralen Abflusskomponenten in Erscheinung. Die unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildete

5.4.2 MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE DU SOL, DE L'EVAPORATION ET DE LA RECHARGE

La modélisation de l'évaporation avec le logiciel GWN-BW présentent la variabilité spatiale la plus faible entre toutes les grandeurs qui participent au bilan. Elle varie très peu d'une année sur l'autre mais est très sujette aux variations saisonnières. Les valeurs les plus faibles sont calculées dans les agglomérations du fait de la forte proportion de sols imperméabilisés ainsi qu'en rive gauche de la partie Sud de la zone en raison des plus faibles précipitations et de des capacités réduites de rétention d'eau des sols. Les valeurs les plus élevées se situent en zone boisée de moyenne montagne et au niveau des zones humides en raison de la faible profondeur du toit de la nappe.

L'évapotranspiration réelle annuelle calculée sur la zone d'emprise du modèle s'élève à 500 mm/a. Cette moyenne cache des écarts notables entre les parties française (515 mm/a) et allemande (5901 mm/a) dues aux cumuls de précipitations différents. Les cumuls annuels entre 600 et 630 mm/a sont très supérieurs dans les Vosges et en Forêt Noire en raison des précipitations plus abondantes.

Les fluctuations saisonnières de l'évapotranspiration se retrouvent dans tous les secteurs et pour tout type de végétation. Durant la saison hivernale, les échanges d'eau sont de l'ordre de 0,3 à 0,5 mm/d et ils atteignent 2,5 à 3,5 mm/d en été. Les valeurs les plus élevées du fossé rhénan sont calculées au début de l'été courant mai et diminuent légèrement par la suite avec la vidange des réserves en eau du sol malgré un apport d'énergie supérieur. Les apports en eau supérieurs entraînent un décalage des valeurs maximales vers les mois de Juin et juillet.

Les flux hypodermiques latéraux sont quasi inexistant dans la partie centrale, alluviale et peu vallonnée de la zone d'étude. Les eaux de percolation quittant la zone racinaire correspondent dans ce cas

Sickerwassermenge entspricht hier direkt der Grundwasserneubildung, wenngleich je nach Überdeckung des Schotterkörpers eine zeitliche Verzögerung vorhanden sein kann. Demgegenüber gelangt in den Mittelgebirgen nur ein Teil der gesamten Abflussmenge in die Kluftsysteme des Festgesteins, wird in Feuchtgebieten und Mooren gespeichert oder durchläuft die geringmächtigen Talgrundwasserleiter, aus welchen es mit größerer zeitlicher Verzögerung den Basisabfluss der Vorfluter speist. Der Rest gelangt auf oberflächennahen Fließwegen und mit geringer Verweilzeit zum Abfluss. Für die im Schwarzwald gelegenen Einzugsgebiete (Teilgebiet 12) beträgt der Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluss nach den vorliegenden statistischen Untersuchungen (Armbruster, 2001) im langjährigen Mittel nur etwas mehr als 40 Prozent (375 mm/a gegenüber 890 mm/a gesamter Abflussbildung). Für die Vogesen wurden bisher keine derartigen Untersuchungen angestellt, die Größenordnung dürfte bei ähnlicher Gebietsausstattung und vergleichbaren klimatischen Bedingungen jedoch die gleiche sein.

à la recharge de la nappe, même si le passage dans la zone non saturée induit un décalage dans le temps. Dans les zones de moyenne montagne au contraire, une partie seulement des eaux d'infiltration parviennent à rejoindre le milieu fissuré des roches compactes. Les autres sont temporairement stockées dans des zones humides ou marécageuses, alimentent les petits aquifères alluviaux et contribuent bien plus tard à maintenir l'écoulement de base des cours d'eau superficiels. Le reste s'écoule en surface et rejoint rapidement les cours d'eau. Des études statistiques (Armbruster, 2001) ont montré que seul 40 % des débits superficiels correspondent à l'écoulement de base (375 mm/a pour 890 mm/a de débit total) pour les bassins versants situés en Forêt noire (zone 12). Des études similaires n'ont pas été menées dans les Vosges pour le moment, bien que les résultats devraient être analogues pour des bassins versants comparables et des conditions climatiques équivalentes.

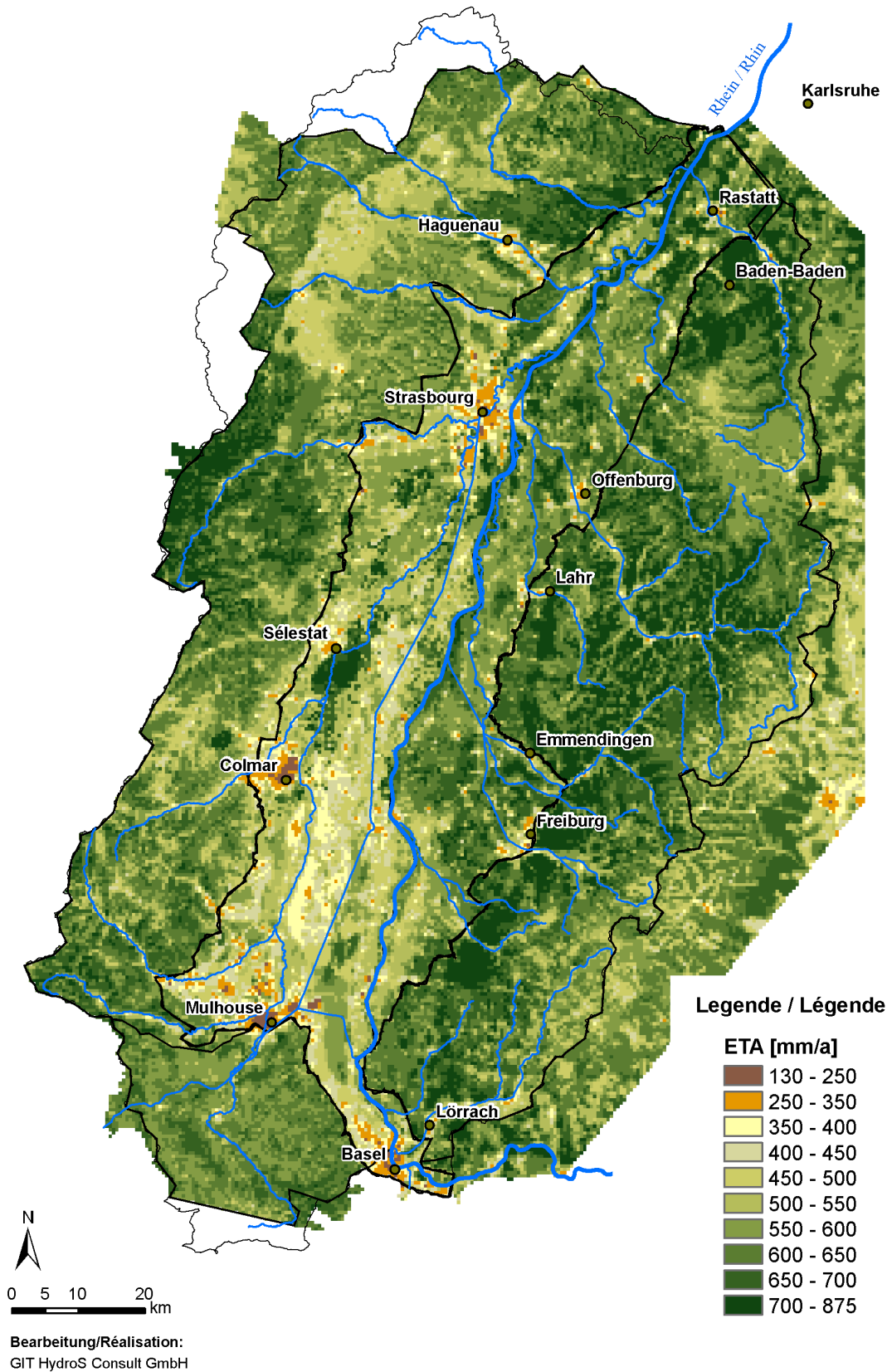


Abb. 5.4.3: Mittlerer Jahreswert der aktuellen Verdunstung [mm/a]
 Figure 5.4.3: Moyenne pluriannuelle de l'évaporation [mm/a]

Die räumliche Verteilung der Gesamtabflusshöhe folgt im Projektgebiet stark der Verteilung der Niederschlagshöhe. Die höchsten Werte treten mit durchschnittlich 890 mm/a im Schwarzwald in Erscheinung, während die Abflussbildung auf der Ostseite den Vogesen in Folge der dort geringeren Niederschläge lediglich 535 mm/a beträgt.

Im Oberrheingraben erfolgt im langjährigen Mittel eine Grundwasserneubildung von knapp 235 mm/a. Wie für die zuvor diskutierten Bilanzgrößen, so ist auch in diesem Fall eine räumliche Differenzierung mit trockeneren Verhältnissen im Elsass (210 mm/a) und höheren Wasserumsätzen auf der rechtsrheinischen Seite (265 mm/a) zu beobachten. Noch weit ausgeprägter sind jedoch die Unterschiede zwischen trockenen und feuchten Einzeljahren. So wurde in den trockenen Jahren 1991 und 1993 mit 130 bis 150 mm/a nur die Hälfte des langjährigen Mittelwertes erreicht. Besonders hohe Neubildungsraten traten mit jeweils 320 bis 340 mm/a von 1986 bis 1988 auf, solche mit 310 bis 320 mm/a in den Jahren 1999, 2001 und 2002.

La répartition géographique des écoulements globaux correspond bien à la distribution des cumuls de précipitations. On retrouve les valeurs les plus élevées de l'ordre de 890 mm/a en moyenne en Forêt Noire alors que les versants Est des Vosges présentent des valeurs plus modestes de l'ordre de 535 mm/a en raison de précipitations moindres.

La moyenne pluriannuelle de la recharge de la nappe par les précipitations est estimée à environ 235 mm/a dans le fossé rhénan. Pour les mêmes raisons que précédemment, des disparités géographiques existent aussi entre le secteur alsacien moins arrosé (210 mm/a) et la rive droite du Rhin mieux pourvue en eau (265 mm/a). Les inégalités sont encore bien plus importantes entre années sèches et humides. Durant les années sèches de 1991 et 1993, la recharge atteignait de 130 à 150 mm/a, soit à peine la moitié des moyennes pluriannuelles. A l'opposé, des valeurs de 320 à 340 mm/a ont été atteintes sur la période de 1986 à 1988, des valeurs de 310 à 320 mm/a au cours des années 1999, 2001 et 2002.

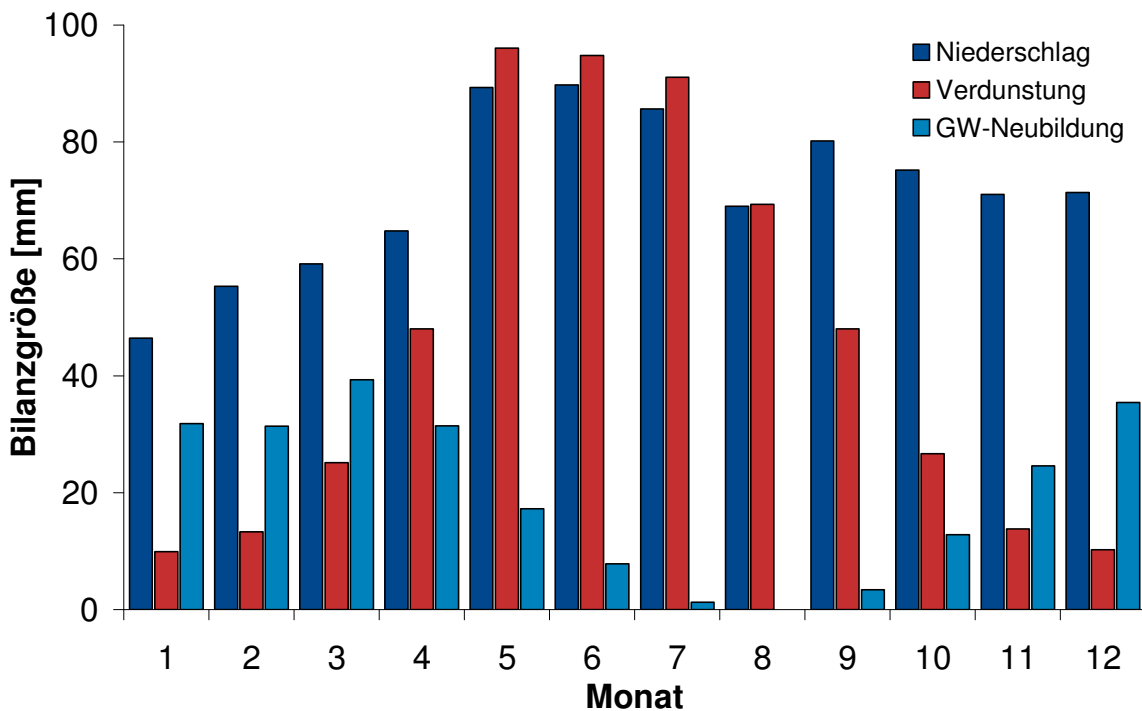
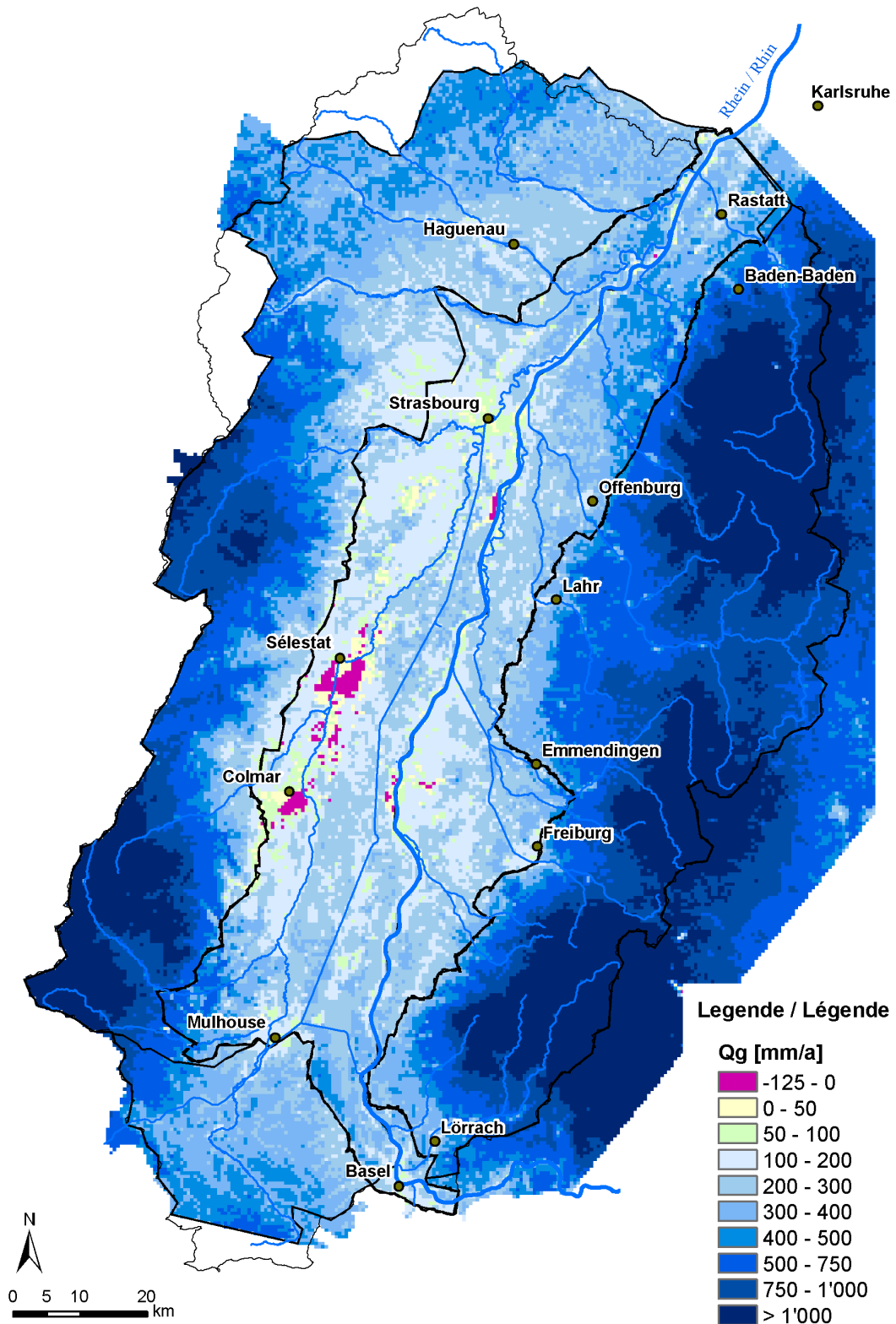


Abb. 5.4.4: Jahresgang des Bodenwasserhaushaltes im Oberrheingraben (inneres Projektgebiet)
 Figure 5.4.4 : Saisonnalité du bilan hydrique du sol dans le fossé rhénan (zone d'emprise du modèle)



Bearbeitung / Réalisation:
GIT HydroS Consult GmbH

Abb. 5.4.5: Mittlere jährliche Sickerwassermenge [mm/a]
Figure 5.4.5: Moyenne pluriannuelle de la recharge [mm/a]

Im Jahresverlauf fällt der überwiegende Teil der Sickerwasserbildung in Folge der deutlich geringeren Verdunstung in das Winterhalbjahr (im Oberrheingraben 194 mm). Über die Sommermonate (Mai bis Oktober) hinweg übersteigt der Verdunstungsanspruch der Vegetation die Niederschlagshöhe, der Bodenwasserspeicher wird aufgezehrt und Sickerwasserbildung bleibt auf kurze Perioden feuchter Witterung beschränkt, in denen größere Niederschlagsereignisse im Bereich von Böden geringer Wasserkapazität kurzfristig eine weitgehende Sättigung bewirken können (Abbildung 5.4.4). Im langjährigen Mittel liegt die Sickerwasserbildung im Oberrheingraben während dieser Zeit bei 40 mm/a, bleibt in Sommerhalbjahren mit trockener Witterung jedoch völlig aus, und sonst größten Teils auf die Monate Mai bis Anfang Juni und die zweite Oktoberhälfte beschränkt. Von Juli bis September findet fast keine Perkolation statt, sondern es ist im Gegenteil, in Bereichen mit geringem Flurabstand sogar Grundwasserzehrung durch kapillaren Aufstieg möglich. Dies ist vor allem in der Rheinaue nördlich des Kaiserstuhls und linksrheinisch in größeren zusammenhängenden Bereichen der Fall. Der kapillare Aufstieg in den Sommermonaten kann hier die Größenordnung der winterlichen Neubildung erreichen und im Bereich von Feuchtgebieten sogar übersteigen.

In Tabelle 5.4.1 sind die wichtigsten Kenngrößen des Bodenwasserhaushalts [mm] noch einmal zusammengestellt.

La recharge de la nappe se produit principalement durant le semestre hivernal en raison d'une évaporation réduite (194 mm dans le fossé rhénan). En période estivale entre mai et octobre, l'évapotranspiration supplante les apports par les pluies et les plantes consomment les réserves d'eau du sol. La recharge est limitée dans le temps à de courtes périodes humides, au cours desquelles des phénomènes pluvieux intenses contribuent au remplissage rapide mais temporaire des réserves en eau du sol (figure 5.4.4). Dans le fossé rhénan, la valeur moyenne pluriannuelle de la recharge est de l'ordre de 40 mm/a en période estivale, sachant que les infiltrations ont lieu essentiellement en mai, début juin et pendant la seconde moitié d'octobre et qu'elle est nulle en année sèche. La recharge est quasi inexistante entre juillet et septembre et des remontées capillaires sont possibles dans certaines zones où la nappe est peu profonde, notamment les basses terrasses du Rhin au Nord du Kaiserstuhl et sur de larges secteurs en rive gauche du Rhin. Les remontées capillaires estivales peuvent atteindre des proportions voisines de la recharge hivernale et même les dépasser dans certaines zones humides.

Les composantes principales du bilan hydrique du sol [mm] sont rappelées dans le tableau 5.4.1.

Tab. 5.4.1 : Kenngrößen des Bodenwasserhaushalts [mm]
Tab. 5.4.1 : composantes du bilan hydrique du sol [mm]

Niederschlag (korrigiert) / Précipitations (corrigées)

Nummer numéro	Teilgebiet secteur	Mittel moyenne			Sommer été	Winter hiver
			Min	Max		
1	Linksrheinisch Rive gauche	798.4	602.1	965.4	456.9	341.5
2	Rechtsrheinisch Rive droite	940.8	737.5	1088.9	534.9	405.9
Ø	Oberrheingraben Fossé rhénan	857.1	657.9	1016.3	489.0	368.0

Nummer numéro	Teilgebiet secteur	Mittel moyenne	Min	Max	Sommer été	Winter hiver
11	Vogesen Vosges	1166.9	871.8	1388.5	559.7	607.3
12	Schwarzwald Forêt Noire	1567.1	1233.1	1895.0	761.8	805.3
13	Sundgau Sundgau	1019.4	706.1	1319.7	540.3	479.1

Aktuelle Verdunstung / Évapotranspiration réelle

Nummer numéro	Teilgebiet secteur	Mittel moyenne	Min	Max	Sommer été	Winter hiver
1	Linksrheinisch Rive gauche	514.5	447.2	565.3	398.4	116.1
2	Rechtsrheinisch Rive droite	592.3	526.7	654.8	465.3	127.0
Ø	Oberrheingraben Fossé rhénan	546.5	480.0	602.2	426.0	120.6
11	Vogesen Vosges	597.7	530.5	660.8	457.4	140.3
12	Schwarzwald Forêt Noire	634.0	596.2	684.9	487.7	146.3
13	Sundgau Sundgau	605.4	549.5	652.7	493.1	112.3

Gesamtabfluss / Écoulement global

Nummer numéro	Teilgebiet secteur	Mittel moyenne	Min	Max	Sommer été	Winter hiver
1	Linksrheinisch Rive gauche	212.7	114.4	315.2	35.2	177.5
2	Rechtsrheinisch Rive droite	264.3	149.1	389.7	46.7	217.6
Ø	Oberrheingraben Fossé rhénan	234.0	128.7	345.9	39.9	194.0
11	Vogesen Vosges	535.7	342.4	731.6	87.9	447.8
12	Schwarzwald Forêt Noire	893.2	590.7	1163.8	253.3	639.8
13	Sundgau Sundgau	378.9	140.0	624.1	55.9	322.9

6 Austauschprozesse zwischen Fluss und Grundwasser

Phénomènes d'échanges nappe - rivière

6.1 EINFÜHRUNG

Austauschprozesse zwischen Fliessgewässern und dem Grundwasser stellen im Gebiet des Oberrheins auch im heutigen noch vorwiegend kanalisiertem Zustand der Fliessgewässer eine wesentliche Komponente in der Gesamtwasserbilanz dar. Bei der Infiltration von Flusswasser in die Grundwasserleiter sowie der Exfiltration von Grundwasser in die Fliessgewässer finden eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse statt. Der Charakter dieser Prozesse ist instationär.

Deutliche Merkmale infiltrierender Gewässer sind Schwankungen der elektrischen Leitfähigkeiten und Temperaturen im Grundwasser sowie deutlich tiefere Nitratkonzentrationen als in den Gebieten ohne infiltrierende Gewässer. Niedrige Nitratgehalte und die häufig zu beobachtenden erhöhten hydraulischen Leitfähigkeiten des Untergrundes entlang von Fliessgewässern machen flussnahe Bereiche attraktiv für die Trinkwasserproduktion. Jedoch wird das Auftreten von Mikroorganismen und der Eintrag von Problemstoffen wie z.B. endokrin wirksame Substanzen und Benzinzusatzstoffe bei flussnahen Fassungen vermehrt als Problem wahrgenommen.

Im Teilprojekt "Fluss-Grundwasser-Interaktion" wurden für die wichtigsten Schweizerischen Teilbereiche des INTERREG Projektgebietes, untere Wiese-Ebene, Region Reinach im unteren Birstal sowie die Rheinebene im Gebiet des Tafeljura (Gebiet Muttentz-Pratteln), relevante Grössen, welche die Infiltrations-/Exfiltrationsverhältnisse zwischen oberirdischen Gewässern und Grundwasser beschreiben, für charakteristische Flussabschnitte ermittelt. Die Lage der 3 Detailuntersuchungsgebiete ist in Abbildung 6.1.1 dargestellt.

6.1 INTRODUCTION

Les phénomènes d'échanges entre les eaux superficielles et les eaux souterraines sont une composante essentielle du bilan global en eau du Rhin Supérieur malgré la forte proportion à l'heure actuelle des secteurs canalisés. Les infiltrations d'eaux de surface dans la nappe phréatique ainsi que le drainage des eaux souterraines par les cours d'eau sont le lieu d'un grand nombre de phénomènes physique, chimiques et biologiques. Ces processus ont un caractère transitoire.

Les variations de la conductivité et de la température des eaux souterraines sont caractéristiques pour l'infiltration d'eaux souterraines, de même que des concentrations en nitrates plus faibles que dans les zones où une telle infiltration n'a pas lieu. Des concentrations réduites en nitrates et des valeurs de la perméabilité hydraulique plus élevées en bordure de cours d'eau favorisent l'implantation d'usines AEP dans ces zones. Il s'avère toutefois que la présence de microorganismes et de substances problématiques, notamment endocriniennes, peut poser des problèmes dans les pompages proches des cours d'eau.

Le sous-projet "échanges nappe-rivière" s'est attaché à déterminer les grandeurs pertinentes dans les phénomènes d'échange entre eaux superficielles et eaux souterraines sur des tronçons de rivières caractéristiques dans les secteurs suisses les plus intéressants du point de vue du projet INTERREG, soit la basse plaine de la Birs, la région de Reinach dans la basse vallée de la Birs et la plaine rhénane dans la région de Muttentz-Pratteln (Jura). Les 3 secteurs d'étude sont présentés dans la figure 6.1.1.

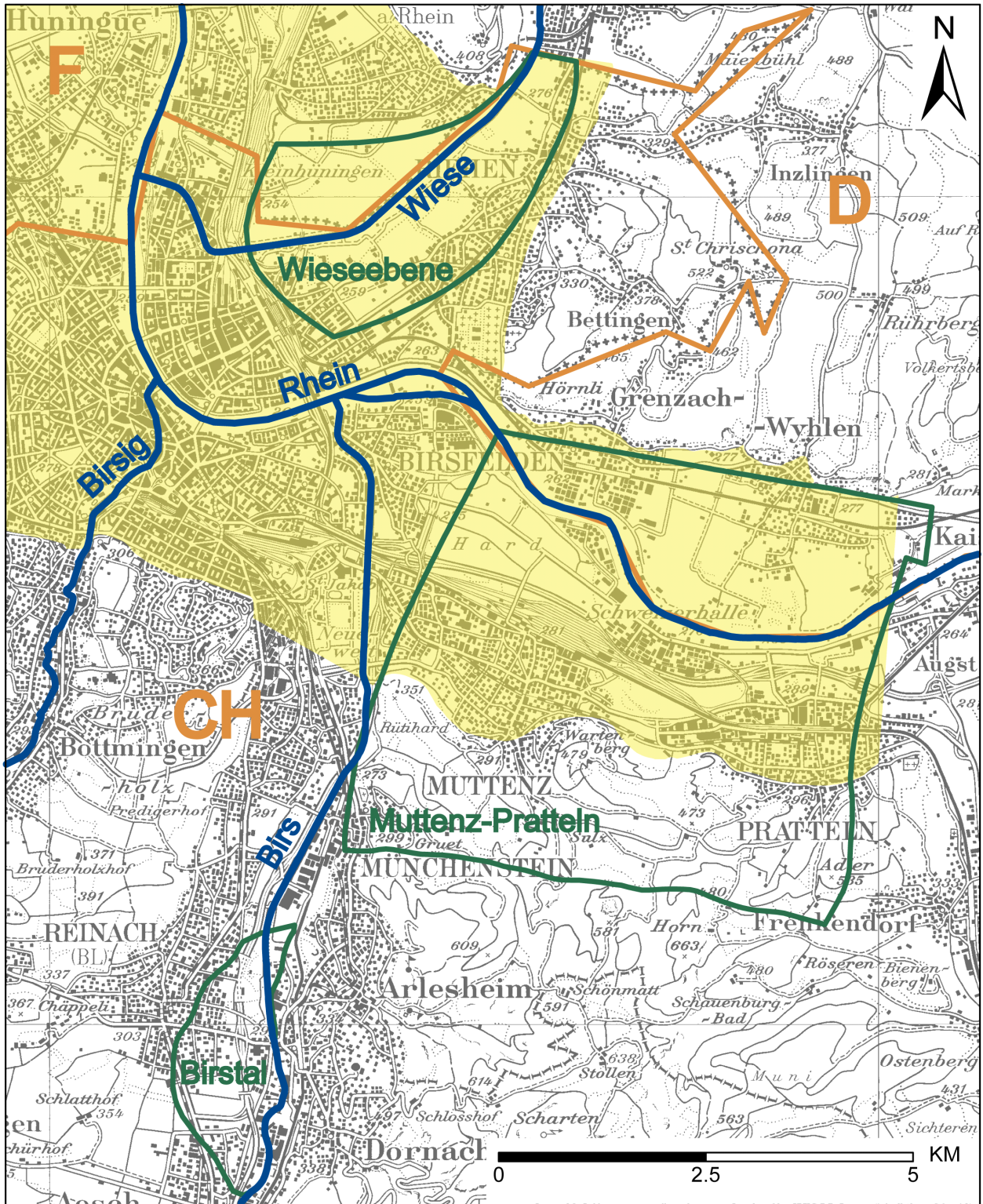


Abbildung 6.1.1: Übersicht über die Lage der Detailuntersuchungsgebiete MuttENZ-Pratteln, Wieseebene, Birstal (grün) am südlichen Rand des INTERREG-III-Gebietes „MoNit“ (gelb)
 figure 6.1.1: localisation des zone d'étude de MuttENZ-Pratteln, plaine de la Wiese, vallée de la Birs (vert) en limite Sud du projet INTERREG-III "MoNit" (jaune)

Das Verständnis der Wechselwirkungen Oberflächenwasser/Grundwasser und Grundwasseranreicherungen bzw. -entnahmen war, hinsichtlich der quantitativen Aspekte der oberflächennahen

Les aspects quantitatifs liés à l'utilisation de ressources de faible profondeur pour la compréhension des phénomènes d'échange nappe-rivière et de l'alimentation ou du prélèvement d'eau souterraine sont

Nutzungen, für den Rhein als auch seiner Zuflüsse nur punktuell vorhanden. Infiltrationsabschnitte entlang des Rheins waren nur vage bekannt und verlässliche Daten fehlten weitgehend. Die Infiltration, abhängig von den hydraulischen Verhältnissen und dem Verbauungsgrad der Flussufer sowie dem strukturellen Aufbau und dem Kolmatierungsgrad der Flusssohlen, war bisher punktuell bekannt. Detaillierte Kenntnisse der Infiltrationsverhältnisse zur Beurteilung von Fragen des qualitativen Grundwasserschutzes fehlten weitgehend.

Der Rhein im Bereich der Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft, die Wiese und die Birs dienten als Test- und Modellgebiete zur Ermittlung von Orientierungswerten der für das regionale GW-Modell notwendigen Leakagekoeffizienten zur Anbindung der Gewässer an das Grundwasser.

In Zusammenhang mit zahlreichen, regionalen Grundwasserschutz- und -managementprojekten konnten Synergien zum INTERREG III Projekt aufgebaut werden, wie z.B. beim Aufbau von hochauflösenden Grundwassermodellen in drei Teilregionen. Entlang der Rheinzufüsse Birs und Wiese liegen zudem auch detaillierte Angaben über den Einfluss von Flussuferrevitalisierungen auf die Infiltrationsverhältnisse vor.

Um die lokalen Verhältnisse in den drei Testgebieten erfassen zu können, wurde ein kleinräumiger Modellmaßstab mit deutlich feinerer Diskretisierung als im gesamten MoNit-Gebiet gewählt. U.a. sind die Schweizerischen Teilgebiete charakterisiert durch intensive Grundwassernutzungen auf dichtbesiedeltem urbanem Raum, die eine sehr hohe räumliche und zeitliche Auflösung erforderten. Zudem existieren zahlreiche Zielkonflikte zwischen der Grundwassernutzung und anderen teilweise ebenfalls rechtlich geschützten Interessen. Für die nächsten Jahre zeichnen sich zudem zahlreiche Nutzungsänderungen ab, einige davon betreffen das Grundwasserdargebot, andere könnten die Qualität des Grundwassers direkt oder indirekt beeinflussen, so dass auf dieser Modellbasis eine Fortschreibung und ein regelmäßiger Einsatz zu gewährleisten ist.

Die Resultate der Modelluntersuchungen Birs und Wiese liefern Angaben zum zeitlichen Verlauf von

con nus de façon pon ctuelle le long du Rhin et de ses affluents. Les secteurs sur lesquels le Rhin infiltre dans la nappe sont peu connus et des données pertinentes relatives à cette question sont rares. Peu d'informations sont disponibles sur les infiltrations, qui dépendent des conditions hydrauliques, de l'aménagement des berges et du colmatage du lit du cours d'eau. Des informations précises sur les aspects quantitatifs des infiltrations étaient rares.

Le Rhin dans le secteur des cantons de Bâle-ville et Bâle-campagne ainsi que la Wiese et la Birs ont servi de zone test pour la détermination de valeurs de référence des coefficients d'échange nappe-rivière nécessaires dans le cadre de la modélisation régionale.

Le projet INTERREG III a bénéficié de nombreux effets de synergie avec des projets régionaux de gestion et de protection des eaux souterraines, par exemple pour la réalisation de modèles hydrodynamiques détaillés sur 3 zones. Il existe également des informations détaillées sur l'influence de la revitalisation des berges de la Wiese et de la Birs sur les phénomènes d'infiltration.

Le maillage et les échelles retenus pour la modélisation des 3 secteurs test sont beaucoup plus fins que le maillage du modèle régional MoNit. En outre, les secteurs suisses sont caractérisés par une utilisation intensive des ressources en eaux souterraines dans un environnement fortement urbanisé, ce qui suppose de fortes discrétisations spatiale et temporelle. Les conflits d'usage entre les utilisateurs de la ressource et des intérêts divergents également couverts par la législation. Un certain nombre de modifications d'usage sont attendues au cours des prochaines années, notamment concernant la réserve en eau souterraine disponible ou encore susceptibles d'influencer directement ou indirectement la qualité de la nappe. Ces conditions permettent de prévoir une actualisation et une mise en œuvre régulière des modèles.

Les résultats de la modélisation donnent des indications sur la chronologie des interactions entre eaux

Fluss-/Grundwasser-Interaktionen, welche zu einem gewissen Grad auch für die seitlichen Zuflüsse des Rheins typisch sind (insbesondere die rechtsseitigen Zuflüsse). Das Fallbeispiel Birs illustriert zudem die Einmischung von nitratreichen seitlichen Grundwasserzuflüssen in einen regional bedeutsamen Grundwasserstrom. Die Resultate aller drei Schweizerischen Modelluntersuchungen dokumentieren die nicht zu unterschätzende Bedeutung der Fluss-/Grundwasser-Interaktionen für das Grundwasserangebot. Damit wurden auch relevante Größen ermittelt bzw. abgeschätzt, welche die Infiltrations- und Exfiltrationsverhältnisse zwischen Fliessgewässern und Grundwasser charakterisieren (z.B. Leakage Koeffizienten = Verhältnis der Durchlässigkeit zur Mächtigkeit der Gewässersohle). Die drei verschiedenen Pilotprojekte und spezifisch dafür errichtete Grundwasserbeobachtungssysteme lieferten die notwendigen Grundlagedaten für die Modellrechnungen.

6.2 RESULTATE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Resultate der drei Subprojekte lassen folgende vorläufigen Schlussfolgerungen zu:

- (1) Im System Wiese-Ebene sind die Austauschprozesse zwischen Fluss- und Grundwasser abhängig von: (i) der Durchlässigkeit der Fliessgewässersohle (K_f - Wert), (ii) den hydraulischen Randbedingungen (Pegel des Fliessgewässers, Grundwasserentnahmen, etc.) sowie (iii) der Durchlässigkeit und Heterogenität des Grundwasserleiters. Kolmations-/Dekolmationsprozesse spielen dabei eine wichtige Rolle. Abschätzungen der spezifischen Infiltrationsrate (q) für die Wiese zeigen Werte, welche vergleichbar sind mit anderen kiesführenden Flüssen (Tab. 1).

superfiziellen et eaux souterraines, qui sont d'une certaine manière typiques pour l'ensemble des affluents du Rhin (Principalement en rive droite). L'exemple de la Birs illustre par ailleurs les effets des apports latéraux en eau souterraine à forte teneur en nitrates dans un courant souterrain l'plus important. Les résultats des études de modélisation menées dans les trois secteurs suisses démontrent l'influence non négligeable des interactions nappe-rivière sur la réserve en eau. Ces études permettent de mettre en évidence et d'évaluer les paramètres pertinents et caractéristiques des phénomènes d'infiltration et d'exfiltration entre les eaux superficielles et les eaux souterraines (par exemple le coefficient d'échange = rapport entre la perméabilité et l'épaisseur du lit du cours d'eau). Les trois projets pilote disposent de systèmes de mesures des eaux souterraines spécifiques permettant de spécifier les données nécessaires à la modélisation.

6.2 RESULTATS ET CONSEQUENCES

Les résultats des trois sous-projet permettent pour le moment de donner les conclusions suivantes:

- (1) Dans le système de la plaine de la Wiese, les échanges entre cours d'eau et nappe dépendent: (i) de la perméabilité du lit de la rivière (coefficient d'échange K_f), (ii) des conditions aux limites hydrauliques (niveau d'eau dans la rivière, prélèvements en eau souterraine, etc...) ainsi que (iii) de la perméabilité et de l'hétérogénéité de l'aquifère. Les processus de colmatage / décolmatage jouent en cela un rôle important. Les estimations des débits d'infiltration (q) obtenues pour la Wiese correspondent bien avec les valeurs issues d'autres cours d'eau alluviaux (tableau 1).

Tabelle 6.2.1: Spezifische Infiltrationsraten (q) verschiedener alpiner und voralpiner Fließgewässer. Daten mit Ausnahme für die Wiese, die Birs und den Rhein bei Muttenz-Pratteln; aus Höhn 2002. HW: Hochwasser; NW: Niedrigwasser.
 Tableau 6.2.1; Débits d'infiltration spécifiques (Q) pour différents cours d'eau d'origine alpine ou préalpine. Les données proviennent de Höhn 2002 à l'exception de la Wiese, de la Birs et du Rhin au niveau de Muttenz/Pratteln. HW: hautes eaux; NW: basses eaux.

Fließgewässer cours d'eau	Breite b [m] largeur	q [m ³ d ⁻¹ m ⁻²]	Datum date
Poschiavino / Permunt	10	0.4-0.7 / 2-4	1989 / 1990
Limmat / Zürich	30	0.3	-
Limmat / Hardhof	30	1	-
Limmat / Dietikon	30	0.1	-
Glatt / Glattfelden	18	0.05-0.1	1979
Sissle / Eiken	12	0.08-0.2	1976
Töss / Linsental	20	0.05	1988
Rhein / Lustenau	65	3	2000
Rhein / Muttenz-Pratteln	200	0.04	2004
Thur / Grüneck-Feldi	50	0.3	-
Wiese / Lange Erlen (HW)	25	0.55	2003
Wiese / Lange Erlen (NW)	25	0.2	1996
Birs / Reinach	30	0.12	2006

- (2) Die Resultate des Systems Muttenz-Pratteln dokumentieren insbesondere den Einfluss der Grundwassernutzungen auf das regionale Fließfeld. Die Komplexität der Beeinflussungen durch die verschiedenen grenzüberschreitenden Nutzungen führen dazu, dass das regionale Grundwassersystem nur mit Modellen verstanden werden kann, welche die räumliche und zeitliche Dynamik der Nutzungen im regionalen Massstab mit genügend hoher Auflösung verknüpfen. Jede größere Nutzungsänderung würde eine Veränderung des Fließfeldes bedeuten. Entsprechend unterstreicht dieses Teilprojekt die Notwendigkeit eines Grundwasser-managements in urbanen Gebieten, wo ein Nebeneinander von Trinkwasserversorgung und industriellen Wassernutzungen existiert.
- (2) Les résultats du système Muttenz-Pratteln montrent plus particulièrement l'influence des prélèvements en eaux souterraines sur le champ d'écoulement. La complexité des interactions entre les différents usages transfrontaliers nécessitent l'utilisation de modèle pour comprendre le système et prendre en compte la dynamique spatiale et temporelle des usages avec une précision suffisante. Chaque modification importante d'un usage aurait pour effet de modifier le champ des écoulements d'eau souterraine. Ce sous-projet met par là en évidence la nécessité de mettre en place une gestion des eaux souterraines en zone urbaine dans lesquels cohabitent l'alimentation en eau potable et les prélèvements industriels.
- (3) Das System Birstal veranschaulicht die Einmischung und den Transport von Nitrat aus landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten in einen regional bedeutsamen Grundwasserleiter. Ein Ausweichen auf flussnahe Fassungen birgt jedoch ein gewisses Risiko bezüglich des Auftretens von Mikroorganismen in flussnahen
- (3) L'exemple de la Birs met en relief les effets de l'apport et du transport de nitrates issus de zone d'agriculture intensive dans un aquifère important à l'échelle régionale. La construction de forages en bordure de cours d'eau ne constitue cependant pas une alternative sans risque en raison des microorganismes qui

Wasserfassungen. Ein optimiertes Entnahmemanagement erfordert auch in diesem Fall fundierte Kenntnisse der Fluss-/Grundwasser-Interaktionen.

Der Datensatz der instationären Modellierung der Grundwasserströmung, geeicht auf der Grundlage von Stundenwerten des hydraulischen Potentials in Piezometern sowie der Grundwasserentnahme und Anreicherung, erlaubt zudem das Studium des zeitlichen Verlaufs der Kolmations-/Dekolmationsprozesse an einer Flusssohle.

peuvent s'introduire dans de telles installations. Une gestion des eaux optimale repose également dans ce cas sur une bonne connaissance des interactions nappe-rivière.

Les données collectées pour la modélisation hydrodynamique des eaux souterraines en régime transitoire, en pas de temps horaire pour ce qui est des niveaux piézométriques ainsi que des prélèvements et des enrichissements d'eau souterraines, constituent une base d'étude de l'évolution des phénomènes de colmatage / décolmatage du lit d'un cours d'eau dans le temps.

7 Modellaufbau und Eichung für stationäre Strömungsverhältnisse

Construction du modèle et étalonnage en régime permanent

7.1 ÜBERSICHT

Ziel der Modellierung von Strömungs- und Transportverhältnissen im gesättigten Grundwasserleiter des Oberrheingrabens ist es diese mit Hilfe eines dreidimensionalen hoch aufgelösten numerischen Modells nachzubilden und ein anhand von Messdaten abgesichertes Werkzeug zur Prognose der Transportprozesse bereitzustellen. Für diese Aufgabenstellung waren folgende Arbeitsschritte notwendig:

- Aufbau des stationären Strömungsmodells
- Eichung für stationäre Strömungsverhältnisse
- Erweiterung auf instationäre Strömungsprozesse
- Eichung für instationäre Strömungsprozesse
- Aufbau des Transportmodells auf der Basis stationärer und instationärer Strömungsverhältnisse
- Eichung des Transportmodells für die Parameter Tritium, Sauerstoff und Nitrat

Zunächst musste das stationäre Strömungsmodell aufgebaut und anhand von gemessenen Piezometerhöhen geeicht werden. Der geometrische Aufbau des Strömungsmodells erfolgte unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Grundlagen, die in Kapitel 2 beschrieben sind.

Im Rahmen der Modelleichung werden die nicht im Detail bekannten Untergrundparameter wie die Durchlässigkeit so lange variiert, bis eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Piezometerhöhen vorliegt. Die Variation der Untergrundparameter erfolgt unter Berücksichtigung der bekannten Bandbreiten aus der hydrogeologischen Erkundung (siehe Kap. 2).

7.1 INTRODUCTION

L'objectif de la modélisation de l'hydrodynamique et du transport dans la partie saturée de l'aquifère du Rhin Supérieur est de disposer d'un outil de prévision fiable, construit à partir d'un modèle numérique 3D de haute résolution et validé par des mesures. Les étapes suivantes ont dû être abordées pour atteindre ce but :

- Construction d'un modèle hydrodynamique en régime permanent.
- Etalonnage du modèle hydrodynamique en régime permanent
- Généralisation du modèle au régime transitoire
- Etalonnage du modèle hydrodynamique en régime transitoire
- Construction du modèle de transport sur la base de l'hydrodynamique en régime permanent et transitoire
- Etalonnage du modèle de transport pour le Tritium, l'oxygène dissous et les nitrates

Dans un premier temps, le modèle hydrodynamique en régime permanent a été construit puis étalonné à partir de mesures de hauteurs piézométriques. La géométrie du modèle a été définie à partir des données hydrogéologiques décrites dans le chapitre 2.

L'étalonnage du modèle consiste à faire varier les paramètres inconnus du sous-sol, comme la perméabilité par exemple, jusqu'à atteindre la meilleure adéquation possible entre piézométrie calculée et piézométrie mesurée. La plage de variation de ces paramètres est définie à l'aide des incertitudes estimées à partir des investigations hydrogéologiques (voir chapitre 2).

Da das stationäre Strömungsmodell die Basis insbesondere für die Prognose der Nitratprozesse im Grundwasserleiter darstellt, ist es notwendig mit dem Strömungsfeld möglichst repräsentative stationäre Verhältnisse zu erfassen. Da die Grundwasserströmung natürlichen hydrologischen Schwankungen unterworfen ist, sind für langfristige Betrachtungen über mehrere Jahre oder Jahrzehnte die mittleren Verhältnisse am besten geeignet. Die Analyse der hydrologischen Verhältnisse der letzten 20 Jahre ergab, dass im Jahr 1986 näherungsweise mittlere Verhältnisse vorgelegen haben. Ebenso zeigten die gemessenen Piezometerhöhen im Oberrheingraben für den Stichtag 20.10.1986 in allen Bereichen näherungsweise mittlere Verhältnisse. Aus diesem Grund wurde der Aufbau der hydrologischen und hydraulischen Randbedingungen auf das Jahr 1986 und den ausgewählten Stichtag 20.10.1986 ausgerichtet.

Bei der Simulation der Strömungsverhältnisse kam das vom US Geological Survey entwickelte Programmsystem MODFLOW [MC DONALD, HARBAUGH 1988], das vom LUBW weiterentwickelt wurde, zur Anwendung. Das Programm MODFLOW basiert auf dem integralen Finite-Differenzen-Verfahren.

7.2 HORIZONTALE ABGRENZUNG

Die Horizontale Abgrenzung des numerischen Modells erfolgt auf der Grundlage der geometrischen Ausdehnung des Kiesgrundwasserleiters im Oberrheingraben und der hydrogeologisch bekannten Randbedingungen für die Grundwasserströmung.

7.2.1 MODELLGEBIET

Das Gebiet des Grundwassermodells umfasst den Raum des inneren Projektgebiets. Das horizontale Modellgebiet wurde demnach entsprechend dem Rand des Kiesgrundwasserleiters im Oberrheingraben gemäß Abbildung 7.2.1 festgelegt. Im Westen begrenzt der Rand der Vogesen und im Osten der Schwarzwaldrand das Modellgebiet. Im Norden reicht das Modellgebiet bis in den Raum Karlsruhe. Im Süden endet das Modellgebiet am Hochrhein bei Grenzach-

Parce que le modèle hydrodynamique en régime permanent est en particulier la base de la prévision du transport de nitrates dans l'aquifère, il est important de représenter au mieux les processus hydrodynamiques. Bien que les écoulements soient soumis aux variations naturelles des régimes hydrologiques, l'hydrodynamique en régime moyen est le régime le mieux adapté pour les simulations concernant plusieurs années voire décennies. L'interprétation des données hydrologiques sur les 20 dernières années montre que l'année 1986 peut être considérée comme une année moyenne. De plus, les hauteurs piézométriques mesurées le 20.10.1986 dans le Bassin du Rhin supérieur peuvent être considérées globalement comme des hauteurs moyennes. De ce fait, une estimation des conditions hydrologiques et hydrauliques a été faite pour l'année 1986 et pour le jour du 2.10.1986.

Le logiciel MODFLOW [MC DONALD, HARBAUGH 1988] mis au point par le Service Géologique des Etats-Unis et adapté par le LUBW a été utilisé pour l'hydrodynamique. Le logiciel MODFLOW utilise la méthode des différences finies intégrales pour la résolution des équations.

7.2 LIMITE HORIZONTALE

Les limites horizontales du modèle hydrodynamique ont été définies à partir de l'extension des alluvions constituant l'aquifère du Rhin Supérieur et des conditions aux limites hydrogéologiques connues pour l'hydrodynamique.

7.2.1 DOMAINE MODELISE

Le domaine modélisé est constitué de la plaine du Rhin. D'un point de vue horizontal, le domaine est adapté à la limite des alluvions de l'aquifère du Rhin Supérieur (voir figure 7.2.1). La limite Ouest est constituée par les Vosges, celle à l'Est par la Forêt Noire. Au Nord, le domaine s'étend jusqu'à Karlsruhe et au Sud, jusqu'à Grenzach-Wyhlen.

Wyhlen.

Das so abgegrenzte Modellgebiet hat eine maximale Ausdehnung von 160 km in nordsüdlicher Richtung und 90 km in Ost-West-Richtung. Die Gesamtfläche des Modellgebiets beträgt 4.289 km².

Le domaine ainsi défini atteint une longueur maximale de 160 km dans la direction Nord-Sud et de 90 km dans la direction Est-Ouest. La surface totale du domaine modélisé est de 4 289 km².



Abbildung 7.2.1: Horizontale Ausdehnung des Grundwassermodells und Randbedingungen an den Modellrändern.
Figure 7.2.1: Limites horizontales du modèle hydrogéologique et conditions aux limites.

7.2.2 MODELLRANDBEDINGUNGEN

Die Grundwasserströmung wird hauptsächlich durch die so genannten Randbedingungen bestimmt. Diese werden sowohl innerhalb des Mo-

7.2.2 CONDITIONS AUX LIMITES

L'hydrodynamique souterraine est en grande partie définie par les conditions aux limites. Celles-ci sont définies à la fois à l'intérieur du domaine

dellgebietes als auch an den Modellrändern angesetzt. Für die Definition der Randbedingungen stehen folgende 3 Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Art oder Festpotenzialrandbedingung: Bei dieser Randbedingung wird dem numerischen Modell eine Piezometerhöhe vorgegeben. Vom Modell wird dann der Zu- oder Abfluss über diese Randbedingung bestimmt.

2. Art oder Quellen/Senken-Randbedingung: Bei dieser Randbedingung wird dem numerischen Modell eine Entnahme oder Zugabe vorgegeben. Die Piezometerhöhe wird wie im übrigen Modellgebiet durch das numerische Modell bestimmt. Auch ein undurchlässiger Rand ist eine Randbedingung 2. Art.

3. Art oder Leakagerandbedingung: Diese Randbedingung wird für die Interaktion mit Oberflächengewässern verwendet. Dabei wird der Wasserspiegel im oberirdischen Gewässer, Gewässersohle und ein Sohlwiderstand dem numerischen Modell vorgegeben. Sowohl der Austausch mit dem Gewässer als auch die Piezometerhöhe im Grundwasserleiter wird durch das Modell bestimmt.

Am Modellrand des Untersuchungsgebiets wurden die folgenden in Abbildung 7.2.1 dargestellten Randbedingungen verwendet:

- unterirdischer Randzufluss über den Rand der Vogesen (Randbedingung 2. Art)
- unterirdischer Randzufluss über den Schwarzwaldrand (Randbedingung 2. Art)
- vorgegebene Potenzialhöhe am nördlichen Rand (Randbedingung 1. Art)
- vorgegebene Potenzialhöhe am südlichen Rand (Randbedingung 1. Art)

Die vorgegebenen Potenzialhöhen am nördlichen und südlichen Rand wurden gemessenen Grundwasserständen entnommen.

Im Innern des Modellgebiets wurden folgende Randbedingungen angesetzt:

- Grundwasserentnahmen
- Grundwasserneubildung aus Niederschlag (siehe Kap. 5)
- Austausch mit oberirdischen Gewässern (Rhein siehe Kap. 4, Gewässernetz und Baggerseen)

modélisé et aux limites du domaine. Trois types de conditions aux limites sont possibles :

Premier type ou conditions de potentiel imposé: ce type de condition consiste à imposer la valeur de la hauteur piézométrique dans le modèle numérique. Les flux entrants ou sortants pour ce type de limite sont calculés par le modèle.

Deuxième type, conditions de flux ou terme puits/source : un flux (ou débit) est imposé au modèle numérique par ce type de condition. La hauteur piézométrique correspondante est calculée par le modèle numérique. Les limites imperméables sont définies par ce type de condition.

Troisième type ou condition mixte: ce type de limites est utilisé pour représenter les échanges nappe-rivières. Pour les cours d'eau de surface, il est alors nécessaire de fournir au modèle numérique les cotes de la surface libre, du radier, la perméabilité du lit et l'épaisseur des sédiments. Le modèle numérique calcule alors la hauteur piézométrique correspondante et le débit échangé.

Les conditions aux limites du domaine modélisé présentées sur la figure 7.2.1 sont les suivantes :

- des conditions de flux souterrains à la limite des Vosges (Condition de type 2).
- des conditions de flux souterrains à la limite de la Forêt Noire (Condition de type 2).
- Piézométrie imposée à la limite Nord (condition de type 1).
- Piézométrie imposée à la limite Sud (condition de type 1).

Les hauteurs piézométriques imposées aux limites Sud et Nord ont été estimées à partir de valeurs mesurées.

A l'intérieur du domaine modélisé, les conditions suivantes ont été utilisées :

- Les prélèvements par pompage
- La recharge de nappe due aux précipitations (voir chapitre 5)
- Les échanges avec les eaux de surface (pour le Rhin – voir chapitre 4, les rivières et les gravières)

7.3 HORIZONTALE DISKRETISIERUNG

Als horizontale Diskretisierung wurde entsprechend dem Finite-Differenzen-Verfahren ein zeilen- und spaltenorientiertes Modellnetz aufgebaut. Dieses Modellnetz ist nach Norden ausgerichtet und weist quadratische Modellzellen auf. Im Hinblick auf die Simulation von Transportprozessen im Grundwasserleiter musste ein vergleichsweise feines Modellnetz verwendet werden, um die numerischen Voraussetzungen für eine stabile Lösung (Gitter-Peclet-Zahl ≈ 1) einzuhalten. Deshalb wurden Modellzellen mit einer Seitenlänge von 100 m angesetzt.

Aus dieser sehr feinen horizontalen Auflösung ergab sich ein Modellnetz mit 949 Spalten und 1.619 Zeilen. Innerhalb des Modellgebiets liegen 4.106.195 Modellzellen, an denen die Strömungs- und Transportverhältnisse berechnet werden.

7.4 VERTIKALE DISKRETISIERUNG

Das numerische Modell wurde entsprechend der hydrogeologischen Modellvorstellung für den Untersuchungsraum zunächst in 2 hydrogeologische Einheiten unterteilt. Dies sind im oberen Teil die Neuenburg-Formation und im unteren Teil die Breisgau - Formation. Um insbesondere beim Transport die scharfen vertikalen Fronten nachbilden zu können, wurde das numerische Modell in vertikaler Richtung in insgesamt 10 Modellschichten unterteilt. Davon wurden 5 Modellschichten verwendet, um die Neuenburg-Formation abzubilden, und die restlichen 5 Modellschichten repräsentieren die Breisgau - Formation. Im Bereich der Ostrheinrinne, die zwischen dem Kaiserstuhl und der Freiburger Bucht liegt, wurde diese den oberen 5 Modellschichten zugeordnet. Außerdem wurde der feinklastische Horizont 4 im Norden des Modellgebiets zwischen Baden-Baden und Karlsruhe der 5. Modellschicht zugewiesen, die dort mit einem Meter Mächtigkeit angenommen wurde. Als weitere hydrogeologische Randbedingung bei der Erstellung der Modellschichten wurde berücksichtigt, dass die oberen 20 m der Neuenburg-Formation deutlich höher durchlässig sind als die darunter liegenden.

7.3 LA DISCRÉTISATION HORIZONTALE

Imposée par ma méthode des différences finies, la discrétisation est fondée sur un maillage constitué de lignes et colonnes. Ce maillage est orienté au Nord et est constitué de mailles carrées. Dans l'objectif de simuler le transport dans l'aquifère, la discrétisation utilisée est homogène et les mailles de petites tailles pour assurer une solution numérique stable (Péclet de discrétisation de l'ordre de 1). Pour ces raisons, les mailles utilisées ont un côté de longueur 100 m.

Cette discrétisation très fine a conduit à définir un maillage constitué de 949 colonnes et 1 619 lignes. 4 106 195 mailles représentent l'intérieur du domaine modélisé, mailles pour lesquelles l'hydrodynamique et le transport seront simulés.

7.4 DISCRÉTISATION VERTICALE

Conformément au modèle géologique, le modèle numérique a été construit sur la base de 2 unités hydrogéologiques : la partie supérieure de la formation du Neubourg et la partie inférieure de la formation de Breisgau. Le modèle numérique repose sur une discrétisation verticale en 10 couches afin de pouvoir représenter au mieux les fronts raides et verticaux de concentration lors de la simulation du transport. De ce fait, 5 couches ont été utilisées pour représenter la formation du Neubourg, les 5 autres couches pour la formation de Breisgau. Dans la zone du chenal rhénan oriental, entre le Kaiserstuhl et la baie de Fribourg, seules les 5 couches supérieures sont utilisées. Par ailleurs, l'horizon intercalaire 4 au Nord du domaine entre Baden-Baden et Karlsruhe qui, dans cette zone, a une épaisseur estimée à 1 m, est représenté par la couche numéro 5. De plus, dans la conception du modèle, il a été tenu compte de perméabilités plus importantes dans les 20 mètres supérieurs de la formation du Neubourg par rapport aux couches inférieures, conformément aux informations hydrogéologiques.

Unter Berücksichtigung der o.g. hydrogeologischen Rahmenbedingungen erfolgte die in Abbildung 6.4.1 dargestellte Unterteilung des Untersuchungsraumes im numerischen Modell.

La discrétisation verticale retenue dans le modèle numérique est présentée sur la figure 6.4.1. Elle est conforme aux informations hydrogéologiques énoncées au paragraphe précédent.

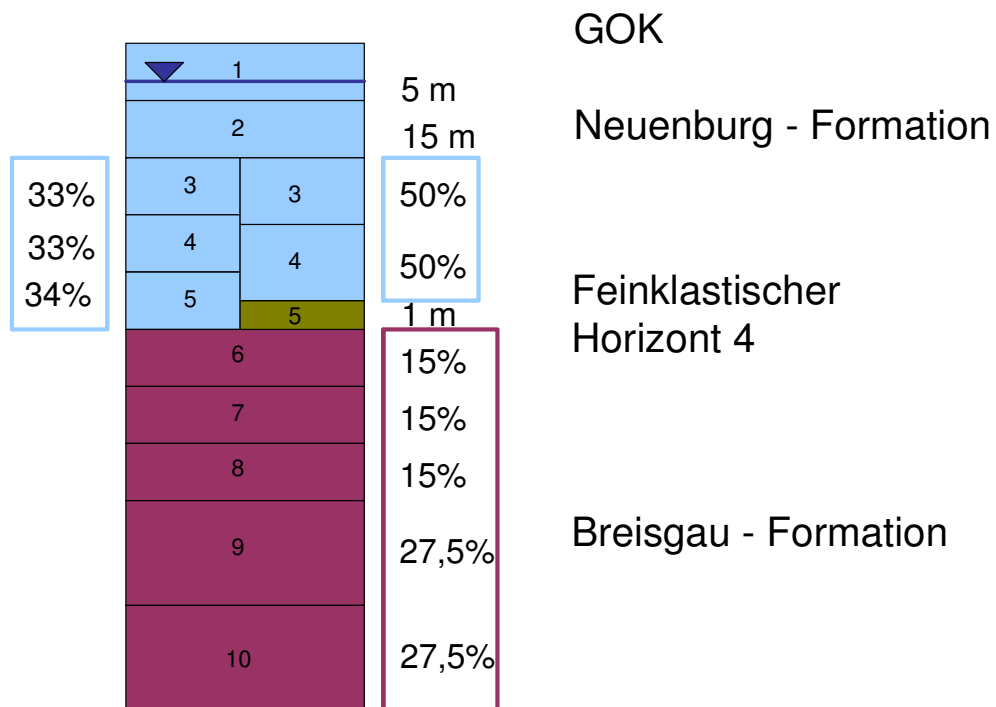


Abbildung 7.4.1: Schematische Darstellung zur Aufteilung der Modellschichten im Grundwassermodell.
Figure 7.4.1: Représentation schématique de la discrétisation verticale du modèle hydrogéologique.

Die Basis der ersten Modellschicht wurde 5 m unter dem Grundwasserspiegel bei Mittelwasserverhältnissen gelegt. Die zweite Modellschicht hat eine Mächtigkeit von 15 m. Damit wird mit den ersten beiden Modellschichten der obere Teil der Neuenburg-Formation abgebildet. Die Modellschichten 3 bis 5 repräsentieren den unteren Teil der Neuenburg-Formation. Diese wird im numerischen Modell in 3 gleich dicke Modellschichten unterteilt. Im Verbreitungsbereich des feinklastischen Horizonts 4 zwischen der Neuenburg - Formation und der Breisgau - Formation repräsentiert die Modellschicht 5 mit einer Mächtigkeit von 1 m den feinklastischen Horizont 4. Die Modellschichten 3 und 4 unterteilen

La base de la première couche du modèle se situe à 5 m sous la surface piézométrique observée en régime moyen. La deuxième couche a une épaisseur de 15 m. La partie supérieure de la formation du Neubourg est ainsi décrite par ces deux premières couches. Les couches 3 à 5 représentent la partie inférieure de la formation du Neubourg. Cette partie est discrétisée dans le modèle numérique par 3 couches de même épaisseur. La zone constituée de l'horizon intercalaire 4 entre les formations de Neubourg et de Breisgau est représentée par la 5ème couche d'une épaisseur de 1 m dans le secteur concerné. Dans cette zone, les couches 3 et 4 représentent pour moitié chacune

hier den unteren Teil der Breisgau – Formation in zwei Hälften.

In der ebenfalls in 5 Modellschichten diskretisierten Breisgau - Formation wurden die Mächtigkeiten der Modellschichten 6 bis 8 jeweils mit 15% der Gesamtmächtigkeit der Breisgau - Formation angesetzt. Die Mächtigkeiten der Modellschichten 9 und 10 betragen jeweils 27,5% der Gesamtmächtigkeit von der Breisgau - Formation.

Durch die in Abbildung 7.4.1 dargestellte vertikale Diskretisierung ergeben sich oberflächennah die geringsten Schichtmächtigkeiten, die mit der Tiefe hin zunehmen. Gleichzeitig lässt sich die Schichtgrenze zwischen der Neuenburg - Formation und der Breisgau - Formation sowie die Annahme, dass die oberen 20 m der Neuenburg - Formation höher durchlässig sind, im numerischen Modell nachbilden.

7.5 GRUNDWASSERENTNAHMEN

Im Untersuchungsraum liegen zahlreiche Grundwasserentnahmen, die von der öffentlichen Wasserversorgung, von der Industrie und zur landwirtschaftlichen Bewässerung genutzt werden. Die Lage der Entnahmen ist in Abbildung 7.5.1 dargestellt. Im Oktober 1986 wurden insgesamt 16,54 m³/s Wasser aus dem Kiesgrundwasserleiter des Oberrheingraben entnommen. Soweit die erforderlichen Ausbaudaten bekannt waren, wurden die Entnahmen tiefendifferenziert im Grundwassermodell als Randbedingung 2. Art angesetzt.

la partie inférieure de la formation de Breisgau.

La formation de Breisgau, elle aussi discrétisée en 5 couches, est représentée par les couches 6 à 8 ayant chacune une épaisseur égale à 15% de l'épaisseur totale de la formation, et par les couches 9 et 10 d'épaisseur chacune égale à 27.5% de l'épaisseur totale.

La discrétisation verticale représentée sur la figure 7.4.1 montre que la discrétisation la plus fine se situe près de la surface du sol et que l'épaisseur des couches augmente avec la profondeur. Par cette discrétisation, il a donc été possible de représenter l'interface formation de Neuenburg-formation de Breisgau et de reproduire les perméabilités plus élevées dans les 20 m supérieurs de la formation du Neuenburg.

7.5 PUIITS DE POMPAGE

De nombreux puits de pompage sont présents dans la zone d'étude, puits utilisés par les syndicats des eaux, les industries ou l'irrigation des cultures. La localisation de ces puits est présentée sur la figure 7.5.1. En octobre 1986, 16,54 m³/s ont été prélevés des alluvions du Rhin Supérieur. Ces prélèvements, considérés comme des conditions aux limites de 2^{ème} type, sont répartis sur la verticale dans le modèle numérique lorsque les informations concernant l'équipement des puits sont disponibles.



Abbildung 7.5.1: Lage der Grundwasserentnahmen im Untersuchungsraum (Oktober 1986).
Figure 7.5.1: Localisation des points de prélèvements dans le domaine d'étude (Octobre 1986).

7.6 UNTERIRDISCHE ZU- UND ABFLÜSSE

Über den Schwarzwaldrand und den Rand der Vosges findet ein unterirdischer Zustrom in das Modellgebiet statt. Zunächst wurde versucht, den unterirdischen Grundwasserzufluss über eine Bilanzbetrachtung für die angrenzenden Einzugsgebiete zu ermitteln. Dabei hat sich gezeigt, dass diese Bilanzierung nur für kleine Zwischeneinzugsgebiete, die zwischen den oberirdischen Zuflüssen am Gra-

7.6 ENTRÉE ET PERTE D'EAUX

Des apports d'eau souterraine ont lieu aux limites nappe-Vosges et nappe-Forêt Noire. Dans un premier temps, ces flux ont été estimés par une méthode de bilan appliquée au niveau des bassins-versants correspondants. Il a été possible de montrer que cette approche n'est valable que pour des bassins de taille intermédiaire, bassins situés en limites de la nappe. Pour ces bassins-versants

benrand liegen, möglich ist. Für diese Zwischeneinzugsgebiete wurde die versickernde Neubildungsrate als Randzustrom dem numerischen Modell vorgegeben. Zusätzlich zu diesen Zwischeneinzugsgebieten fließt über die quartären Talfüllungen der Gewässer aus dem Schwarzwald und den Vogesen Grundwasser zu. Dafür wurde eine Zuflussrate von 100 l/s pro Kilometer Talbreite abgeschätzt. Aus dieser grob bestimmten Randzuflussverteilung ergibt sich ein unterirdischer Gesamtzufluss von 8 m³/s über den gesamten westlichen und östlichen Modellrand inklusive dem Rand zum Kaiserstuhl. Der Randzufluss wurde in Abhängigkeit der Durchlässigkeiten über die Tiefe am Modellrand verteilt und als Randbedingung 2. Art angesetzt.

7.7 OBERIRDISCHE GEWÄSSER

Der hauptsächliche Vorfluter im Untersuchungsgebiet ist der Rhein. Dieser wird durch ein feinmaschiges Gewässernetz gespeist, das in Abbildung 7.7.1 dargestellt ist. Im Hinblick auf die Berücksichtigung der Gewässer im Grundwassermodell wurden diese in folgende drei unterschiedliche Kategorien unterteilt. Diese sind:

- Kleinere bis mittlere Gewässer
- Rhein und Rheinkanalstrecken
- Baggerseen

de taille intermédiaire, l'infiltration résultante des précipitations a été considérée comme un flux d'entrée pour le modèle numérique. Des apports supplémentaires à ceux de ces bassins-versants existent au niveau des alluvions quaternaires présents dans les vallées des Vosges et de la Forêt Noire débouchant dans la plaine. Un apport d'un débit de 100 l/s a été estimé pour une largeur de vallée de 1 km. Un débit moyen de 8 m³/s a été établi à partir de cette première estimation pour l'ensemble des limites ouest et est, incluant la limite avec le Kaiserstuhl. Ce débit est réparti verticalement en fonction des perméabilités aux limites du domaine et considéré comme une condition aux limites de type 2.

7.7 LES EAUX DE SURFACE

Le Rhin est le plus grand cours d'eau dans la zone d'étude. Celui-ci est alimenté par un réseau de cours d'eaux surface très dense présenté sur la figure 7.7.1. Ces cours d'eaux ont été classés en 3 catégories afin de les prendre en compte dans modèle hydrogéologique. Ces catégories sont :

- Cours d'eau de petite et moyenne importance
- Le Rhin et son canal d'accompagnement
- Les gravières

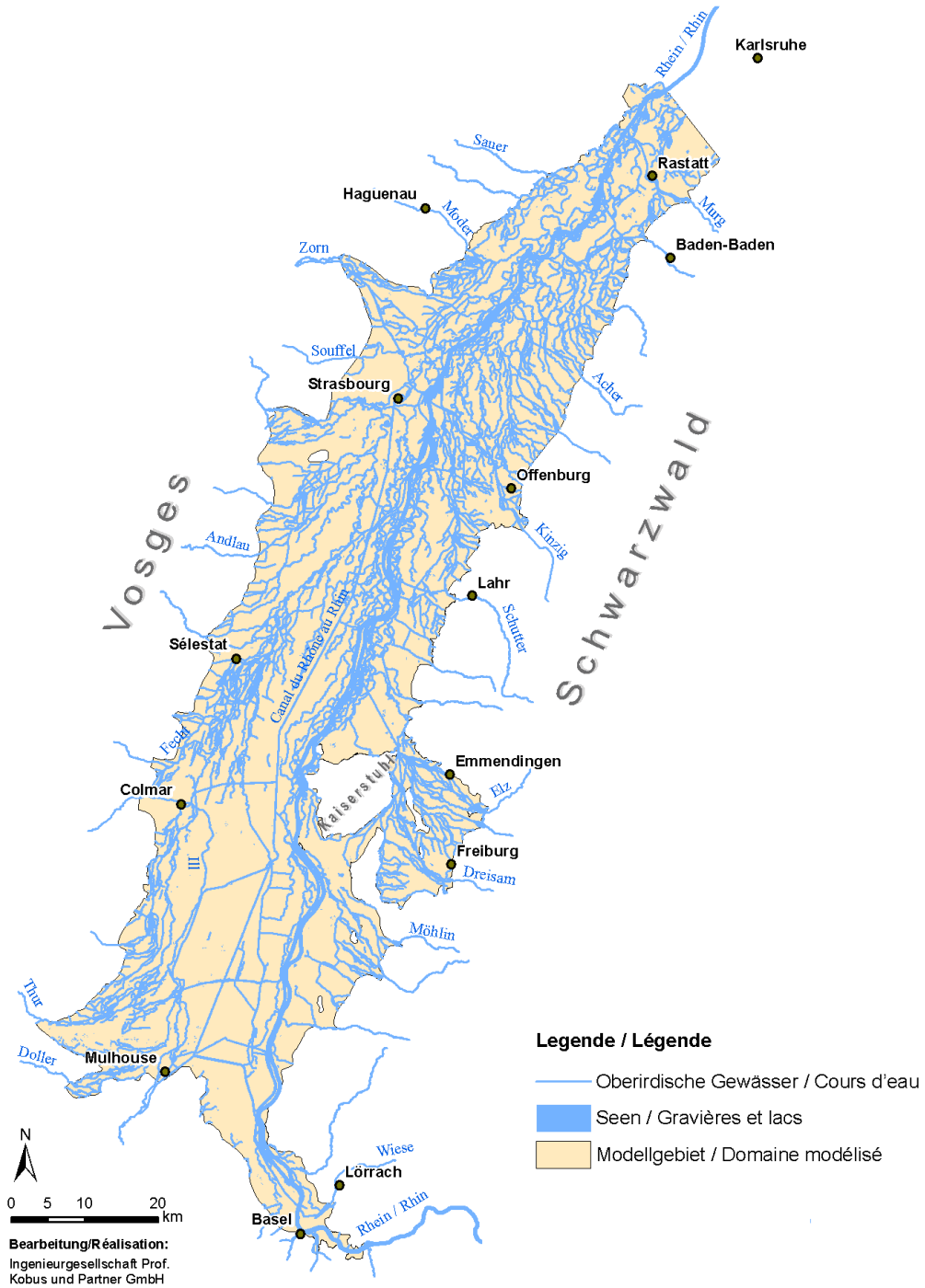


Abbildung 7.7.1: Lage der Gewässer im Untersuchungsraum.
 Figure 7.7.1: Localisation des cours d'eau et des gravières et lacs dans le domaine d'étude.

7.7.1 RHEIN ALS LEAKAGE-RANDBEDINGUNG MIT VOR- GEGEBENEN LEAKAGEHÖHEN

Der Abfluss im Rhein und den Rheinkanalstrecken ist weitgehend unabhängig von der Interaktion mit dem anstehenden Grundwasser. Deshalb wurde hierfür die klassische Leakagerandbedingung mit vorgegebenem Wasserspiegel im Gewässer verwendet. Es erfolgte keine Rückkopplung zwischen Grundwasser und Gewässer. Im Folgenden wird diese Randbedingung als RIVER-Randbedingung bezeichnet.

Die für die RIVER-Randbedingung notwendige Wasserspiegellage für den Rhein und seine Rheinkanalstrecken wurde mit einem eindimensionalen hydraulischen Modell in Tagesschritten für die Periode 01.01.1985 bis 31.12.2002 berechnet. Die durchgeführte Bearbeitung und ihre Ergebnisse sind ausführlich in Kapitel 4 beschrieben. Für die stationäre Modellanpassung wurde die Wasserspiegellage vom Stichtag 20.10.1986 verwendet.

7.7.2 GEWÄSSERNETZ MIT GEKOPPELTER BILANZBE- TRACHTUNG

Für das feinmaschige Gewässernetz wurde eine gekoppelte Betrachtung zwischen Grundwasser und Oberirdische Gewässer mit einer abschnittweisen Bilanzbetrachtung im Gewässer durchgeführt. Dies ist notwendig, da die Abflussverhältnisse und damit die Wasserspiegellagen in den meisten kleineren Gewässern vom Austausch mit dem Grundwasserleiter abhängen. Hierfür wurde die so genannte STREAMFLOW-Randbedingung verwendet.

Bei der STREAMFLOW-Randbedingung werden die Gewässer in einzelne Abschnitte unterteilt. Für diese Abschnitte erfolgt eine Bilanzierung des zu- und abfließenden Wassers (Zufluss vom oberstromigen Abschnitt, Abfluss in den unterstromigen Abschnitt, Austausch mit dem Grundwasser). Für die STREAMFLOW-Randbedingung wird das Gewässernetz mit Gewässerverzweigungen und – vereinigungen aufgebaut, so dass das gesamte Fließschema im Modellgebiet nachgebildet wird.

7.7.1 LE RHIN COMME CONDITION AUX LIMITES DU 3EME TYPE.

Les débits du Rhin et de son canal d'accompagnement sont indépendants des interactions avec les eaux souterraines. De ce fait, les conditions classiques d'échange nappe-rivière avec une cote de surface libre de la rivière imposée sont utilisées. Il n'y a pas de réaction nappe-rivières. Ces conditions seront appelées conditions de type Rivière par la suite.

Les cotes de surface libre pour le Rhin et le canal d'accompagnement nécessaires aux conditions de Rivière ont été calculées à l'aide d'un modèle hydraulique mono-dimensionnel pour la période du 01.01.1985 au 31.12.2002, avec un pas de temps de la journée. Cette étude et ses résultats sont présentés de manière détaillée dans le paragraphe 4. Pour le calcul de nappe en régime permanent, les cotes de la surface libres ont été prises au 20.10.1986.

7.7.2 RESEAU DE SURFACE COUPLE A LA NAPPE

Une description couplée des échanges entre nappe et eaux de surface a été retenue pour le réseau de surface, avec un calcul de bilan hydraulique par tronçon pour les eaux de surface. Cette approche est indispensable, les débits et donc les niveaux d'eau dans les cours d'eaux les plus petits étant fortement dépendants des échanges avec la nappe. Une condition aux limites dénommée STREAMFLOW est appliquée pour ces cours d'eau.

Les cours d'eau sont discrétisés en tronçon pour les conditions de type STREAMFLOW. Un bilan en eau est calculé pour chaque tronçon (entrée par le tronçon amont, sortie dans le tronçon aval, échange avec la nappe). L'ensemble du schéma hydraulique de surface présent dans le domaine d'étude est représenté pour les conditions de type STREAMFLOW, incluant les confluences et difffluences des cours d'eau.

Unter der Annahme von Normalabflussverhältnissen wird der zugehörige Wasserspiegel in den Gewässern berechnet. Dieser wird als so genannte Leakaugöhe bei der Ermittlung des Austausches mit dem Grundwasserleiter verwendet. Die Bilanzbetrachtung im Gewässer und die Berechnung des Austausches mit dem Grundwasser erfolgt iterativ innerhalb des numerischen Modells.

Die Gesamtlänge des Gewässernetzes beträgt 5.431 km. Da viele Gewässer außerhalb des Modellgebietes entspringen, fließen diese über den Rand des Grundwassermodells zu. Um den oberirdischen Zufluss berücksichtigen zu können, wurde dieser anhand der in Kapitel 3 dargestellten Abflussregionalisierung instationär auf Monatsbasis bestimmt. Eine Bilanzierung der regionalisierten Abflüsse in das Modellgebiet und dem Gesamtabfluss der zugehörigen Einzugsgebiete hat ergeben, dass ein Restglied übrig bleibt, welches nach hydrogeologischer Plausibilisierung nicht als unterirdischer Randzustrom aufgefasst werden kann. Dieses Restglied wurde dem oberirdischen Zufluss zugeschlagen.

7.7.3 BAGGERSEEN MIT GEKOPPELTER BILANZBETRACHTUNG

Die Baggerseen im Untersuchungsraum stehen in direktem hydraulischen Kontakt mit dem Grundwasserleiter. Die Baggerseen erhalten einen unterirdischen Zufluss und einen Abfluss, der mit der Summe der oberirdischen Zu- und Abflüsse im stationären Fall Null ergeben muss. Diese Bilanzbetrachtung wird im numerischen Modell anhand der so genannten LAKE-Randbedingung durchgeführt.

Im Untersuchungsgebiet liegen insgesamt 599 Baggerseen mit einer summarischen Seefläche von 40 km². Bei der Erstellung der LAKE-Randbedingung für die Baggerseen wurde auch die mittlere Tiefe mitberücksichtigt.

La cote de la surface libre est calculée sous l'hypothèse d'un écoulement où la pente de la surface libre est égale à la pente du radier. Cette cote sera considérée comme cote d'échange nappe-rivière pour les calculs de ces échanges avec la nappe. Les calculs de bilan dans les rivières et des échanges avec la nappe sont effectués d'une manière itérative par le modèle numérique. La longueur totale du réseau d'eaux de surface est de 5 431 km. Beaucoup de cours d'eau trouvent leur source à l'extérieur du domaine d'étude. Il convient donc d'estimer les débits aux niveaux des limites du domaine. Cette estimation spatialisée et menée à des pas de temps mensuels est détaillée dans le chapitre 3. Un calcul de bilan de ces débits spatialisés et des débits totaux au niveau des bassins-versants a mis en évidence un débit résiduel, débit résiduel ne pouvant être affecté aux écoulements souterrains pour des raisons hydrogéologiques. Ce débit résiduel a été affecté aux apports pour les eaux de surface.

7.7.3 GRAVIERES AVEC CALCUL COUPLE DE BILAN

Les gravières présentes dans le domaine d'étude sont en contact direct avec l'aquifère. Ces gravières sont le lieu d'apports et de pertes d'eaux souterraines, qui, cumulés avec les entrées/sorties des eaux de surface doivent conduire à un bilan global égal à zéro en régime permanent. Au sein du modèle numérique, ce calcul de bilan est effectué dans le cadre de la condition aux limites dite LAKE.

599 gravières pour une surface totale de 40 km² sont présentes dans le domaine d'étude. La profondeur moyenne de ces gravières est prise en compte dans la mise en œuvre de la condition dite LAKE.

7.8 GRUNDWASSERNEUBILDUNG AUS NIEDERSCHLAG

Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag stellt die hauptsächliche Zuflussgröße für den Grundwasserleiter dar. Bedingt durch die klimatologischen Verhältnisse auf der Nordhalbkugel erfolgt die hauptsächliche Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr. In den Sommermonaten weist die Neubildung wegen der wesentlich höheren aktuellen Verdunstung sehr geringe Werte auf.

Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag wurde länderübergreifend einheitlich mit dem hydrologischen Modell GWN_BW rasterbasiert mit einer horizontalen Auflösung von 500 m x 500 m für die Periode 01.01.1985 bis 31.12.2002 bestimmt. Dem Programm GWN_BW werden zur Simulation stationsbezogene Antriebsdaten in täglicher Auflösung zur Verfügung gestellt. Das Simulationsergebnis ist demnach maximal täglich aufgelöst. Für die vorliegende Grundwassermodellierung wurde als Grundwasserneubildung die berechnete Sickerung im langjährigen Mittel sowie in monatlicher Aggregation verwendet. Die methodischen Grundlagen, die benötigte Datengrundlage sowie die Berechnungsergebnisse sind im Kapitel 5 ausführlich beschrieben.

Aus der in Kap 5. beschriebenen Neubildungsbeziehung als Mittelwert über den gesamten Betrachtungszeitraum wurde die in Abbildung 7.8.1 dargestellte Verteilung für die stationäre Anpassung verwendet.

7.8 RECHARGE DE NAPPE A PARTIR DES PRECIPITATIONS

La recharge de nappe à partir des précipitations constitue les principaux apports pour l'aquifère. Déterminée par les conditions climatiques de l'hémisphère nord, la recharge a lieu principalement pendant les 6 mois les plus froids, c-à-d de la fin de l'automne au début du printemps. Durant les mois d'été, cette recharge est très faible compte tenu de l'importance de l'évaporation.

La recharge de nappe à partir des précipitations a été estimée par unités homogènes sur tout le domaine à l'aide du modèle distribué GWN_BW, sur la base de mailles de 500 m x 500 m pour la période du 01.01.1985 au 31.12.2002. Des données d'entrées au pas de temps journalier au niveau de stations locales sont fournies au modèle GWN_BW. De ce fait, la résolution de la discrétisation temporelle est au maximum journalière. L'infiltration moyennée sur plusieurs années et les valeurs agrégées à l'échelle du mois sont utilisées pour déterminer la recharge de nappe pour la modélisation hydrogéologique. Les aspects méthodologiques, les interprétations et les résultats de calcul sont détaillés dans le chapitre 5.

La figure 7.8.1 représente un résultat détaillé dans le chapitre 5 pour la recharge de nappe moyenne utilisée pour l'étalonnage du modèle hydrogéologique en régime permanent.

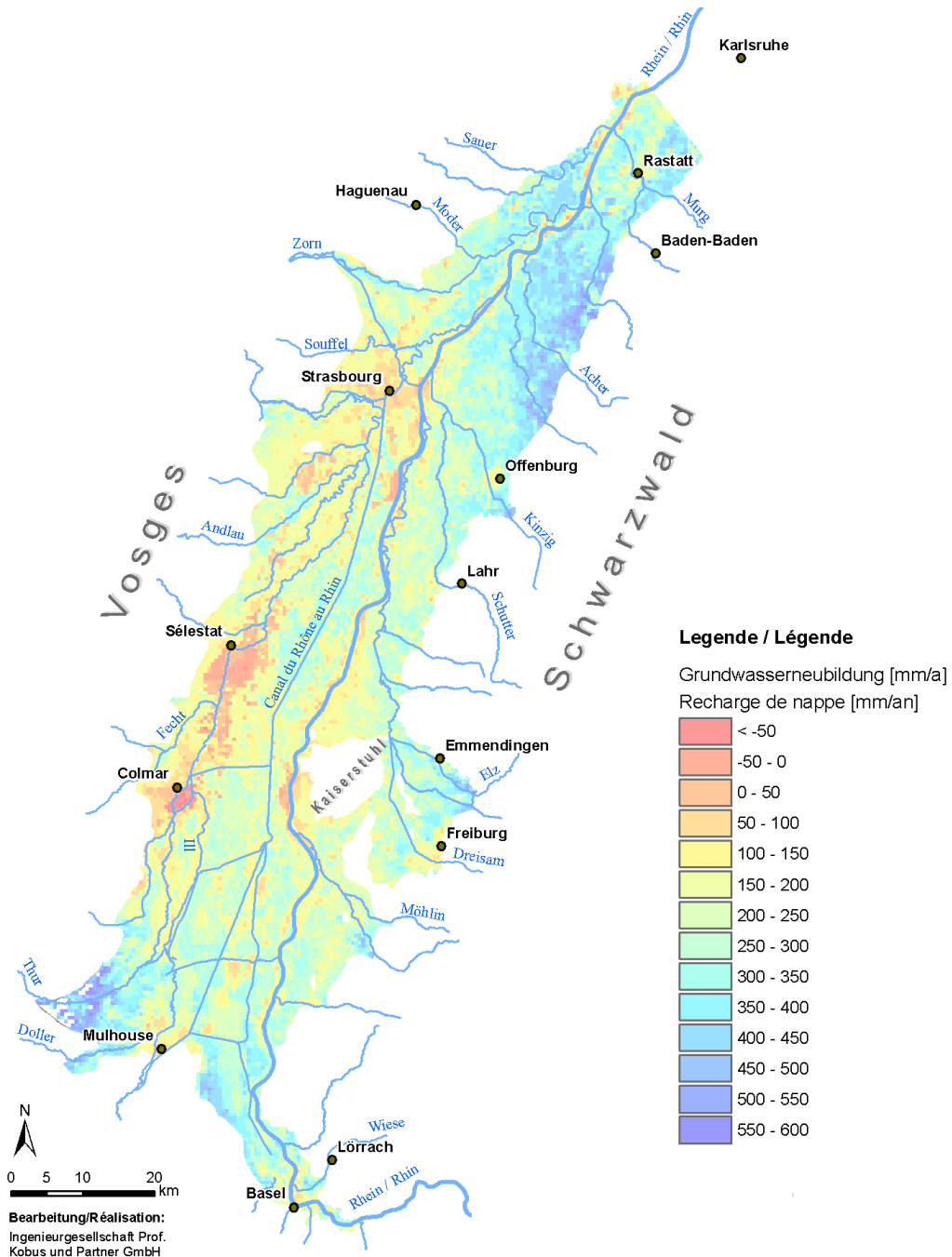


Abbildung 7.8.1: Verteilung der durchschnittlichen Grundwasserneubildung im Mittelungszeitraum 01.01.1985 – 31.12.2002.
Figure 7.8.1: Répartition de la recharge moyenne de nappe pour la période du 01.01.1985 au 31.12.2002.

Die höchsten Neubildungsraten liegen am Schwarzwaldrand zwischen Offenburg und Baden-Baden sowie im westlichen Teil des Kalibeckens vor. Hier erreichen die Neubildungsraten Werte von über 500 mm/a. Eine Grundwasserzehrung findet großflächig im Bereich der Ill-Niederung und lokal in Teilen der Rheinniederung aufgrund der geringen Flurabstände statt. Die mittlere Neubildungsrate für den gesamten Modellraum beträgt 233 mm/a.

Les valeurs de recharge les plus élevées se situent en limite de la Forêt Noire, entre Offenburg et Baden-Baden, et au débouché de la vallée de la Thur. Dans ces zones, la recharge dépasse des valeurs de 500 mm/an. Une perte d'eau souterraine par évaporation a lieu sur de grandes surfaces proche de l'Ill et de manière plus locale, proche du Rhin, compte tenu de la faible profondeur de la nappe. En moyenne, la recharge de nappe est de 233 mm/an pour l'ensemble du domaine.

7.9 VERGLEICHSGRÖßEN FÜR DIE STATIONÄRE MODELLEICHUNG

Im Rahmen der stationären Strömungseichung wurden die so genannten Eichgrößen variiert. Zur Überprüfung des Eichvorgangs wurden die gemessenen Piezometerhöhen (Vergleichsgrößen) mit den berechneten Piezometerhöhen verglichen. Bei der stationären Eichung wurden die gemessenen Piezometerhöhen vom Stichtag 20.10.1986 verwendet, die etwa mittlere Grundwasserströmungsverhältnisse repräsentieren.

Für diesen Stichtag lagen insgesamt 1.020 Messwerte vor, die mit den Berechnungswerten verglichen wurden. Auf deutscher Seite waren 872 und auf französischer Seite 148 Messwerte vorhanden.

7.10 EICHGRÖßEN

Als Eichgrößen werden die Größen des numerischen Modells bezeichnet, die im Rahmen der Modelleichung angepasst werden. Für die stationäre Eichung waren dies im vorliegenden Fall:

- die horizontalen Durchlässigkeiten
- die Leakagekoeffizienten an den oberirdischen Gewässern

Aufgrund des hydrogeologischen Aufbau des Kiesgrundwasserleiters wurde für folgende Einheiten eine Verteilung für die horizontale Durchlässigkeit bestimmt:

- oberer Teil der Neuenburg-Formation (Modellschichten 1 und 2)
- unterer Teil der Neuenburg-Formation (Modellschichten 3 bis 5)
- Breisgau - Formation (Modellschichten 6 bis 10)

In vertikaler Richtung wurde eine homogene Anisotropie von $1/10$ (k_v/k_h) angenommen. Zu Beginn der Modellanpassung wurden die Verteilungen aus der Auswertung der hydrogeologischen Grundlagen (siehe Kap. 2) entnommen.

7.11 ERGEBNIS DER STATIONÄREN STRÖMUNGSEICHUNG

Das Ergebnis der stationären Strömungseichung lässt sich anhand der Abweichungen zwischen ge-

7.9 DONNEES DE VALIDATION POUR L'ETALONNAGE EN REGIME PERMANENT.

Les paramètres d'étalonnage sont modifiés dans le cadre de l'étalonnage du modèle en régime permanent. Les hauteurs piézométriques calculées sont comparées aux hauteurs mesurées pour vérifier les valeurs des paramètres d'étalonnage. Pour ce faire, les hauteurs piézométriques mesurées le 20.10.1986 et qui représentent à peu près un écoulement moyen, ont été utilisées.

1 020 valeurs mesurées ce jour-là ont été comparées avec les hauteurs piézométriques calculées : 872 pour du côté allemand, 148 du côté français.

7.10 LES PARAMÈTRES D'ÉTALONNAGE

Les paramètres d'étalonnage sont les paramètres qui seront modifiés au cours de l'étalonnage. Pour l'étalonnage en régime permanent, les paramètres considérés sont les suivants :

- la perméabilité horizontale
- les coefficients caractérisant les échanges nappe-rivières

Sur la base de la dynamique des dépôts sédimentaires, une répartition de la perméabilité horizontale est faite pour les unités suivantes :

- la partie supérieure de la formation du Neubourg (couches 1 et 2 du modèle)
- la partie inférieure de la formation du Neubourg (couches 3 à 5 du modèle)
- La formation du Breisgau (couches 6 à 10 du modèle)

Pour la perméabilité verticale, il est supposé que l'anisotropie est la même dans tout le domaine avec un rapport de $1/10$ (k_v/k_h). La distribution issue des données hydrogéologiques (voir chapitre 2) a été utilisée comme valeurs initiales pour l'étalonnage.

7.11 RESULTATS DE L'ETALONNAGE EN REGIME PERMANENT

Les résultats de l'étalonnage en régime permanent sont examinés à partir d'analyses statistiques des

messenen und berechneten Piezometerhöhen in der statistischen Auswertung ablesen. Dazu sind die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung in Abhängigkeit der gemessenen Piezometerhöhe zu Beginn und am Ende der Modellanpassung in Abbildung 7.11.1 dargestellt. Am Ende der Modellanpassung wurde eine mittlere Abweichung von 0,61 m an allen Messstellen erzielt. Geht man von einem Piezometerhöhenunterschied von 100 m im Modellgebiet aus, der in etwa entlang des Rheines vorliegt, so liegt die mittlere Abweichung deutlich unter 1% der Piezometerhöhendifferenz im Modellgebiet. Es kann deshalb von einer sehr guten Modellanpassung ausgegangen werden.

écarts entre les piézométries mesurées et calculées. La figure 7.11.1 représente les écarts entre piézométries calculées et mesurées avant et après étalonnage du modèle. Après étalonnage, un écart moyen de 0.61 m sur l'ensemble des points de mesure a été atteint. En considérant une différence de hauteur piézométrique de près de 100m dans le domaine d'étude le long du Rhin, cet écart représente moins de 1% des écarts des hauteurs piézométriques observées dans le domaine d'étude. L'étalonnage est régime permanent peut donc être considéré comme très satisfaisant.

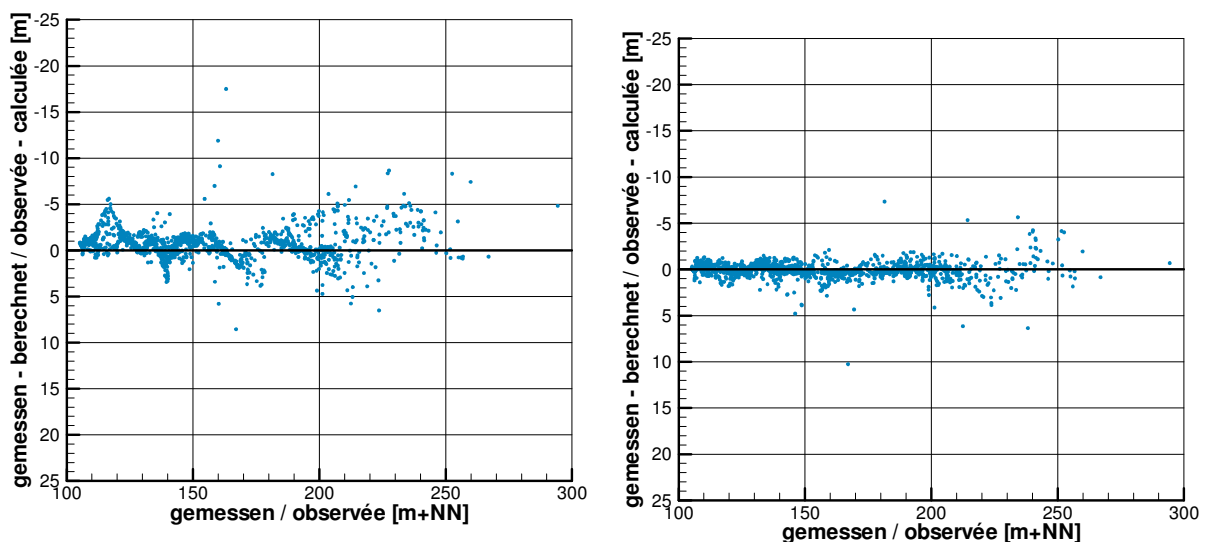


Abbildung 7.11.1: Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Piezometerhöhen für den Stichtag 20.10.1986 zu Beginn und am Ende der Modelleichung.

Figure 7.11.1: Ecarts entre piézométries calculées et mesurées pour le jour de référence du 20.10.1986 avant et après étalonnage.

Im Verlauf der Modelleichung wurden zunächst die horizontalen Durchlässigkeiten zum Schwarzwaldrand und zu den Vogesen gegenüber der Ausgangssituation verringert. Dies war notwendig, um die insbesondere auf deutscher Seite vorhandenen steilen Piezometerhöhengradienten nachbilden zu können. Generell wurde bei der Veränderung der Durchlässigkeitsstrukturen versucht, die von LGRB und BRGM erarbeiteten Strukturen beizubehalten bzw. diese weiter zu vereinheitlichen.

Ein weiterer wichtiger Eichschritt war die Anpassung der Leakagekoeffizienten. Dabei wurden zunächst die Leakagekoeffizienten des Rheins modifiziert und damit die rheinnahen Messstellen bestmöglich angepasst. Die Leakagekoeffizienten des Gewässernetzes wurden zunächst homogen variiert, bis das Optimum der Anpassung erzielt wurde. Danach erfolgte eine grobe Differenzierung, die die Anpassung weiter verbesserte.

Während der Eichung wurden auch die Abflüsse in den Gewässern überprüft. Dabei hat sich an einzelnen Gewässern herausgestellt, dass diese aufgrund eines sehr geringen Zuflusses bereits wenige Modellzellen nach dem Eintritt in das Modellgebiet versickern. Aus diesem Grund wurde diesen Gewässern ein zusätzlicher Zufluss aus dem in Kapitel 7.7.2 beschriebenen Restglied des benachbarten Gewässers zugeschlagen.

Mit diesen Modifikationen der Ausgangssituation konnte die in Abbildung 6.11.1 dargestellte Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Piezometerhöhen erzielt werden.

7.12 PIEZOMETERHÖHENVERTEILUNG

Die mit dem stationären Grundwassermodell berechnete Piezometerhöhenverteilung in der obersten Modellschicht ist in Abbildung 7.12.1 dargestellt. Die generelle Grundwasserströmung ist rheinparallel mit einem relativ gleichmäßigen Gradienten von 0.075 %. Ein deutlich steileres Piezometerhöhengefälle ergibt sich im Bereich der Freiburger Bucht,

Par rapport aux informations initiales, les perméabilités horizontales au voisinage des Vosges et de la Forêt Noire ont été diminuées au cours de l'étalonnage dans un premier temps. Cela était nécessaire pour reproduire au mieux les forts gradients piézométriques, notamment du côté allemand. En général, lors des modifications des perméabilités, les structures établies par le LGRB et le BRGM ont été préservées.

La détermination des coefficients d'échange nappe-rivières a constitué une autre étape importante de l'étalonnage. Dans un premier temps, les coefficients d'échange au niveau du Rhin ont été modifiés afin de représenter au mieux la piézométrie dans son voisinage. Les coefficients d'échange ont été d'abord modifiés de manière uniforme, jusqu'à trouver une restitution de la piézométrie optimale. Ensuite, des modifications ont été faites par grands tronçons pour améliorer les résultats.

Les débits dans les cours d'eau ont été vérifiés au cours de l'étalonnage. Certains cours d'eau avec un débit d'entrée très faible se sont retrouvés à sec à proximité des limites du domaine. Pour y remédier, un débit supplémentaire a été attribué à ces cours d'eau pour augmenter le débit résiduel calculé par la méthode décrite au chapitre 7.7.2.

Les écarts entre piézométries calculées et mesurées présentés sur la figure 6.11.1 illustrent les résultats obtenus après ces modifications.

7.12 RÉPARTITION DES HAUTEURS PIÉZOMÉTRIQUES

Les hauteurs piézométriques calculées à l'aide du modèle en régime permanent pour la couche supérieure sont représentées sur la figure 7.12.1. L'écoulement moyen est parallèle au Rhin avec un gradient hydraulique relativement constant de 0.075%. Des gradients nettement plus élevés existent au niveau de Fribourg, des

der Vorbergzone südlich des Kaiserstuhls und im südwestlichen Teil des Kalibeckens. Eine Versteilung der Piezometerhöhe findet sich auch an den größeren Zuflüssen aus dem Schwarzwald und den Vogesen. In diesen Bereichen verläuft die Grundwasserströmung senkrecht zur Achse des Oberrheingrabens.

contreforts de la Forêt Noire au Sud du Kaiserstuhl et au débouché de la Thur. Une augmentation du gradient existe aussi au niveau des débits d'entrée les plus important en limites des Vosges et de la Forêt Noire. Dans ces zones, l'écoulement est perpendiculaire à la direction principale du bassin du Rhin Supérieur.

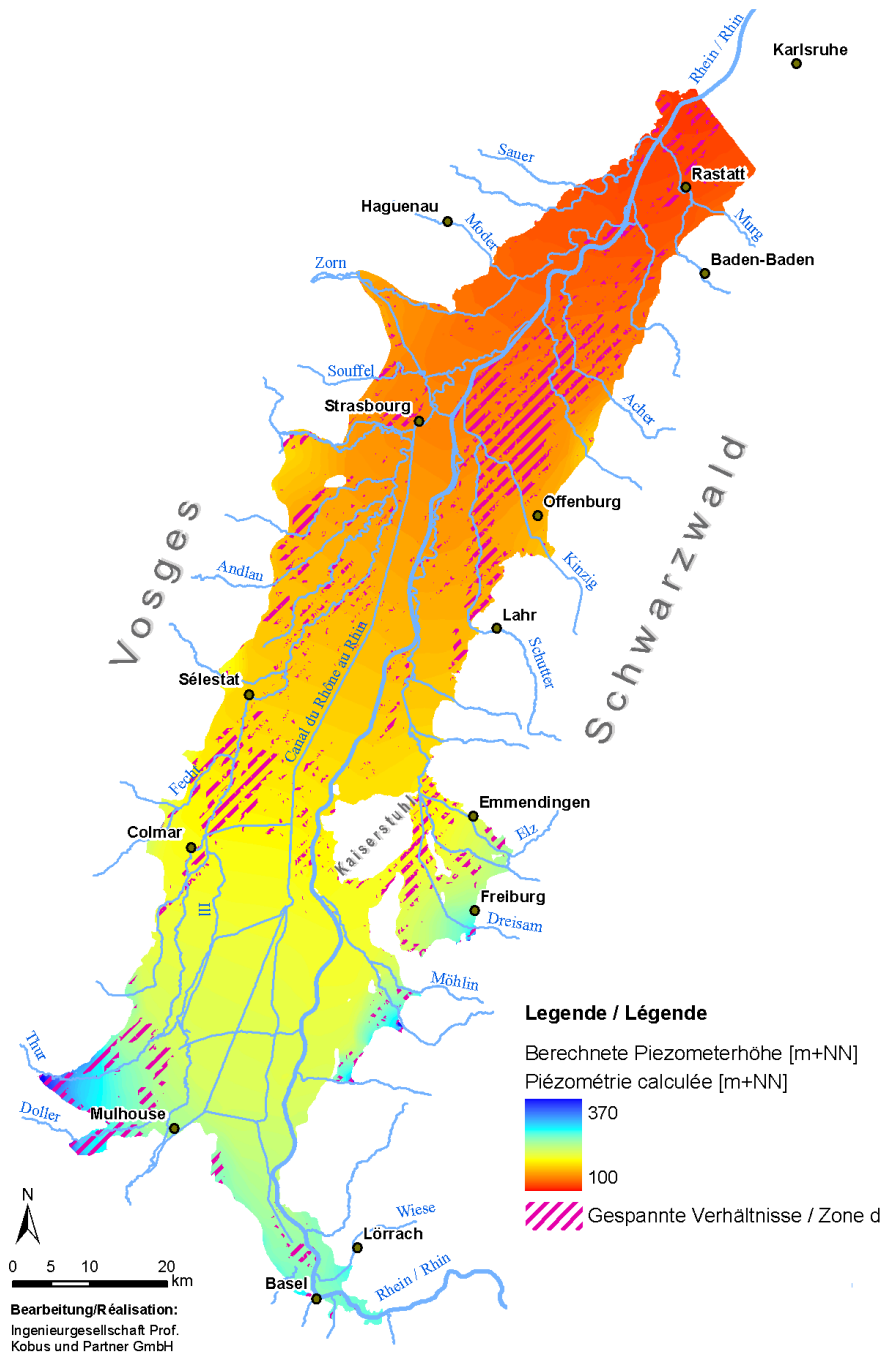


Abbildung 7.12.1: Berechnete Piezometerhöhen im Oberrheingraben mit Bereichen gespannter Grundwasserverhältnisse.
 Figure 7.12.1: Piézométrie calculée dans la plaine du Rhin Supérieur et zone de nappe captive.

Mit Hilfe des Modells wurden auch die Bereiche mit gespannten Grundwasserverhältnissen ausgewertet. Diese sind ebenfalls für mittlere Piezometerhöhen in Abbildung 7.12.1 dargestellt. Im Wesentlichen liegen diese in der Rhein- bzw. Ill-Niederung vor.

Die vertikalen Piezometerhöhenunterschiede sind im Modellraum vergleichsweise klein, da in weiten Teilen des Untersuchungsgebiets keine hydraulisch trennenden Schichten zwischen den beiden hydrogeologischen Einheiten vorliegen. Das bedeutet, dass die in Abbildung 7.12.1 dargestellte oberflächennahe Piezometerhöhe aus der Neuenburg-Formation auch die Grundwasserströmungsverhältnisse in der Breisgau-Formation wiedergibt.

7.13 WASSERBILANZ

Mit Hilfe des stationären Modells wurde auch die durchschnittliche Wasserbilanz des Gesamtsystems ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.13.1 zusammengestellt. Der Gesamtumsatz beträgt 86,22 m³/s. Der hauptsächliche Zufluss findet über die Grundwasserneubildung aus Niederschlag statt. In den Bereichen geringer Flurabstände verdunstet ein vergleichsweise geringer Anteil aus dem Grundwasserleiter. Beim Rhein mit Rheinkanal ergibt sich ein größerer Zufluss als Abfluss in den Rhein. Dies lässt sich mit den im Modellgebiet vorhandenen Staustufen und im Staubereich jeweils vorhandenen Rheinseitengräben erklären. Hier findet rheinnah eine Kurzschlussströmung statt. Wertet man den Austausch zwischen allen oberirdischen Gewässern und Grundwasser für die Rheinniederung aus, so ergibt sich ein summarischer Abfluss aus dem Grundwasser in die oberirdischen Gewässer und damit in den Rhein von 24,7 m³/s. Dies zeigt, dass die kleinen Gewässer zuzüglich des Rheins in der Rheinniederung die hauptsächliche Vorflut für den Grundwasserleiter sind.

Des zones avec des comportements de nappe captive ont également été mises en évidence par le modèle. Elles sont présentées sur la figure 7.12.1. Elles se situent essentiellement au voisinage de l'Ill et du Rhin.

Les hauteurs piézométriques se différencient très peu sur la verticale, essentiellement à cause de l'absence d'une couche sédimentaire moins perméable sur la plus grande partie du domaine, couche pouvant créer une rupture hydraulique entre les 2 unités géologiques. La carte piézométrique de la partie superficielle de la formation de Neuenbourg peut donc être généralisée en profondeur jusqu'à la formation de Breisgau.

7.13 BILANZEN EAU

Le bilan en eau moyen pour l'ensemble de l'hydrosystème souterrain a été établi à l'aide du modèle en régime permanent. Les résultats sont présentés dans le tableau 7.13.1. Le cumul des flux échangés s'élève à 86.22 m³/s. Le principal apport est dû à la recharge de nappe liée aux précipitations. Dans les zones où la nappe est proche de la surface du sol, une évaporation avec un flux relativement faible existe. Au niveau du Rhin et de son canal d'accompagnement, l'infiltration est plus importante que le drainage. Cela s'explique par la présence de barrages et du contre-canal de drainage. Un écoulement préférentiel a lieu dans cette zone. Au voisinage du Rhin, le cumul des flux échangés entre les eaux de surface, le Rhin avec son canal d'accompagnement et les eaux souterraines montre une perte des eaux souterraines estimées à 24,7 m³/s. Les petits cours d'eau accompagnant le Rhin constituent la principale composante du bilan de sortie.

Tabelle 7.13.1: Gesamtwasserbilanz des stationären Strömungsmodells
 Tableau 7.13.1: Bilan en eau établi par le modèle en régime permanent

Bilanzkomponente <i>Composante</i>	Zufluss <i>Entrée</i>	Abfluss <i>Sortie</i>
Neubildung/Evapotranspiration <i>Recharge/évaporation</i>	31,75	0,05
Festpotenzialrand <i>Limite à potentiel imposé</i>	0,09	0,35
Rhein und Rheinkanal <i>Rhin et son canal</i>	19,29	11,85
Gewässernetz <i>Réseau d'eaux de surface</i>	24,04	54,36
Baggerseen <i>Gravières</i>	3,06	3,06
Randzufluss <i>Flux aux limites</i>	7,99	0,00
Entnahmen <i>Prélèvements</i>	0,00	16,54
Gesamt <i>Total</i>	86,22	86,22

Aus dem feinmaschigen Gewässernetz erfolgt eine Versickerung von 24 m³/s, die hauptsächlich am Grabenrand vorliegt. Beim Eintritt der Gewässer in das Modellgebiet liegen die Grabensohlen auch teilweise über dem Grundwasserspiegel. Der hauptsächliche Abfluss aus dem Modellsystem findet über das Gewässernetz statt. Hier wirken insbesondere in der Rhein-Niederung die Gewässer drainierend für das Grundwasser. Der unterirdische Randzufluss spielt beim Grundwasserumsatz mit 8 m³/s eher eine geringe Rolle. Die Zu- und Abflussbilanz für die Baggerseen ist ausgeglichen. Der Abfluss über den nördlichen Festpotenzialrand ist von untergeordneter Bedeutung.

7.14 AUSTAUSCHVERHÄLTNISSE

Da im Grundwassermodell eine konsistente Wasserbilanz erstellt wird, lässt sich damit auch der vertikale Austausch zwischen den hydrogeologischen Einheiten und der Austausch mit dem Gewässernetz auswerten.

Une infiltration de 24 m³/s a lieu au niveau du réseau d'eaux de surface, infiltrations qui ont surtout lieu aux limites du Fossé Rhénan. La cote du radier de certains cours d'eau est située au-dessus du niveau de la nappe à l'entrée de la zone modélisée. Les principaux flux de sortie de nappe ont lieu au niveau du réseau d'eaux de surface. En particulier, les rivières proches du Rhin ont un effet de drainage de la nappe important. Avec un débit de 8 m³/s, les écoulements souterrains en limite du domaine jouent un rôle moins important dans le bilan global. Le bilan entrée-sortie pour les gravières est équilibré. Les flux de sortie au niveau des potentiels imposés de la limite Nord sont peu significatifs.

7.14 DYNAMIQUE DES ÉCHANGES

Le modèle hydrogéologique permettant d'établir un bien cohérent, il est possible d'évaluer les échanges verticaux entre les formations géologiques et les échanges avec les eaux de surface.

7.14.1 AUSTAUSCH ZWISCHEN NEUENBURG- UND BREISGAU-FORMATION

Wertet man den Austausch zwischen der 5. und 6. Modellschicht und damit zwischen der Neuenburg- und Breisgau-Formation aus, so ergibt sich ein Austausch von $17 \text{ m}^3/\text{s}$, der bereichsweise nach unten und andernorts nach oben gerichtet ist. Da in der Breisgau-Formation keine weiteren wesentlichen Bilanzkomponenten vorliegen, ist der Austausch mit der Neuenburg-Formation die hauptsächliche Bilanzkomponente für die Breisgau-Formation. Die Verteilung der vertikalen Austauschverhältnisse ist in Abbildung 7.14.1 dargestellt. Der Abstieg von Grundwasser liegt hauptsächlich in den Randbereichen vor, während sich die Aufstiegsbereiche in der Nähe des dichten Gewässernetzes und des Rheins befinden.

7.14.1 ECHANGES ENTRE LES FORMATIONS DU NEUBOURG ET DE BREISGAU

Les échanges entre les formations du Neubourg et de Breisgau sont estimés en analysant les flux entre les couches 5 et 6. Cet échange est globalement de $17 \text{ m}^3/\text{s}$, échanges orientés quelques fois vers le haut ou vers le bas. Les échanges entre ces deux formations constituent la seule composante du bilan pour la formation de Breisgau, celle-ci n'ayant aucune autre composante de flux d'entrée ou de sortie. La répartition des flux verticaux entre ces deux formations est présentée sur la figure 7.14.1. Les écoulements descendant ont lieu principalement en limites du domaine modélisé, les écoulements ascendant au voisinage du réseau d'eaux de surface et du Rhin.

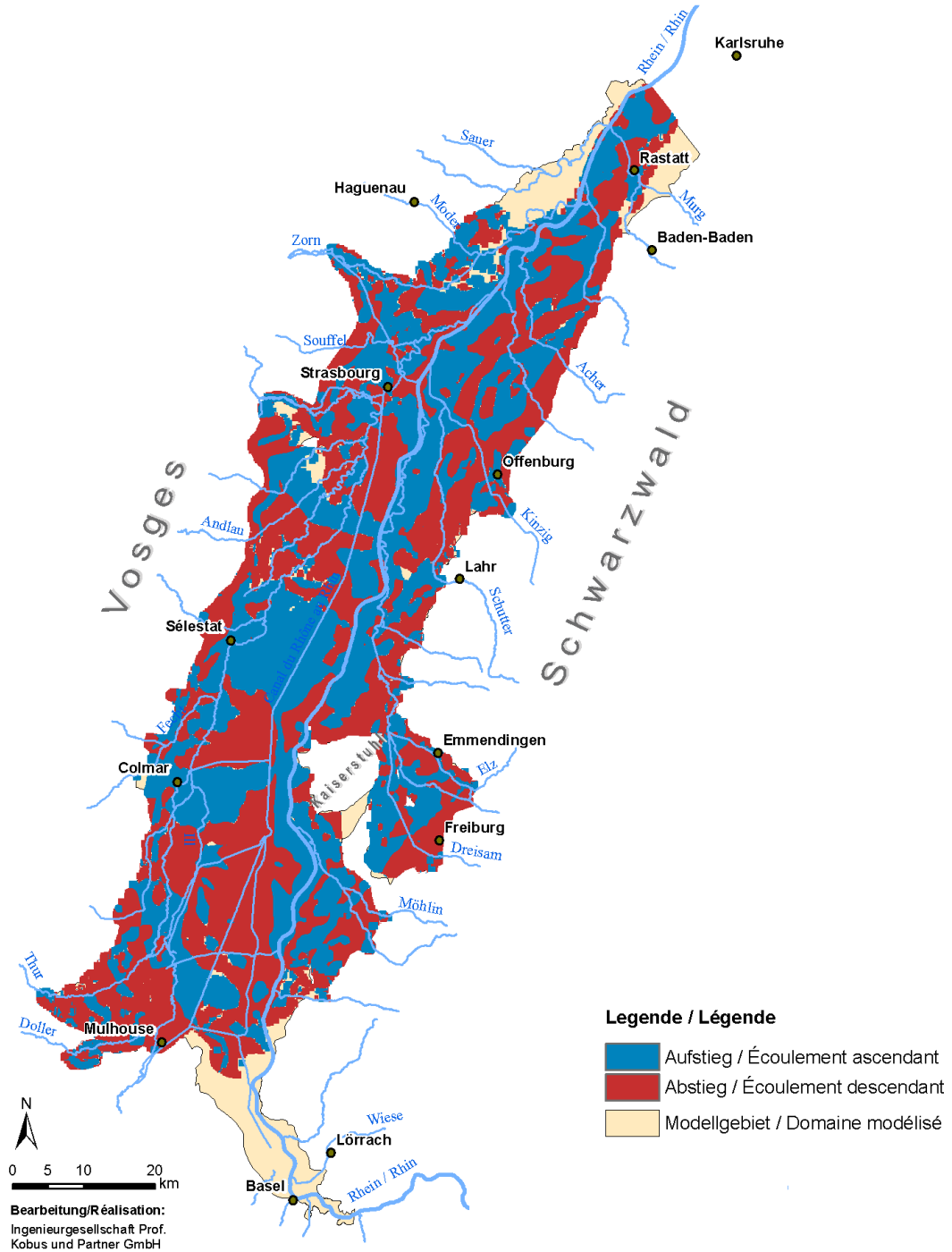


Abbildung 7.14.1: Vertikaler Austausch zwischen der Neuenburg- und Breisgau-Formation.
 Figure 7.14.1: Echanges verticaux entre les formations de Neubourg et de Breisgau.

7.14.2 AUSTAUSCH MIT DEM GEWÄSSERNETZ

In Abbildung 7.14.2 ist das Gewässernetz nach in- und exfiltrierenden Bereichen klassifiziert. Die Dicke der Gewässer gibt Auskunft über die jeweilige Austauschrate mit dem Gewässer. Die Gewässer mit infiltrierenden Verhältnissen liegen vorwiegend im südlichen Teil des Modellgebiets und am Grabenrand. Exfiltration von Grundwasser in die Gewässer findet hauptsächlich im Zentrum des Oberrheingrabens statt. Hier liegen auch Grundwasseraufstiege aus der Breisgau-Formation vor (siehe Abb. 7.14.1).

7.14.2 ECHANGES AVEC LES EAUX DE SURFACE

Les infiltrations et drainage au niveau des eaux de surface sont présentés sur la figure 7.14.2. L'épaisseur du trait représentant la rivière est fonction du débit d'échange. Les cours d'eau infiltrant de l'eau dans la nappe se situent essentiellement dans la partie Sud du domaine modélisé et aux limites du Fossé Rhénan. Le drainage de la nappe par les eaux de surface se situe surtout dans la partie centrale de la plaine du Rhin. Les remontées de nappe provenant de la formation de Breisgau sont aussi mises en évidence (voir figure 7.14.1).

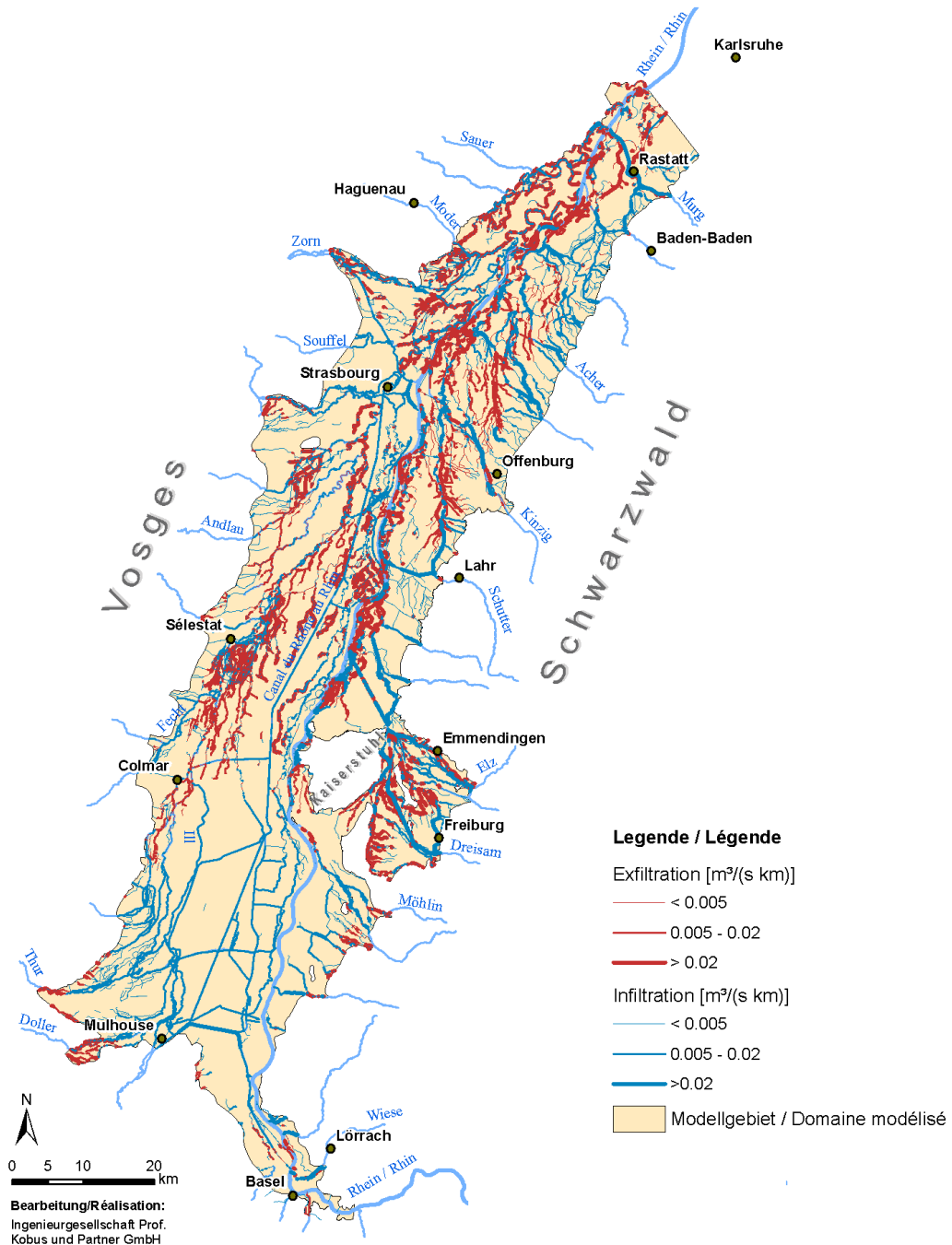


Abbildung 7.14.2: Austauschverhältnisse mit dem Gewässernetz.
Figures 7.14.2: Echanges nappe-réseau des eaux de surface.

Die maximalen Austauschraten betragen $0,4 \text{ m}^3/(\text{s km})$. Im Mittel ergibt sich eine Infiltration von $0,009 \text{ m}^3/(\text{s km})$ und eine Exfiltration von $0,026 \text{ m}^3/(\text{s km})$. Die mittleren Infiltrationsraten sind damit in derselben Größenordnung wie die Infiltrationsraten, die in den Detailuntersuchungen in der Schweiz für die Birs und Wiese festgestellt wurden. Die Exfiltrationsraten sind um den Faktor 45 größer als die Infiltrationsraten. Dies liegt an der verstärkten Kolmation

Le débit maximal d'échange est de $0.4 \text{ m}^3/(\text{s km})$. En moyenne, l'infiltration dans la nappe est de $0.009 \text{ m}^3/(\text{s km})$ et le drainage de la nappe de $0.026 \text{ m}^3/(\text{s km})$. Le débit moyen d'infiltration est du même ordre de grandeur que celui constaté dans le cadre de l'étude détaillée menée sur les échanges nappe-rivière dans la Birs et la Wiese en Suisse. Les débits de drainage sont environ 45 fois plus élevés que ceux d'infiltration. Ceci provient des effets de col-

bei Infiltration und an der hauptsächlich Wirkung des Gewässernetzes als Vorfluter.

7.15 GEEICHTE AQUIFERKENNGRÖßEN

In der stationären Modelleichung wurde die Verteilung der horizontalen Durchlässigkeiten und der Leakagekoeffizienten der oberirdischen Gewässer bestimmt. Die Variation der vertikalen Anisotropie (k_{fv}/k_{fh}) hat gezeigt, dass diese einen zu vernachlässigenden Einfluss auf das Strömungsfeld und auch auf die Transportprozesse hat.

7.15.1 HORIZONTALE DURCHLÄSSIGKEITEN

Die horizontalen Durchlässigkeiten nehmen generell von oben nach unten ab. Die Durchlässigkeitsverhältnisse sind wie folgt dargestellt:

Abbildung 7.15.1: oberer Teil der Neuenburg-Formation (Modellschichten 1 und 2)

Abbildung 7.15.2: unterer Teil der Neuenburg-Formation (Modellschichten 3 bis 5)

Abbildung 7.15.3: Breisgau - Formation (Modellschichten 6 bis 10)

In der Kartendarstellung ist auch die statistische Verteilung der Durchlässigkeiten im numerischen Modell aufgenommen. Vergleicht man diese mit den gemessenen Werten, so zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung für alle hydrogeologischen Einheiten im harmonischen Mittelwert, der generell etwas kleiner ist als der Messwerte. Die Standardabweichung in den Durchlässigkeitsverteilungen des Modells ist deutlich kleiner als bei den Messwerten. D.h. es konnte auch eine Homogenisierung der Durchlässigkeitsfelder durch die Modelleichung erreicht werden.

matage des lits de rivière lors de l'infiltration et sur l'effet prépondérant du drainage par les eaux de surface.

7.15 LES PARAMÈTRES ÉTALONNÉS

Les perméabilités horizontales et les coefficients caractérisant les échanges nappe-rivières ont été estimés lors du calage du modèle en régime permanent. Les variations du rapport d'anisotropie (k_{fv}/k_{fh}) ont eu des effets négligeables sur l'écoulement et le transport.

7.15.1 LES PERMEABILITES HORIZONTALES

En général, les perméabilités diminuent avec l'altitude. Elles sont présentées comme suit :

La figure 7.15.1 représente la partie supérieure de la formation de Neubourg (couches 1 et 2 du modèle).

La figure 7.15.2 représente la partie inférieure de la formation de Neubourg (couches 3 à 5).

La figure 7.15.3 représente la formation de Breisgau (couches 6 à 10 du modèle).

La distribution statistique des perméabilités utilisées dans le modèle numérique est également indiquée sur les cartes. La moyenne harmonique de cette distribution est en très bonne concordance avec celle obtenue à partir des valeurs mesurées pour toutes les unités hydrogéologiques, avec une moyenne un peu inférieure par rapport aux valeurs mesurées. L'écart-type de la distribution des perméabilités obtenu par calage est nettement plus petite que celle obtenue à partir des valeurs mesurées. L'étalonnage du modèle a conduit à une homogénéisation des champs de perméabilités.

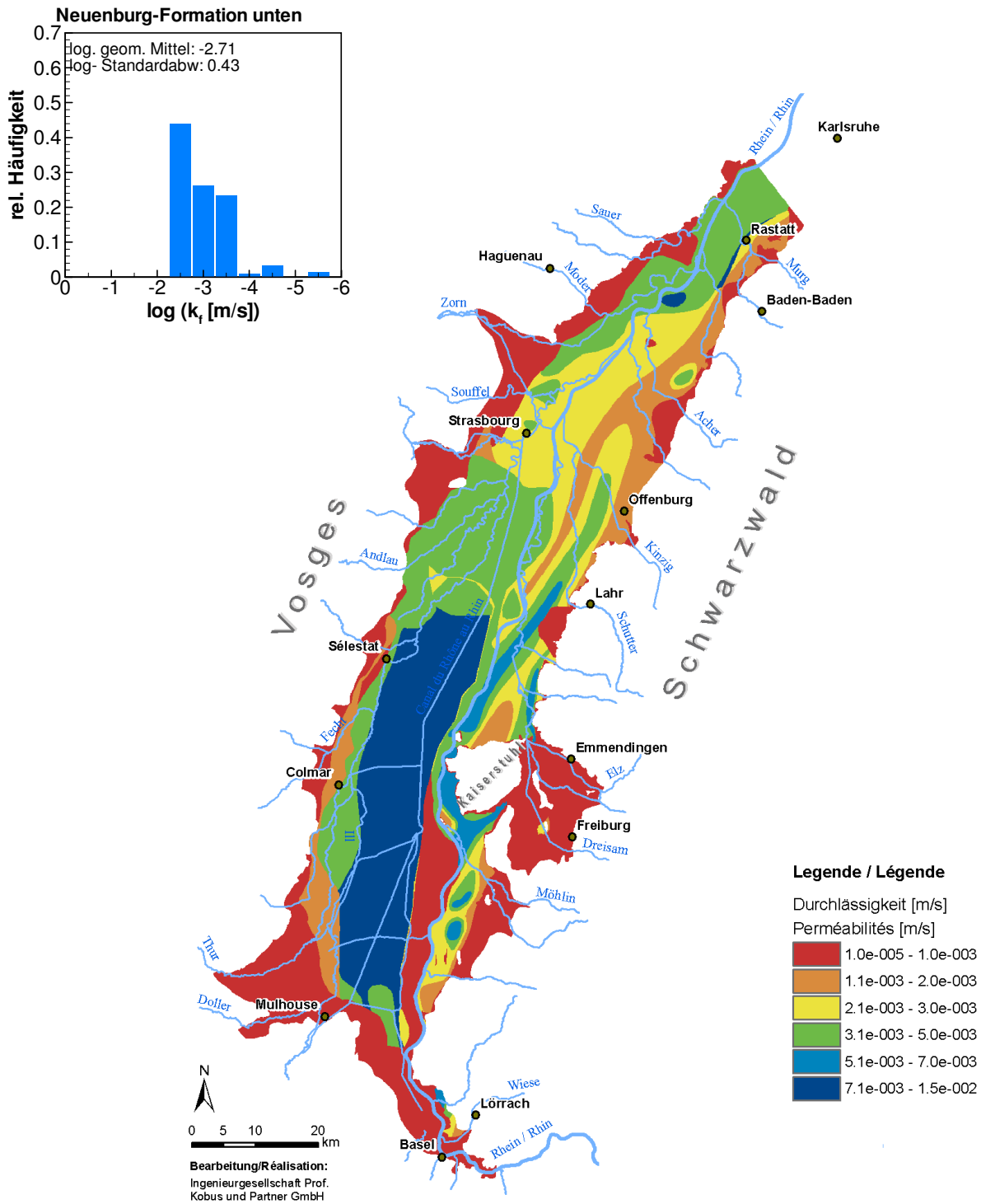


Abbildung 7.15.2: Verteilung der horizontalen Durchlässigkeiten im unteren Teil der Neuenburg-Formation und statistische Verteilung der Durchlässigkeiten.

Figure 7.15.2: Répartition des perméabilités horizontales pour la partie inférieure de la formation de Neubourg et leur distribution statistique.

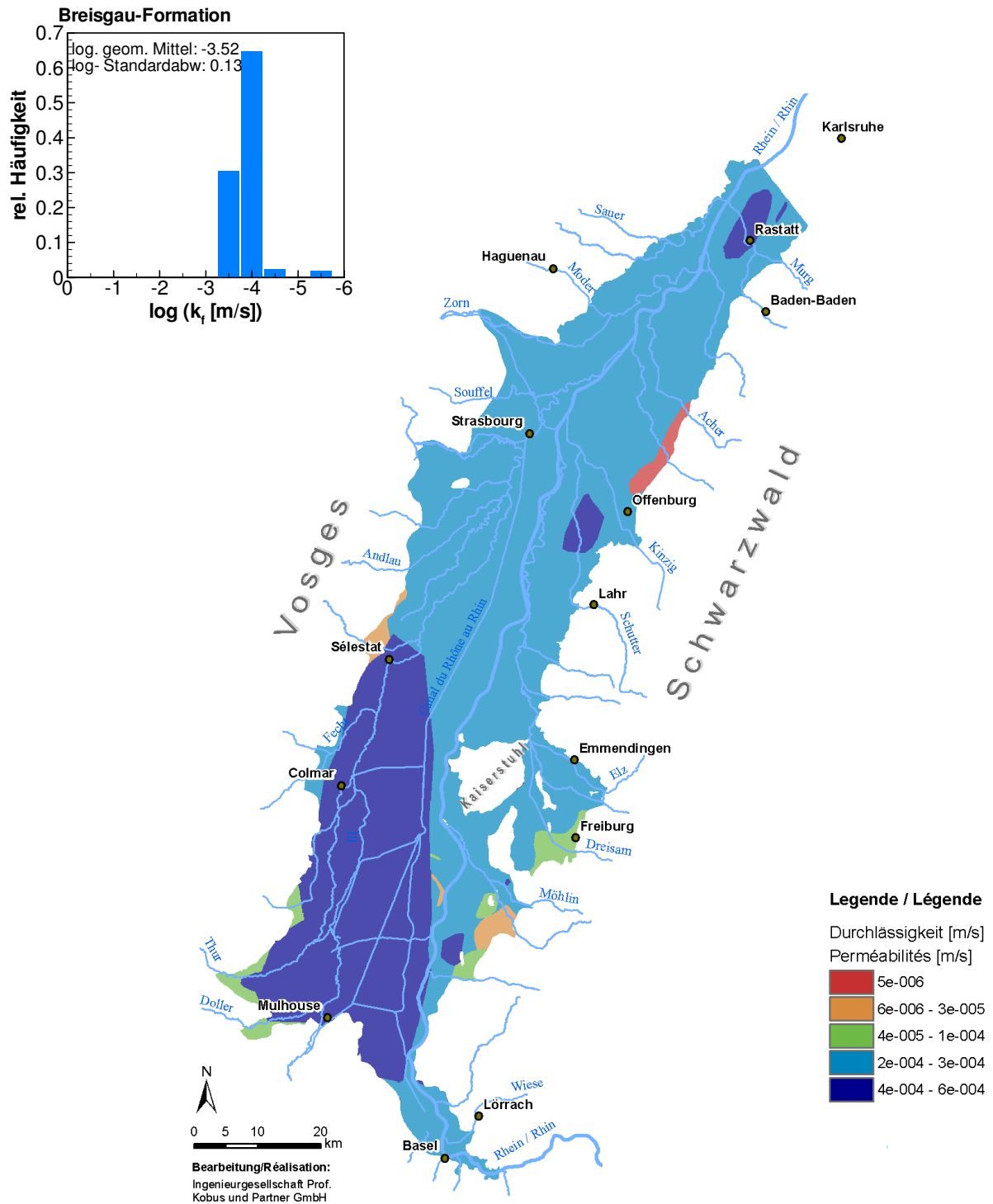


Abbildung 7.15.3 : Verteilung der horizontalen Durchlässigkeiten in der Breisgau-Formation und statistische Verteilung der Durchlässigkeiten.
 Figure 7.15.3: Répartition des perméabilités horizontales pour la formation de Breisgau et leur distribution statistique.

In der Neuenburg-Formation wurden die Durchlässigkeiten hauptsächlich im Randbereich des Oberrheingrabens verringert, um die steilen Piezometerhöhengradienten nachzubilden. In den Breisgauschichten wurde eine vergleichsweise homogene Verteilung mit einer mittleren Durchlässigkeit von $1.5 \cdot 10^{-4}$ m/s ermittelt.

7.15.2 LEAKAGEKOEFFIZIENTEN DER OBERFLÄCHENGEWÄSSER

Die Leakagekoeffizienten der oberirdischen Gewässer sind im numerischen Modell als Quotient zwischen der Sohldurchlässigkeit k_{fr} und der Dicke der Sohlschicht d definiert. Um die höhere Selbstdichtung der Gewässer bei infiltrierenden Verhältnissen berücksichtigen zu können, wurde beim Leakagekoeffizient zwischen In- und Exfiltration unterschieden. Der Austausch zwischen Grundwasser und oberirdische Gewässer Q_{gew} ergibt sich damit zu:

$$Q_{gew} = A \cdot \frac{k_{fr}}{d} \Delta h$$

Wobei A die Austauschfläche zwischen Grundwasser und oberirdischem Gewässer und Δh der Piezometerhöhengradient zwischen Grundwasser und Gewässer ist.

Die Leakagekoeffizienten des Gewässernetzes wurden im Mittel zu $3,0 \cdot 10^{-6}$ 1/s für Infiltration und zu $4,5 \cdot 10^{-6}$ 1/s für Exfiltration bestimmt. Lokal wurden die Leakagekoeffizienten an einzelnen Gewässern modifiziert. Die Verteilung der Leakagekoeffizienten ergibt sich entsprechend Abbildung 7.15.4.

Les perméabilités proches des limites du Fossé Rhéan pour la formation de Neubourg ont été diminuées pour reproduire les forts gradients hydrauliques. Une perméabilité moyenne de $1.5 \cdot 10^{-4}$ m/s répartie de manière assez uniforme a été estimée pour la formation de Breisgau.

7.15.2. LES COEFFICIENTS D'ÉCHANGE NAPPE-RIVIERES

Dans le modèle numérique, les coefficients d'échange nappe-rivières sont définis par le rapport entre k_{fr} , la perméabilité des sédiments de la rivière et d , leur épaisseur. Ces coefficients peuvent différer s'il s'agit d'une infiltration ou d'un drainage, pour tenir compte d'un effet de colmatage existant lors de l'infiltration. Le débit échangé entre la nappe et la rivière, noté Q_{gew} est déterminé par la relation suivante :

Avec A la surface d'échange entre la rivière et la nappe et Δh le gradient de charge entre la rivière et la nappe.

Les coefficients d'échange du réseau d'eaux de surface ont en moyenne une valeur de $3,0 \cdot 10^{-6}$ 1/s pour les infiltrations dans la nappe et une valeur de $4,5 \cdot 10^{-6}$ 1/s en situation de drainage. Ces valeurs ont été localement modifiées pour quelque cours d'eau. La répartition de ces coefficients est présentée sur la figure 7.15.4.

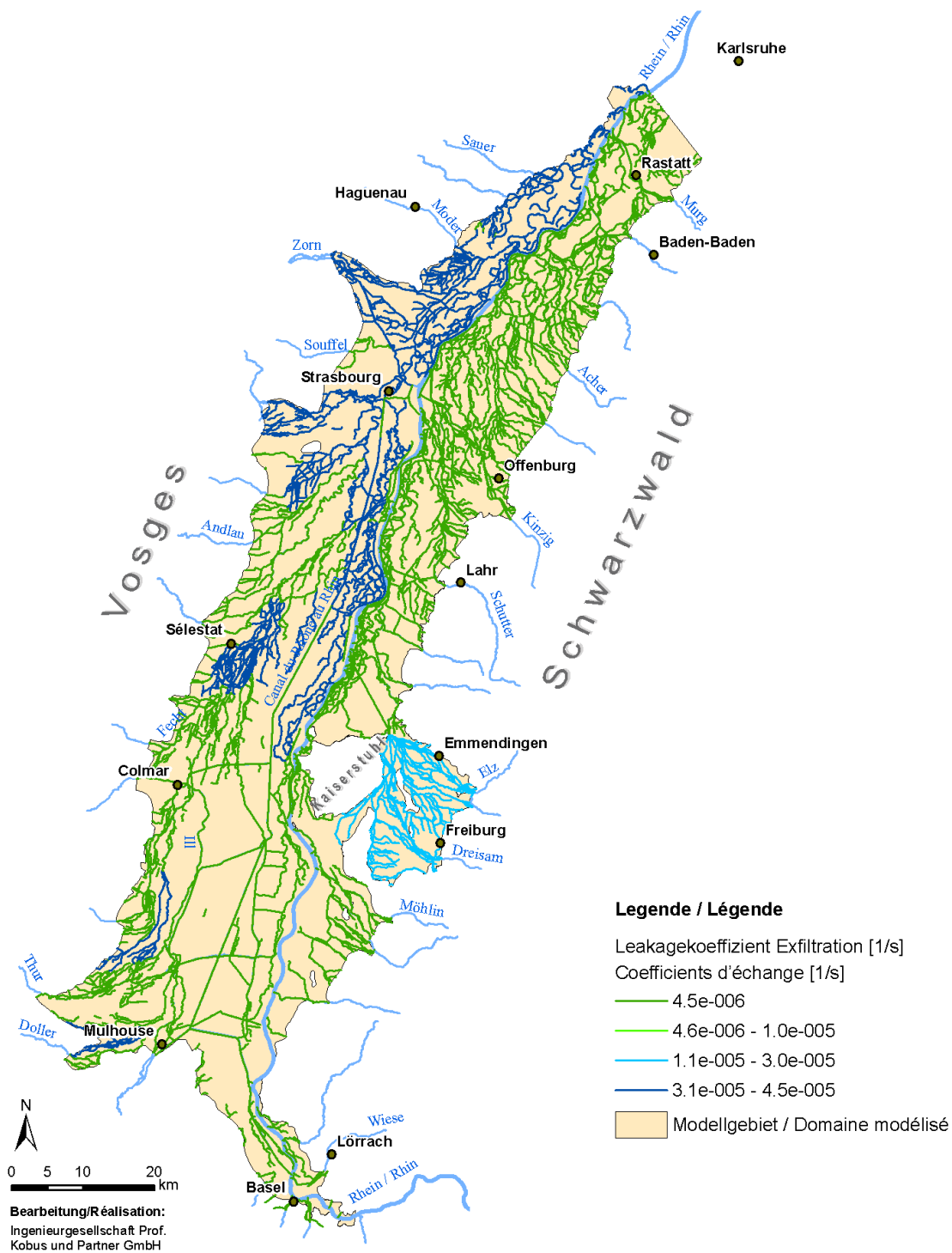


Abbildung 7.15.4: Verteilung der Leakagekoeffizienten [1/s] im Gewässernetz.
Figure 7.15.4: Répartition des coefficients d'échange [1/s] pour le réseau de surface.

7.16 ERGEBNIS DER SENSITIVITÄTSSTUDIE

Mittels einer Sensitivitätsstudie wurde untersucht, welchen Einfluss die Eichgrößen auf die berechneten Piezometerhöhen und die Wasserbilanz haben. Dazu wurden die horizontalen Durchlässigkeiten, die vertikale Anisotropie sowie die Leakagekoeffizienten in den oberirdischen Gewässern global variiert und die sich daraus ergebenden Unterschiede zum Eichergebnis untersucht.

Änderungen der Durchlässigkeiten wirken sich vor allem in den Randbereichen aus. Eine Verdopplung der Durchlässigkeiten führt zu Trockenfallen des Modells in den Randbereichen mit großen Gradienten bzw. im Kalibecken. Eine Halbierung der Durchlässigkeiten führt zu einem Anstieg der berechneten Piezometerhöhen um 0,5 bis 5 m in diesen Bereichen. Zum Rhein ist der Einfluss einer Halbierung bzw. Verdopplung der Durchlässigkeiten mit bis zu 0,2 m geringer. Eine Veränderung der vertikalen Anisotropie um den Faktor 10 führt zu einer vernachlässigbaren Änderung der Piezometerhöhen von wenigen Zentimetern.

Die Leakagefaktoren des Rheins mit Kanal wurden in der Sensitivitätsstudie verdoppelt und halbiert. Die Auswirkungen dieser Variation beschränken sich auf den Bereich in unmittelbarer Rheinnähe. Hier ergeben sich Unterschiede in den berechneten Piezometerhöhen von bis zu 0,1 m.

Aufgrund des dichten Gewässernetzes in weiten Teilen des Modellgebietes wirken sich Änderungen der Leakagefaktoren in den kleineren oberirdischen Gewässern stärker aus, als die Änderung der Leakagefaktoren des Rheins. Eine Verdopplung bzw. Halbierung der Leakagewerte resultiert hier in großflächigen Piezometerhöhendifferenzen von mehr als 0,2 m.

Die Sensitivitätsstudie zeigte, dass die Durchlässigkeiten und die Leakagekoeffizienten des Gewässernetzes sensitiv auf die Piezometerhöhen sind. Die Veränderung der Leakagekoeffizienten des Rheins mit Kanal und der Anisotropiewerte haben einen unbedeutenden Einfluss auf die Piezometerhöhen.

7.16 RESULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE

L'influence des paramètres étalonnées sur les hauteurs piézométriques et les bilans calculés a été étudiée par analyse de sensibilité. Les perméabilités horizontales, le rapport d'anisotropie verticale et les coefficients d'échange nappe-rivières ont été modifiés globalement et les écarts résultants analysés par rapport aux résultats de l'étalonnage.

Les variations des perméabilités horizontales ont un effet prépondérant au niveau des limites du domaine. Des valeurs deux fois plus élevées de perméabilité génèrent des mailles sans eau au niveau des limites à forts gradients hydrauliques comme au débouché de la Thur. Une diminution d'un facteur 2 de ces perméabilités conduit à une augmentation du niveau de la nappe de 0.5 à 5 m dans ces secteurs. La multiplication ou la division des perméabilités par un facteur 2 se traduit par une variation de l'ordre de 0.2 m au niveau du Rhin. Une modification du facteur d'anisotropie se traduit par une variation du niveau piézométrique négligeable, de l'ordre de quelques cm.

Les coefficients d'échange nappe-rivière au niveau du Rhin et de son canal ont été doublés ou réduits de moitié. L'effet de ces variations reste localisés au voisinage du Rhin et du canal, avec des variations du niveau piézométrique de l'ordre de 0.10 m.

Les modifications des coefficients d'échange pour le réseau d'eaux de surface ont des effets plus importants que ceux faites au niveau du Rhin compte tenu de la densité de ce réseau dans plusieurs zones de domaine modélisé. Une multiplication ou une division par 2 de ces coefficients se traduit par une variation de piézométrie de 0.2 m sur de grandes parties du domaine.

L'analyse de sensibilité a montré que les perméabilités horizontales et les coefficients d'échange nappe-rivières sont des paramètres sensibles. Les variations des coefficients d'échange au niveau du Rhin et de son canal, ainsi que les variations du facteur d'anisotropie ont un effet négligeable sur la piézométrie.

Neben der Variation der Eichgrößen wurde auch ein Modelllauf mit verminderter Grundwasserneubildung durchgeführt, da die Verifizierung der Grundwasserneubildungsberechnung (siehe Kapitel 5) auf eine Überschätzung der Grundwasserneubildungsberechnung um ca. 15% hinweist. Wird die Grundwasserneubildung um 15% verringert, so ändert sich der gesamte Wasserumsatz (siehe Tabelle 7.13.1) lediglich um 4% im numerischen Modell. Der verminderte Zufluss über die Grundwasserneubildung führt zu einer Erhöhung der Infiltration aus den oberirdischen Gewässern um 5%. Ebenso verringert sich die Exfiltration in die Gewässer um 6%. Das bedeutet, dass eine Veränderung der mittleren Grundwasserneubildung durch den Austausch mit den Gewässern kompensiert wird. Bei der mittleren Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Piezometerhöhen ist nur eine geringfügige Veränderung zu erkennen.

Un calcul avec une recharge de nappe plus faible a été mené en parallèle à l'étalonnage, une surévaluation de 15% de la recharge de nappe ayant été détectée dans le calcul de la recharge (voir chapitre 5). Le bilan en eau global (voir tableau 7.13.1) est modifié de seulement 4% pour une recharge inférieure de 15%. La diminution des apports provenant de la recharge de nappe conduit à une augmentation de 5% des apports provenant des infiltrations au niveau des cours d'eau. De même, le drainage par les rivières est diminué de 6%. Cela signifie que la diminution des apports par la recharge est compensée par les flux d'eau provenant des échanges nappe-rivières. Cette modification se traduit par une faible variation des écarts moyens entre piézométrie calculées et mesurée.

8 Instationärer Modellaufbau und Strömungseichung

Conception du modèle en régime transitoire et étalonnage

8.1 ÜBERSICHT

Um das stationäre Strömungsmodell weiter zu verbessern wurde auch eine instationäre Strömungseichung durchgeführt. Für die instationäre Strömungsmodellierung wurden die stationären Datensätze auf instationäre Verhältnisse erweitert. Dies betrifft im Wesentlichen die Randbedingungen, die infolge der Hydrologie und der Bewirtschaftung schwanken. Folgende Randbedingungen wurden instationär angesetzt:

- Grundwasserneubildung aus Niederschlag
- Wasserspiegel des Rheins und des Rheinkanals
- oberirdischer Zufluss in den Gewässern am Modellrand
- Grundwasserentnahmen

Der unterirdische Randzufluss wurde als zeitlich konstant angenommen, da sich die zeitliche Dynamik und insbesondere die Schwankungsintensität nicht direkt aus der Hydrologie ableiten lassen.

Ziel der instationären Strömungseichung war es die natürliche Dynamik des Grundwasserleitersystems mit Hilfe des numerischen Modells nachzubilden und so die Prognosefähigkeit des Modells zu verbessern.

8.2 BETRACHTUNGSZEITRAUM UND ANFANGSBEDINGUNGEN

Der Betrachtungszeitraum für die instationäre Modellierung wurde so gewählt, dass dieser mit möglichst aktuellen Daten belegt werden kann. Es wurde der Zeitraum 01.01.1986 bis 31.12.2002 ausgewählt. Dafür lagen die relevanten Strömungsrandbedingungen vor (siehe Kap. 3, 4 und 5).

Mit diesem Zeitraum von 18 Jahren wurden auch

8.1 APERÇU

Un étalonnage en régime transitoire a été mené pour améliorer le modèle développé en régime permanent. Les données et variables utilisées en régime permanent ont été généralisées au régime transitoire. Cela concerne plus particulièrement les conditions aux limites, qui changent en fonction de l'hydrologie et de l'exploitation de la nappe. Les conditions aux limites suivantes ont été estimées pour le régime transitoire :

- La recharge de nappe à partir des précipitations
- La surface libre du Rhin et de son canal d'accompagnement
- Les entrées d'eau pour les cours d'eau aux limites du domaine
- Les prélèvements

Les apports par écoulement souterrain sont supposés constants, leurs variations dans le temps surtout en terme de flux ne pouvant être directement estimées à partir des données hydrologiques.

L'objectif de l'étalonnage en régime transitoire est de pouvoir reproduire l'hydrodynamique transitoire de l'aquifère à l'aide du modèle numérique et d'améliorer ainsi, sa capacité de prédiction.

8.2 PERIODE D'OBSERVATION ET CONDITIONS INITIALES

La période utilisée pour la simulation en régime transitoire a été choisie afin de pouvoir utiliser les données les plus récentes. La période choisie s'étend du 01.01.1986 au 31.12.2002. Les conditions aux limites hydrodynamiques ont été établies pour cette période (voir chapitres 3, 4 et 5).

Les variations de régime hydrologique à plus ou

langfristige hydrologische Verhältnisse abgedeckt. Das bedeutet, dass mit dem numerischen Modell sowohl Trocken- als auch Nassjahre betrachtet und reproduziert wurden.

Für die instationäre Betrachtung war es auch notwendig eine entsprechende Anfangsverteilung der Piezometerhöhen dem numerischen Modell vorzugeben. Da die stationäre Eichung für den Herbst 1986 bei Mittelwasserverhältnissen durchgeführt wurde und die hydrologischen Bedingungen für das Jahr 1986 in etwa durchschnittlich waren, wurde die stationäre Lösung als Anfangsbedingung für die instationäre Simulation verwendet.

8.3 ZEITDISKRETISIERUNG

Ziel der instationären Strömungsmodellierung war es, insbesondere die langfristigen Entwicklungen im Grundwasserleiter des Oberrheingrabens nachzubilden. Deshalb wurde eine gleichmäßige zeitliche Diskretisierung in Monatszeitschritten gewählt. Damit ließen sich die saisonal bedingten hydrologischen Schwankungen nachbilden. Kurzfristige Reaktionen im Grundwasserleiter, z.B. auf einzelne Hochwasserereignisse, können nicht simuliert werden, da die Zeitskalen für Hochwasserereignisse im Stunden- bis Tagesbereich liegen. Die langfristigen Wasserspiegelschwankungen des Rheins in monatlicher Auflösung wurden in der Modellbetrachtung mitberücksichtigt.

8.4 GRUNDWASSERENTNAHMEN

Die Datenlage für die instationäre Entwicklung der Grundwasserentnahmen im Modellgebiet ist sehr heterogen. An einigen Entnahmestellen liegen nur mittlere Werte vor. Für die meisten Entnahmen sind allerdings auch Jahreswerte vorhanden. In Einzelfällen waren monatsdifferenzierte Daten verfügbar. Der zeitliche Verlauf der Grundwasserentnahmen in der Summe ist in Abbildung 8.4.1 dargestellt. Die Gesamtentnahme steigt innerhalb des Betrachtungszeitraumes von rd. 16 m³/s auf rd. 20 m³/s an.

moins long terme sont ainsi couvertes par cette période d'une durée de 18 ans. Les années sèches et humides pourront être analysées et reproduites à l'aide du modèle numérique.

Pour le calcul en régime transitoire, la définition de la distribution initiale en piézométrie doit être fournie au modèle numérique. Les résultats de l'écoulement en régime permanent ont été utilisés comme conditions initiales pour le calcul en régime transitoire. En effet, ces résultats concernent l'automne 1986 où la piézométrie et les conditions hydrologiques représentent une situation moyenne pour le période considérée et pour l'année 1986.

8.3 DISCRÉTISATION EN TEMPS

L'objectif de la modélisation en régime transitoire est, en particulier, de reproduire au mieux les évolutions à long terme de la dynamique des eaux souterraines dans la plaine du Rhin Supérieur. Pour ce faire, un pas de temps fixe de 1 mois a été retenu, pas de temps qui permet de prendre en compte les variations hydrologiques saisonnières. Les variations de la nappe sur de courtes périodes, comme par exemple lors de crues, ne peuvent pas être simulées, l'échelle de temps caractéristique des crues étant de l'ordre de l'heure ou de la journée. Les fluctuations du niveau du Rhin au pas de temps mensuel ont été intégrées dans le modèle hydrogéologique.

8.4 LES PRÉLÈVEMENTS

Pour le calcul en régime transitoire, les données concernant les prélèvements sont de qualité très hétérogène. Seules des valeurs moyennes sont disponibles pour certains points de prélèvement pour l'ensemble de la période. Les valeurs annuelles existent pour la plupart des prélèvements. Dans certains cas, des données mensuelles ont été fournies. La somme des prélèvements et son évolution dans le temps sont présentées sur la figure 8.4.1. Le total des débits prélevés augmente d'environ 16 m³/s à environ 20 m³/s.

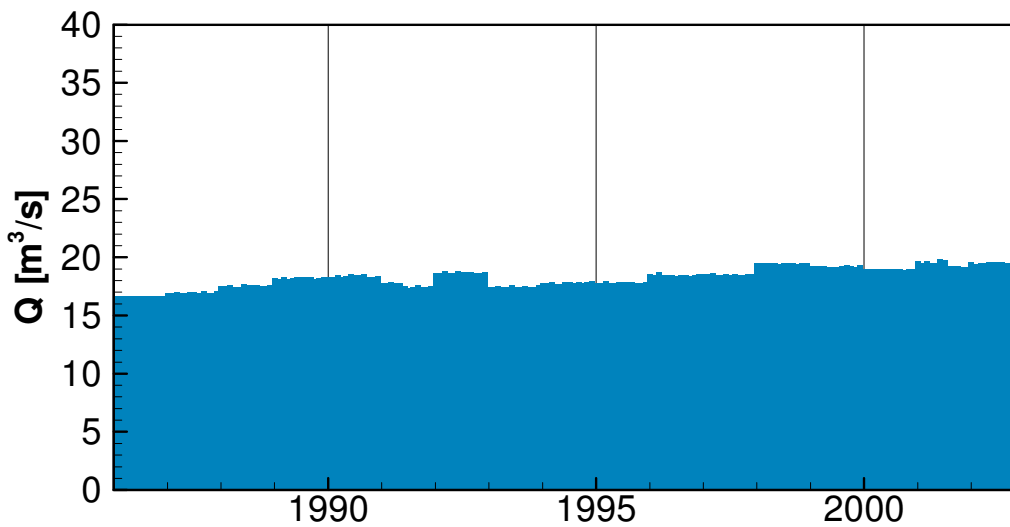


Abbildung 8.4.1: Zeitlicher Verlauf der Grundwasserentnahmen in der Summe für das Modellgebiet.
 Figure 8.4.1: Evolution de l'ensemble des débits prélevés pour le domaine d'étude.

8.5 OBERIRDISCHE GEWÄSSER

Die instationäre Randbedingung für die oberirdischen Gewässer ist unterschiedlich. Für den Rhein und den Rheinkanal wurden die Wasserspiegel aus der Wasserspiegellagenberechnung (siehe Kap. 4) verwendet. Dabei wurde der Monatsmittelwert für das Grundwassermodell angesetzt. Bei dem Gewässernetz wurde als instationäre Randbedingung der oberirdische Zufluss über den Modellrand aus der Abflussregionalisierung (siehe Kap. 3) entnommen. Der schwankende Zufluss in die oberirdischen Gewässer führt auch zu einem instationären Abfluss in den oberirdischen Gewässern und damit zu zeitlich schwankenden Wasserständen, so dass die Austauschverhältnisse mit dem Grundwasser zeitlich variabel sind.

8.6 GRUNDWASSERNEUBILDUNG

Die Grundwasserneubildung ist die wichtigste instationäre Zuflusskomponente. Die über das ganze Modellgebiet summierte Zuflussrate für den Betrachtungszeitraum in Monatsschritten ist in Abbildung 8.6.1 dargestellt. Hieraus wird die große Dynamik dieser Randbedingung für den Grundwasserleiter ersichtlich. Die Grundwasserneubildung schwankt zwischen näherungsweise 0 in den Sommermonaten und maximal bis zu 175 m³/s in regen-

8.5 LES EAUX DE SURFACE

Les conditions aux limites pour les eaux de surface sont de nature différente. Les niveaux du Rhin et son canal d'accompagnement ont été établis à partir du calcul hydraulique (voir chapitre 4). Ces valeurs ont été définies au pas de temps mensuel pour le modèle hydrogéologique. Pour le réseau de surface, les flux d'entrée aux limites du domaine d'étude ont été fournis par la spatialisation des débits (voir chapitre 3). Les variations de ces débits d'entrée conduisent à des variations des débits dans les cours d'eau, et donc à des variations de niveau d'eau. Ces variations induisent des fluctuations des échanges nappe-rivières.

8.6 LA RECHARGE DE NAPPE

La recharge de nappe est la composante la plus importante des entrées d'eau en régime transitoire. L'évolution au pas de temps mensuel du cumul de la recharge sur tout le domaine est présenté sur la figure 8.6.1. Cette figure illustre la grande dynamique de ce flux d'entrée pour l'aquifère. La recharge de nappe fluctue entre des valeurs d'environ 0 pour les mois d'été jusqu'à atteindre une valeur maximale de l'ordre de 175 m³/s pen-

reichen Wintermonaten. Der Maximalwert liegt damit doppelt so hoch wie der durchschnittliche Gesamtumsatz des numerischen Modells.

dant les mois d'hiver les plus pluvieux. Cette valeur maximale est le double de la valeur moyenne des flux d'entrée définis par le modèle numérique.

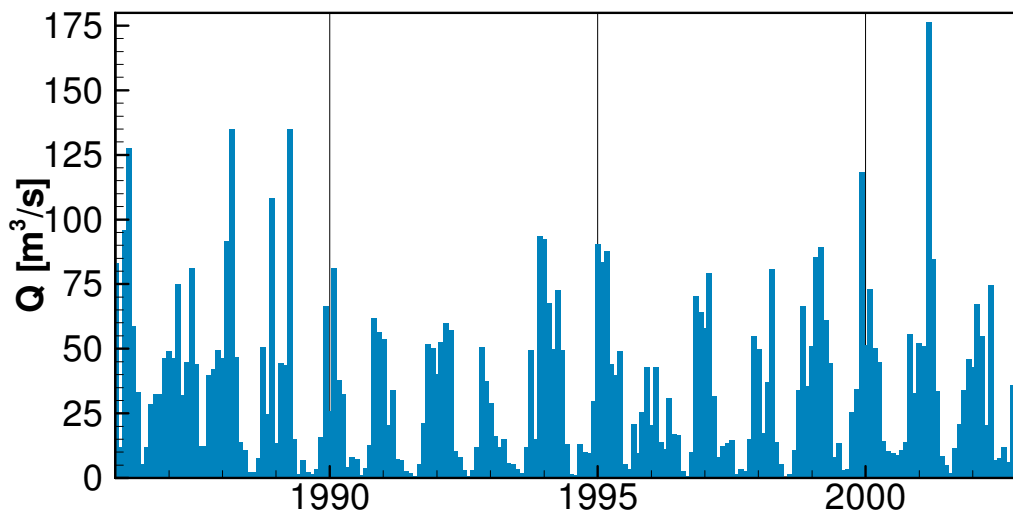


Abbildung 8.6.1: Zeitlicher Verlauf der Grundwasserneubildung in der Summe für das Modellgebiet.
Figure 8.6.1: Evolution temporelle de la recharge cumulée sur tout le domaine modélisé.

8.7 VERGLEICHSGRÖßEN FÜR DIE MODELLEICHUNG

Bei der instationären Modelleichung wurden, wie bei der stationären Eichung, die gemessenen Piezometerhöhen als Vergleichsgrößen verwendet. Dazu standen insgesamt 1.533 Messstellen zur Verfügung, an denen der Grundwasserstand durch wöchentliche Messungen aufgezeichnet wird. Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserstandsganglinien erfolgte visuell, da sich die Güte der Nachbildung der zeitlichen Dynamik nicht mit Differenzwerten zwischen Messung und Rechnung beurteilen lässt.

Da insbesondere auf deutscher Seite zahlreiche Messstellen vorhanden sind, wurden in der instationären Modelleichung 294 ausgewählte, gleichmäßig auf links- und rechtsrheinisches Gebiet verteilte liegende, Messstellen betrachtet und versucht das numerische Modell an die gemessene Dynamik anzupassen.

8.8 EICHGRÖßEN

Bei der instationären Modelleichung wurden zunächst die Aquiferparameter Speicherkoeffizient und speichernutzbarer Hohlraumanteil variiert. Dabei hat

8.7 VARIABLES DE COMPARAISON POUR L'ÉTALONNAGE DU MODELE

Comme pour l'étalonnage en régime permanent, les hauteurs piézométriques mesurées constituent les variables de comparaison utilisées pour l'étalonnage en régime transitoire. 1 533 points de mesure sont disponibles avec des valeurs hebdomadaires. La comparaison entre les piézométries calculées et mesurées est faite de manière visuelle, l'évaluation de la qualité de l'étalonnage par analyse de différences entre mesure et calcul n'est plus pertinente dans le cas de variations temporelles.

Compte tenu du grand nombre de piézomètres disponibles, en particulier du côté allemand, 294 piézomètres répartis uniformément de part et d'autre du Rhin ont été sélectionnés pour l'étalonnage en régime transitoire. La dynamique observée sur ces piézomètres devra être reproduite par le modèle numérique.

8.8 LES PARAMÈTRES D'ÉTALONNAGE

Les coefficients d'emmagasinement et les porosités de l'aquifère sont modifiés dans un premier temps lors de l'étalonnage. Afin de reproduire

sich gezeigt, dass auch bereichsweise der Leakagekoeffizient der oberirdischen Gewässer zu variieren ist, damit sich die typische Dynamik der oberirdischen Gewässer auch auf den Grundwasserleiter überträgt. Das Ergebnis der Modifikation der Leakagekoeffizienten wurde bereits bei der Dokumentation der stationären Eichergebnisse mitberücksichtigt (siehe Kap. 7.14.2).

Der Speicherkoeffizient für gespannte Verhältnisse wurde homogen für alle hydrogeologischen Einheiten angesetzt. Der speicherwirksame Hohlraumanteil beschreibt die Speicherfähigkeit des Systems bei ungespannten Verhältnissen. Der speicherwirksame Hohlraumanteil ist somit eine Kenngröße für die Speicherfähigkeit der ungesättigten Zone. Die Verteilung dieser Speicherfähigkeit wurde im Rahmen der Modelleichung ermittelt.

8.9 GEEICHTE PIEZOMETERHÖHEN

Die Güte der instationären Modellanpassung ergibt sich aus dem Vergleich der gemessenen und berechneten Ganglinien. Eine Auswahl der wichtigsten Ganglinien zeigt Abbildung 8.9.1 für den rechtsrheinischen Teil und Abbildung 8.9.2 für den linksrheinischen Teil. Bei der Beurteilung der Anpassungsgüte ist zu beachten, dass die gemessene Gangliniencharakteristik nur insoweit nachgebildet werden kann, wie die im Modell angesetzten instationären Randbedingungen die Dynamik beeinflussen. Da die wichtigste instationäre Randbedingung die lokale Grundwasserneubildung ist, entspricht die Piezometerhöhendynamik hauptsächlich der Dynamik der Grundwasserneubildung. In Rheinnähe zeigen sich auch die Einflüsse der schwankenden Wasserstände des Rheins.

Im numerischen Modell werden die unterschiedlichen gemessenen Gangliniencharakteristika vergleichsweise gut nachgebildet. So zeigen die berechneten Grundwasserstandsganglinien einerseits die saisonale Schwankung mit Amplituden von 1 bis 2 m und andererseits auch mehrjährige dynamische Entwicklungen. Auch lokale Unterschiede in der Schwankungsamplitude (siehe Abb. 8.9.1), die nicht auf den

les effets caractéristiques de la dynamique des eaux de surface sur les eaux souterraines, les coefficients d'échange nappe-rivières ont du également être modifiés. Les résultats concernant les modifications des coefficients d'échange ont déjà été pris en compte dans la présentation des résultats du régime permanent (voir chapitre 7.14.2).

Le coefficient d'emménagement pour les secteurs où la nappe est considérée comme captive est le même, quelque soit l'unité hydrogéologique. La porosité représente la capacité de stockage de l'hydrosystème en condition de nappe libre. Cette porosité peut être considérée comme une grandeur caractérisant les capacités de stockage de la zone non-saturée. La répartition de cette capacité de stockage a été déterminée au cours de l'étalonnage du modèle.

8.9 LA PIÉZOMÉTRIE APRÈS ÉTALONNAGE

La qualité de l'étalonnage transitoire est évaluée par comparaison entre piézométrie calculée et mesurée. Une sélection des chroniques piézométriques les plus caractéristiques est présentée sur les figures 8.9.1 pour le côté droit du Rhin et 8.9.2 pour le côté gauche du Rhin. Dans l'évaluation de la qualité de l'étalonnage, il ne faut pas oublier que les caractéristiques des chroniques mesurées ne sont reproduites qu'en fonction de la dynamique des conditions aux limites. La recharge de nappe locale étant le principal moteur de la dynamique transitoire de la nappe, les fluctuations des hauteurs piézométriques sont corrélées à celles de la recharge. Au voisinage du Rhin, les effets des variations du niveau du Rhin sont identifiables.

Les différentes caractéristiques des chroniques piézométriques mesurées sont reproduites de manière comparable par le modèle numérique. Les chroniques calculées mettent en évidence d'une part les fluctuations saisonnières avec des amplitudes de 1 à 2 m, et d'autre part, les dynamiques pluriannuelles. Quelques variations dans les amplitudes de fluctuations, non liées aux in-

Rheineinfluss zurückzuführen sind, werden im numerischen Modell nachgebildet.

Die Anpassungsgüte ist links- und rechtsrheinisch in etwa gleich gut. Unterschiede in der Gangliniendynamik, die auf den unterschiedlichen Rheinausbau zurückzuführen sind, mit größeren Schwankungsamplituden im Süden als im Norden, werden ebenfalls mit dem numerischen Modell nachgebildet.

fluences du Rhin, sont également mises en évidence par le modèle numérique (voir figure 8.9.1).

La qualité de l'étalonnage est du même ordre, de part et d'autre du Rhin. Les différences des dynamiques des chroniques piézométriques entre le Sud et le Nord, sont également reproduites par le modèle numérique. Au niveau du Rhin, les effets liés à son aménagement sont aussi bien simulés.

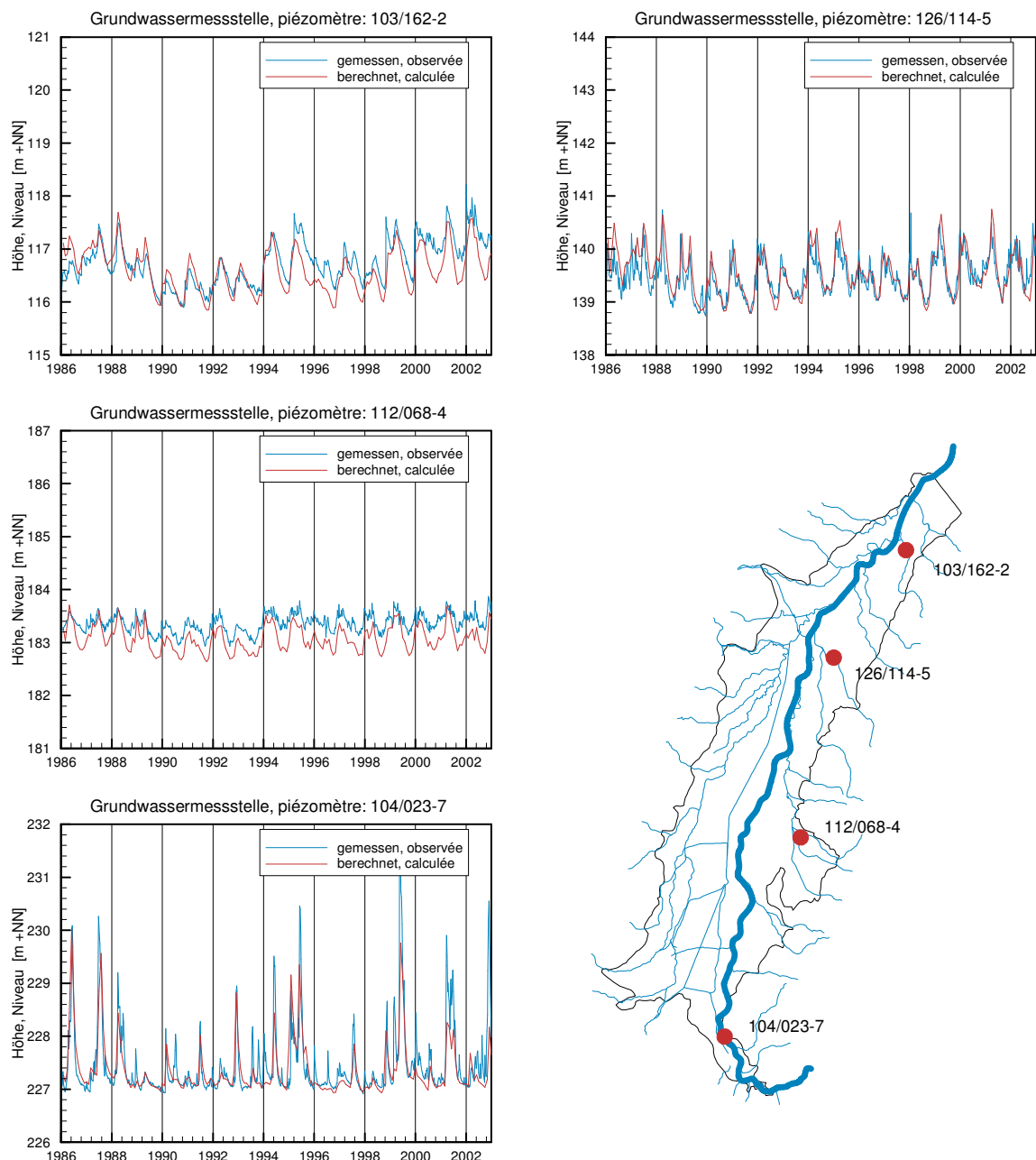


Abbildung 8.9.1: Berechnete und gemessene Ganglinien der Piezometerhöhe auf rechtsrheinischer Seite.
Figure 8.9.1: Chroniques piézométriques calculées et mesurées du côté droit du Rhin.

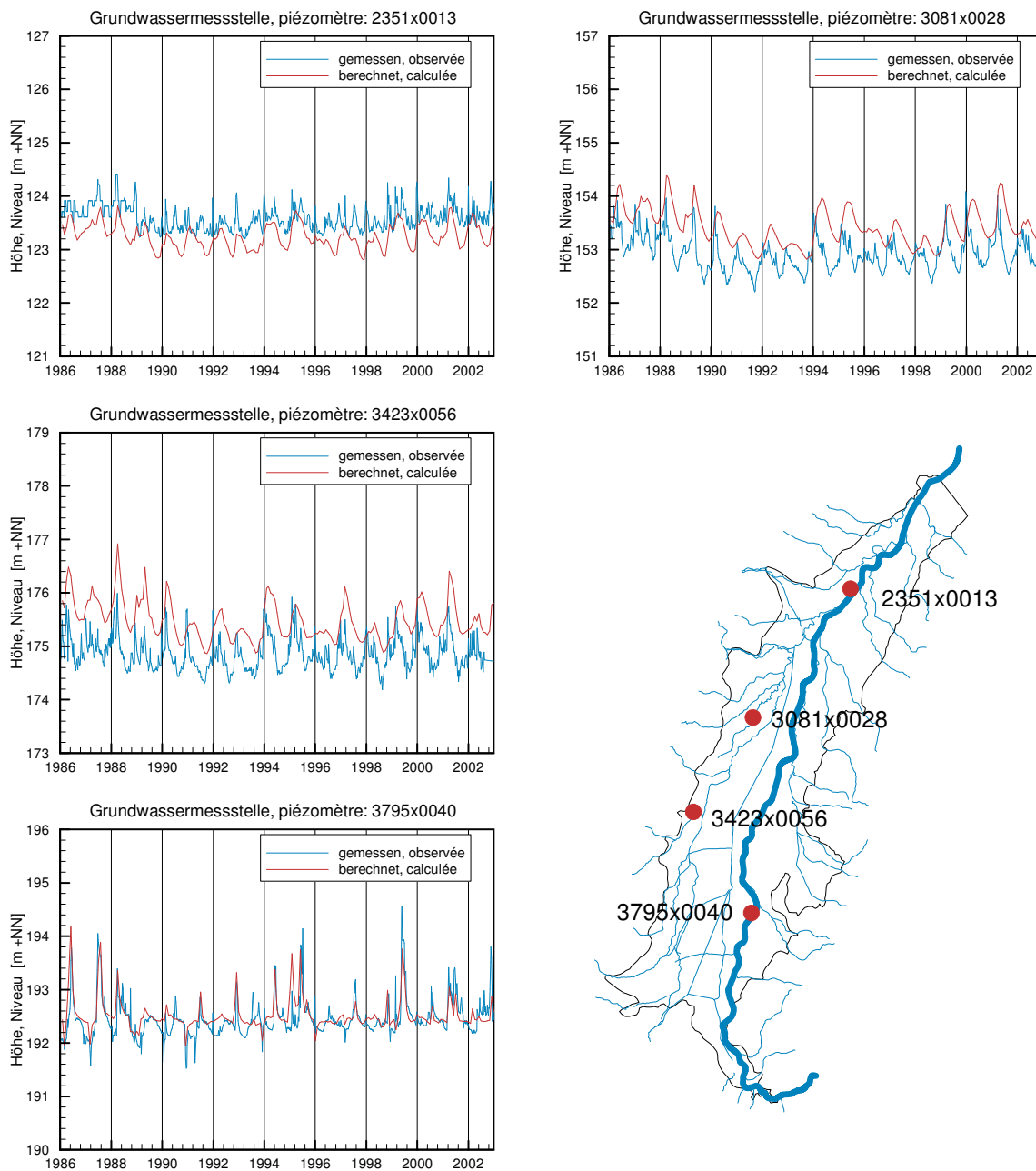


Abbildung 8.9.2: Berechnete und gemessene Ganglinien der Piezometerhöhe auf linksrheinischer Seite.
 Figure 8.9.2: Chroniques piézométriques calculées et mesurées du côté gauche du Rhin.

8.10 GEEICHTE HOHLRAUMANTEILE

Die speichernutzbare Hohlräumverteilung bestimmt die Dynamik der Piezometerhöhen im Bereich der freien Grundwasseroberfläche. Die im Rahmen der instationären Strömungseichung ermittelte Verteilung des speichernutzbaren Hohlräumanteils ist in Abbildung 8.10.1 dargestellt.

8.10 LA POROSITÉ APRÈS ÉTALONNAGE

La dynamique de la nappe dans les zones où elle est considérée comme libre, dépend de la porosité. La répartition de cette porosité obtenue après étalonnage du modèle en régime transitoire est présentée sur la figure 8.10.1.

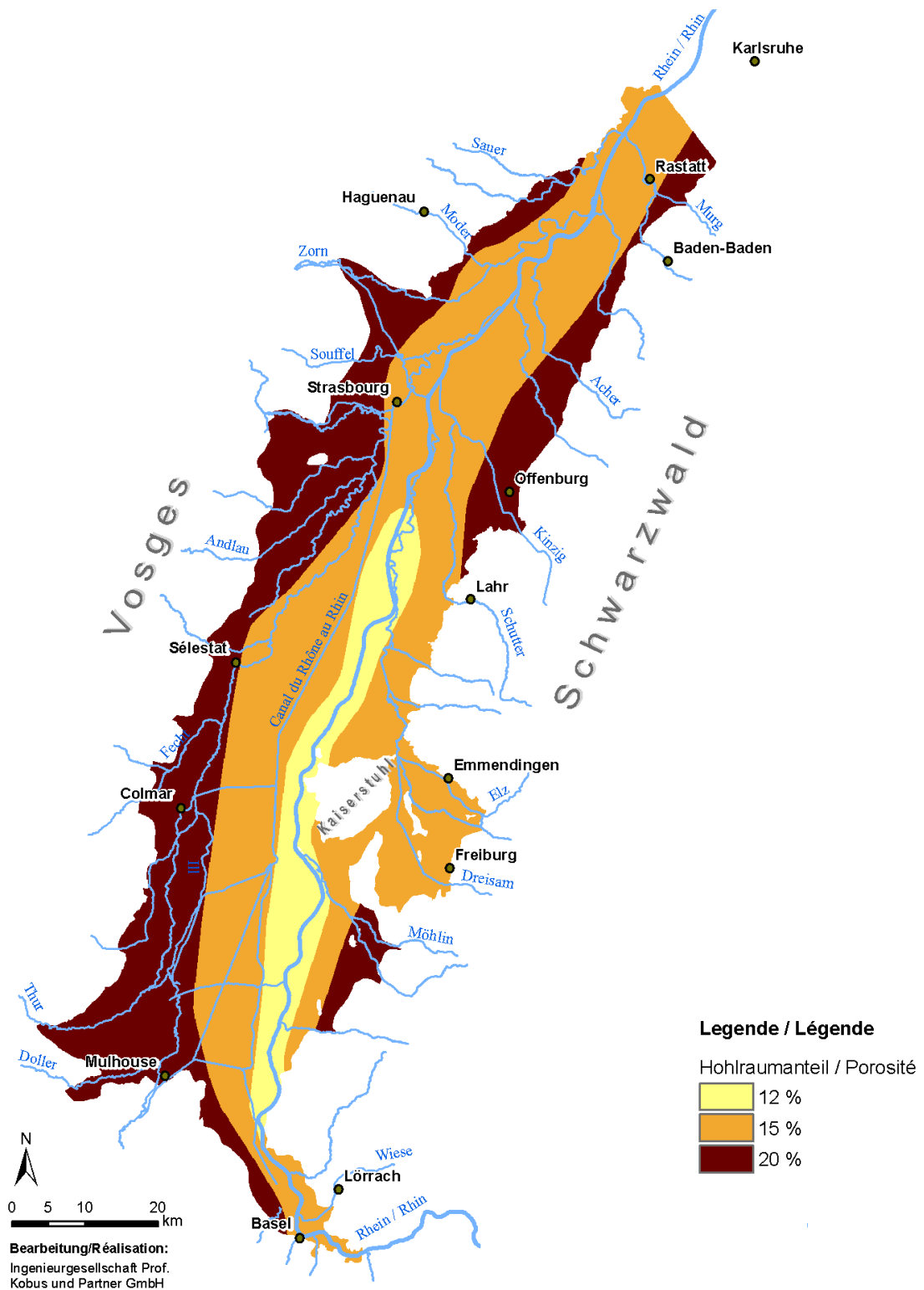


Abbildung 8.10.1: Verteilung des speichernutzbaren Hohlraumanteils.
Figure 8.10.1: Cartographie de la porosité.

Der speichernutzbare Hohlraumanteil variiert zwischen 12 und 20 %. Die Modellanpassung hat eine grobe Zonierung des Hohlraumanteils ergeben. Danach liegen die größten Hohlraumanteile jeweils an den Grabenrändern vor. Dieser Bereich mit einem Hohlraumanteil von 20 % zieht sich auf linksrheinischer Seite von Süden nach Norden hin durch. Auf rechtsrheinischer Seite ist dieser Wertebereich nur im Norden und am Rand des Markgräflerlandes ausgeprägt.

Im zentralen Teil des Oberrheingrabens verläuft ein breites Band mit einem mittleren Hohlraumanteil von 15%. Dieses umfasst sowohl den Rheinniederungsbereich als auch Teile der Niederterrasse. Im Süden liegt ein Bereich mit einem Hohlraumanteil von 12 % in unmittelbarer Rheinnähe vor, der sich in etwa an der Ausdehnung der Rheinniederung orientiert.

8.11 WASSERBILANZ

Mit Hilfe des numerischen Modells wurde auch die instationäre Wasserbilanz für den Betrachtungszeitraum 1986 bis 2002 bestimmt. Abb. 8.11.1 zeigt zunächst die Gesamtwasserbilanz. Diese schwankt zwischen 70 und 200 m³/s für den Gesamttraum. Die hauptsächliche Zuflusskomponente, die auch die größten Schwankungen in der Gesamtwasserbilanz verursacht, ist die Grundwasserneubildung aus Niederschlag (siehe Abb. 8.6.1). Durch die instationären Grundwasserstandsschwankungen kommt es zu einer Speicherfüllung während der winterlichen Neubildungsphase und zu einer Speicherentleerung in den Sommermonaten (siehe Abbildung 8.11.2).

La porosité varie entre 12 à 20 %. L'étalonnage a fourni une zonation simplifiée de cette porosité. Les porosités les plus élevées se situent au niveau des limites du Fossé Rhénan. A gauche du Rhin, cette zone avec une porosité de 20% s'étend du Sud au Nord de manière continue. A droite du Rhin, cette valeur de porosité est présente uniquement au Nord et aux limites du Markgräflerlande.

Une large bande caractérisée par une porosité de 15% se situe dans la partie centrale de la plaine du Rhin Supérieur. Cette zone comprend le voisinage immédiat du Rhin et les terrasses avoisinantes. Une zone avec une porosité de 12% au voisinage immédiat du Rhin est localisée au Sud, zone qui s'étend vers le Nord le long du Rhin.

8.11 BILAN EN EAU

Un bilan en eau pour la période 1986 à 2002 a également été établi à l'aide du modèle numérique en régime transitoire. Le bilan global est présenté dans la figure 8.11.1. Ce bilan varie de 70 à 200 m³/s pour l'ensemble du domaine. La plus grande composante des apports, qui est aussi la principale cause des fluctuations des termes du bilan, est la recharge de nappe issue des précipitations (voir figure 8.6.1). Les fluctuations piézométriques conduisent à un stockage d'eau pendant les phases hivernales de la recharge, et à un déstockage d'eau pendant les mois d'été (voir figure 8.11.2).

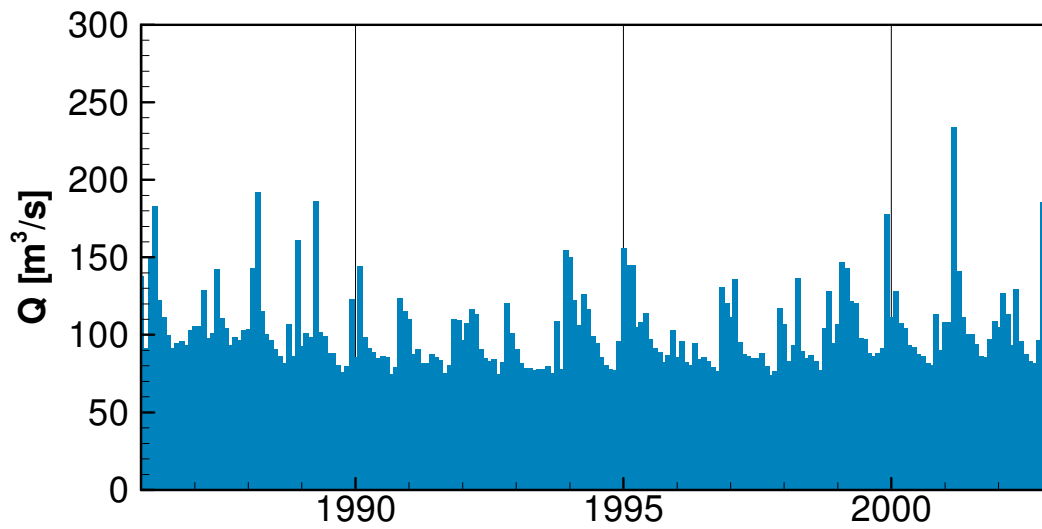


Abbildung 8.11.1: Zeitlicher Verlauf der Grundwasserbilanz im numerischen Modell.
 Figure 8.11.1: Variation temporelle du bilan en eau déterminé par le modèle numérique.

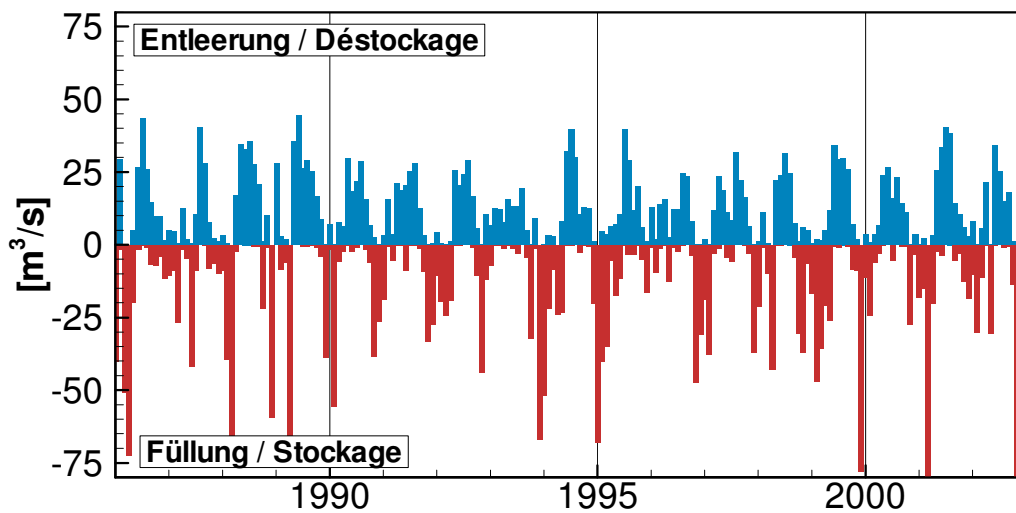


Abbildung 8.11.2: Zeitlicher Verlauf der Speicherfüllung und Entleerung im numerischen Modell.
 Figure 8.11.2: Chronique des phases de stockage et déstockage déterminées par le modèle numérique.

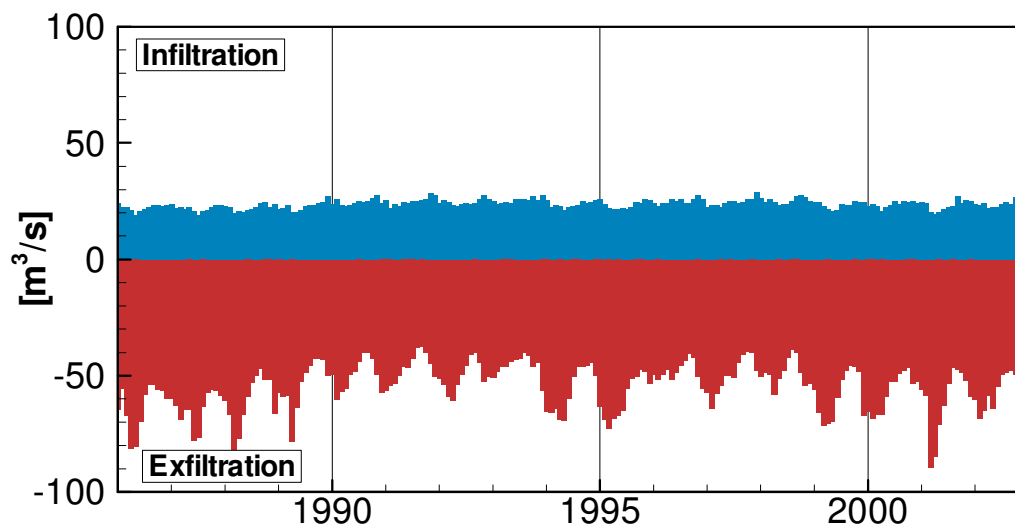


Abbildung 8.11.3: Zeitlicher Verlauf des Austausches mit den oberirdischen Gewässern im numerischen Modell.
 Figure 8.11.3: Variation temporelle d'échanges avec les eaux de surface par le modèle numérique.

Die hauptsächliche Abflusskomponente ist der Austausch mit den oberirdischen Gewässern, der in Abbildung 8.11.3 dargestellt ist. Dieser schwankt deutlich gedämpfter als die Grundwasserneubildung aber mit derselben zeitlichen Variation. Im Winterhalbjahr ist der Abfluss aus dem Grundwasserleiter in die Gewässer größer als im Sommer. Die Unterschiede belaufen sich im Gesamtgebiet auf 10 bis 30 m³/s. Durch einzelne Rheinhochwasser kommt es temporär auch zu einer erhöhten Infiltration aus den Gewässern in den Grundwasserleiter. Dieser kurzfristig erhöhte Austausch beträgt aber nur 5 bis 10 m³/s. Die übrigen Schwankungen sind saisonal durch schwankende Grundwasserstände bedingt. Im Sommer und Herbst ist der Zufluss aus den Gewässern größer als im Winter.

La principale composante des pertes d'eau est due aux eaux de surface présentées sur la figure 8.11.3. Les amplitudes sont nettement plus petites que celles dues à la recharge de nappe mais les fluctuations dans le temps sont identiques. Le drainage de la nappe par les eaux de surface est plus important en hiver qu'en été. Cette différence se situe entre 10 à 30 m³/s pour tout le domaine. Quelques périodes d'infiltration d'eaux de surface dans l'aquifère peuvent exister lors d'épisodes de crue du Rhin. Cet apport très temporaire se situe seulement entre 5 à 10 m³/s. Les autres variations des échanges sont saisonnières et corrélées aux fluctuations des niveaux de nappe. Les pertes d'eau au niveau des eaux de surface sont plus importantes en été et à l'automne qu'en hiver.

8.12 SENSITIVITÄTSSTUDIE

In der Sensitivitätsstudie wurde der Einfluss des speichernutzbaren Hohlraumanteils und des gespannten Speicherkoeffizienten auf die berechneten Piezometerhöhen und damit auf die Anpassungsgüte untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass der gespannte Speicher, der in den Bereichen wirksam ist, in denen die Grundwasseroberfläche in die Deck-

8.12 ANALYSE DE SENSIBILITÉ

La sensibilité de la porosité et du coefficient d'emmagasinement sur les hauteurs piézométriques et la qualité de l'étalonnage ont été étudiés en faisant varier ces paramètres. Il a été montré que, pour les zones concernées où la nappe atteint le niveau du sol loessique, les variations du coefficient d'emmagasinement ont très peu

schichten einschneidet, eine untergeordnete Bedeutung für die Anpassungsgüte hat. Dies lässt sich damit erklären, dass in den gespannten Bereichen auch ein sehr dichtes Gewässernetz vorliegt, so dass die Speicherfähigkeit des Grundwasserleiters in diesen Bereichen nur eine geringe Rolle spielt.

Aus den Modellergebnissen lässt sich im Hinblick auf die Sensitivität des speichernutzbaren Hohlraumanteils folgendes ableiten:

- Im Nahbereich der kleineren Gewässer führt eine Änderung des speichernutzbaren Hohlraumanteils nur zu geringen Änderungen in der Gangliniendynamik.
- Im Nahbereich der Rheins, in dem vorwiegend im südlichen Modellgebiet ein Hohlraumanteil von 12% ermittelt wurde, führt eine Vergrößerung des Hohlraumanteils zu einer verringerten Gangliniendynamik, die auf eine verschlechterte Anpassung des Modells hindeutet.
- Da auf linksrheinischer Seite die Grundwasserstandsschwankungen am Grabenrand am größten sind, führt eine Veränderung des Hohlraumanteils in diesen Bereichen zu einer deutlich anderen Gangliniendynamik. Das bedeutet, dass der in diesen Bereichen eingegrenzte Hohlraumanteil am besten abgesichert ist.

d'effet sur la qualité de l'étalonnage. Cela signifie que dans ces zones, où le réseau hydrographique est également présent, les capacités de stockage jouent un rôle négligeable.

Les résultats des modélisations concernant l'analyse de sensibilité de la porosité montrent que :

- Au voisinage des petits cours d'eau, les variations de la porosité modifient très peu les fluctuations temporelles de la piézométrie.
- Au voisinage du Rhin, dans la partie Sud où une porosité de 12% a été estimée, une augmentation de la porosité conduit à une dynamique piézométrique avec des fluctuations d'amplitudes moins importantes. Il en résulte un étalonnage de moins bonne qualité.
- Du côté gauche du Rhin, aux limites du Fossé Rhénan où les amplitudes piézométriques sont les plus grandes, une modification de la porosité induit un changement notable dans la dynamique de la piézométrie. Dans ces zones, l'estimation de la porosité est donc la plus fiable.

9 Stofftransportmodellierung

Modélisation du transport de soluté

9.1 VORGEHENSWEISE

Das Ziel der Stofftransportmodellierung war die Nachbildung und Prognose der Nitratverhältnisse im Grundwasserleiter des Oberrheingrabens. Der hauptsächliche Nitrateintrag findet flächig mit der Grundwasserneubildung statt. Durch die ungesättigte Zone wird Nitrat in den gesättigten Teil des Grundwasserleiters transportiert. In der ungesättigten Zone kommt es zu einer Verzögerung des Nitrateintrags aus der Bodenzone. Diese Verzögerung wurde vorab abgeschätzt und bei der Formulierung der Nitrateintragsrandbedingung aus Grundwasserneubildung mitberücksichtigt. Ein Abbau des flächenhaften Nitrateintrags findet in der gut durchlüfteten ungesättigten Zone nicht statt.

Im gesättigten Teil des Grundwasserleiters wird das Nitrat dreidimensional transportiert, mikrobiell abgebaut und durch die oberirdischen Gewässer, Entnahmen oder den unterirdischen Abfluss am Gebietsrand ausgetragen. Diese Transportprozesse werden in der Transportsimulation nachgebildet. Dabei wird die dreidimensionale Transportdifferentialgleichung für poröse Medien gelöst.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_a \nabla C + \nabla \cdot (D \nabla C) + qC + R$$

Mit:

- $v_a \nabla C$: Advektionsterm, *terme d'advection*
- $\nabla \cdot (D \nabla C)$: Dispersionsterm, *terme de dispersion*
- qC : Quellen – /Senkenterm, *terme puits/source*
- R : Reaktionsterm, *terme d'adsorption*

Aus der Differentialgleichung lassen sich die für den Nitrattransport relevanten Prozesse in der gesättigten Zone mathematisch beschreiben. Folgende Transportmechanismen wurden in der Modellierung mitberücksichtigt:

- Advektiver Transport: Der advektive Transport von Nitrat ergibt sich aus dem Strö-

9.1 LA DÉMARCHE

L'objectif de la modélisation du transport de solutés était de reproduire la dynamique des nitrates et de prédire leur devenir dans l'aquifère du Rhin Supérieur. La principale entrée de nitrates est surfacique, liée à la recharge de nappe. Les nitrates pénètrent dans la nappe après avoir traversé la zone non saturée. Cette zone non-saturée engendre un retard pour l'infiltration des nitrates ayant déjà traversés la zone racinaire. Ce retard a d'abord été estimé puis pris en compte dans l'estimation des apports de nitrates liés à la recharge de nappe. La dégradation des nitrates dans la zone non saturée est négligée, compte tenu des bonnes conditions d'aération.

Dans la zone saturée de l'aquifère, les nitrates se déplacent dans les 3 dimensions, subissent une dégradation microbiologique et sortent du domaine soit par prélèvements, soit au niveau des flux de sortie du domaine (limite Nord), ou encore au niveau des cours d'eau. Ces processus de transport sont décrits par le modèle de simulation. L'équation de transport de solutés dans un milieu poreux est résolue en 3 dimensions.

L'équation aux dérivées partielles décrivant le transport de soluté est :

Les mécanismes de transport prépondérant pour les nitrates en zone saturée sont représentés par ce modèle mathématique. Les mécanismes de transport pris en compte sont les suivants :

- Transport par advection: le transport par advection des nitrates est du à l'écoulement de

mungsfeld im Grundwasserleiter, das anhand der Strömungsmodellierung bestimmt wurde. In der Strömungsmodellierung werden Filtergeschwindigkeiten ermittelt. Anhand der durchflusswirksamen Porosität ergeben sich die für die Transportprozesse im Grundwasserleiter relevanten Abstandsgeschwindigkeiten. Die durchflusswirksame Porosität ist eine Aquifereigenschaft, die im Rahmen der Transportmodellierung bestimmt wurde.

- **Dispersiver Transport:** Der Transport von Wasserinhaltsstoffen, wie z.B. Nitrat, das im gesamten Modell über die Geländeoberfläche eingetragen wird, unterliegt zwar auch dispersiven Transportprozessen. Diese sind aber, im Hinblick auf die Verteilung der Wasserinhaltsstoffe, von untergeordneter Bedeutung, da keine scharfen Fronten in den Konzentrationsverteilungen auftreten. Dies wurde im Rahmen einer Sensitivitätsbetrachtung (Lang, U., Keim, B., Maier, A., Ackerer, Ph., Schäfer, W. 2004) nachgewiesen. Das bedeutet, dass die Dispersivität kein sensitiver Parameter beim regionalen Transport von großräumig verteilten Wasserinhaltsstoffen ist, der z.B. anhand von gemessenen Nitratkonzentrationen bestimmt werden kann. Deshalb wurde eine konstante Längsdispersivität α_L von 100 m und eine Querdispersivität α_T von 10 m angenommen.
- **Mikrobieller Abbau:** Der Abbau von Nitrat findet im Grundwasserleiter nur unter reduzierenden Verhältnissen statt. Das bedeutet, dass der Nitratabbau von den lokalen Sauerstoffkonzentrationen abhängig ist. Geht man davon aus, dass die Sauerstoffverteilung im Grundwasserleiter zeitlich konstant ist und dass es die gleichen biochemischen Prozesse und Parameter sind, die sowohl die Sauerstoffzehrung als auch den Nitratabbau steuern, so kann der Nitratabbau aus der leichter bestimmbaren Sauerstoffzehrung abgeleitet werden.

Neben den dargestellten Transportprozessen ist zu berücksichtigen, dass die Simulation des Nitrattrans-

l'eau dans l'aquifère, écoulement déterminé par le modèle hydrodynamique. Les vitesses ainsi calculées sont les vitesses dites de Darcy. Les vitesses intervenant dans le transport de solutés dans l'aquifère sont déterminées à partir de la porosité efficace. Cette porosité efficace est une propriété de l'aquifère et sera estimée dans le cadre de l'étude sur la modélisation du transport.

- **Transport par dispersion:** le transport de solutés, tels les nitrates, qui s'infiltrent à travers toute la surface du domaine sont également soumis aux processus de dispersion. Cependant, compte tenu de la répartition de ces solutés, ces processus sont peu importants, du à l'absence de fronts marqués de concentration. Cette hypothèse a été confirmée dans le cadre d'une étude de sensibilité (Lang, U., Keim, B., Maier, A., Ackerer, Ph., Schäfer, W. 2004). La dispersivité n'est donc pas un paramètre sensible pour le transport à l'échelle régionale de solutés présents sur de grandes échelles, comme le confirme les concentrations mesurées des teneurs en nitrates. Pour ces raisons, une valeur constante de dispersivité longitudinale de 100m et transversale de 10m a été retenue.
- **La dégradation biologique:** dans un aquifère, la dégradation des nitrates n'a lieu qu'en conditions réductrices. Cette dégradation dépend donc de la teneur en oxygène dissous au niveau local. Si l'on admet que la répartition de l'oxygène dans l'aquifère ne change pas au cours du temps et que les processus biochimiques et les paramètres qui les caractérisent sont toujours les mêmes, il est alors possible d'évaluer la biodégradation à partir de la dégradation de l'oxygène dissous, dégradation plus facile à estimer.

La simulation du transport des nitrates est aussi dépendante des conditions initiales, en plus des

ports ein Anfangswertproblem ist. Das bedeutet, dass eine dreidimensionale Nitratanzfangsverteilung dem Modellierungszeitraum zugrunde zu legen ist. Da die vorhandenen Messwerte nicht ausreichen, um eine konsistente dreidimensionale Anfangsverteilung der Nitratkonzentrationen zu ermitteln, musste anhand einer so genannten Vorlaufsimulation die Anfangsverteilung bestimmt werden.

Aus den oben zusammengestellten Transportprozessen und der Anfangswertproblematik ergaben sich folgende Arbeitsschritte bei der Nitrattransportmodellierung:

- Abschätzung der Verweilzeiten in der ungesättigten Zone
- Bestimmung des durchflusswirksamen Hohlraumanteils anhand einer Tritiumsimulation
- Bestimmung der Bereiche mit Denitrifikation durch Simulation des Sauerstofftransports
- Ermittlung der Nitratkonzentrationsverteilung für 1950 unter der Annahme einer zeitlich konstanten Nitratverteilung bis 1950
- Simulation des langjährigen Transports von Nitrat zwischen 1950 und 2005
- Prognose des Nitrattransports bis 2050 unter verschiedenen Annahmen zur Entwicklung des Nitratreintrags anhand von Szenarien und Handlungsoptionen

Die Basis der oben beschriebenen Transportmodellierung bildete die Strömungsmodellierung mit der stationären Eichung für Mittelwasserhältnisse und die instationäre Strömungssimulation zwischen 1986 und 2002. Da der Nitratreintrag und der Transport von Nitrat über mehrere Jahrzehnte wirken, wurde davon ausgegangen, dass sich der Nitrattransport näherungsweise anhand von mittleren Strömungsverhältnissen beschreiben lässt. Konzentrationsschwankungen infolge dynamischer Grundwasserströmung bleiben dadurch unberücksichtigt. Anhand von Simulationsrechnungen mit instationärem Strömungsfeld zwischen 1986 und 2002 wurde diese Annahme überprüft.

processus de transport eux-mêmes. Les conditions initiales de la répartition tridimensionnelle doivent donc être estimées pour le début de la période simulée. En raison de mesures en nombre insuffisant pour établir des conditions initiales pertinentes en 3 dimensions, une simulation dite préliminaire a été effectuée pour déterminer cette distribution initiale de concentration.

Sur la base des objectifs du projet, de l'ensemble des processus de transport et des difficultés liées aux conditions initiales, la modélisation du transport de nitrates a été menée selon les étapes suivantes :

- Estimation des temps de transport dans les zones non saturées
- Estimation des porosités efficaces à partir d'une simulation du transport de Tritium
- Détermination des zones de dénitrification à partir d'une simulation du transport d'oxygène dissous
- Evaluation de la distribution en nitrates en 1950 en supposant que la distribution en nitrates n'a pas changé jusqu'en 1950
- Simulation du transport des nitrates de 1950 à 2005
- Prédiction de la migration des nitrates jusqu'en 2050 selon des hypothèses concernant les infiltrations des nitrates établies à partir de scénarii et de différentes pratiques culturelles.

Les modélisations hydrodynamiques en régime permanent pour un écoulement et en régime transitoire de 1986 à 2002 constituent les bases de la modélisation du transport de nitrates décrite précédemment. Bien que les apports et le transport des nitrates s'effectuent sur plusieurs années, il est admis que le transport peut être décrit par un écoulement moyen permanent. Les fluctuations des concentrations liées aux variations de l'écoulement dans le temps ne sont donc pas décrites par le modèle. Cette hypothèse a été vérifiée en effectuant des simulations avec un écoulement en régime transitoire défini sur la période allant de 1986 à 2002.

Die Transportrechnungen wurden mit dem von ZENG und WANG (1999) entwickelten Programmsystem MT3DMS durchgeführt.

Les simulations de transport ont été réalisées à l'aide du modèle MT3DMS développé par ZENG et WANG (1999).

9.2 BERÜCKSICHTIGUNG DER UNGESÄTTIGTEN ZONE

Die Berechnung des Nitrataustrags liefert Frachten für die Untergrenze der durchwurzelten Zone, d.h. in ca. 90 cm Tiefe (siehe Teilprojekt Nitratverlagerung). Der Grundwasserspiegel liegt jedoch in weiten Teilen des Modellgebiets deutlich tiefer. Dadurch kann es zu einer erheblichen Verzögerung des Nitratreintrags ins Grundwasser kommen. Um diese Verzögerung abschätzen zu können, wurde die Verweilzeit für jede Modellzelle nach folgender Formel bestimmt:

$$\Delta t = \frac{\Delta z_{\text{Sand}}}{GWN} WG_{\text{Sand}} + \frac{\Delta z_{\text{Löss}}}{GWN} WG_{\text{Löss}}$$

mit

$$\Delta z_{\text{Sand}} = \Delta z_{\text{ges}} - \Delta z_{\text{Löss}} \text{ [L]}$$

$$\Delta z_{\text{ges}} = \text{GOK} - \text{GOF} \text{ [L]}$$

$\Delta t =$ Verweilzeit in der ungesättigten Zone [T]

Temps de parcours dans la zone non saturée [T]

Δz_{ges} : Gesamtmächtigkeit der ungesättigten Zone [L]

Epaisseur de la zone non saturée [L]

$\Delta z_{\text{Löss}}$: Mächtigkeit der gering durchlässigen Überdeckung (z.B. Löss) [L]

Epaisseur de la couche de sol à plus faible perméabilité (loess par exemple) [L]

GOK: Höhe der Geländeoberkante [L]

Cote de la surface du sol [L]

GOF: Höhe der Grundwasseroberfläche [L]

Cote de la surface de nappe [L]

GWN: Grundwasserneubildungsrate [L/T]

Recharge de nappe [L/T]

$WG_{\text{Sand}}, WG_{\text{Löss}}$: Wassergehalt von Sand bzw. der gering durchlässigen Überdeckung [-]

Teneur en eau du sable, resp. de la couverture de sol à faible perméabilité [-]

9.2 PRISE EN COMPTE DE LA ZONE NON SATURÉE

Le calcul des apports de nitrates fournit les flux sortant de la zone racinaire, c-à-d à environ 90 cm de profondeur (voir sous-projet transfert des nitrates). Le niveau de la nappe est bien plus profond dans la plus grande partie du domaine modélisé. Ceci peut induire à décalage dans le temps significatif de l'arrivée des nitrates dans la nappe. Afin d'estimer ce décalage, les temps de parcours au niveau de chaque maille du modèle ont été calculés à l'aide de la formule suivante :

Die Statistik der berechneten Verweilzeiten in der ungesättigten Zone im Modellgebiet ist in Tabelle 9.2.1 dargestellt. Dabei wurde angenommen, dass der Wassergehalt für Sand 5% beträgt und der für die gering durchlässigen Überdeckungen wie Löss 20% [RICHERT, J. 2004], Détermination des vitesses de transfert de l'eau, des nitrates et d'autres solutés dans la zone non saturée dans un loess profond. Rap. Chambre d'Agriculture du Bas Rhin, 85p, 77 ill.).

Les résultats concernant les temps de parcours dans la zone non saturée du domaine d'étude sont présentés dans le tableau 9.2.1. Une teneur en eau du sable de 5 % et de 20 % pour la couverture de sol à faible perméabilité a été admise pour ces calculs selon [RICHERT, J. 2004], Détermination des vitesses de transfert de l'eau, des nitrates et d'autres solutés dans la zone non saturée dans un loess profond. Rap. Chambre d'Agriculture du Bas Rhin, 85p, 77 ill.).

Tab. 9.2.1: Statistik der berechneten Verweilzeiten im Modellgebiet
 Tab. 9.2.1: Résultats du calcul des temps de parcours dans la zone modélisée.

Verweilzeitklasse (a) <i>Temps de parcours (an)</i>	Anzahl Knoten <i>Nbre de mailles</i>	% der aktiven Knoten des Modell- gebiets <i>% de mailles actives dans la zone modélisée</i>
0 – 2	282.711	65,9
2 – 5	99.593	23,2
5 – 10	27.335	6,4
10 – 20	9.392	2,2
20 – 30	2.724	0,6
30 – 40	1.135	0,3
über 40	526	0,1
Ohne Grundwasserneubildung	5.346	1,2

*Knoten pro Schicht insgesamt: 1.536.431, davon aktiv: 428.762
 *Total de mailles par couche: 1.536.431, dont 428.762 actives

Lange Verweilzeiten entstehen überall dort, wo mächtige Löss-Überdeckungen vorhanden sind. Dies ist insbesondere an den Gebirgsrändern der Fall (Abb. 9.2.1).

Des temps de parcours élevés existent partout où la couverture loessique est épaisse. C'est surtout le cas en bordure du domaine (voir figure 9.2.1).

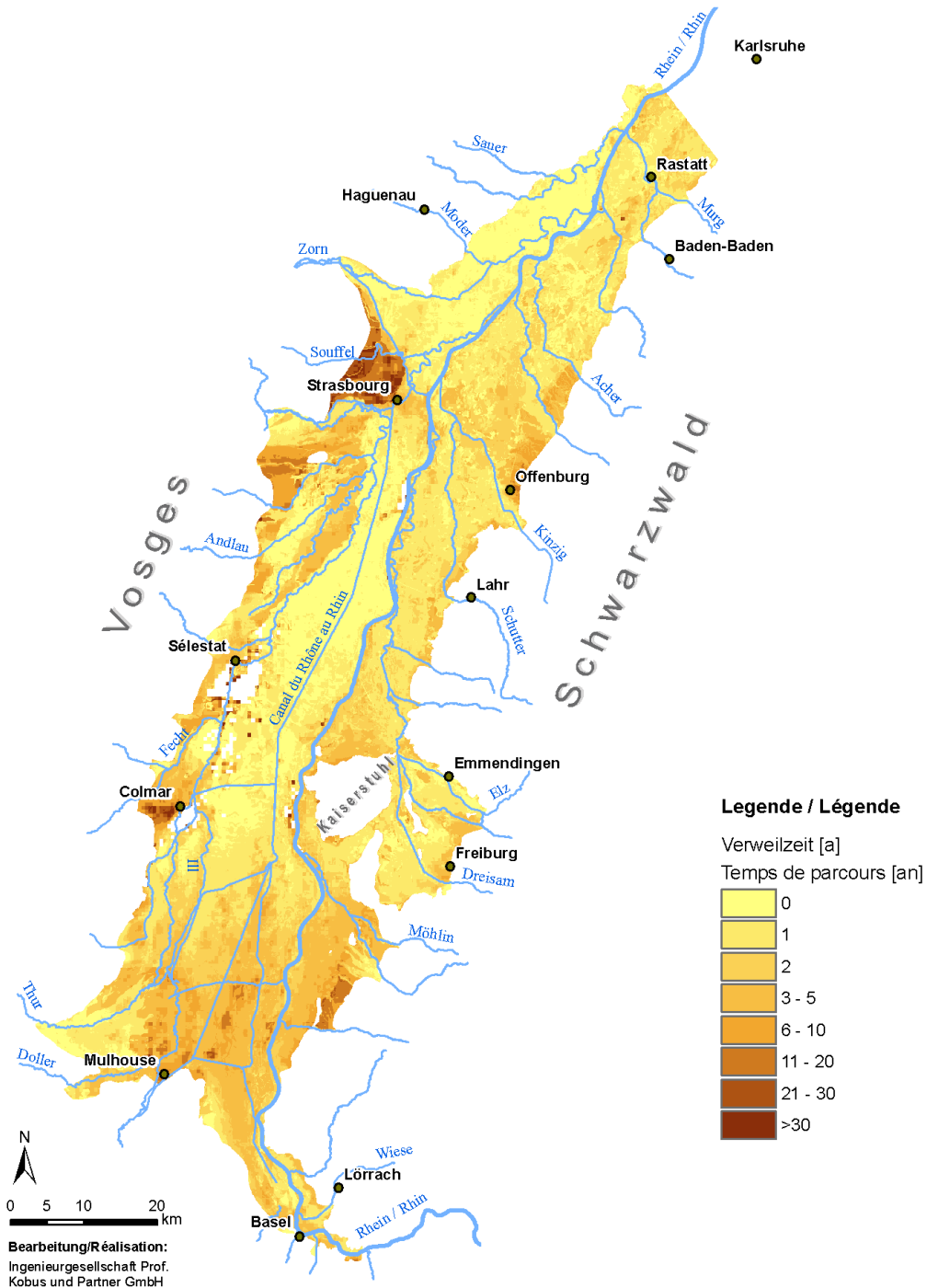


Abbildung 9.2.1 Verteilung der Verweilzeiten in der ungesättigten Zone.
Figure 9.2.1 Cartographie des temps de parcours dans la zone non saturée.

9.3 IDENTIFIKATION DER ZUSTROMBEREICHE ZU DEN MESSSTELLEN

Bevor die Parameter Tritium, Sauerstoff und Nitrat mit dem Transportmodell betrachtet wurden, wurden Modellrechnungen durchgeführt, um die Zustrombereiche zu den einzelnen Messstellen zu identifizieren. Dazu wurden die folgenden Randbe-

9.3 IDENTIFICATION DES ZONES D'EMPRUNT AU NIVEAU DES POINTS DE MESURE

Les zones d'emprunt de chaque point de mesure ont été identifiées par plusieurs simulations avant l'analyse du transport de Tritium, oxygène dissous et nitrates. Les différents flux aux limites ont été 'marqués' afin d'évaluer leur contribution

dingungen markiert und die Anteile des jeweiligen Randbedingungswassers in den Messstellen ausgewertet:

- Neubildung
- unterirdischer Randzufluss
- Gewässernetz

Die Untersuchung ermöglicht die gemessenen Daten besser zu interpretieren und die Berechnungsergebnisse hinsichtlich Plausibilität zu überprüfen. Folgende Bereiche konnten für die Messstellen, die zwischen 0 und 40 m verfiltert sind identifiziert werden (siehe Abb. 9.3.1):

- Der größte Teil des Grundwassers in den Messstellen des mittleren und südlichen Untersuchungsraums ist vorwiegend durch die Grundwasserneubildung beeinflusst.
- Das Wasser der Messstellen im südlichen Kalibecken zum Vogesenrand und östlich des Canal du Rhône au Rhin ist deutlich durch versickerndes Wasser aus oberirdischen Gewässern markiert. Dies gilt auch für zahlreiche Messstellen am Grabenrand im Markgräflerland, entlang der Kinzig und der Murg.
- Das Wasser in den Messstellen am Grabenrand ist fast ausschließlich durch den Randzufluss beeinflusst. Dieser Randzufluss wirkt sich allerdings nur in einem sehr schmalen Streifen von wenigen Kilometern am Grabenrand aus.
- Entlang der Ill zwischen Colmar und Straßburg finden sich Messstellen, deren Wasser sich keiner der Randbedingungen zuordnen lässt. Dieses Wasser stammt aus der Tiefe und ist aufsteigendes Grundwasser, das länger als 30 Jahre unterwegs war.

respective au niveau de ces points de mesure. Les flux analysés sont les suivants :

- la recharge de nappe
- les apports aux limites souterrains
- le réseau hydrographique.

Ce travail permet de mieux interpréter les données mesurées et d'évaluer la plausibilité des résultats des valeurs simulées. Les zones d'emprunt ont pu être identifiées pour les points de mesure crépinés sur une hauteur de 40 m. Elles sont les suivantes (voir figure 9.3.1) :

- La plus grande partie des eaux souterraines prélevée au niveau des points de mesure situés dans la partie centrale et au Sud de la zone d'étude est surtout influencée par la recharge de nappe.
- L'eau prélevée au niveau des points de mesure situé au débouché de la Thur et à l'Est du canal du Rhône au Rhin provient clairement des eaux de surface. C'est aussi le cas pour de nombreux points de mesure situés en limite du Fossé Rhénan dans le Markgräflerland, le long de la Kinzig et de la Murg
- L'eau prélevée au niveau des points de mesure situés en limite du Fossé Rhénan provient presque exclusivement des apports souterrains. Cet apport a cependant un effet qui se limite à une bordure étroite d'à peine quelques kilomètres.
- Les points de mesure localisés près de l'Ill entre Colmar et Strasbourg ne montrent aucune caractéristique marquée concernant l'origine de l'eau. L'eau provient des profondeurs par écoulement ascendant avec un temps de résidence de plus de 30 ans.

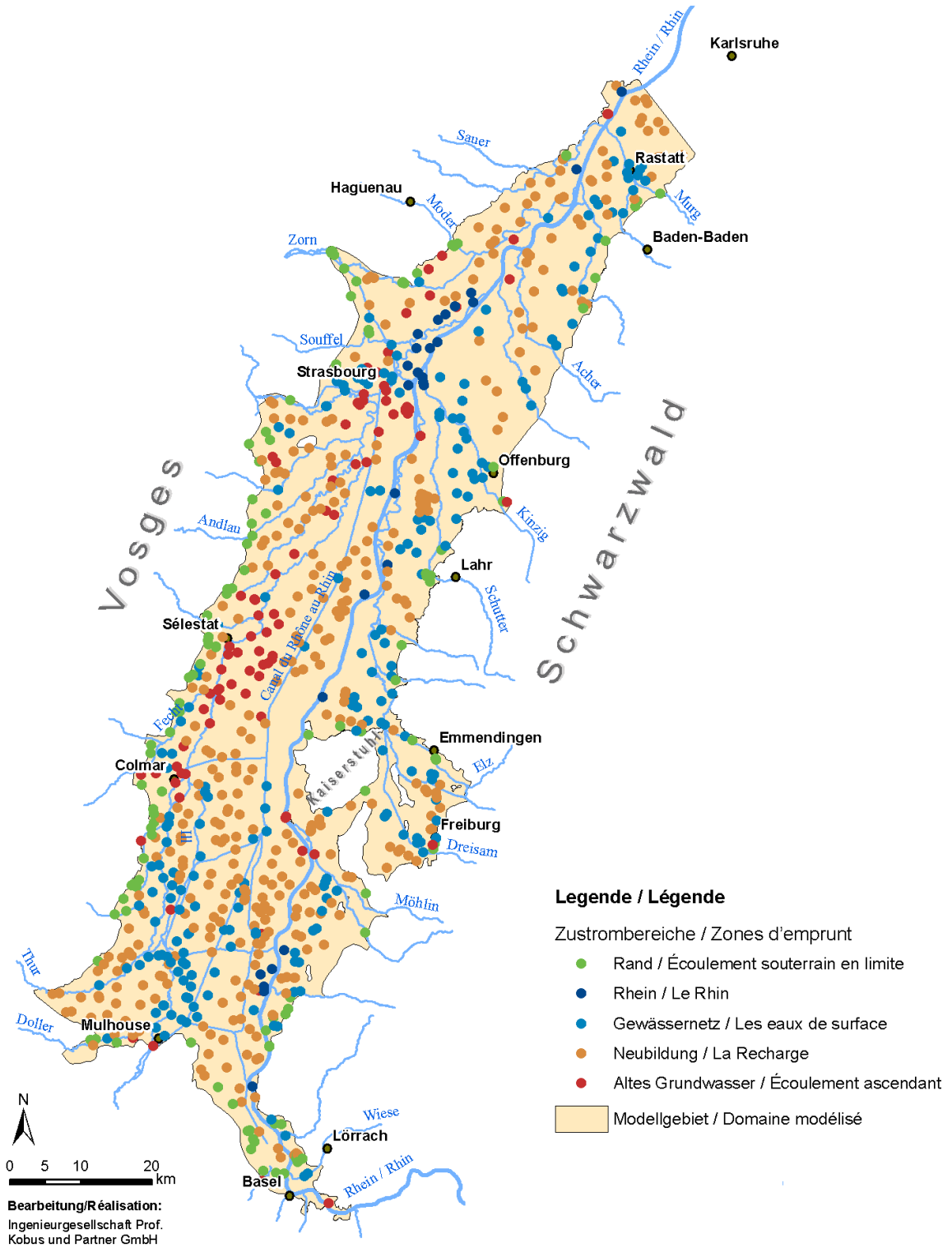


Abbildung 9.3.1: Identifikation der Zuströmung zu den Messstellen.
Figure 9.3.1: Identification des zones d'emprise des points de mesure.

9.4 TRITIUMSIMULATION

Ein wesentlicher Transportprozess für Nitrat im Grundwasser ist der advective Stofftransport, d.h. der Transport mit der Grundwasserströmung. Der relevante Parameter hierfür ist die Abstandsgeschwindigkeit, welche mittels Division der Filtergeschwindigkeit durch die transportwirksame (effektive) Porosität n_e ermittelt wird. Die Filtergeschwindigkeit wiederum ist eine Eingangsgröße für das Transportmodell, die aus der Strömungsberechnung geliefert wird.

Der Wert der effektiven Porosität ist eine Funktion des Aquiferaufbaus, aber auch der Aufenthaltszeit eines Stoffes im Aquifer (vgl. Kap. 9.4.3). Für kleinräumige Situationen (Meter bis mehrere Zehner-Meter) lässt sich n_e mithilfe von Markierungsversuchen bestimmen. Aufgrund der Abhängigkeit der effektiven Porosität von der Aufenthaltszeit lassen sich die so ermittelten Werte jedoch nicht auf eine großräumige Transportsituation übertragen. Aktive Markierungsversuche im regionalen Maßstab hingegen scheiden aus Praktikabilitätsgründen aus. Die effektive Porosität für den großräumigen Stofftransport kann daher nur unter Verwendung anthropogener Spurenstoffe mit bekannter Eintragungsgeschichte bestimmt werden. Im vorliegenden Fall wurde das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium verwendet.

9.4.1 RANDBEDINGUNGEN

Der Tritium-Transport wurde für den Zeitraum von 1963 – 1997 berechnet. Die Tritium-Konzentration im Niederschlag stammt für die Jahre 1963 – 1977 von der Station Hof/Saale, von 1978 - 1988 von der Station Karlsruhe, und für die Jahre von 1989 - 1997 wurde der Mittelwert der Stationen Karlsruhe und Weil am Rhein verwendet [IAEA 2004]. Für die o.g. Stationen sind monatliche Aufzeichnungen vorhanden. Ausgewählt wurden nur die Konzentrationen des Winterniederschlags (von Oktober – März), da davon ausgegangen werden kann, dass der Großteil der Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr geschieht.

9.4 SIMULATION DU TRANSPORT DU TRITIUM

Un des processus les plus importants du transport des nitrates est l'advection due aux mouvements de l'eau. Le paramètre clé est la vitesse moyenne réelle déterminée par le rapport vitesse de Darcy sur porosité efficace n_e . La vitesse de Darcy constitue une donnée d'entrée du modèle de transport, donnée fournie par le modèle hydrodynamique.

La valeur de la porosité efficace dépend de la structure de l'aquifère et détermine le temps de parcours moyen d'un soluté dans l'aquifère (voir chapitre 9.4.3). La porosité efficace n_e peut être déterminée par des essais de traçage à petite échelle (quelques mètres à quelques dizaines de mètres). Les valeurs ainsi estimées ne peuvent être généralisées à grande échelle compte tenu de l'hétérogénéité du milieu. Cette technique ne peut pas non plus être appliquée à grande échelle compte tenu des temps de parcours et des effets de dilution. Les porosités efficaces ne peuvent donc être estimées qu'à l'aide d'un traceur d'origine anthropique et dont l'historique de la contamination est connu. Pour nos calculs, nous avons retenu un isotope radioactif, le Tritium.

9.4.1 LES CONDITIONS AUX LIMITES

La simulation du transport du Tritium a été menée pour une période allant de 1963 à 1997. Les concentrations en Tritium des précipitations proviennent de la station de Hof/Saale de 1963 à 1977, de la station de Karlsruhe de 1978 à 1988, et pour les années 1989 à 1997, une moyenne des valeurs mesurées à Karlsruhe et Weil am Rhein a été utilisée [IAEA 2004]. Les données sont recueillies avec un pas de temps mensuel aux stations évoquées ci dessus. Seules les concentrations des précipitations hivernales (d'octobre à mars) ont été prises en compte, l'essentiel de la recharge de la nappe ayant lieu pendant cette période.

Für die Grundwasserströmung wurden langjährig mittlere Verhältnisse gewählt, der Stofftransport wurde in 35 Perioden zu je einem Jahr berechnet. Für jedes Jahr wurde der Mittelwert der monatlichen Messwerte des Winterhalbjahres verwendet. Dabei wurde die Verzögerung des Tritiumtransports in der ungesättigten Zone berücksichtigt (vgl. Kap. 9.2).

Der Tritiumgehalt des Rheinwassers wurde aus den Messwerten der Stationen Weil am Rhein, Breisach und Worms gemittelt (Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2005). Für den Eintrag aus den anderen oberirdischen Gewässern wurde zunächst vereinfachend die Konzentration des Niederschlagswassers verwendet. Während der Modellkalibrierung zeigte sich jedoch, dass dadurch der Tritiumeintrag unterschätzt wird. Deshalb wurde den oberirdischen Gewässern der Tritiumgehalt des Neckars aus der Station Obertürkheim [BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 2005] zugeordnet. Zwar liegt der Neckar außerhalb des Modellgebiets, er war jedoch der einzige Nebenfluss des Rheins im Oberrheingraben, für den kontinuierliche Tritium-Messreihen vorliegen.

Die Messwertaufzeichnungen für den Rhein und für den Neckar beginnen erst in den Jahren 1980 bzw. 1978. Daher mussten die Tritiumgehalte für die vorangegangenen Modellperioden aus den Niederschlagsdaten und den vorhandenen Gewässerdaten extrapoliert werden. Die im Modell verwendeten Tritiumkonzentrationen für die Grundwasserneubildung aus Niederschlag und für die Zuflüsse aus dem Rhein und den übrigen oberirdischen Gewässern zeigt die Abb. 9.4.1.

Le transport a été simulé sur 35 périodes d'une année chacune et sur la base de l'écoulement moyen déterminé en régime permanent. Pour chaque année, la moyenne des concentrations mesurées en période hivernale a été utilisée. De plus, le décalage dans le temps du au parcours dans la zone non saturée a été pris en compte (voir chapitre 9.2).

Les teneurs en Tritium de l'eau du Rhin ont été établies à partir des stations de mesure de Weil am Rhein, Breisach et Worms (Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2005). Pour les eaux de surface, les teneurs en Tritium utilisées ont été supposées identiques à celles des eaux de précipitation en première approximation. Les résultats des simulations et de l'étalonnage ont montré que les apports en Tritium sont sous-estimés. Les teneurs observées à la station Obertürkheim sur le Neckar [BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE 2005] ont alors été utilisées. Bien que le Neckar se situe en dehors du domaine d'étude, c'est le seul affluent du Rhin pour lequel les teneurs en Tritium ont été mesurées de manière continue.

L'acquisition des données en Tritium pour le Rhin et pour le Neckar a commencé respectivement en 1980 et 1978. Il a donc été nécessaire d'estimer les teneurs en Tritium pour le Rhin et les eaux de surface à partir des teneurs des précipitations pour les années précédentes. Les teneurs mises en œuvre dans la modélisation pour la recharge à partir des précipitations, pour les infiltrations au niveau du Rhin et des autres cours d'eau sont présentées sur la figure 9.4.1.

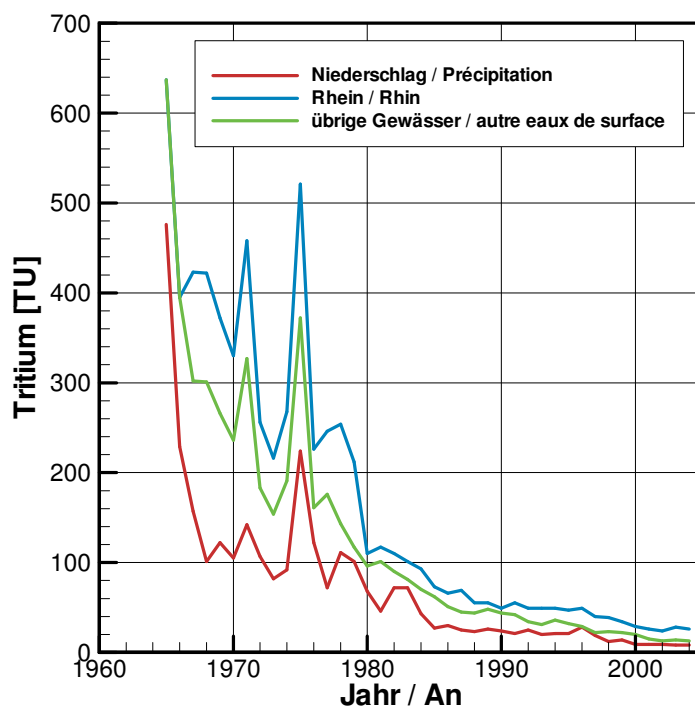


Abbildung 9.4.1: Tritiumkonzentrationen für den Grundwasserzufluss aus Niederschlag, aus dem Rhein und den übrigen oberirdischen Gewässern in TU (Tritium Units; 1 TU = 1 Tritiumkern pro 10^{18} Wasserstoffkernen).
 Figure 9.4.1: Concentrations en Tritium des apports provenant des précipitations, du Rhin et des autres cours d'eau. TU (Tritium Units; 1 TU = 1 pour un noyau de Tritium pour 10^{18} molécules d'eau).

Für den Tritiumgehalt des Randzuflusses wurden vereinfachend die Werte aus der Grundwasserneubildung der jeweiligen Randzelle verwendet. Als Anfangskonzentration im Jahr 1963 wurde im gesamten Modellgebiet ein Wert von 0 TU angesetzt. Berücksichtigt wurde auch der Tritium-Zerfall in Form einer Abbaureaktion erster Ordnung mit einer Halbwertszeit von 12,32 Jahren.

Les teneurs en Tritium pour les conditions aux limites ont été supposées égales à celles des précipitations évaluées pour les mailles correspondantes. Les concentrations dans la nappe sont supposées nulles en 1963 et constituent les conditions initiales. La dégradation radioactive du Tritium a également été prise en compte à l'aide d'un modèle de dégradation de premier ordre avec une constante de demi-vie de 12.32 années.

9.4.2 MODELLKALIBRIERUNG

Zur Kalibrierung des Tritiumtransports standen 480 Messwerte aus den Jahren 1991 bis 1997 zur Verfügung. Drei Messstellen lagen dabei auf linksrheinischer Seite. 406 Messwerte stammten aus dem Grundwasser der Neuenburg-Formation (Modellschichten 1 – 5), die übrigen 74 Messwerte zeigten die Gehalte des Grundwasser in der Breisgauformation (Modellschichten 6 – 10).

9.4.2 ETALONNAGE DU MODELE

840 concentrations mesurées entre 1991 et 1997 étaient disponibles pour l'étalonnage du modèle. 3 points de mesure se situent dans la partie gauche de Rhin. 406 points de mesure sont représentatifs de la formation de Neubourg (couche de 1 à 5 du modèle), les 74 restants sont représentatifs de la formation de Breisgau (couche 6 à 10).

Als Basis zur Simulation des Tritiumtransports wurde zunächst das Strömungsmodell im Bearbeitungsstand vom Oktober 2005 verwendet. Dabei zeigte sich, dass die berechneten Tritium-Konzentrationen in den Neuenburg-Schichten, d.h. im oberen Teil des Modellgebiets, systematisch niedriger waren als die Messwerte, während es sich in den Breisgau-Schichten umgekehrt verhielt. Offensichtlich gelangte im Modell also zuviel tritiumreiches Wasser in die tieferen Modellschichten. Diese systematische Abweichung konnte dadurch behoben werden, dass die Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit in der Breisgauformation um ca. den Faktor 10 reduziert wurde. Um die gemessenen Wasserstände weiterhin gut reproduzieren zu können, mussten gleichzeitig die Durchlässigkeiten in der Neuenburg-Formation erhöht werden.

Der Tritiumtransport auf der Basis des modifizierten Strömungsmodells lieferte nun für alle Modellschichten zu niedrige Tritiumgehalte. Durch eine Erhöhung des Tritiumeintrags aus den oberirdischen Gewässern (vgl. Kap. 9.4.1) konnte der mittlere Tritiumgehalt des Grundwassers im Modell besser nachgebildet werden.

Im letzten Kalibrierungsschritt wurde die effektive Porosität angepasst. Für das gesamte Modellgebiet wurde vereinfachend ein einheitlicher Wert angesetzt. Modellrechnungen mit reduzierten effektiven Porositäten in den tieferen Schichten ergaben keine Verbesserung der Modellergebnisse. Das Ergebnis dieses Kalibrierungsschritts ist in Abbildung 9.4.2 zu sehen.

Le modèle hydrodynamique établi en octobre 2005 a d'abord été utilisé comme base pour la simulation du Tritium. Les concentrations calculées en Tritium dans la formation du Neubourg, c-à-d dans la partie superficielle du modèle, étaient systématiquement plus faibles que les valeurs mesurées, alors que pour la formation du Neubourg, les valeurs calculées étaient plus grandes. Apparemment, le transport vertical de l'eau chargée en Tritium était trop important. Ce biais systématique dans la modélisation a été supprimé en diminuant les perméabilités de la formation de Breisgau par un facteur 10. En même temps, il a été nécessaire d'augmenter les perméabilités de la formation du Neubourg afin de pouvoir continuer à bien reproduire les niveaux piézométriques

La simulation du transport du Tritium sur la base de l'écoulement ainsi modifié a conduit à une sous-évaluation des teneurs en Tritium pour toutes les couches du modèle. Les teneurs moyennes en Tritium ont pu être reproduites beaucoup mieux en augmentant les concentrations en Tritium au niveau des eaux de surface (voir chapitre 9.4.1).

La dernière étape de l'étalonnage du modèle a consisté à définir la porosité efficace. Une valeur unique de porosité a été choisie pour l'ensemble du domaine par simplification. Les simulations menées avec des valeurs plus faibles de porosité dans les horizons plus profonds n'ont pas fourni de meilleurs résultats. Les résultats de l'étalonnage sont présentés au niveau de la figure 9.4.2.

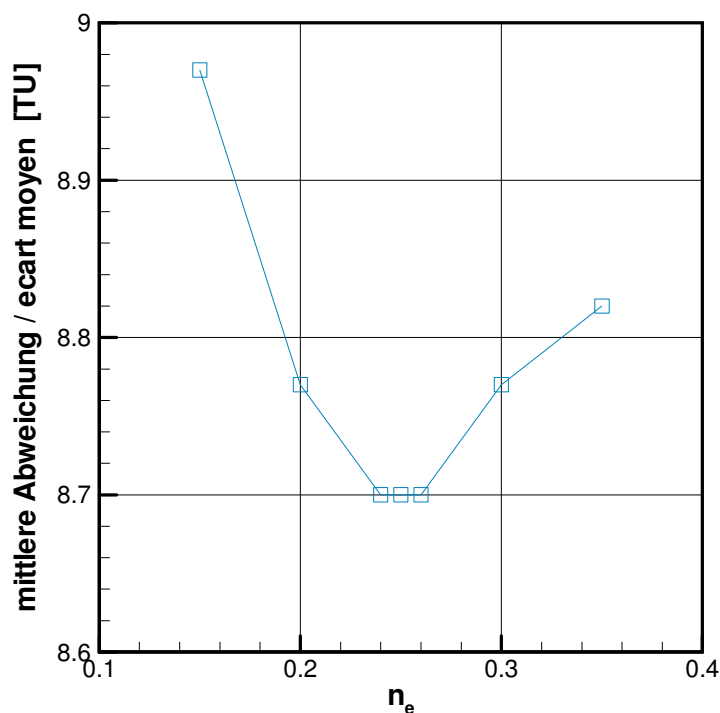


Abbildung 9.4.2: Mittlere Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Tritiumkonzentrationen für die 480 Messwerte in Abhängigkeit von der effektiven Porosität.

Figure 9.4.2: *Ecart moyen entre concentrations en Tritium calculées et mesurées pour 480 points de mesure en fonction de la porosité efficace.*

Eine minimale mittlere Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Tritiumkonzentrationen wurde für einen Bereich zwischen 24 % - 26 % gefunden. Für sämtliche weitere Transportberechnungen wurde eine effektive Porosität von 25 % verwendet. Im Rahmen der Modellkalibrierung wurden auch noch die vertikale Anisotropie der Durchlässigkeitsverteilung des Strömungsmodells und die Dispersivitäten des Transportmodells variiert. Diese Variationen, insbesondere die der vertikalen Anisotropie, hatten jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die berechneten Tritiumkonzentrationen.

9.4.3 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Eine effektive Porosität von 25 % ist ein relativ hoher Wert verglichen mit den Ergebnissen aus kleinräumigen Tracer-Versuchen, wo typischerweise Werte um 15 % gefunden werden. Hauptursache für die unterschiedlichen Werte dürfte sein, dass die

Un écart minimal entre les concentrations en Tritium mesurées et calculées a été observé pour une porosité efficace se situant entre 24 et 26 %. Une porosité efficace de 25% a été retenue pour toutes les simulations de transport. Le rapport d'anisotropie des perméabilités et les valeurs de dispersivité pour le transport ont aussi été modifiés dans le cadre de cet étalonnage. Ces modifications, et notamment celles concernant le rapport d'anisotropie, n'ont pas engendré de différences significatives dans les concentrations en Tritium calculées par le modèle.

9.4.3 ANALYSE DES RESULTATS

Une valeur de porosité efficace de 25 % est relativement élevée par rapport aux valeurs trouvées lors d'essais de traçage à petites échelles qui se situent autour de 15 %. Une des raisons majeures de cette différence peut être imputée au temps de

Aufenthaltszeit der Tracer-Stoffe bei kleinräumigen Untersuchungen in der Größenordnung von Tagen liegt, wohingegen Tritium mehrere Jahrzehnte im Grundwasserleiter verbleibt. Während der kurzen Aufenthaltszeiten bewegt sich der Tracer nur in den sehr gut durchströmten Bereichen des Untergrunds, und die so ermittelte effektive Porosität ist relativ klein. Die lange Aufenthaltszeit des Tritiums ermöglicht es diesem, auch in weniger stark durchströmte Teile des Aquifers zu gelangen und somit einen größeren Anteil des gesamten wassererfüllten Hohlraumvolumens zu erkunden. Dies drückt sich in der höheren effektiven Porosität aus.

Da für Sauerstoff und Nitrat ähnliche Verweilzeiten wie für Tritium im Grundwasserleiter zu erwarten sind ist es sinnvoll, den für Tritium gefundenen Wert auch für den Sauerstoff- und den Nitrattransport zu verwenden. Die Abbildung 9.4.3 zeigt, dass die Streuung der berechneten Werte relativ hoch ist. Dies dürfte u.a. eine Folge davon sein, dass kleinräumige Heterogenitäten in den hydraulischen Durchlässigkeiten, die einen erheblichen Einfluss auf den lokalen Tritium-Messwert haben können, in dem großräumigen Modell nicht identifiziert werden konnten.

transfert des solutés, qui sont de l'ordre de quelques jours pour les essais à petites échelles alors que ces temps de transfert sont de plusieurs décennies pour le Tritium. Lors des essais avec des temps de parcours assez faibles, le traceur se déplace essentiellement dans les zones à forte vitesse et la porosité efficace ainsi obtenue est alors plus petite. Les temps de parcours élevés du Tritium permet à ce soluté d'explorer également des zones à faible perméabilité et ainsi, le soluté se déplace sur un plus grand volume de l'aquifère. De ce fait, la porosité efficace prend une valeur plus élevée.

La même valeur de porosité efficace peut être utilisée pour simuler le transport de l'oxygène dissous et des nitrates, les temps de parcours attendus étant du même ordre de grandeur. La figure 9.4.3 montre que les résultats sont relativement dispersés. Cela peut être dû à la non prise en compte des hétérogénéités de perméabilités à l'échelle locale, hétérogénéités susceptibles d'avoir un effet important sur des mesures locales de concentration en Tritium et qui ne peuvent pas être prises en compte dans le modèle construit à une échelle régionale.

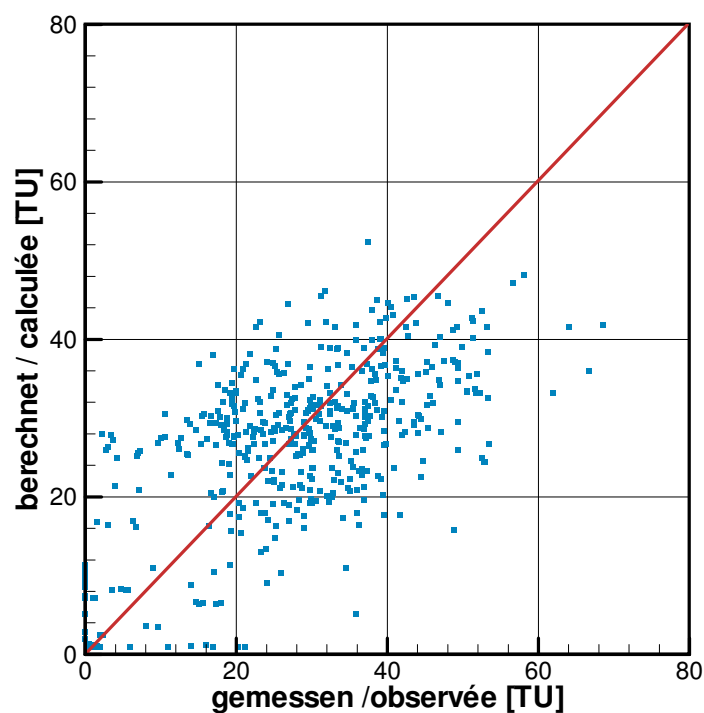


Abbildung 9.4.3:
Figure 9.4.3:

Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Tritium-Konzentrationen des kalibrierten Modells.
Comparaison entre concentrations en Tritium mesurées et simulées après étalonnage du modèle.

Grundsätzlich muss bei der Simulation des Nitrat-transportes auch die Möglichkeit eines Nitrat-abbau in Betracht gezogen werden. Im vorliegenden Fall dürfte die heterotrophe Denitrifikation, d.h. der Nitrat-abbau durch Oxidation organischen Kohlenstoffs, der verbreitetste Abbauprozess sein. Lokal kann jedoch auch die autotrophe Denitrifikation in Zusammenhang mit der Oxidation reduzierter Schwefelverbindungen eine Rolle spielen. Beide Prozesse sind mikrobiell katalysiert. Gemeinsam ist beiden Prozessen auch, dass zunächst Sauerstoff abgebaut wird, bevor Nitrat als Oxidationsmittel verwendet wird.

Die Simulation des Sauerstofftransportes war dadurch motiviert, den Sauerstoffabbau als Indikator für eine mögliche Nitratreduktion heranzuziehen. Der Umweg über die Betrachtung des Sauerstoffabbaus ist notwendig, da beim Sauerstoff im Gegensatz zum Nitrat von einem räumlich und zeitlich weitgehend konstanten Eintrag ausgegangen werden kann und der Sauerstoffabbau deshalb im Aquifer leichter zu quantifizieren ist als der Nitratabbau selbst.

9.5.1 RANDBEDINGUNGEN

Ein Sauerstoffeintrag in das Modellgebiet erfolgt vor allem in gelöster Form über die Grundwasserneubildung, den Zufluss aus den oberirdischen Gewässern und den Randzufluss. Ein diffusiver Eintrag aus der Bodenluft wurde wegen der geringen Diffusionskonstante im Wasser vernachlässigt.

Die Sauerstoffkonzentration im Niederschlagswasser wurde mit 10 mg/l angenommen, für den Randzufluss und den Zufluss aus oberirdischen Gewässern wurde zunächst ein einheitlicher Wert von 5 mg/l angesetzt. Die Zuflusskonzentrationen wurden im Rahmen der Kalibrierung angepasst.

Für den Sauerstoffabbau wurde ein Prozess nullter Ordnung angenommen. Diese Annahme resultiert aus der Überlegung, dass die Sauerstoffzehrung und die Denitrifikation in natürlichen Grundwasserleitern

La simulation du transport de l'ion nitrate nécessite la prise en compte de la dégradation. Dans le cas présent, la dénitrification hétérotrophe, c-à-d la dégradation par oxydation du carbone de la matière organique, doit être le processus prépondérant. Localement, la dénitrification autotrophe, c-à-d par oxydation d'une forme réduite de sulfures, peut aussi avoir lieu. Les deux processus sont catalysés par des microorganismes. Pour les 2 processus également, l'ion oxygène dissous est utilisé avant les nitrates dans les processus d'oxydation.

La simulation du transport d'oxygène était motivée par l'utilisation de la dégradation de l'oxygène comme indicateurs de la dégradation des nitrates. La simulation préalable du transport de l'oxygène dissous et de sa dégradation est nécessaire car, contrairement aux nitrates, les apports peuvent être supposés constants sur de longues périodes de temps et sur l'ensemble du domaine d'étude. De ce fait, la dégradation de l'oxygène est plus facile à quantifier que celle des nitrates.

9.5.1 LES CONDITIONS AUX LIMITES

Les apports en oxygène se font essentiellement sous forme dissous par la recharge de nappe, les infiltrations au niveau des eaux de surface et des limites du domaine modélisé. Un apport par diffusion au niveau de l'interface nappe-air présente dans le sol n'a pas été pris en considération, la constante de diffusion étant petite.

Les concentrations en oxygène des eaux de précipitation ont été estimées à 10 mg/l, une valeur constante de 5 mg/l a été adoptée dans un premier temps pour les eaux de surface. Ces concentrations ont été modifiées au cours de l'étalonnage du modèle.

Un processus de dégradation d'ordre zéro a été adopté pour la dégradation de l'oxygène. Cette hypothèse repose sur le raisonnement suivant : la dégradation de l'oxygène et des nitrates dans les

weniger eine Funktion der Sauerstoff- bzw. Nitratkonzentration selbst als vielmehr der Verfügbarkeit der Reduktionsmittel organischer Kohlenstoff oder reduzierte Schwefelverbindungen ist, z.B. [STARR, R. C., GILLHAM, R. W. 1993]. Anders als beim Abbauprozess erster Ordnung ist die Sauerstoffabbaurate daher eine Konstante, deren Wert nicht von der Sauerstoffkonzentration abhängt. Es wurde davon ausgegangen, dass die Eintrags- und Abbauverhältnisse für Sauerstoff im Modellgebiet langfristig konstant sind.

9.5.2 KALIBRIERUNG DES SAUERSTOFFTRANSPORTS

Zur Überprüfung der berechneten Sauerstoffkonzentrationen standen Messwerte an 918 Messstellen aus dem Jahr 1997 zur Verfügung. 759 dieser Messstellen (83 %) sind in der Neuenburg-Formation verfiltert, die übrigen 159 Messstellen in der Breisgau-Formation.

Da die Rand- und Abbaubedingungen im Modell zeitlich konstant waren, wurde der Sauerstofftransport solange simuliert, bis eine näherungsweise stationäre Situation erreicht war. Dies war nach 30 Jahren Simulationszeit der Fall. Die so berechneten Sauerstoffkonzentrationen wurden dann mit den Messwerten verglichen.

Im ersten Kalibrierungsschritt wurde eine einheitliche Abbaukonstante für das gesamte Modellgebiet angesetzt. Die beste Übereinstimmung ergab sich für einen Wert von 0,23 mg O₂/ l a. Dabei zeigte sich jedoch, dass es in einigen Teilbereichen des Modellgebiets noch systematische Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Sauerstoffkonzentrationen gab. Beispielsweise waren die berechneten Werte im Bereich um Rastatt deutlich höher als die Messwerte.

In einem weiteren Kalibrierungsschritt wurde deshalb versucht, den Sauerstoffabbau mit einer räumlich verteilten Abbaurate nachzubilden. Dabei wurde die Abbaurate lediglich in der obersten Modellschicht variiert, da davon ausgegangen wurde, dass

aquifères en conditions naturelles n'est que très peu dépendante des concentrations en oxygène ou en nitrates, mais dépend surtout de la disponibilité des composants réducteurs carbone de la matière organique, sulfures sous forme réduite, e.g. [STARR, R. C., GILLHAM, R. W. 1993]. Contrairement aux processus de dégradation de premier ordre, la cinétique de dégradation de l'oxygène est une constante qui ne dépend pas de la concentration en oxygène. Il a donc été supposé que les apports d'oxygène et sa cinétique de dégradation sont indépendants du temps.

9.5.2 ETALONNAGE DU MODELE DE TRANSPORT D'OXYGENE

918 valeurs de concentration en oxygène mesurées en 1997 ont été utilisées pour vérifier la pertinence des concentrations calculées. 759 mesures (83%) sont représentatives de la formation de Neubourg, les autres 159 points de mesure sont représentatifs de la formation de Breisgau.

Les conditions aux limites et les conditions de dégradation étant supposées constantes, la durée de la période simulée a été prise suffisamment longue pour atteindre un régime permanent. La durée simulée ainsi obtenue est de 30 ans. Les concentrations en oxygène calculées à la fin de cette période ont été comparées aux valeurs mesurées.

Une valeur uniforme de constante de dégradation a été déterminée pour l'ensemble du domaine modélisé lors de la première phase d'étalonnage. Le meilleur ajustement a été obtenu pour une constante de 0,23 mg O₂/ l an. Cependant, dans certaines parties du domaine d'étude, un biais systématique entre valeurs mesurées et calculées de concentration en oxygène est apparu. A titre d'exemple, les teneurs en oxygène calculées au voisinage de Rastatt se sont avérées nettement plus élevées que celles mesurées.

La deuxième phase de l'étalonnage a donc consisté à faire varier spatialement la constante de dégradation. La cinétique de dégradation a été modifiée uniquement dans les couches supérieures du modèle, partant de l'hypothèse que cette dégradation

erhöhte Abbauaktivitäten auf den obersten Bereich des Grundwasserleiters begrenzt sind. Für die übrigen Modellschichten wurde ein einheitlicher Wert von $0,15 \text{ mg O}_2 / 1 \text{ a}$ verwendet. In der obersten Modellschicht wurde die Abbaukonstante zwischen $0,2 \text{ mg O}_2 / 1 \text{ a}$ und $7,2 \text{ mg O}_2 / 1 \text{ a}$ variiert. Die Abbildung 9.5.1 zeigt die im Rahmen der Kalibrierung bestimmte Verteilung der Abbaukonstanten im Modellgebiet.

est la plus active dans les parties supérieures de l'aquifère. Une cinétique de dégradation de $0,15 \text{ mg O}_2 / 1 \text{ a}$ à été utilisée pour les autres couches du modèle. La constante de cinétique de dégradation a été modifiée dans une plage de valeurs allant de $0,2 \text{ mg O}_2 / 1 \text{ a}$ à $7,2 \text{ mg O}_2 / 1 \text{ a}$. La répartition de la constante de cinétique de dégradation obtenue après calage du modèle est présentée dans la figure 9.5.1.

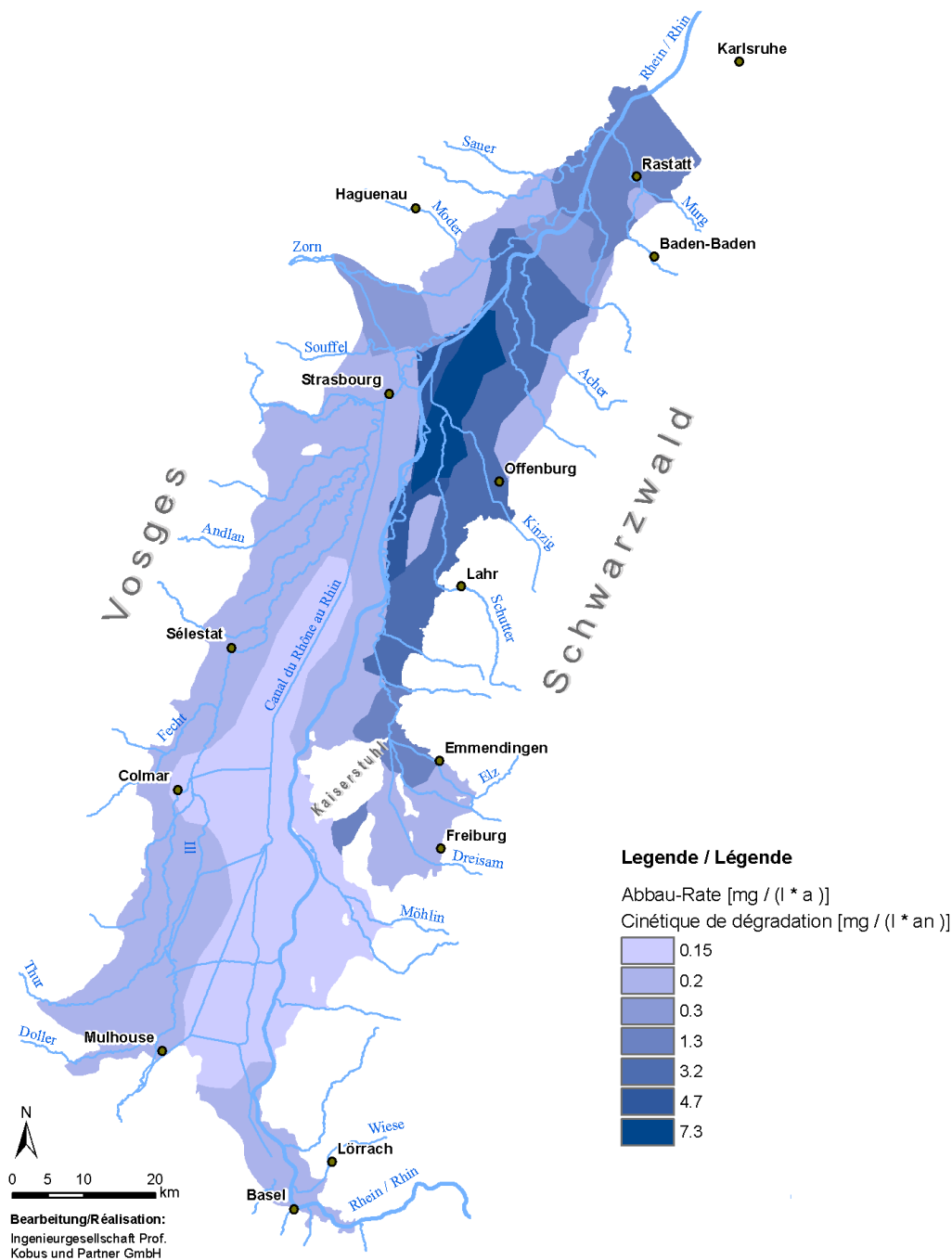


Abbildung 9.5.1: Verteilung der Abbaukonstanten für Sauerstoff in der obersten Modellschicht, wie sie im Rahmen der Modellkalibrierung ermittelt wurde.

Figure 9.5.1: Répartition de la constante de cinétique de dégradation de l'oxygène obtenue après étalonnage du modèle.

Eine weitere Verbesserung der Simulationsergebnisse konnte durch eine Erhöhung der Zustromkonzentration aus den oberirdischen Gewässern von 5 mg/l auf 7 mg/l erreicht werden. Die mittlere Abweichung zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen betrug im kalibrierten Modell 2,2 mg/l Sauerstoff. Die gemessene und die berechnete Sauerstoffverteilung für 1997 sind in den Abbildungen 9.5.2 und 9.5.3 zu sehen.

Une meilleure simulation a pu être obtenue en augmentant les teneurs en oxygène dissous des eaux de surface, de 5 mg/l à 7 mg/l. L'écart moyen entre les concentrations calculées et mesurées sont de l'ordre de 2,2 mg/l après étalonnage du modèle. Les concentrations en oxygène dissous mesurées et calculées pour l'année 1997 sont présentées sur les figures 9.5.2 et 9.5.3.

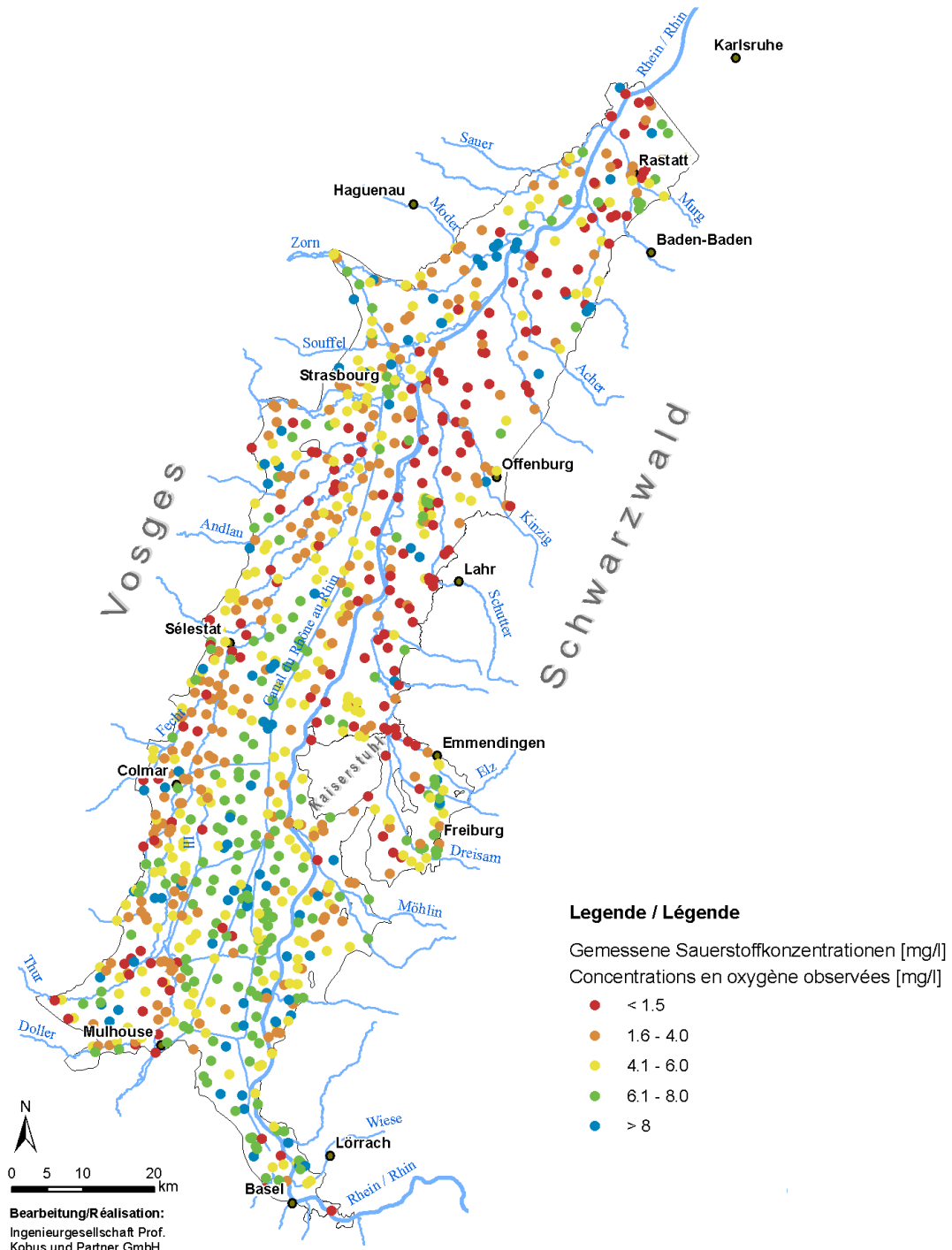


Abb. 9.5.2: Gemessene Sauerstoffkonzentrationen an den Messstellen des Modellgebiets für das Jahr 1997
 Figure. 9.5.2: Valeurs des concentrations en oxygène observées en 1997 aux points de mesure localisés dans le domaine d'étude.

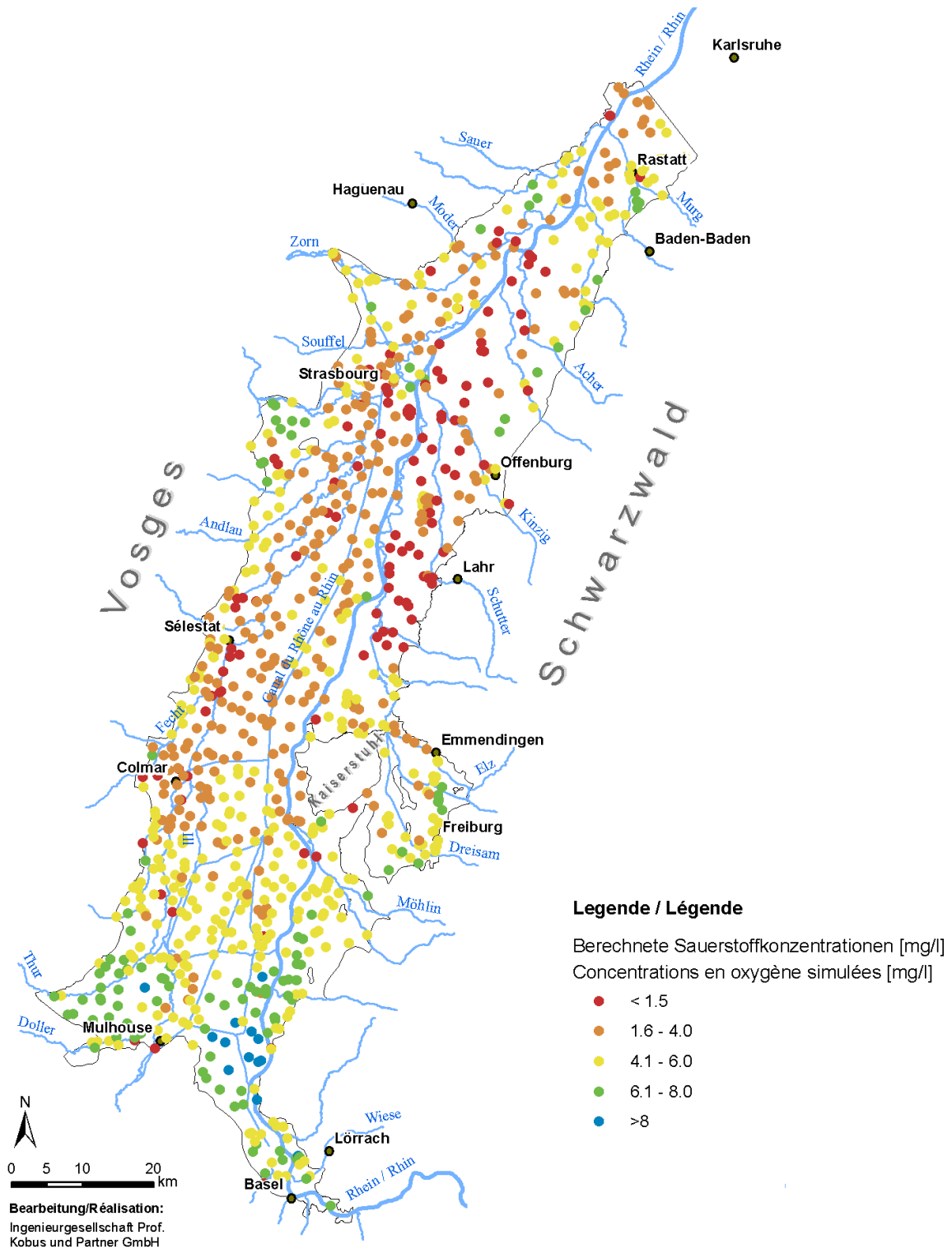


Abb. 9.5.3 Berechnete Sauerstoffkonzentrationen an den Messstellen des Modellgebiets für das Jahr 1997
 Figure. 9.5.3: Valeurs des concentrations en oxygène simulées en 1997 aux points de mesure localisés dans le domaine d'étude.

9.5.3 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Den Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sauerstoffkonzentrationen zeigt die Abbildung 9.5.4.

9.5.3 INTERPRETATION DES RESULTATS

La comparaison entre concentrations en oxygène mesurées et calculées est présentée sur la figure 9.5.4.

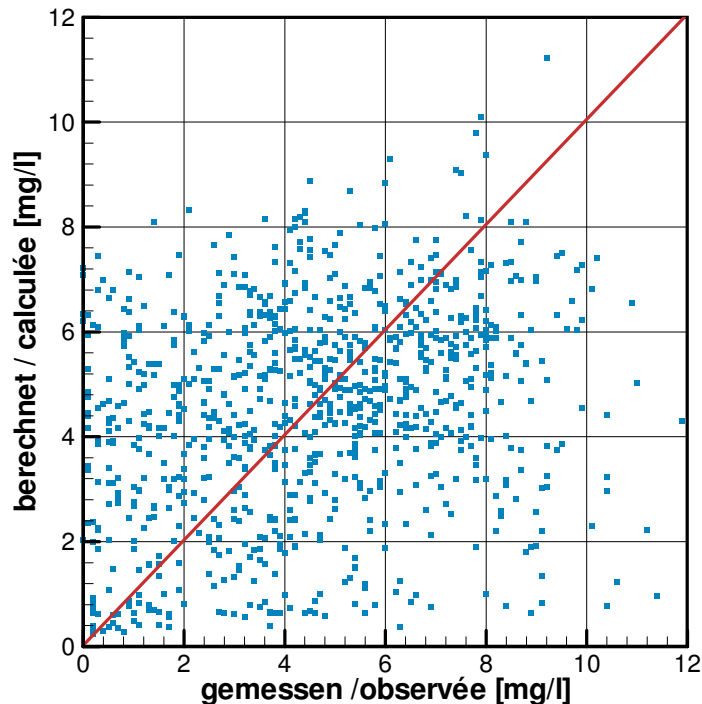


Abbildung 9.5.4: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Sauerstoffkonzentrationen für das kalibrierte Modell.
Figure 9.5.4: Comparaison entre concentrations en oxygène mesurées et calculées après étalonnage du modèle.

Wie schon im Fall des Tritiumtransports ist die Streuung der Ergebnisse relativ groß. Dies dürfte wiederum an lokalen Effekten liegen, die im großräumigen Modell nicht aufgelöst werden. Im Vergleich zum Tritiumtransport kommen aber beim Sauerstoff noch die räumlich variablen Abbauprozesse hinzu. So wurde im Modell für den Zufluss aus oberirdischen Gewässern ein einheitlicher Wert von 7 mg/l angenommen. In Wirklichkeit jedoch kann diese Konzentration lokal auch sehr viel geringer sein, wenn es im Gewässersediment zur Sauerstoffzehrung kommt.

Comme dans le cas de la simulation du transport du Tritium, les résultats sont disparates. Ceci peut à nouveau être dû aux hétérogénéités locales qui ne peuvent être prises en compte dans un tel modèle. Par rapport au Tritium, la variabilité spatiale des processus de dégradation constitue une raison supplémentaire. Une teneur en oxygène dissous de 7 mg/l pour les eaux de surface a été retenue. En réalité, cette valeur de concentration peut être beaucoup plus faible, si des processus de dégradation sont activés dans les sédiments des cours d'eau.

9.5.4 ÜBERTRAGUNG DER ERGEBNISSE AUF DEN NITRATTRANSPORT

Trotz der starken Streuung der berechneten Sauerstoffkonzentrationen konnte der Trend der Sauerstoffzehrung im Grundwasserleiter nachgebildet werden. Insbesondere ist es gelungen, Bereiche mit verstärkter Zehrung zu identifizieren.

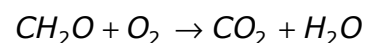
9.5.4 TRANSFERT DES RESULTATS A LA SIMULATION AU TRANSPORT DES NITRATES

Les tendances décrivant la dégradation de l'oxygène dans l'aquifère ont pu être reproduites malgré une grande disparité des valeurs calculées. En particulier, des zones avec fortes activités de dégradation ont pu être mises en évidence.

Im nächsten Schritt musste nun aus dem Sauerstoffabbau auf die Denitrifikation im Grundwasserleiter geschlossen werden. Grundlage für die Übertragung der Raten war die Annahme, dass die Denitrifikation eine Fortsetzung der aeroben Oxidationsprozesse bei Sauerstoffmangel darstellt, d.h. dass die beteiligten Mikroorganismen das Reduktionsmittel organischer Kohlenstoff (beim heterotrophen Stoffwechsel) bzw. reduzierter Schwefel (beim autotrophen Umsatz) zunächst mit Sauerstoff und ab dem Unterschreiten einer gewissen Sauerstoff-Schwellenkonzentration mit Nitrat als Elektronenakzeptor oxidieren, z.B. [KOROM, S.F. 1992].

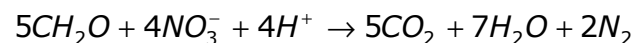
Die Reaktionsgleichungen für beide Prozesse und die stöchiometrischen Größen sind im Folgenden am Beispiel der Oxidation von organischem Kohlenstoff (CH₂O) dargestellt:

Oxidation mit Sauerstoff:



Pro Mol CH₂O wird 1 Mol O₂ (32 g) verbraucht.

Oxidation mit Nitrat:



Pro Mol CH₂O werden 4/5 Mol NO₃⁻ (49,6 g) verbraucht.

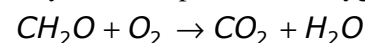
Daraus ergibt sich ein Faktor von Sauerstoff- zu Nitratverbrauch von 1,55 (49,6 g NO₃⁻ / 32 g O₂), d.h. die Abbaukonstanten, die bei der Nachbildung des Sauerstofftransports bestimmt wurden, müssen mit 1,55 multipliziert werden, wenn sie zur Nachbildung der entsprechenden Denitrifikation verwendet werden sollen.

Ein weiterer Reaktionsparameter ist neben der Abbaukonstante die Sauerstoff-Schwellenkonzentration, ab der die Denitrifikation einsetzen soll. In Laborversuchen mit homogenen Medien kann diese Konzentration relativ gering sein (< 1 mg/l). Unter heterogenen Bedingungen und im Feldmaßstab kann eine Denitrifikation jedoch bereits bei höheren mittleren Sauerstoffkonzentrationen einsetzen. Ursache dafür sind anaerobe Zonen, die eine Denitrifikation auch in ansonsten aeroben Aquiferen ermöglichen. Im vorliegenden Fall wurde eine Schwellenkonzentration von 3 mg/l O₂ gewählt, d.h. ab dieser Konzentration

L'étape suivante à franchir consiste à passer de la dégradation de l'oxygène dans l'aquifère à celle des nitrates. Ce passage repose sur l'hypothèse que la dénitrification est la suite de processus d'oxydation qui ont lieu en situation de manque d'oxygène. Les microorganismes concernés utilisent d'abord l'oxygène pour oxyder le carbone de la matière organique (dégradations hétérotrophes) ou les sulfures sous forme réduite (dégradation autotrophe) jusqu'à une valeur seuil de teneur en oxygène, puis utilise l'ion nitrate comme accepteur d'électrons, voir par exemple [KOROM, S.F. 1992].

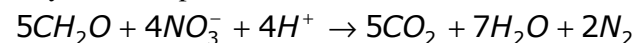
Les réactions chimiques et les coefficients stœchiométriques pour les deux processus sont présentés ci dessous dans le cas de l'oxydation du carbone organique (CH₂O).

Oxydation en présence d'oxygène :



1 mole O₂ (32 g) consommée pour 1 mole de CH₂O

Oxydation en présence de nitrates :



4/5 de mole de NO₃⁻ (49,6 g) utilisée pour 1 mole de CH₂O.

Le rapport Oxygène/Nitrates est donc de 1.55 (49.6 g NO₃⁻ / 32 g O₂). La constante de dégradation déterminée lors de la simulation du transport de l'oxygène doit donc être multipliée par un facteur de 1.55 pour reproduire la cinétique de dénitrification ainsi définie.

En plus de la constante de dégradation, il faut également déterminer la concentration en oxygène seuil, seuil à partir duquel la dénitrification a lieu. En conditions homogènes et au laboratoire, cette valeur seuil peut être relativement basse (< 1 mg/l). En milieux hétérogènes et dans des conditions de terrain, la dénitrification peut exister pour des valeurs seuils plus élevées. Pour preuve, il existe des zones anaérobies où la dénitrification existe même lorsque les conditions deviennent aérobies. La concentration seuil pour ces travaux a été fixée à 3 mg/l O₂. La dénitrification a donc lieu avec une constante de cinéti-

läuft die Denitrifikation mit der aus der Sauerstoffsimulation abgeschätzten Abbaukonstante ab.

9.6 SIMULATION DES NITRATTRANSPORTS 1950 BIS 2005 MIT STATIONÄREM STRÖMUNGSFELD

Um die Nitratverhältnisse im Grundwasserleiter prognosefähig nachbilden zu können, wurde zunächst die bisherige Situation in einer instationären Transportberechnung reproduziert. Es wurde dabei auf Grundlage statistischer Daten davon ausgegangen, dass vor 1950 kein merklicher anthropogener Nitratreintrag stattgefunden hat, so dass eine Simulationszeit von 1950 bis 2005 ausgewählt wurde. Innerhalb dieser Simulationszeit liegen Nitratmessungen an zahlreichen Messstellen vor, die mit den berechneten Nitratwerten verglichen wurden und so das Nitrattransportmodell überprüft werden konnte.

9.6.1 RANDBEDINGUNGEN

Für die Modellierung des Nitrattransports ist es notwendig, dass alle Zuflussrandbedingungen mit einer Zuflusskonzentration belegt werden. Dies betrifft folgende Randbedingungen:

- Grundwasserneubildung aus Niederschlag
- Zufluss aus den oberirdischen Gewässern
- unterirdischer Zufluss

Der Zufluss aus den oberirdischen Gewässern wurde anhand verfügbarer Messwerte aus dem Jahresdatenkatalog 1972 – 2004 abgeschätzt. An den meisten Messstellen der oberirdischen Gewässer im Oberrheingraben wurden Nitratkonzentrationen von 6 bis 10 mg/l gemessen. Im numerischen Modell wurde eine konstante Zuflusskonzentration von 8 mg/l für die oberirdischen Gewässer angesetzt.

Die Basis der Zuflusskonzentrationen für die Grundwasserneubildung und den unterirdischen Zustrom bildete die Nitratbilanzmodellierung (siehe Teilprojekt Nitratverlagerung). Anhand der Nitratbilanzmodellierung wurde für 1980, 1990 und 2000 der flächenhafte Nitratreintrag über die Geländeoberfläche ermittelt. Zusätzlich erfolgte eine grobe Abschätzung des Nitratreintrags für 1950. Der Nitratrein-

trag wurde als konstante Wert von 8 mg/l angesetzt, was eine gute Näherung an die tatsächliche Situation darstellt, die durch die Simulationen bestätigt wurde. Diese Abschätzung ist nur für die Simulationen von 1950 bis 2005 gültig, da die Simulationen für diese Periode durchgeführt wurden. Für die Simulationen von 1950 bis 2005 wurde die Abschätzung des Nitratreintrags für 1950 verwendet.

9.6 SIMULATION DU TRANSPORT DE NITRATES DE 1950 A 2005 AVEC UN ECOULEMENT PERMANENT.

Afin de pouvoir mener des simulations prévisionnelles du transport de nitrates fiables, la situation actuelle a été simulée dans un premier temps en régime transitoire. Sur la base de données existantes, il est admis qu'il n'existait pas d'apport significatif d'origine anthropique avant 1950, ce qui a motivé le choix de la période de simulation de 1950 à 2005. De nombreuses valeurs de teneurs en nitrates observées en plusieurs points de mesure sont disponibles pendant cette période. Les valeurs calculées sont comparées à ces valeurs mesurées afin de vérifier le modèle de transport mis au point.

9.6.1 CONDITIONS AUX LIMITES

Pour la modélisation du transport de nitrates, il est nécessaire de définir une concentration en nitrates pour chaque condition aux limites avec apport d'eau. Cela concerne les conditions aux limites suivantes :

- La recharge de nappe par précipitations
- Les apports par les eaux de surface
- Les apports par les écoulements souterrains

La concentration des eaux de surface a été estimée à partir des données disponibles relevées entre 1972 et 2002. Pour la plupart des points de mesure localisés dans la plaine du Rhin Supérieur, les concentrations sont comprises entre 6 et 10 mg/l. Une concentration constante de 8 mg/l a été imposée pour les eaux de surface dans le cadre de la modélisation.

Les concentrations en nitrates pour la recharge de nappe et les écoulements aux limites souterrains ont été définis par un calcul de bilan (voir sous-projet transfert des nitrates). Les apports diffus en nitrates au niveau de la surface du sol ont été estimés par un calcul de bilan pour les années 1980, 1990 et 2000. Une estimation simplifiée a également été faite pour l'année 1950. Ces apports ont été estimés sous forme

trag wurde in Form einer Nitratfracht berechnet. Diese Nitratfracht wurde für alle 4 Zeitpunkte anhand der mittleren Grundwasserneubildungsverteilung jeweils in eine Nitratkonzentrationsverteilung umgerechnet. Zwischen den oben genannten Jahren wurde die Nitratkonzentration linear interpoliert.

Für den unterirdischen Zufluss wurde die Zuflusskonzentration als Mittelwert des angrenzenden Einzugsgebiets außerhalb des Grundwassermodells angesetzt. Eine Verzögerung des Nitratzuflusses infolge eines Transports im Einzugsgebiet wurde nicht mitberücksichtigt. Der zeitliche Verlauf des gesamten unterirdischen Nitratzuflusses ist in Abbildung 9.6.1 dargestellt. Entsprechend den Annahmen zur zeitlichen Entwicklung des Nitratzuflusses aus der Grundwasserneubildung ergibt sich ein Maximum im Jahr 1980 von 11,5 kt NO₃ pro Jahr.

Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag wurde mit der interpolierten Zuflusskonzentration im Modellgebiet belegt, wobei die Verweilzeit in der ungesättigten Zone jeweils mitberücksichtigt wurde. Daraus ergibt sich der in Abbildung 9.6.1 dargestellte Verlauf der zufließenden Nitratfracht im numerischen Modell.

Der Nitratzufluss beginnt mit 10 kt NO₃ pro Jahr in 1950. Dies entspricht dem natürlichen Nitrategieintrag. Die höchste aus dem Boden ausgetragene Nitratfracht ergab sich aus der Nitratbilanzmodellierung für das Jahr 1980. Der größte Nitrategieintrag in das Grundwasser wird 1982, unter Berücksichtigung der Verweilzeit in der ungesättigten Zone, mit 68 kt NO₃ pro Jahr erreicht. Danach nimmt der Nitrategieintrag kontinuierlich bis 2000 auf 38 kt NO₃ pro Jahr ab. Nach 2000 bleibt die aus dem Boden ausgetragene Nitratfracht konstant bis 2005. Mit Berücksichtigung der ungesättigten Zone ergibt sich damit zwischen 2000 und 2005 ein leichter Rückgang um 3 kt NO₃.

de flux. Pour ces 4 dates, les flux de nitrates sont transformés en distribution de concentrations à l'aide de la distribution de la recharge de nappe moyenne. Entre ces quatre dates, les valeurs de concentrations sont obtenues par interpolation linéaire.

Pour les écoulements aux limites souterrains, la concentration estimée est une valeur moyenne des concentrations dans le bassin-versant amont (c-à-d situé hors domaine modélisé). Un décalage dans le temps du au temps de transfert dans le bassin-versant n'a pas été pris en compte. La chronique des apports totaux en nitrates par ces écoulements souterrains est présentée dans la figure 9.6.1. L'évolution des flux de nitrates liée à la recharge pour la même période atteint un maximum pour l'année 1980 avec une valeur de 11,5 kt NO₃ par an.

La recharge de nappe par les précipitations est combinée avec les concentrations interpolées, en tenant compte des temps de parcours dans la zone non saturée. Les flux arrivant à la nappe sont ainsi estimés. Leur évolution au cours du temps utilisée par le modèle numérique est présentée dans la figure 9.6.1.

Les apports en nitrates se situent à 10 kt NO₃ par an, ce qui peut être considéré comme les apports en conditions naturelles. Le calcul de bilan montre que le flux maximal au-dessous de la zone racinaire est atteint en 1980. Pour les eaux souterraines, cela correspond à un apport maximal de 68 kt NO₃ par an en 1982, compte tenu du temps de transfert dans les zones non saturées. Ensuite, les apports diminuent de manière continue jusqu'en 2000 pour atteindre une valeur de 38 kt NO₃ par an. Entre 2000 et 2005, les flux en sortie de zone racinaire restent constants. Pour les eaux souterraines, compte tenu des temps de transfert dans la nappe, ces flux diminuent légèrement d'environ 3 kt NO₃.

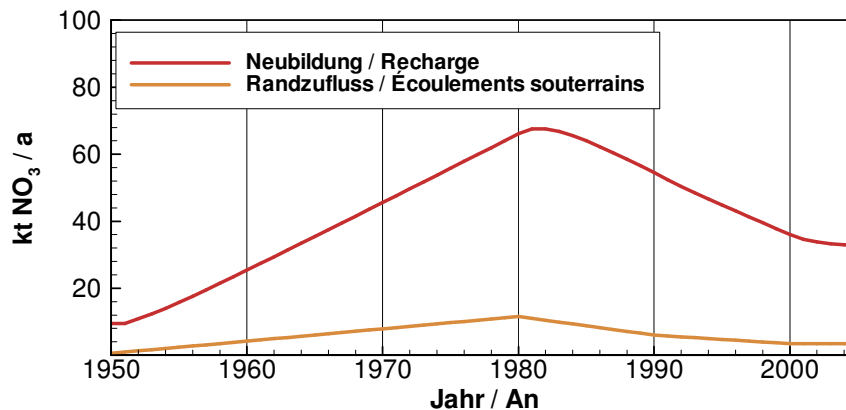


Abbildung 9.6.1: Zeitlicher Verlauf des Nitratintrags über die Grundwasserneubildung und den unterirdischen Randzustrom.
 Figure 9.6.1: Evolution des apports de nitrates par la recharge de nappe et par les écoulements souterrains en limite.

9.6.2 ANFANGSBEDINGUNG

Zu Beginn des Simulationszeitraumes muss eine dreidimensionale Startverteilung für die Nitratkonzentration im Grundwasserleiter vorgegeben werden. Es wird davon ausgegangen, dass 1950 eine stationäre Nitratverteilung im Grundwasserleiter vorgelegen hat, die dem numerischen Modell als Anfangsverteilung vorzugeben ist. Sensitivitätsuntersuchungen [LANG et al. 2004] haben gezeigt, dass eine mittlere homogene Nitratanfängskonzentration z.B. von 5 mg/l nicht stationären Verhältnissen entspricht, da in den Bereichen mit erhöhtem Nitratabbau und in den tieferen Aquiferbereichen nitratfreie Verhältnisse vorliegen. Deshalb wurde zunächst ein Modelllauf über 30 Jahre durchgeführt, dem die für 1950 abgeschätzte Nitratintragsverteilung zu Grunde gelegt wurde. Damit stellt sich eine näherungsweise stationäre dreidimensionale Nitratkonzentrationsverteilung im Modell ein. Die Stationarität der Nitratverteilung wurde anhand der Gesamtmasse im System kontrolliert. Im numerischen Modell liegen damit 150 kt Nitrat im Grundwasserleiter des Untersuchungsraums zu Beginn der Simulation (1950) vor.

9.6.3 VERGLEICH GEMESSENER UND BERECHNETER NITRATKONZENTRATIONEN

Um die Güte der Nitratsimulation zu überprüfen, wurden die berechneten Nitratkonzentrationen mit gemessenen Informationen verglichen. Dazu standen folgende Ergebnisse zur Verfügung:

9.6.2 CONDITIONS INITIALES

Les concentrations initiales dans les eaux souterraines doivent être définies dans les 3 dimensions. Il est supposé qu'en 1950, la répartition des nitrates peut être considérée comme représentative d'un régime permanent et que cette répartition puisse être considérée comme conditions initiales pour les simulations. Des études de sensibilité [LANG et al. 2004] ont montré qu'une concentration initiale homogène de 5 mg/l ne correspond pas à un régime permanent, les zones à forte dénitrification où les zones profondes ayant montré des concentrations nulles. Pour définir la distribution initiale des concentrations en nitrates estimée pour 1950, une simulation sur une période de 30 ans a été menée. Ce calcul permet ainsi d'obtenir une distribution tridimensionnelle des teneurs en nitrates en situation de régime permanent. L'établissement du régime permanent est vérifié en analysant l'évolution de la masse de nitrates présente dans l'aquifère. Une masse totale de 150 kt de nitrates est estimée par le modèle numérique dans la zone d'étude en l'année 1950.

9.6.3 COMPARAISON ENTRE CONCENTRATIONS EN NITRATES CALCULEES ET MESUREES

Les concentrations en nitrates simulées et mesurées sont comparées entre elles afin d'estimer la qualité de la simulation du transport de nitrates. Les données suivantes ont été utilisées :

- Bestandsaufnahmen 1996/1997 und 2003: An ca. 800 bzw. 900 Messstellen im Modellgebiet wurden Nitratkonzentrationen gemessen. Aus diesen Messwerten wurde eine Karte der Nitratkonzentration für 1997 und 2003 erstellt (Région Alsace, 2000 und 2005).
- Ganglinien aus dem deutschen und französischen Routinemessprogramm

Zunächst wurden die Ergebnisse des numerischen Modells für die beiden Jahre 1997 und 2003 den Messergebnissen gegenüber gestellt. Der Vergleich für 1997 an allen Messstellen ist in Abbildung 9.6.2 dargestellt. Diese Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Nitratkonzentrationen zeigt aufgrund der lokalen Verhältnisse an den Messstellen eine vergleichsweise große Streuung, die sich auch für die Bestandsaufnahme 2003 zeigt. Trotz dieser großen Streuung, sind die Vergleichspunkte gleichmäßig um die Winkelhalbierende gruppiert, so dass von keiner systematischen Abweichung ausgegangen werden kann.

- Années de référence 1996/1997 et 2003: Les concentrations en nitrates ont été déterminées pour environ 800 resp. 900 points de mesure. Une carte des teneurs en nitrates a été établie pour 1997 et 2003 à partir de ces mesures (Région Alsace, 2000 et 2005).
- Des chroniques de concentrations à partir des actions habituelles de surveillance du coté allemand et français

Dans un premier temps, les résultats du modèle numérique ont été comparés aux valeurs mesurées en 1997 et 2003. Cette comparaison pour l'année 1997 est illustrée par la figure 9.6.2 pour tous les points de mesure. Cette comparaison des valeurs mesurées et simulées des teneurs en nitrates montrent une même dispersion des écarts liée à des processus locaux, dispersion que l'on retrouve également pour l'année 2003. Malgré cette grande dispersion des écarts, les points de comparaison sont répartis de manière régulière autour de la bissectrice. Il n'y a donc pas de biais systématique dans les résultats.

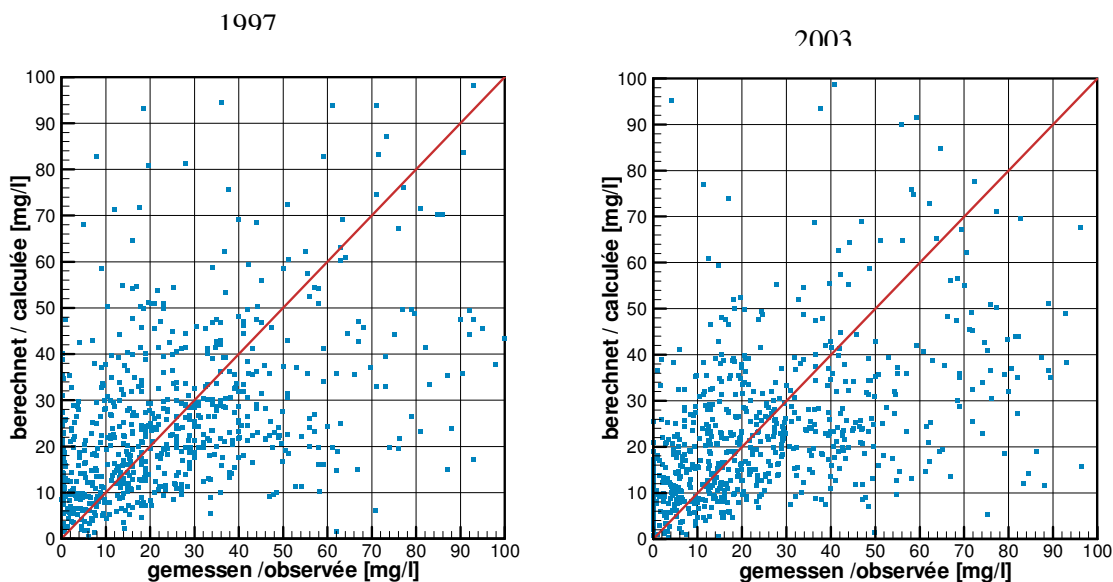


Abbildung 9.6.2: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Nitratkonzentrationen links 1997, rechts 2003.
 Figure 9.6.2: Comparaison entre concentrations en nitrates mesurées et calculées (à gauche pour 1997, à droite pour 2003).

Statistische Auswertungen der Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Nitratkonzentrationen für die Bestandsaufnahmen 1997 und 2003 sind in den Tabellen 9.6.1 und 9.6.2 aufgeführt. Danach unterscheiden sich die mittleren gemesse-

Les résultats des interprétations statistiques des résultats concernant les écarts entre concentrations mesurées et calculées pour les années de référence 1997 et 2003 sont présentés dans les tableaux 9.6.1 et 9.6.2. Les concentrations moyennes calcu-

nen und berechneten Nitratkonzentrationen lediglich um 2.6 mg/l für 1997 und um 4,5 mg/l für 2003. Erwartungsgemäß finden sich die größten Nitratkonzentrationen in den flachen Messstellen mit einer Verfilterung zwischen 0 und 10 Tiefe unter dem Grundwasserspiegel. In den Messstellen mit einer Verfilterung zwischen 10 und 40 m Tiefe sind die Nitratkonzentrationen im Jahr 1997 um 5,4/4,1 mg/l (Messung/Rechnung) kleiner als in den oberflächennahen Messstellen. Im Jahr 2003 sind diese um 4,4/2,7 mg/l (Messung/Rechnung) kleiner als oberflächennah. Dies zeigt, dass im numerischen Modell die vertikale Verteilung in beiden Jahren sehr gut wiedergegeben wird. Messstellen mit einer Verfilterung tiefer als 40 m zeigen deutlich zu tiefe Nitratkonzentrationen im Modell. Allerdings sind mit lediglich 19 Messstellen in dieser Tiefenlage nur bedingt repräsentativen Aussagen möglich.

lées ne se différencient que de 2.6 mg/l pour 1997 et de 4.5 mg/l pour 2003 des valeurs mesurées. Comme prévu, les concentrations en nitrates les plus élevées se situent aux points de mesure qui présentent une zone crépinée entre 0 et 10 m de profondeur. Pour les forages avec une zone crépinée comprise entre 10 et 40 m de profondeur, les concentrations en nitrates sont de 5,4/4,1 mg/l (Mesure/calcul) plus faible que les valeurs de proche surface pour 1997. Pour 2003, cette même différence est de 4,4/2,7 mg/l (Mesure/Calcul). Cela montre que la différenciation verticale observée pour les deux années est très bien reproduite par le modèle numérique. Les concentrations calculées sont nettement sous-estimées pour les forages avec des zones crépinées plus profondes que 40 m. Compte tenu du nombre limité à 19 points de mesure à cette profondeur, les interprétations doivent être faites avec prudence.

Tabelle 9.6.1: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Nitratkonzentrationen an den Messstellen der Bestandsaufnahme 1997.

Tableau 9.6.1: Comparaison entre concentrations en nitrates mesurées et calculées aux points de mesure pour l'année de référence 1997.

Tiefe Profondeur [m]	NO ₃ gemessen mesuré [mg/l]	NO ₃ berechnet calculé [mg/l]	Anzahl Messstellen Nbre. Points de mesure
0-200	28,4	25,8	696
0-10	30,3	27,5	481
10-40	24,9	23,4	196
>40	17,3	8,0	19

Tabelle 9.6.2: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Nitratkonzentrationen an den Messstellen der Bestandsaufnahme 2003.

Tableau 9.6.2: Comparaison entre concentrations en nitrates mesurées et calculées aux points de mesure pour l'année de référence 2003.

Tiefe Profondeur [m]	NO ₃ gemessen mesuré [mg/l]	NO ₃ berechnet calculé [mg/l]	Anzahl Messstellen Nbre. Points de mesure
0-200	27,2	22,7	696
0-10	28,8	23,8	481
10-40	24,4	21,1	196
>40	15,0	9,2	19

Der Vergleich der beiden Zeitpunkte 1997 und 2003 zeigt, dass in den flachen Messstellen die Nitratkonzentrationen in der Messung und in der Rechnung zurückgehen. In den tiefen Grundwassermessstellen ist eine Zunahme der berechneten Nitratkonzentrationen zu beobachten. Die Modellergebnisse weisen auf eine etwas größere Abnahme der Nitratkonzentration im numerischen Modell als bei den Messwerten hin. Eine bessere Abschätzung der zeitlichen Entwicklung ergibt sich aus der Auswertung der Nitratganglinien. Einige ausgewählte Ganglinien auf deutscher und französischer Seite sind in den Abbildungen 9.6.3 und 9.6.4 dargestellt.

La comparaison entre les deux années de référence 1997 et 2003 montrent que, pour les points de mesure en proche surface, les concentrations en nitrates mesurées et calculées diminuent. Pour les points de mesure localisés en profondeur, une augmentation des concentrations calculées est constatée. Les résultats de la modélisation montrent également une diminution des teneurs en nitrates un peu plus élevée que celles observées au niveau des mesures. Une meilleure évaluation de la dynamique simulée des nitrates est possible à partir des chroniques de mesures. Les figures 9.6.3 et 9.6.4 montrent les résultats obtenus pour quelques points de mesure sélectionnés du côté allemand et français.

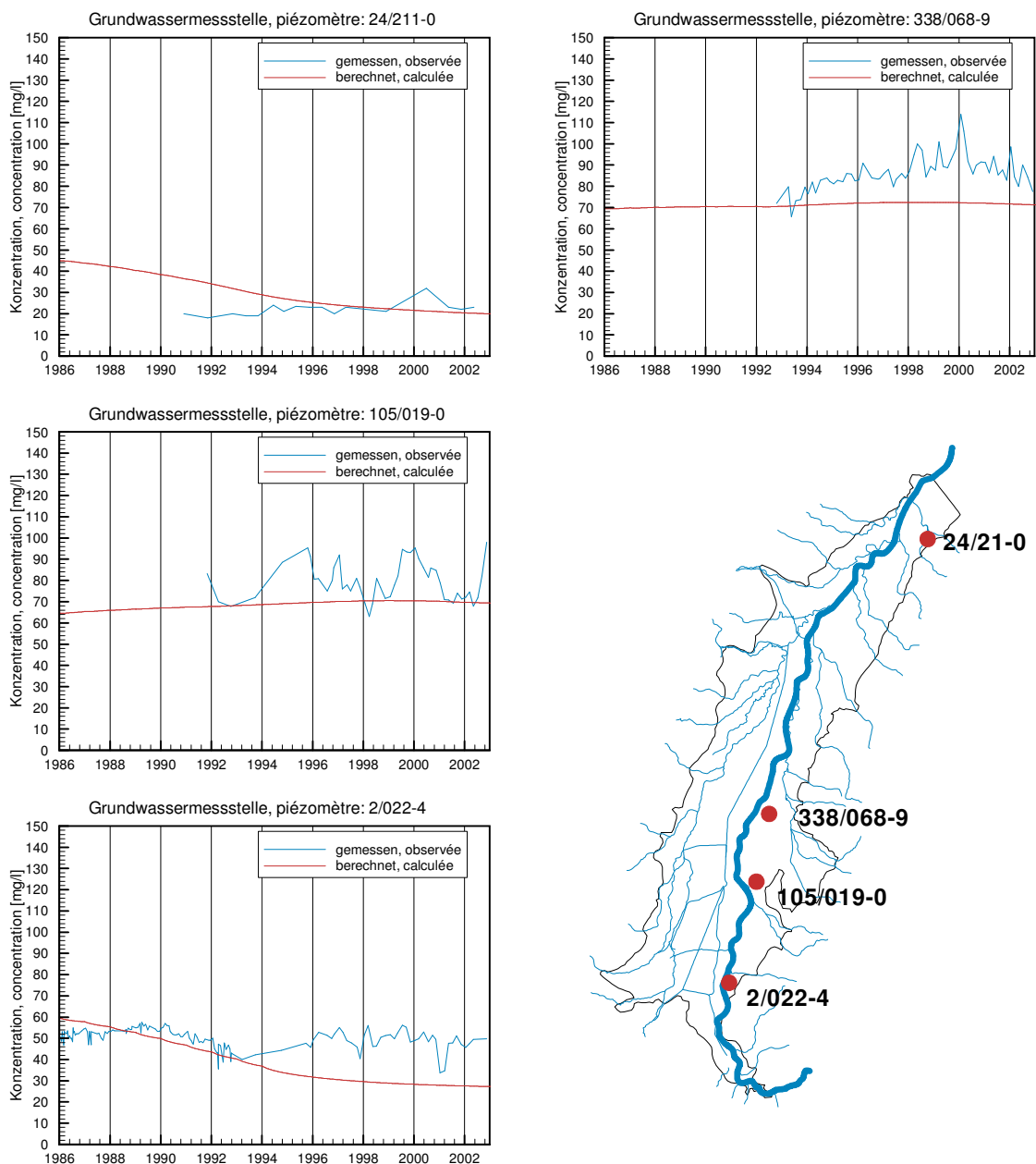


Abbildung 9.6.3: Berechnete und gemessene Nitratganglinien auf rechtsrheinischer Seite.
 Figure 9.6.3: Chronique de concentrations en nitrates mesurées et calculées à l'Est du Rhin.

Generell lässt sich festhalten, dass im numerischen Modell die lokalen Unterschiede zwischen Bereichen mit hohen und niedrigen Nitratkonzentrationen gut nachgebildet werden. Die gemessenen saisonalen Schwankungen der Nitratkonzentrationen von bis zu 20 mg/l deuten darauf hin, dass die einzelnen Messungen von den lokalen Verhältnissen und von den jeweils aktuellen Nitratreintragsbedingungen abhängen. Im numerischen Modell werden langjährige Mittelwerte der Grundwasserneubildung verwendet und die Eintragsfunktion orientiert

En général, les écarts entre zones à fortes concentrations en nitrates et à faible concentration en nitrates sont bien reproduits par le modèle. Les variations saisonnières des teneurs mesurées en nitrates jusqu'à 20 mg/l montrent que les valeurs mesurées dépendent des conditions locales et des conditions aux limites concernant les apports en nitrates. Une recharge de nappe moyennée sur de nombreuses années est utilisée pour le modèle numérique et les apports sont calculés sur la base de calculs de bilan d'azote

sich lediglich an drei einzelnen Zeitpunkten mit detaillierter Nitratbilanzierung, so dass sich zwangsläufig lokale Unterschiede für Einzelmesswerte ergeben müssen.

pour 3 dates. Des écarts entre concentrations calculées et mesurées au niveau des points de mesure sont donc attendus, compte tenu des hypothèses évoquées ci-dessus.

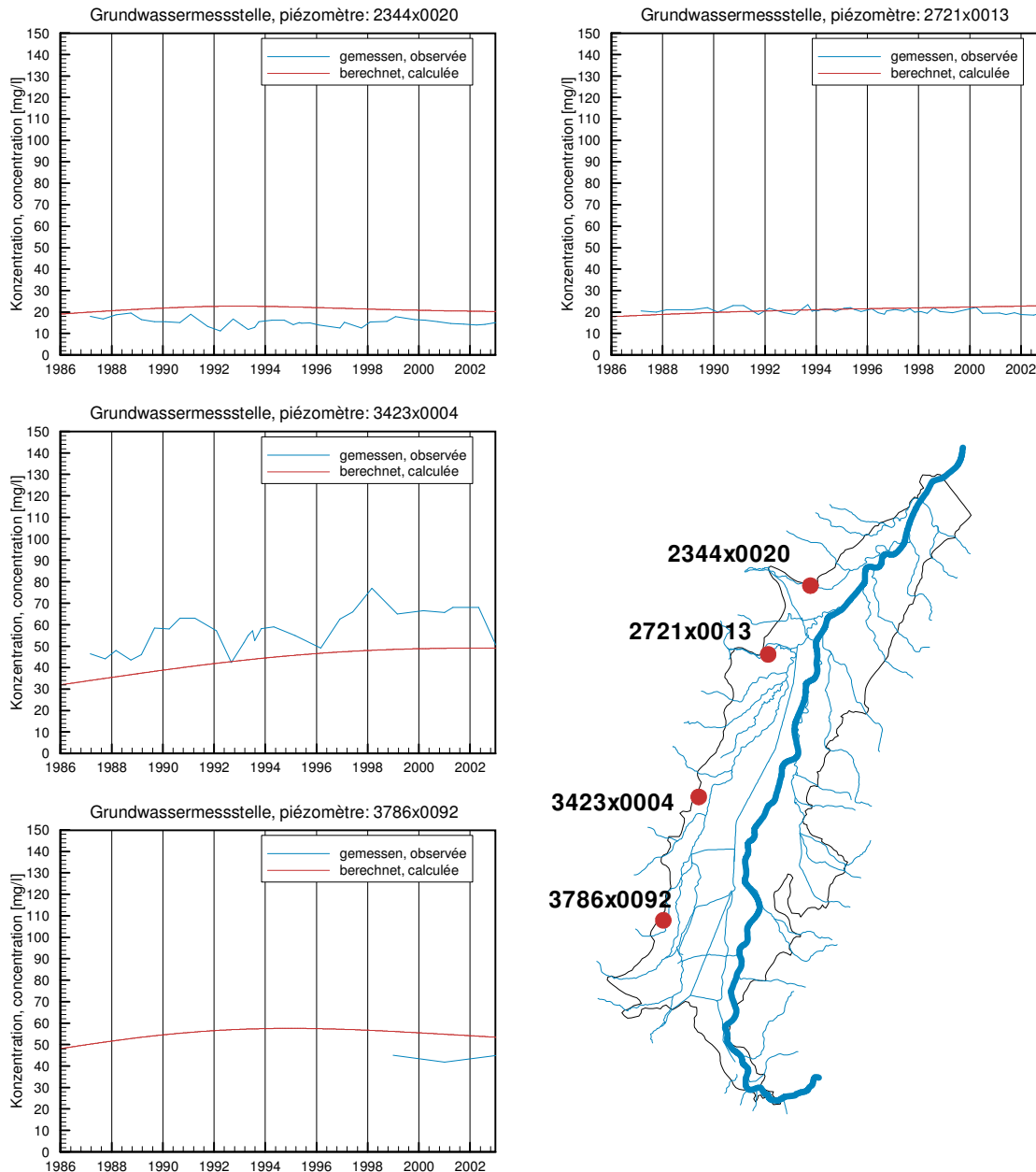


Abbildung 9.6.4: Berechnete und gemessene Nitratganglinien auf linksrheinischer Seite.
Figure 9.6.4: Chronique de concentrations en nitrates mesurées et calculées à l'Ouest du Rhin.

9.6.4 ERGEBNISSE

Mit Hilfe des numerischen Modells lässt sich auch die Verteilung der berechneten Nitratkonzentrationen auswerten. Diese sind für das Jahr 1997 in den Abbildungen 9.6.5 bis 9.6.7 für die drei Tiefenstufen 0-10 m, 10-40 m und größer als 40 m dargestellt.

9.6.4 RÉSULTATS

La répartition spatiale des concentrations en nitrates peut également être analysée à l'aide du modèle numérique. Cette spatialisation est présentée sur les figures 9.6.5 à 9.6.7 pour l'année 1997 et pour les profondeurs de 0-10 m, 10-40 m, et supérieure à 40 m.

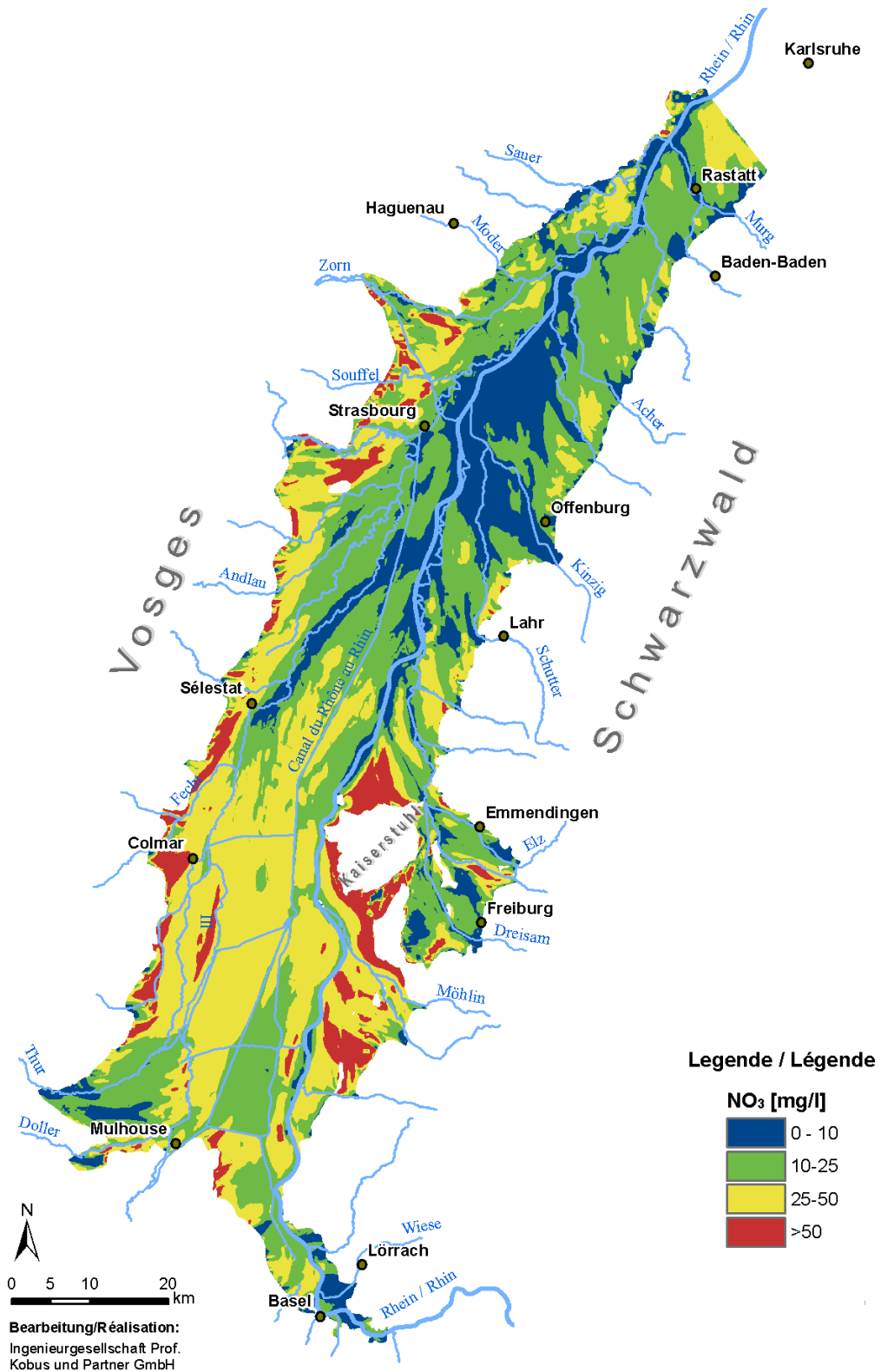


Abbildung 9.6.5: Berechnete mittlere Nitratverteilung in der Tiefenstufe 0 – 10 m für 1997.

Figure 9.6.5: Teneurs moyennes en nitrates pour la profondeur de 0 – 10 m pour 1997.

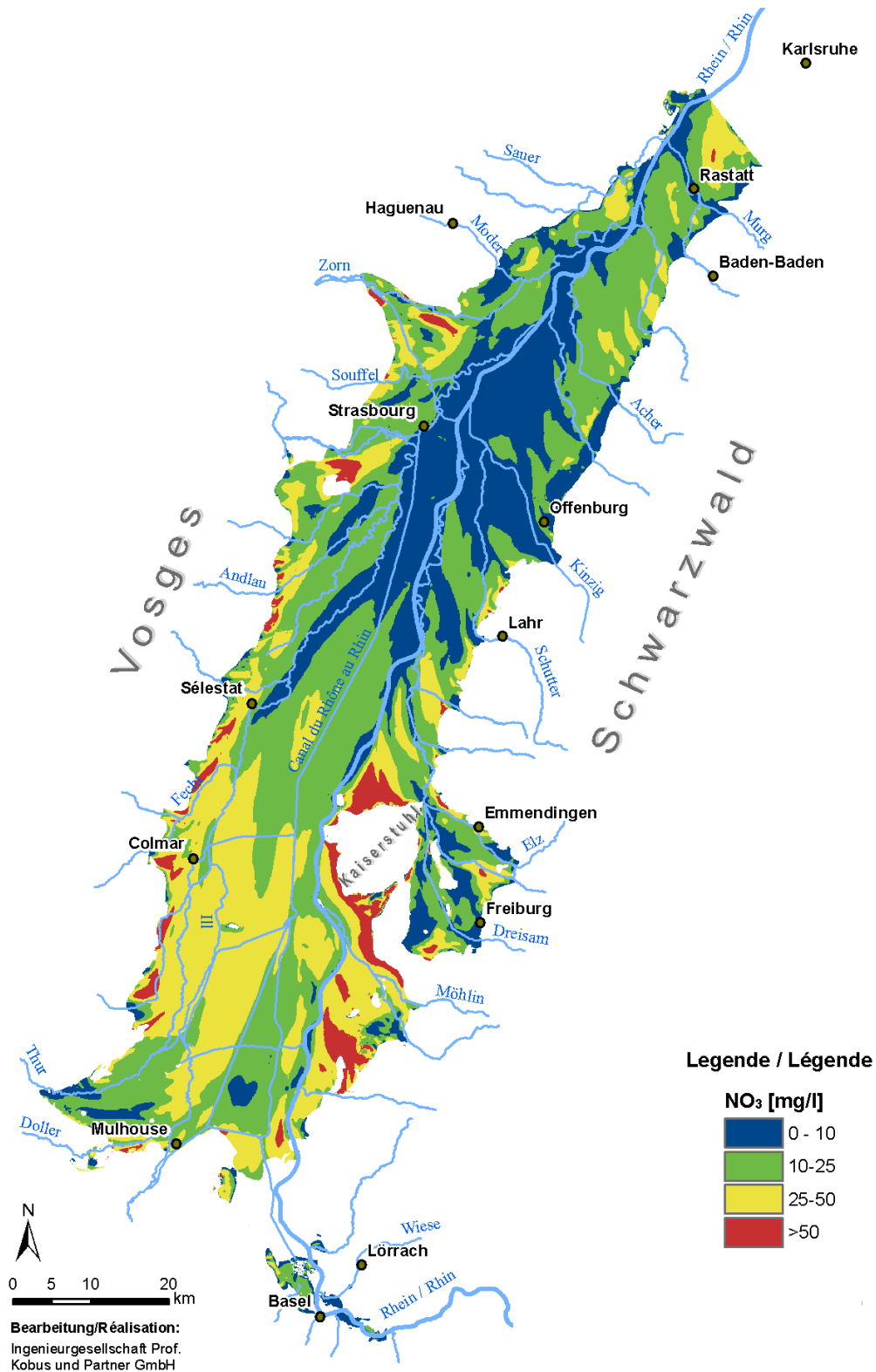


Abbildung 9.6.6: Berechnete mittlere Nitratverteilung in der Tiefenstufe 10 – 40 m für 1997.
Figure 9.6.6: Teneurs moyennes en nitrates pour la profondeur de 10 – 40 m pour 1997.

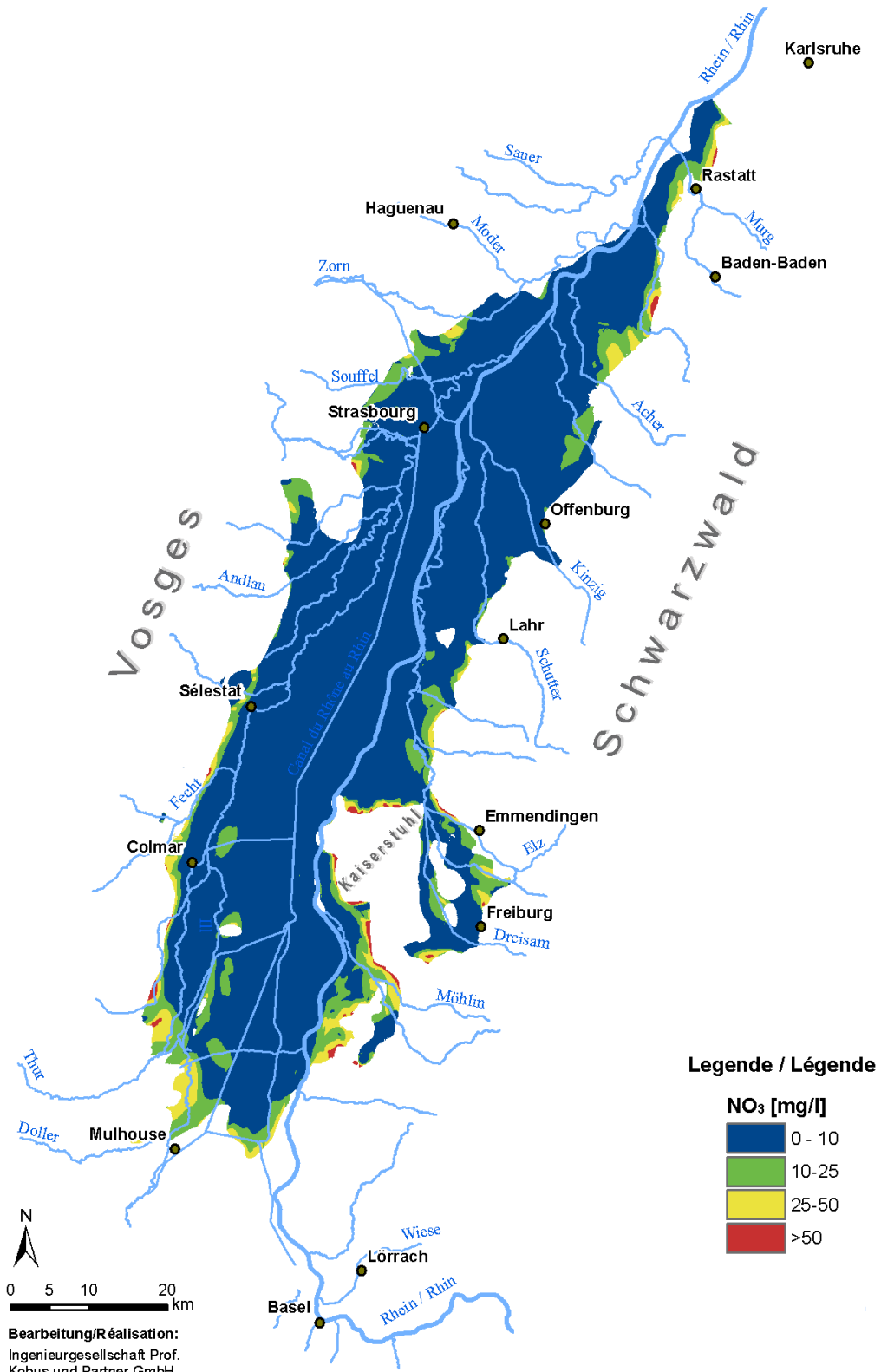


Abbildung 9.6.7: Berechnete mittlere Nitratverteilung in der Tiefenstufe größer als 40 m für 1997.
 Figure 9.6.7: Teneurs moyennes en nitrates pour une profondeur supérieure à 40 m pour 1997.

Die berechnete Nitratverteilung in der Tiefenstufe 0 bis 10 m zeigt entsprechend den Messergebnissen (siehe Région Alsace, 2000) im südlichen Teil des Untersuchungsgebiets aufgrund der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung die größeren Nitratkonzentrationen als im Norden. Die größten Nitratkonzentrationen mit Werten größer als 50 mg/l liegen an den Grabenrändern vor. Dies betrifft insbesondere das Markgräflerland südlich des Kaiserstuhls. Hier bilden sich zahlreiche Nitratfahnen aus, deren Ursprung in den landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten der Vorbergzone liegt. Das gleiche gilt für den Bereich nördlich des Kaiserstuhls. Hier resultiert die Nitratfahne aus den intensiv genutzten Weinanbaugebieten. Ebenso entwickelt sich in der Freiburger Bucht eine Fahne zwischen Freiburg und Emmendingen. Auf französischer Seite sind zahlreiche Fahnen mit Nitratkonzentrationen über 50 mg/l am Modellrand erkennbar. Der Bereich zwischen Colmar und Mulhouse weist Nitratkonzentrationen zwischen 25 und 50 mg/l auf. Lediglich das Gebiet zwischen Mulhouse und Rhein zeigt vergleichsweise geringe Nitratkonzentrationen, die auf die großen Waldflächen in diesem Raum zurück zu führen sind.

Der verdünnende Einfluss von Flüssen wird entlang der Kinzig, der Dreisam in der Freiburger Bucht und entlang des Rheins nördlich des Kaiserstuhls sichtbar. Hier finden sich entlang schmaler Streifen Nitratkonzentrationen kleiner als 10 mg/l. Der Einfluss Nitrat reduzierender Verhältnisse zeigt sich hauptsächlich in der Ortenau nordwestlich von Offenbourg. Hier haben sich oberflächennah sehr geringe Nitratkonzentrationen ausgebildet.

Geringe Nitratkonzentrationen finden sich auch aufgrund von aufsteigendem tiefen Grundwasser. Dies ist hauptsächlich in der Ill-Niederung bis in den Raum Strasbourg der Fall. Hier liegen die Nitratkonzentrationen ebenfalls unter 10 mg/l.

Die Verteilung der Nitratkonzentrationen in der Tiefenstufe 10 bis 40 m (siehe Abbildung 9.6.6) ist der oberflächennahen Verteilung sehr ähnlich. Generell sind die Konzentrationen aber geringer als oben. Die großen oberflächennahen Nitratfahnen lassen sich auch in dieser Tiefenstufe erkennen. Das im Bereich

Les concentrations en nitrates calculées pour l'horizon 0-10 m montrent des teneurs plus élevées dans la partie Sud que dans la partie Nord, conformément aux observations (voir Région Alsace, 2000). Cette différence est due à une agriculture plus intensive dans cette partie du domaine d'étude. Les concentrations les plus élevées et supérieures à 50 mg/l se situent en limite du Fossé Rhéнан. Cela concerne surtout le Markgräflerland au Sud du Kaiserstuhl. De nombreux panaches de contamination existent dans cette zone, liés à une agriculture intensive au niveau des contreforts de la Forêt Noire. Les mêmes observations peuvent être faites au nord du Kaiserstuhl où la présence de panaches est liée à l'exploitation de la vigne. De même, dans la baie de Fribourg, un panache de nitrates peut être identifié entre Fribourg et Emmendingen. De nombreuses zones avec des concentrations en nitrates supérieures à 50 mg/l sont mises en évidence en bordure du Fossé Rhéнан du côté français. Les concentrations se situent entre 25 et 50 mg/l entre Colmar et Mulhouse. Des concentrations moins élevées sont présentes dans la seule zone entre Mulhouse et le Rhin liées à la présence d'une forêt sur une surface importante.

Les influences des cours d'eau sont identifiables au niveau de la Kinzig, du Dreisam dans la baie de Fribourg et le long du Rhin au Nord du Kaiserstuhl. Des concentrations inférieures à 10 mg/l existent sur ces zones de faibles largeurs. L'influence des conditions réductrices sur les teneurs en nitrates est identifiée surtout dans la Ortenau, au Nord-Ouest d'Offenbourg. Les concentrations en nitrates s'avèrent très faibles dans cette zone.

De faibles teneurs en nitrates se rencontrent également dans des zones à écoulement ascendant. C'est essentiellement le cas au voisinage de l'Ill entre Sélestat et Strasbourg, où les concentrations restent inférieures à 10 mg/l.

La répartition des teneurs en nitrates pour les profondeurs de 10 à 40 m (voir figure 9.6.6) ressemble à celle observée sur les 10 premiers mètres. En général, les valeurs sont cependant moins élevées. Les grands panaches de nitrates se retrouvent également à ces profondeurs. Les écoulements ascen-

der Ill-Niederung und entlang des Rheins im Norden aufsteigende tiefe Grundwasser führt zu großflächigen Bereichen niedriger Nitratkonzentration.

Die tiefen Aquiferbereiche (siehe Abbildung 9.6.7) sind geometriebedingt nur im mittleren und nördlichen Teil des Untersuchungsraumes vorhanden. In weiten Bereichen sind die über die Tiefe gemittelten Nitratkonzentrationen kleiner als 10 mg/l. Lediglich im Bereich des Kaiserstuhls und im nördlichen Markgräflerland pausen sich die Nitratfahnen in den Randbereichen aufgrund der geringen Aquifermächtigkeiten bis in diese Tiefenstufe durch.

Untersucht man die zeitliche Entwicklung der Nitratverteilungen, so lässt sich feststellen, dass die Ausdehnung der Nitratfahnen oberflächennah zu Beginn der 90er Jahre am größten war. In der Tiefenstufe 10 bis 40 m lässt sich eine Verringerung der Nitratkonzentrationen erst nach 2003 erkennen. Im tiefen Grundwasser scheint es bis 2005 keine Verringerung der Flächen erhöhter Nitratkonzentration zu geben.

Mit Hilfe des numerischen Modells lässt sich neben Nitratkonzentrationen auch eine Gesamtbilanz für die im Grundwasserleiter vorhandene Nitratmenge erstellen. Die im Grundwasserleiter gespeicherte gesamte Nitratmenge ist in Abbildung 9.6.8 dargestellt. Die Berechnung der anthropogen unbelasteten Situation vor 1950 ergibt eine gespeicherte Nitratmenge von 150 kt NO_3 . Die gesamte Nitratmenge steigt bis Mitte der 90er Jahre auf 1.000 kt NO_3 an. Seit Mitte der 90er Jahre bis 2005 ist lediglich eine sehr geringe Abnahme der Gesamtmasse in der Größenordnung von 4,5% zu erkennen. Vergleicht man die gespeicherte Gesamtmasse mit der Eintragsfunktion (siehe Abbildung 9.6.1), so lässt sich die stark verzögerte Reaktion des Grundwasserleitersystems auf die Verringerung des Nitratreintrags von 87 kt NO_3 pro Jahr (1980) bis auf 36 kt NO_3 pro Jahr (2005) erkennen. Obwohl der Nitratreintrag über 25 Jahre um mehr als die Hälfte verringert wurde, geht die Gesamtmasse um lediglich 4,5% (45 kt NO_3) innerhalb der letzten 10 Jahre zurück.

dants au voisinage de l'Ill entre Sélestat et Strasbourg et le long du Rhin dans la partie Nord génèrent de grandes zones à faible concentration en nitrates.

La partie la plus profonde de l'aquifère est plus limitée, compte tenu de la géométrie de l'aquifère (voir figure 9.6.6). Elle n'existe que pour la partie centrale et Nord du domaine d'étude. Dans la plus grande partie de cette zone, les teneurs en nitrates sont inférieures à 10 mg/l. Compte tenu de la faible épaisseur de l'aquifère en bordure du Fossé Rhénan, on trouve des panaches de nitrates uniquement en limites du domaine, au niveau du Kaiserstuhl et de partie Nord du Markgräflerland.

L'analyse de l'évolution de la distribution des nitrates au cours du temps, montre qu'une extension maximale a été atteinte au début des années 90. Une baisse des teneurs en nitrates apparaît uniquement après 2003 pour les horizons compris entre 10 et 40 m de profondeur. Pour les zones à concentrations significatives en nitrates, aucune baisse n'est identifiée jusqu'à 2005 dans les parties plus profondes de l'aquifère.

Un bilan global des quantités de nitrates présentes dans l'aquifère peut être établi à l'aide du modèle numérique. Les quantités totales stockées dans l'aquifère sont présentées dans le tableau 9.6.8. Pour la situation de 1950 considérée comme non influencée par les activités anthropiques, la masse de nitrates présente dans l'aquifère est estimée à 150 kt NO_3 . Cette masse augmente jusqu'au milieu des années 1990 pour atteindre 1000 kt NO_3 . Une très faible baisse de cette masse, de l'ordre de 4.5 %, apparaît entre le milieu des années 1990 et 2005. Le décalage de réaction et l'effet tampon de l'aquifère sont clairement identifiés en comparant l'évolution des masses de nitrates dans l'aquifère à celle des apports (voir chapitre 9.6.1) qui diminuent en passant de 87 kt NO_3 /an en 1980 à 36 kt NO_3 /an en 2005. Bien que les apports en nitrates aient diminué de plus de moitié en 25 ans, la masse de nitrates présente dans l'aquifère n'a diminué que de 4.5 % (45 kt NO_3) au cours des 10 dernières années.

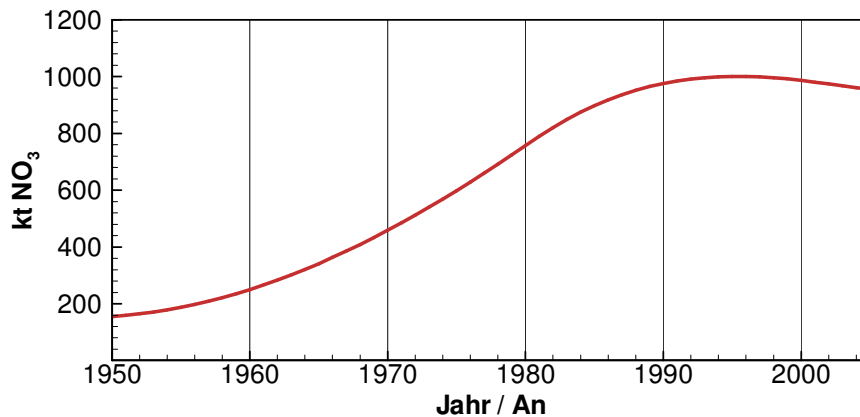


Abbildung 9.6.8: Zeitliche Entwicklung der im Grundwasser gespeicherten Nitratmenge.
 Figure 9.6.8: Evolution de la masse de nitrates stockés dans les eaux souterraines.

Zur Gesamtbilanz des Systems gehören neben dem Nitratreintrag und der gespeicherten Nitratmenge auch die Abflusskomponenten. Diese sind in Abbildung 9.6.9 zusammengestellt. Aus dem Gesamtsystem findet ein Nitrataustrag über die oberirdischen Gewässer, die Grundwasserentnahmen und durch denitrifizierende Prozesse statt. Im Gegensatz zur steil ansteigenden und wieder abfallenden Zufussfunktion aufgrund Neubildung und unterirdischem Randzufluss zeigen die meisten Abflusskomponenten nur eine geringe Dynamik über den Betrachtungszeitraum zwischen 1950 und 2005. Dies ist ein Grund weshalb die gespeicherte Gesamtmasse nur sehr träge auf die Reduktion des Nitratreintrags reagiert.

En complément des masses stockées et des apports, le calcul du bilan pour l'ensemble du système étudié permet d'évaluer les pertes. Celles-ci sont présentées dans le tableau 9.6.9. Ces pertes de nitrates sont dues aux échanges avec les eaux de surface, les prélèvements au niveau des forages et les processus de dénitrification. Sur la période simulée de 1950 à 2005, la plupart des pertes de nitrates restent relativement constante, à l'opposé des apports qui présentent des augmentations et diminutions rapides due à la recharge de nappe et aux écoulements souterrains en limites. C'est aussi une des raisons qui expliquent pourquoi la baisse des apports de nitrates ne se traduit pas par une baisse significative de la masse stockée.

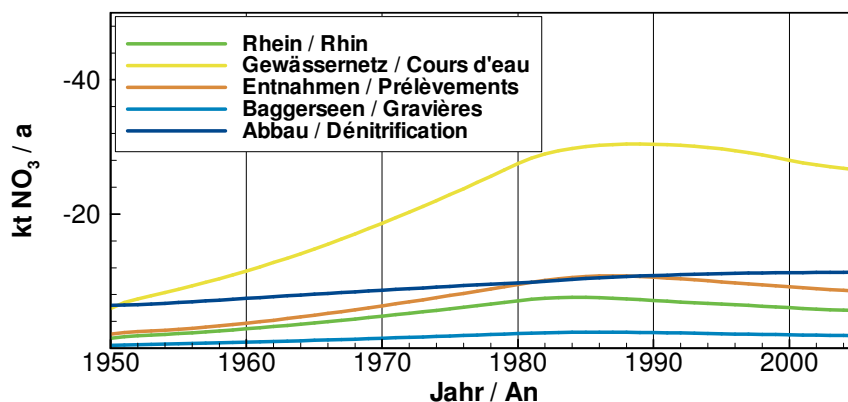


Abbildung 9.6.9: Zeitliche Entwicklung der Nitratabflüsse.
 Figure 9.6.9: Evolution des pertes de nitrates.

Die hauptsächliche Abflusskomponente ist der Abfluss in das Gewässernetz. Dieser steigt auf bis zu 30 kt NO₃ pro Jahr an. Die übrigen Abflusskomponenten sind mit Abflüssen von 2 bis 11 kt NO₃ pro Jahr deut-

La principale perte de nitrates se fait dans les cours d'eau. Cette perte peut atteindre 30 kt NO₃/an. Les autres composantes de pertes d'azote sont nettement plus petites avec des va-

lich geringer. Der Nitrataustrag über die Grundwasserentnahmen hat seinen Maximalwert am Ende der 80er Jahre mit 10 kt NO₃ pro Jahr. Der Abbau steigt kontinuierlich aus dem Jahr 1950 an und erreicht einen Maximalwert von ebenfalls 11 kt NO₃ pro Jahr am Ende der Betrachtungszeitspanne. Der Abfluss in die Baggerseen ist eher untergeordnet.

9.6.5 SENSITIVITÄTSSTUDIE

Wie die Modelluntersuchungen zeigen werden die Nitratverhältnisse für 1997 vergleichsweise gut nachgebildet, aber die Abnahme der Nitratkonzentrationen im Vergleich zu 2003 wird im numerischen Modell etwas überschätzt. Ein Grund dafür kann sicherlich in der Zuflussfunktion für Nitrat über die Geländeoberfläche liegen. Hier wurde anhand der drei detailliert berechneten Nitratfrachtverteilungen für 1980, 1990 und 2000 der zeitliche Verlauf durch lineare Interpolation zwischen den Zeitpunkten bestimmt. Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung der Verweilzeiten in der ungesättigten Zone die in Abbildung 9.6.1 dargestellte Zuflussfunktion, die 1982 einen Hochpunkt hat und bis in das Jahr 2000 wieder fällt, wobei der Nitratreintrag im Jahr 2000 genauso groß ist wie 1965.

In der ersten Sensitivitätsbetrachtung (S1) wurde davon ausgegangen, dass der größte Nitratreintrag nicht nur im Jahr 1980 vorgelegen hat sondern bis in das Jahr 1987 konstant hoch war. Dieser Ansatz lässt sich mit den Verkaufszahlen für Mineraldünger erklären. Die Verkaufszahlen sind bis 1987 stetig angestiegen. Erst danach haben sich die Verkaufszahlen wieder deutlich verringert. Durch diese Annahme erfolgt ein größerer Nitratzufluss in das System als bei der Eichvariante. Dies hat zur Folge, dass die berechneten Nitratkonzentrationen für 1997 etwas größer sind als die gemessenen und der Nitratrückgang zwischen 1997 und 2003 deutlich größer ist als bei den Messwerten, so dass bei dieser Annahme eher von einer Verschlechterung im Modellergebnis auszugehen ist.

leurs allant de 2 kt NO₃/an à 11 kt NO₃/an. Les exportations de nitrates liées aux prélèvements atteignent une valeur maximale fin des années 80 avec une valeur de 10 kt NO₃/an. La dénitrification augmente de manière continue et atteint une valeur maximale de 11 kt NO₃/an à la fin de la période simulée. Les pertes au niveau des gravières sont négligeables.

9.6.5 ANALYSE DE SENSIBILITE

Comme le montrent les résultats de la modélisation, les teneurs en nitrates de 1997 sont relativement bien reproduites, alors que celles de 2003 sont surestimées par le modèle numérique. Cette surestimation peut certainement être liée à la fonction d'entrée en nitrates définie à la surface du sol. L'évolution au cours du temps de ces apports est obtenue par interpolation linéaire, interpolation faite à partir de la distribution des flux estimée pour 1980, 1990 et 2000. En tenant compte des temps de parcours dans la zone non saturée, la fonction décrivant les apports de nitrates à la nappe montre un maximum atteint en 1982 et qui diminue à partir de 2000 (figure 9.6.1), alors que les apports d'azote à la surface du sol en 2000 sont égaux à ceux de 1965.

Pour ces raisons, l'apport maximal des entrées en nitrates de 1980 est maintenu constante jusqu'en 1987 dans le cadre du premier calcul d'analyse de sensibilité (S1). Cette hypothèse est appuyée par les chiffres de vente des engrais minéraux. Ces chiffres montrent une augmentation permanente des ventes d'engrais jusqu'en 1987. La vente a ensuite diminué de manière significative après 1987. Une plus grande quantité de nitrates est donc apportée pour ce calcul par rapport à celle utilisée pour l'étalonnage du modèle. Il en résulte des concentrations en nitrates calculées sensiblement supérieures à celles mesurées en 1997 et une diminution de ces concentrations entre 1997 et 2003 plus marquée pour les valeurs calculées comparativement à celles mesurées. Cette hypothèse conduit donc à une détérioration de la qualité du modèle.

Tabelle 9.6.3: Nitratkonzentrationen an den Messstellen der Bestandsaufnahme 1997 und 2003 für die Messwerte, den Eich- und die Sensitivitätsläufe.

Tableau 9.6.3: Concentrations en nitrates mesurées, calculées après étalonnage et calculées lors des analyses de sensibilité aux points de mesure pour l'année de référence 1997 et 2003.

	Mittlere Nitratkonzentration [mg/l] für 1997 <i>Concentration moyenne [mg/l] pour 1997</i>	Mittlere Nitratkonzentration [mg/l] für 2003 <i>Concentration moyenne [mg/l] pour 2003</i>
Gemesen		
9.2.1.1 MESURE	28,4	27,2
Eichlauf		
9.2.1.2 ETALONNAGE	25,8	22,7
Sensitivitätslauf 1		
<i>Calcul de sensibilité 1</i>	27,1	23,4
Sensitivitätslauf 2		
<i>Calcul de sensibilité 2</i>	26,1	23,4
Sensitivitätslauf 3		
<i>Calcul de sensibilité 3</i>	37,9	39,4
Sensitivitätslauf 4		
<i>Calcul de sensibilité 4</i>	27,5	27,1
Sensitivitätslauf 5		
<i>Calcul de sensibilité 5</i>	26,7	23,6

In der zweiten Sensitivitätsbetrachtung (S2) wurde davon ausgegangen, dass die Güte der Eingangsdaten für die Bestimmung der Nitratflussverteilung im Jahr 2000 etwas besser ist als in den Jahren davor. Aufgrund der Überschätzung der Ackerflächen in den Satellitenbildern wurde die Nitratfracht auf Ackerflächen um 25% reduziert. Geht man davon aus, dass diese Überschätzung im Jahr 2000 nur lediglich 15% betragen hat, so ist der Nitratzufluss für 2000 etwas größer als in dem Eichlauf. Die Ergebnisse dieses Sensitivitätslaufes unterschieden sich allerdings nur sehr wenig zu dem Eichlauf. Generell ist die Abnahme der Konzentrationen zwischen 1997 und 2003 etwas geringer als im Eichlauf. Aber eine deutliche Veränderung wird dadurch nicht erreicht.

In zwei weiteren Sensitivitätsrechnungen wurde angenommen, dass der hohe Eintrag von 1980 bis in das Jahr 2005 angehalten hat (S3), bzw., dass der Nitratreintrag von 1990 bis 2005 konstant, mit der Verteilung aus 1990, war (S4). Die Ergebnisse des Sensitivitätslaufes S3 zeigen, dass damit die Nitratkonzentrationen deutlich überschätzt

Pour le deuxième calcul de sensibilité (S2), il est admis que la fiabilité de l'estimation de la répartition des apports de nitrates est meilleure pour l'année 2000 par rapport aux années précédentes. Les apports de nitrates sous zones cultivées ont été diminués de 25 %, les surfaces en cultures étant surestimées par les images satellite. En supposant que cette diminution n'est que de 15% en 2000 pour la calcul S2, les flux de nitrates arrivant à la nappe seront plus élevés que ceux utilisés pour l'étalonnage du modèle. Les résultats de ce calcul de sensibilité ne diffèrent que très peu des résultats obtenus après étalonnage. La baisse de concentration en nitrates de 1997 à 2003 est globalement plus faible que lors du calcul après étalonnage, mais la différence entre les deux calculs reste négligeable.

Pour les deux calculs de sensibilité suivants, il est supposé que les importants apports de 1980 sont maintenus jusqu'en 2005 (S3) ou que l'apport est constant de 1990 à 2005 avec la distribution établie en 1990 (S4). Les résultats de l'analyse S3 montrent que les concentrations mesurées sont nettement surévaluées. Ces résultats de modélisation

werden. Dieses Modellergebnis kann aber dazu verwendet werden, um die hypothetische Entwicklung darzustellen, falls es zu keiner Reduktion des Nitratreintrages gekommen wäre. In diesem Fall wären die mittleren Nitratkonzentrationen um 10 mg/l höher als heute gemessen.

Eine sehr realistische Betrachtung stellt der Sensitivitätslauf S4 dar. Hier unterscheiden sich die berechneten mittleren Nitratkonzentrationen nur geringfügig von den gemessenen für beide Vergleichsjahre. Die konstante Eintragsfunktion zwischen 1990 und 2005 entspricht in etwa auch den Zahlen der Verkaufsstatistiken für mineralischen Dünger in Baden-Württemberg. Dieses Modellergebnis scheint darauf hinzuweisen, dass der Nitratreintrag für das Jahr 2000 etwas unterschätzt wird. Für das Jahr 1997 ergeben sich nur geringe Unterschiede zwischen Eichlauf und Sensitivitätslauf S4 bei den Nitratkonzentrationsverteilungen. Für 2003 vergrößern sich die Unterschiede, wie dies auch aus den mittleren Nitratkonzentrationen gemäß Tabelle 9.6.3 ersichtlich ist.

Ein weiterer unsicherer Parameter bei der Nitrattransportmodellierung ist der maximale Sauerstoffgehalt, bis zu dem ein Nitratabbau stattfinden kann. In Abschnitt 9.5.4 wurde diese Grenze mit 3 mg/l O₂ festgelegt. Im fünften Sensitivitätslauf (S5) wurde diese Grenze auf 1,5 mg/l O₂ gelegt. Dadurch werden die Gebiete mit Nitratabbau kleiner gegenüber dem Eichlauf. Diese Veränderung hat im Wesentlichen einen Einfluss auf die gesamte Abbaurate im Modell. Der Abbau sinkt für das Jahr 2005 von 11 kt NO₃ pro Jahr auf 7,4 kt NO₃ pro Jahr. Da diese Bilanzgröße aber vergleichsweise gering ist, ergeben sich in den Nitratkonzentrationen an den Messstellen nur sehr kleine Änderungen gegenüber dem Eichlauf. Im statistischen Mittel sind die Ergebnisse in etwa gleich zu denen des Eichlaufs.

Zusammenfassend sind die im Grundwasserleiter gespeicherten Massen für den Eichlauf und die Sensitivitätsläufe in Abbildung 9.6.10 dargestellt. Die Sensitivitätsläufe 1 bis 4 unterscheiden sich ab 1985 vom Eichlauf. Lediglich der Sensitivi-

peuvent cependant être utilisés pour représenter un scénario qui consiste à admettre l'absence de réduction des apports de nitrates. Dans ce cas, la concentration moyenne en nitrates dans la nappe serait supérieure de 10 mg/l.

Le calcul de sensibilité S4 est une configuration réaliste. Les concentrations moyennes calculées sont très proches des concentrations moyennes mesurées pour les 2 années. Un apport constant en nitrates de 1990 à 2005 est une hypothèse cohérente avec les chiffres de vente des engrais minéraux dans le Bade-Württemberg. Ce résultat de modélisation semble montrer que les apports estimés pour 2000 étaient sous-estimés. Il y a très peu de différences dans la distribution des concentrations entre ce calcul S4 et les résultats obtenus après étalonnage pour l'année 1997. Cette différence est nettement plus grande pour l'année 2003, comme on peut également le voir sur le tableau 9.6.3 en ce qui concerne les valeurs moyennes.

Une autre incertitude dans la modélisation du transport de nitrates concerne la concentration en oxygène dissous en dessous de laquelle la dénitrification a lieu. Cette valeur seuil a été fixée à 3 mg/l d'O₂ au chapitre 9.5.4. Cette valeur a été fixée à 1,5 mg/l d'O₂ pour le calcul de sensibilité S5. De ce fait, les zones avec dénitrifications sont plus petites par rapport à l'étalonnage. Cette modification a surtout un effet sur la dégradation globale dans la zone modélisée. Pour 2005, cette dégradation passe de 11 kt NO₃/an à 7,4 kt NO₃/an. La dégradation étant une composante du bilan relativement petite, il y a peu de différences dans les concentrations ainsi calculées par rapport à celles obtenues après étalonnage. En moyenne, les résultats sont presque identiques à ceux obtenus lors de l'étalonnage.

La masse stockée dans l'aquifère pour l'étalonnage et les calculs de sensibilité est présentée de manière synthétique sur la figure 9.6.10. Les calculs de sensibilité S1 à S4 se différencient du calcul d'étalonnage à partir de 1985. Les variations de la

tätslauf S5 mit geringerem Abbau unterscheidet sich bereits vor 1985 vom Eichlauf. Generell sind die Verläufe der Gesamtmassen für den Eichlauf und die Sensitivitätsläufe 1, 2 und 5 ähnlich. Im Sensitivitätslauf 3 erfolgt ein stetiger Anstieg der Gesamtmasse. Im Sensitivitätslauf 4, der eine sehr gute Übereinstimmung zu den Messwerten zeigt, steigt die Gesamtmasse ebenfalls bis 2005 an. Der abnehmende Trend ab Mitte der 90er Jahre in der Gesamtmasse wird durch den Sensitivitätslauf 4 nicht bestätigt.

masse totale de nitrates sont globalement identiques pour les calculs de sensibilité S1, 2 et 5 et le calcul d'étalonnage. Le calcul de sensibilité S3 se caractérise par augmentation constante de la masse totale de nitrates jusqu'en 2005. C'est aussi le cas pour le calcul de sensibilité S4, qui montre aussi une très bonne adéquation avec les mesures. La tendance à la baisse des teneurs en nitrates à partir du milieu des années 1990 n'est pas confirmée par le calcul de sensibilité S4.

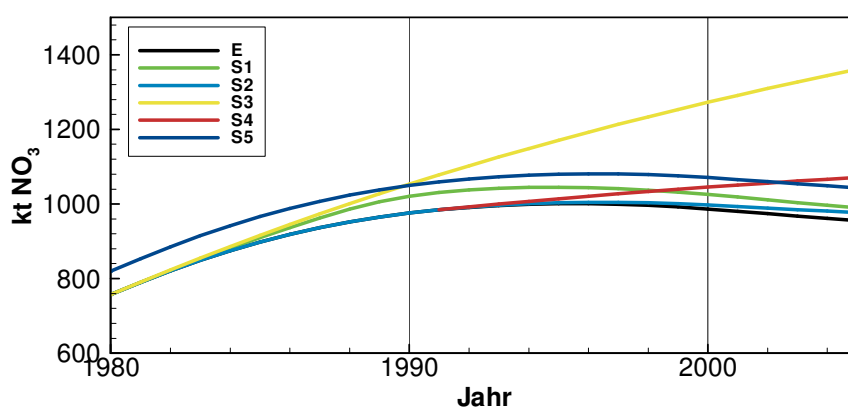


Abbildung 9.6.10: Zeitliche Entwicklung der gespeicherten Nitratmenge im Grundwasserleiter für die Sensitivitätsläufe S1 – S5 und den Eichlauf (E).

Figure 9.6.10: Evolution de la masse de nitrates stockés dans les eaux souterraines pour les calculs de sensibilité (S1 à S5) et après étalonnage (E).

9.7 SIMULATION DES NITRATTRANSPORTS 1986 BIS 2002 MIT INSTATIONÄRER STRÖMUNG

9.7.1 RANDBEDINGUNGEN

Auf der Basis des instationären Strömungsfeldes wurden auch Nitrattransportberechnungen für den Zeitraum 1986 bis 2002 durchgeführt. Dazu wurde die Nitratkonzentrationsverteilung der Modellrechnung mit stationärem Strömungsfeld aus dem Jahr 1985 als Startverteilung dem numerischen Modell vorgegeben.

Als Transportrandbedingungen wurden die gleichen verwendet, wie bei den Simulationsrechnungen mit stationärem Strömungsfeld. Der Nitratzufluss wurde entsprechend den Konzentrationsverteilungen bei den Modellrechnungen mit stationärem Strömungsfeld für die Zeitspanne 1986 bis 2002 ange-
setzt.

9.7 SIMULATION DU TRANSPORT DE NITRATES DE 1986 A 2002 AVEC UN ECOULEMENT TRANSITOIRE

9.7.1 CONDITIONS AUX LIMITES

Une simulation du transport des nitrates a été effectuée sur la période allant de 1986 à 2002 à l'aide du modèle d'écoulement en régime transitoire. Les concentrations initiales pour le modèle numérique sont les concentrations calculées pour 1985 à l'aide du modèle d'écoulement en régime permanent.

Les conditions aux limites pour le transport de nitrates sont identiques à celles utilisées pour le calcul avec un écoulement permanent. Les apports en nitrates sont calculés pour la période 1986-2002 à partir des concentrations utilisées pour le modèle avec un écoulement permanent.

Die Zeitschrittdiskretisierung des Transportmodells wurde entsprechend angepasst. Das bedeutet, dass sich die Strömung monatlich ändert und der Transport mit Zeitschrittlängen von maximal 10 Tagen innerhalb des jeweiligen Monats berechnet wird.

9.7.2 ERGEBNISSE

Die Modellrechnungen mit instationärem Strömungsfeld zeigen erwartungsgemäß keine deutlich anderen Nitratverhältnisse im Untersuchungsraum. Das instationäre Strömungsfeld führt lediglich dazu, dass die Nitratkonzentrationen an den Messstellen saisonal um 0 bis maximal 10 mg/l schwanken. Wie Abbildung 9.7.1 an einer exemplarischen Messstelle zeigt, wird der generelle Trend der Nitratkonzentrationen durch das numerische Modell mit stationärem Strömungsfeld ausreichend genau nachgebildet. Ein Vergleich der berechneten Ergebnisse mit den kurzfristigen Schwankungen in den gemessenen Nitratganglinien ist aufgrund der lokalen Verhältnisse an den Messstellen nur sehr bedingt möglich.

Le pas de temps pour la simulation du transport a été adapté. L'écoulement étant calculé au pas de temps mensuel, le transport de nitrates est simulé avec un pas de temps ne dépassant pas 10 jours pour chaque mois.

9.7.2 RÉSULTATS

Comme attendu pour les teneurs en nitrates, les résultats obtenus en écoulement transitoire diffèrent peu de ceux obtenus avec un écoulement en régime permanent. Le calcul en transitoire permet uniquement de faire apparaître des variations saisonnières des teneurs en nitrates de l'ordre de 0 à 10 mg/l au maximum. La tendance générale décrite par le modèle avec écoulement permanent est reproduite par la simulation avec un régime transitoire, comme le montre les résultats présentés sur la figure 9.7.1 obtenus sur un point de mesure représentatif. Une reproduction par les valeurs calculées de mesures présentant des fluctuations sur de courtes périodes n'est que très rarement possibles, dus aux processus locaux non pris en compte.

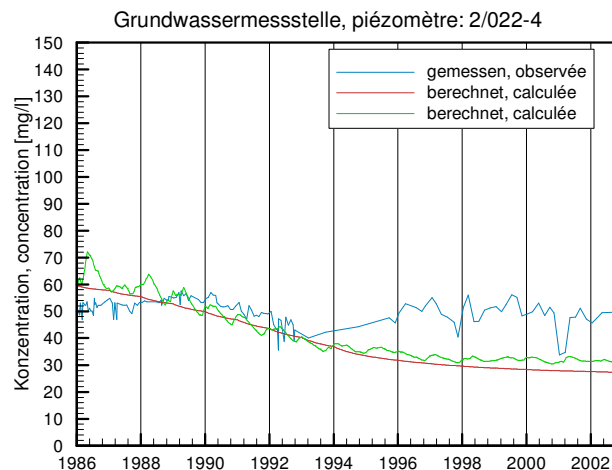


Abbildung 9.7.1: Berechnete und gemessene Nitratganglinien (rot: stationäre Strömung, grün: instationäre Strömung).
 Figure 9.7.1: Chroniques de concentrations calculées et mesurées (avec un écoulement permanent en rouge, avec un écoulement transitoire en vert).

Die Simulationsergebnisse zeigen deutlich, dass eine mittlere stationäre Betrachtung für die Grundwasserströmung ausreichend ist, um abgesicherte Aussagen für den Nitrattransport abzuleiten.

Les résultats des simulations montrent clairement qu'un écoulement calculé en régime permanent est suffisant pour faire des prévisions fiables du transport de nitrates.

9.8 PROGNOSEBETRACHTUNGEN

9.8.1 ÜBERSICHT

Mit Hilfe des geeichten Strömungs- und Transportmodells wurden auch Prognosebetrachtungen durchgeführt, um die zukünftige Entwicklung der Nitratverhältnisse im Betrachtungsraum zu untersuchen. Bei diesen Modellrechnungen wurden die Verhältnisse zwischen 2007 und 2050 simuliert. Anhand von Handlungsoptionen und Szenarienrechnungen wurden verschiedene Nitratzuflussvarianten untersucht. Die Ergebnisse dieser Prognosebetrachtungen wurden mit einem Bezugslauf verglichen, bei welchem davon ausgegangen wurde, dass der Nitratreintrag von 2000 bis 2050 konstant bleibt. Zusätzlich wurde eine sogenannte Nullvariante definiert, bei der davon ausgegangen wird, dass kein Nitratreintrag mehr stattfindet. Die Ergebnisse der Prognosevarianten sowie die Beschreibung der Handlungsoptionen und Szenarien sind im Bericht „Prognosen zur Entwicklung der Nitratbelastung“ dokumentiert.

9.8.2 ERGEBNISSE DES BEZUGSLAUFES

Die zeitliche Entwicklung der Nitratverhältnisse im Grundwasserleiter für den Bezugslauf lässt sich am besten anhand der Gesamtnitratbilanz (siehe Abbildung 9.8.1) abschätzen. Die im Grundwasserleiter gespeicherte Nitratmenge nimmt von 950 kt NO_3 im Jahr 2006 bis auf 800 kt NO_3 im Jahr 2050 ab. Das bedeutet, dass der seit Mitte der 90er-Jahre anhaltende Trend mit abnehmender Nitratmasse auch im Prognosezeitraum anhält. Die Abnahme verläuft näherungsweise linear.

9.8 SIMULATIONS PRÉVISIONNELLES

9.8.1 APERÇU

A l'aide du modèle étalonné en écoulement et en transport, des simulations prévisionnelles ont été menées afin d'analyser le devenir des nitrates dans la zone d'étude. Le devenir des nitrates est simulé sur une période allant des 2007 à 2050. Plusieurs simulations concernant les apports de nitrates sont analysées en fonction de pratiques culturales et de scénarii prédéfinis. Les résultats de ces simulations prévisionnelles sont comparés à un calcul de référence. Ce calcul de référence est mené en supposant que les apports de nitrates restent constants de 2000 à 2050. Un calcul supplémentaire, dénommée variante zéro, a été mené en supposant qu'il n'y ait plus d'apport de nitrates. Les résultats des différentes variantes et la description des pratiques culturales et des scénarii sont détaillés dans le rapport «Prévision de l'évolution de la pollution par les nitrates».

9.8.2 RESULTATS CONCERNANT LE CALCUL DE REFERENCE

L'évolution des teneurs en nitrates dans l'aquifère pour le calcul de référence peut être bien analysée à l'aide du bilan global (voir figure 9.8.1). La masse de nitrates stockés diminuent de 950 kt NO_3 pour l'année 2006 à 800 kt NO_3 pour l'année 2050. La tendance à la baisse commençant milieu des années 90 se retrouve également pour cette période de calcul de prévision. Cette diminution peut être supposée linéaire.

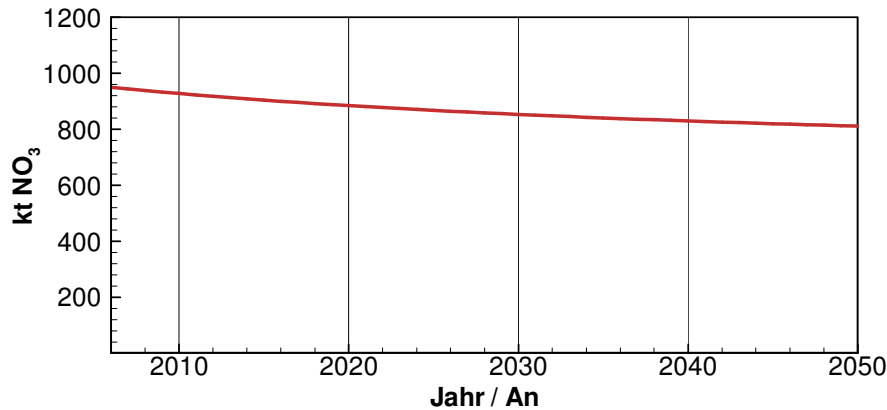


Abbildung 9.8.1: Zeitliche Entwicklung der im Grundwasser gespeicherten Nitratmenge für den Bezugslauf.

Figure 9.8.1: Evolution de la masse de nitrates stockée dans l'aquifère pour le calcul de référence.

Der Jährliche Nitratzufluss durch Grundwasserneubildung und Randzufluss beträgt im Prognosezeitraum 35 kt NO₃ pro Jahr. Diesem Zufluss steht der in Abbildung 9.8.2 dargestellte Nitratabfluss gegenüber. Lediglich der Abfluss über das feinmaschige Gewässernetz nimmt im Prognosezeitraum ab. Die übrigen Abflusskomponenten bleiben näherungsweise konstant. Der gesamte Nitratabfluss ist im Jahr 2050 mit 48 kt NO₃ pro Jahr weiterhin deutlich größer als der Nitratzufluss. Dies erklärt auch die kontinuierliche Abnahme der Gesamtmasse.

L'apport annuel de nitrates par la recharge et les écoulements souterrains est de 35 kt NO₃ par an pendant la période du calcul prévisionnel. Cette valeur est à mettre en relation avec les pertes de nitrates présentées sur la figure 9.8.2. Les pertes diminuent essentiellement au niveau du réseau d'eaux de surface pendant cette période et peuvent être considérées comme constantes pour les autres composantes. Au total, pour l'année 2050, les pertes s'élèvent à 48 kt NO₃ par an et sont nettement plus importantes que les apports.

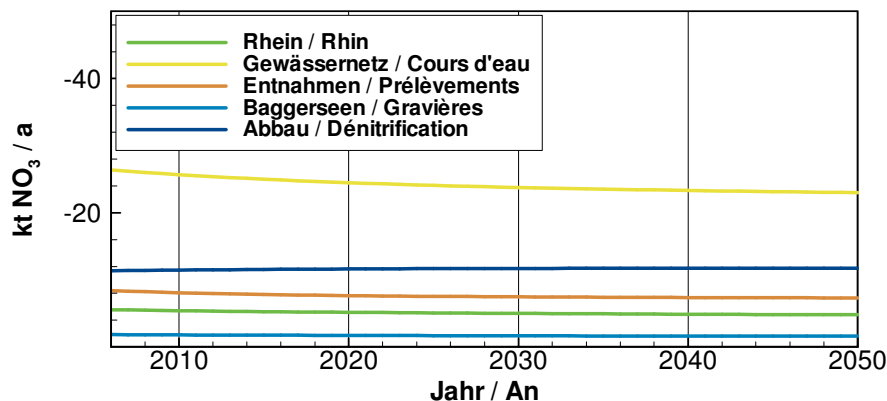


Abbildung 9.8.2: Zeitliche Entwicklung der Nitratabflüsse für den Bezugslauf.

Figure 9.8.2: Evolution des pertes de nitrates pour le calcul de référence au niveau du Rhin, des eaux de surface, des prélèvements, des gravières et à la dégradation.

Die räumlichen Verteilungen der berechneten Nitratkonzentrationen für das Jahr 2050 sind in den Abbildungen 9.8.3 bis 9.8.5 dargestellt. Vergleicht man diese Konzentrationsverteilungen mit den Ergebnissen von 1997 so sieht man einen deutlichen Rückgang insbesondere der Bereiche mit hohen Nitratkon-

La répartition spatiale des nitrates pour 2050 est présentée sur les figures 9.8.3 à 9.8.5. Comparées aux résultats de 1987, les concentrations ont nettement diminué en particulier dans les zones où elles étaient élevées. De ce fait, on trouve beaucoup moins de zones à concentrations supérieures

zentrationen. So finden sich oberflächennah deutlich weniger Bereiche mit Konzentrationen größer als 50 mg/l. Lediglich nördlich des Kaiserstuhls und am Rand zu den Vogesen sind kleinere hochkonzentrierte Nitratfahnen zu erkennen. Im Markgräflerland und in der Freiburger Bucht sind die Fahnen bis auf sehr kleinräumige Gebiete deutlich zurückgegangen. Auch die mäßig belasteten Gebiete zwischen Selestat und Mulhouse weisen Nitratkonzentrationen zwischen 10 und 25 mg/l auf. In der Tiefenstufe 10-40 m sind die Änderungen ähnlich zu denen im oberflächennahen Grundwasser. In den Tiefen größer als 40 m sind deutliche Änderungen lediglich in den Randbereichen zu erkennen.

Die Abnahme der Nitratbelastung wird auch aus der in Tabelle 9.8.1 zusammengestellten Statistik der Nitratkonzentrationen an den Messstellen der Bestandsaufnahme deutlich. Die mittlere Nitratkonzentration nimmt gegenüber 2003 um 4,5 mg/l auf 18,2 mg/l ab. Derselbe Trend ergibt sich auch für die unterschiedlichen Tiefenstufen.

à 50 mg/l dans la partie supérieure de l'aquifère. Quelques zones à fortes concentrations existent encore au Nord du Kaiserstuhl et aux pieds des Vosges. Les panaches de nitrates dans le Markgräflerland et la baie de Fribourg ont été réduits à de très petites zones. De même, les concentrations dans les zones fortement contaminées entre Sélestat et Mulhouse ont diminué pour atteindre des valeurs comprises entre 10 à 25 mg/l. Les variations observées au niveau des horizons entre 10 et 40 m sont proches de celles décrites pour la partie superficielle. Pour les profondeurs au-delà de 40 m, les évolutions se situent uniquement aux limites du domaine.

Pour le calcul de référence, la diminution de la charge en nitrates apparaît clairement au niveau des points de mesure comme le montre le tableau 9.8.1. Par rapport à 2003, la concentration moyenne de 18,2 mg/l a diminué de 4,5 mg/l. La même tendance existe aux différentes profondeurs.

Tabelle 9.8.1: Vergleich zwischen den berechneten Nitratkonzentrationen in den Jahren 2003 und 2050 an den Messstellen der Bestandsaufnahme 2003.

Tableau 9.8.1: Comparaison entre les concentrations en nitrates calculées pour les années 2003 et 2050 aux points de d'observation du calcul de référence.

Tiefe Profondeur [m]	NO ₃ berechnet für 2003 <i>Calculé pour 2003</i> [mg/l]	NO ₃ berech- net für 2050 <i>Calculé pour 2050</i> [mg/l]	Anzahl Messstellen <i>Nbre de points de mesure</i>
0-200	22,7	18,2	696
0-10	23,8	19,1	481
10-40	21,1	17,1	196
>40	9,2	8,4	19

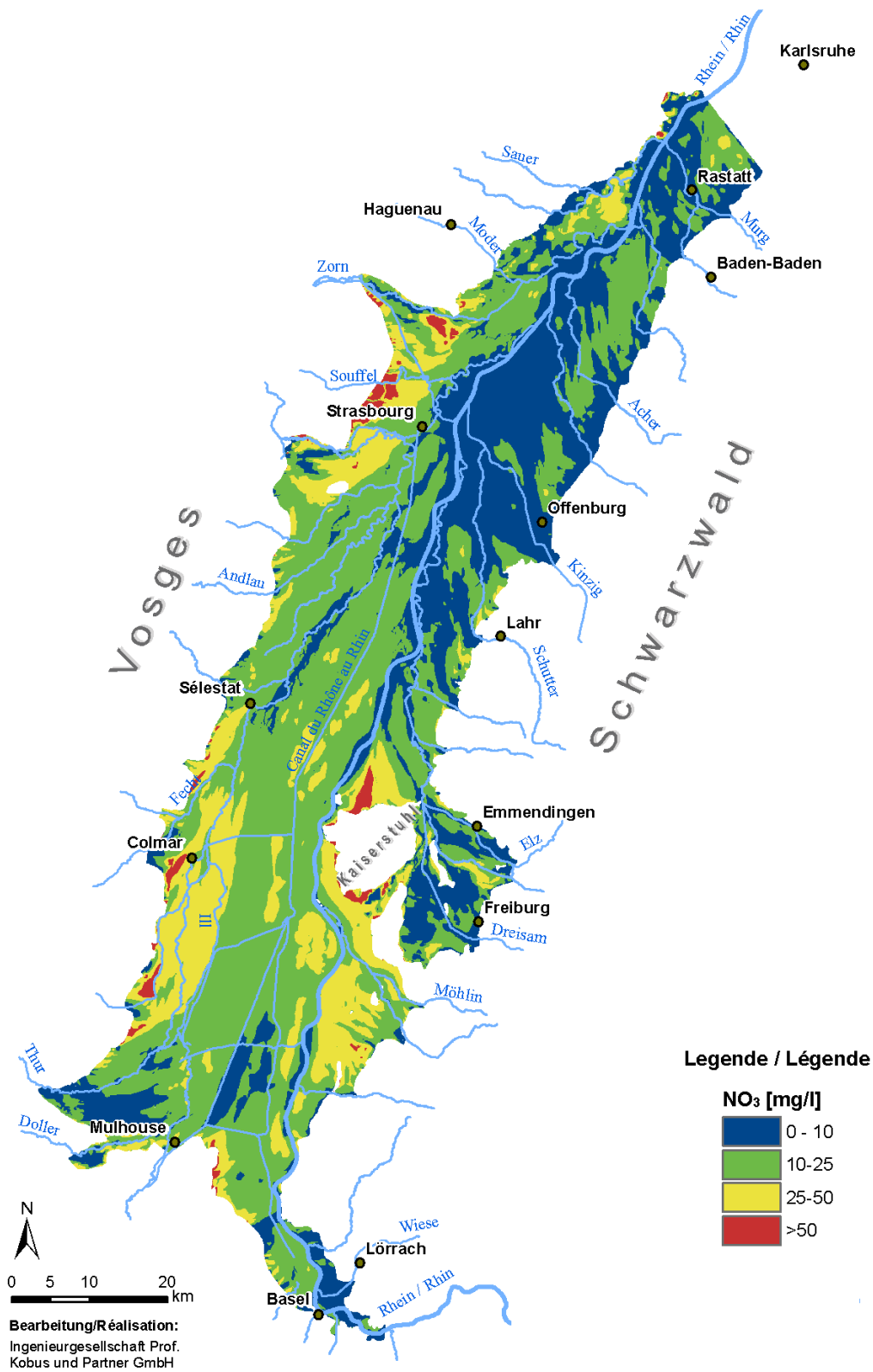


Abbildung 9.8.3: Berechnete mittlere Nitratverteilung im Jahr 2050 in der Tiefenstufe 0 – 10 m für den Bezugslauf.
 Figure 9.8.3: Concentrations en nitrates moyennées sur la profondeur 0-10 m pour l'année 2050 obtenues par le calcul de référence.

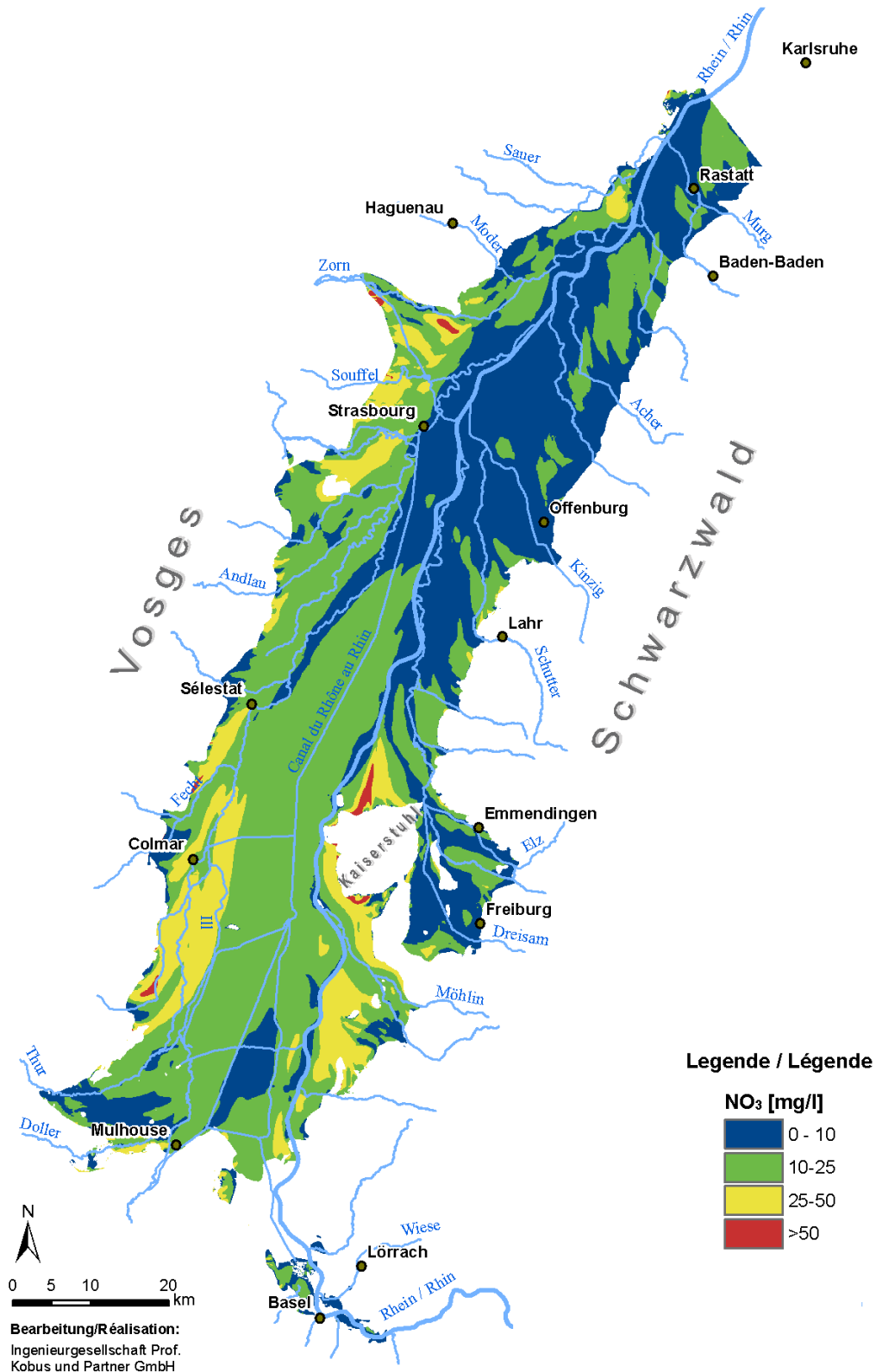


Abbildung 9.8.4: Berechnete mittlere Nitratverteilung im Jahr 2050 in der Tiefenstufe 10 – 40 m für den Bezugslauf.
 Figure 9.8.4: Concentrations en nitrates moyennées sur la profondeur 10-40 m pour l'année 2050 obtenues par le calcul de référence.

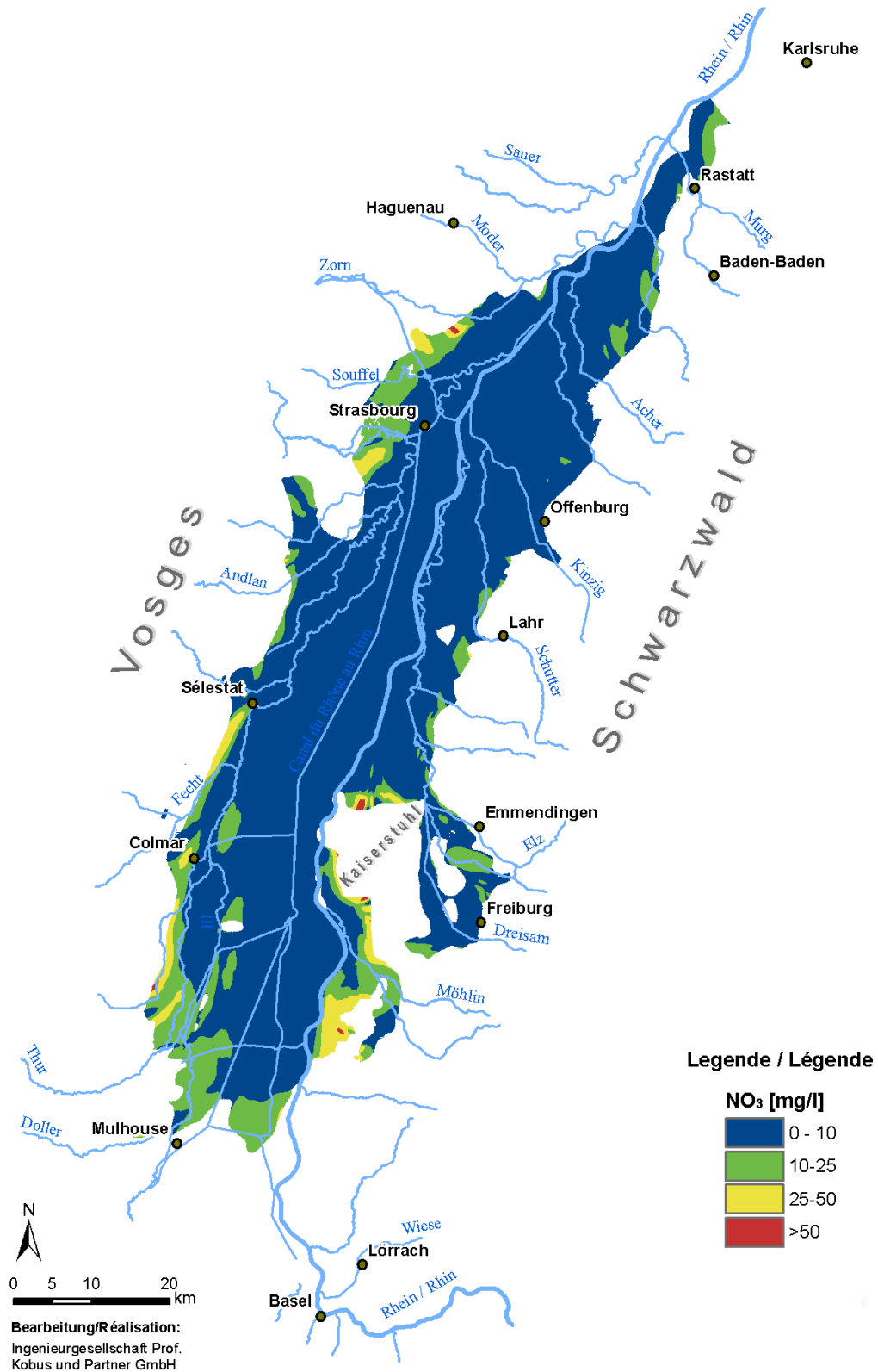


Abbildung 9.8.5: Berechnete mittlere Nitratverteilung im Jahr 2050 in der Tiefenstufe größer als 40 m für den Bezugslauf.
 Figure 9.8.5: Concentrations en nitrates moyennées pour une profondeur supérieure à 40 m et pour l'année 2050 obtenues par le calcul de référence.

9.8.3 PROGNOSE FÜR SENSITIVITÄTSLAUF S3 UND S4

Neben der Prognose der Nitratentwicklung für die Eintragsverhältnisse des Eichlaufes wurden auch Prognosen für die Sensitivitätsläufe S3 und S4 durchgeführt. Bei diesen Prognoserechnungen wurde davon ausgegangen, dass die Nitrateintragsraten aus dem Jahr 2000 bis 2050 gleich bleiben. In Tabelle 9.8.2 sind die mittleren berechneten Nitratkonzentrationen im Jahr 2050 zusammengestellt. Gegenüber dem Bezugslauf, der die Prognose des Eichlaufes darstellt, ergeben sich deutliche Unterschiede. Beim Sensitivitätslauf S3, der die hypothetische Situation beschreibt, dass seit 1980 keine Reduktion des Nitrateintrags stattgefunden hätte, ergeben sich mehr als doppelt so große Nitratkonzentrationen wie beim Bezugslauf. Beim Sensitivitätslauf S4, der im Jahr 2003 die gemessenen Nitratverhältnisse besser nachbildet als der Bezugslauf, ist die mittlere Nitratkonzentration im Jahr 2050 in derselben Größenordnung wie 2003. Die im Bezugslauf errechnete Reduktion der mittleren Nitratkonzentration bis 2050 ergibt sich nicht, da sich das Gesamtsystem bis 2050 mehr oder weniger im Gleichgewicht befindet. Dies wird auch aus dem Vergleich der gespeicherten Gesamtmassen in Abbildung 9.8.4 deutlich. Während die Gesamtmasse des Bezugslaufes weiterhin abnimmt, steigt die Gesamtmasse des Sensitivitätslaufes S4 bis 2050 noch um 200 kt NO_3 bis auf 1200 kt NO_3 an. Damit wäre die gesamte Nitratmasse im Jahr 2050 beim Sensitivitätslauf S4 um 400 kt NO_3 größer als beim Bezugslauf. Die gespeicherte Nitratmasse beim Sensitivitätslauf S3 ist um ca. 1000 kt NO_3 größer als beim Bezugslauf.

9.8.3 PREVISIONS POUR LES CALCULS DE SENSIBILITES S3 ET S4

Des prévisions à partir des calculs de sensibilité S3 et S4 ont également été menées en complément de celles faites sur l'évolution des apports de nitrates. Les apports en nitrates sont supposés constants de 2000 à 2050 pour ces simulations prévisionnelles. Les concentrations moyennes obtenues en 2050 sont synthétisées dans le tableau 9.8.2. Des écarts significatifs par rapport au calcul de référence qui se fonde sur le calcul d'étalonnage sont mis en évidence. Des concentrations égales au plus du double de celles du calcul de référence sont obtenues pour le calcul prévisionnel fait à partir du calcul de sensibilité S3, où il est admis qu'aucune réduction des apports en nitrates n'a lieu depuis 1980. Les concentrations moyennes de 2050 sont du même ordre de grandeur que celles de 2003 pour le calcul de sensibilité S4, qui reproduit mieux les concentrations mesurées que le calcul de référence pour l'année 2003. La tendance à la baisse observée jusqu'en 2050 pour le calcul de référence est absente pour cette simulation, un équilibre de la dynamique des nitrates dans le domaine d'étude étant plus ou moins atteint. Cela se voit aussi nettement sur la masse de nitrates stockés dans l'aquifère comme le montre la figure 9.8.4. Alors que la masse totale diminue pour le calcul de référence, elle augmente pour la simulation S4 jusqu'en 2050, avec une augmentation de 200 kt NO_3 pour atteindre 1200 kt NO_3 . La masse totale serait donc supérieure de 400 kt NO_3 pour la simulation S4 par rapport au calcul de référence. La masse stockée pour le calcul S3 est plus élevée d'environ 1000 kt NO_3 par rapport au calcul de référence.

Tabelle 9.8.2: Berechnete Nitratkonzentrationen im Jahr 2050 an den Messstellen der Bestandsaufnahmen für den Bezugslauf sowie die Sensitivitätsläufe S3 und S4.

Tableau 9.8.2: Concentrations en nitrates simulées pour l'année 2050 aux points d'observation pour le calcul de référence et pour les calculs S3 et S4..

Mittlere Nitratkonzentration [mg/l] für 2050 Concentrations moyenne [mg/l] pour 2050	
Bezugslauf Référence	18,2
Sensitivitätslauf S3 Sensibilité S3	43,9
Sensitivitätslauf S4 Sensibilité S4	26,6

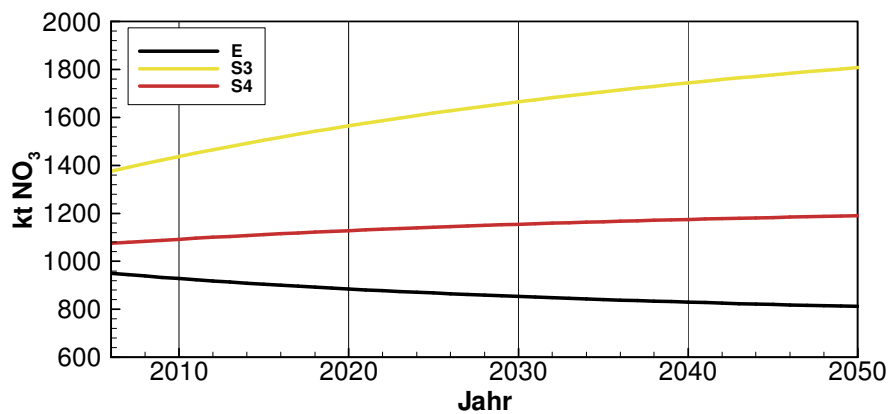


Abbildung 9.8.6: Prognose der zeitlichen Entwicklung der gespeicherten Nitratmenge im Grundwasserleiter für den Bezugslauf (E), Sensitivitätslauf S3 und S4.

Figure 9.8.6: Prévision de l'évolution de la masse de nitrates stockés dans l'aquifère pour le calcul de référence (E) et les calculs de sensibilité S3 et S4.

Sehr deutliche Unterschiede ergeben sich auch für die oberflächennahen Nitratverteilungen im Grundwasserleiter. Beim Sensitivitätslauf S3 (siehe Abbildung 9.8.7) sind die Konzentrationen vor allem im südlichen Teil deutlich über 50 mg/l. Die Verteilung des Sensitivitätslaufes S4 (siehe Abbildung 9.8.8) sieht vergleichsweise ähnlich zu der Situation von 1997 aus. Im Vergleich zu dem Bezugslauf, sind die Konzentrationen für 2050 aber deutlich größer. Während sich im Bezugslauf die Nitratfahnen mit hohen Konzentrationen abbauen, bleiben diese im Sensitivitätslauf S4 bestehen.

Des différences très marquées se retrouvent également dans la répartition des teneurs en nitrates dans la partie superficielle de l'aquifère. Pour le calcul S3 (voir figure 9.8.7), les concentrations au Sud du domaine dépassent nettement les 50 mg/l. La répartition obtenue par le calcul S4 (figure 9.8.8.) ressemble à la situation de 1997. Cependant, en 2050, les concentrations sont nettement plus élevées comparées au calcul de référence. Alors que les panaches à hautes concentrations diminuent pour le calcul de référence, ils persistent pour la simulation S4.

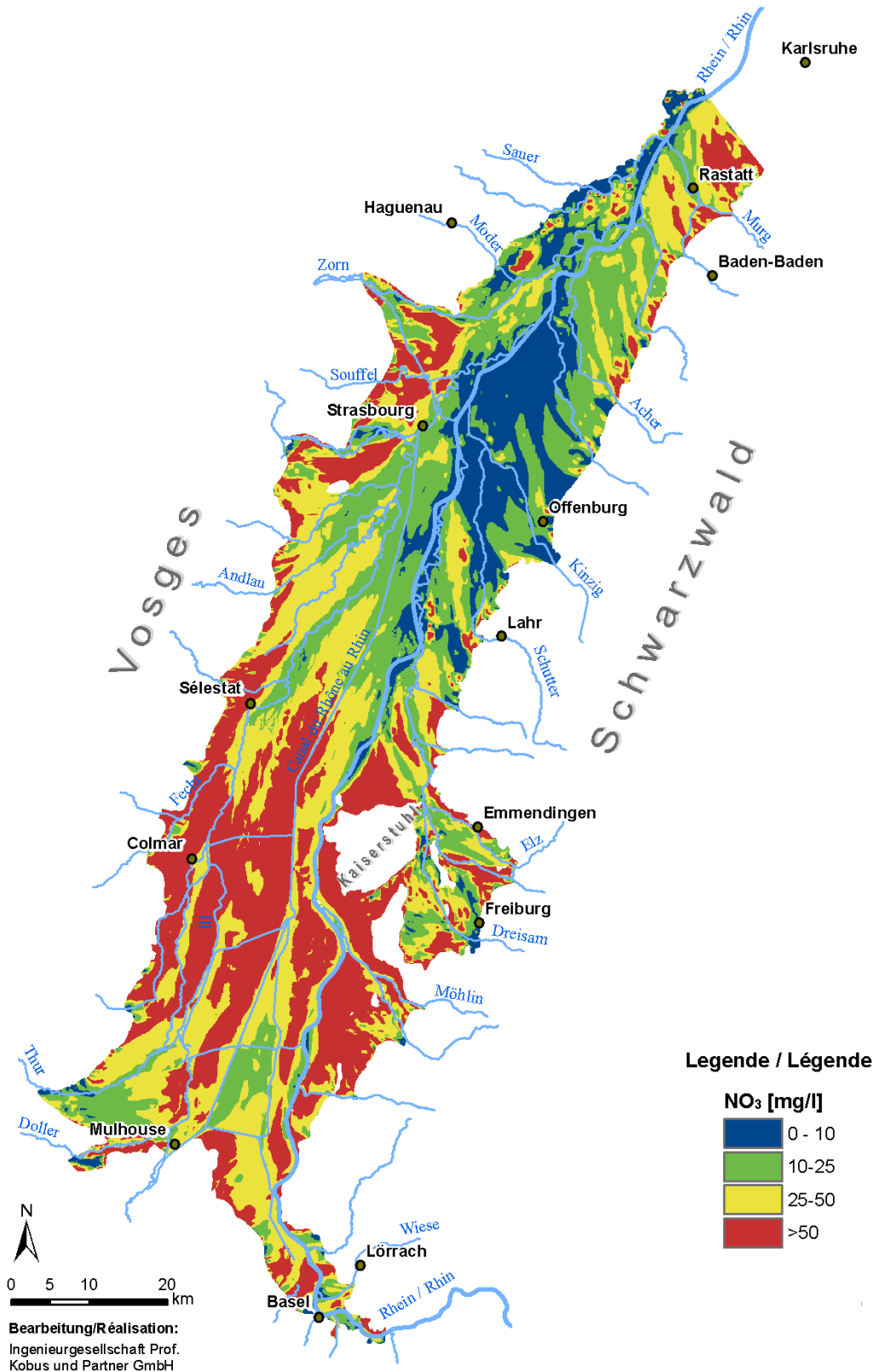


Abbildung 9.8.7: Berechnete mittlere Nitratverteilung 2050 in der Tiefenstufe 0 – 10 m für 2050 für den Sensitivitätslauf S3.
Figure 9.8.7: Concentrations en nitrates moyennées sur la profondeur 0-10 m pour l'année 2050 obtenues par le calcul S3.

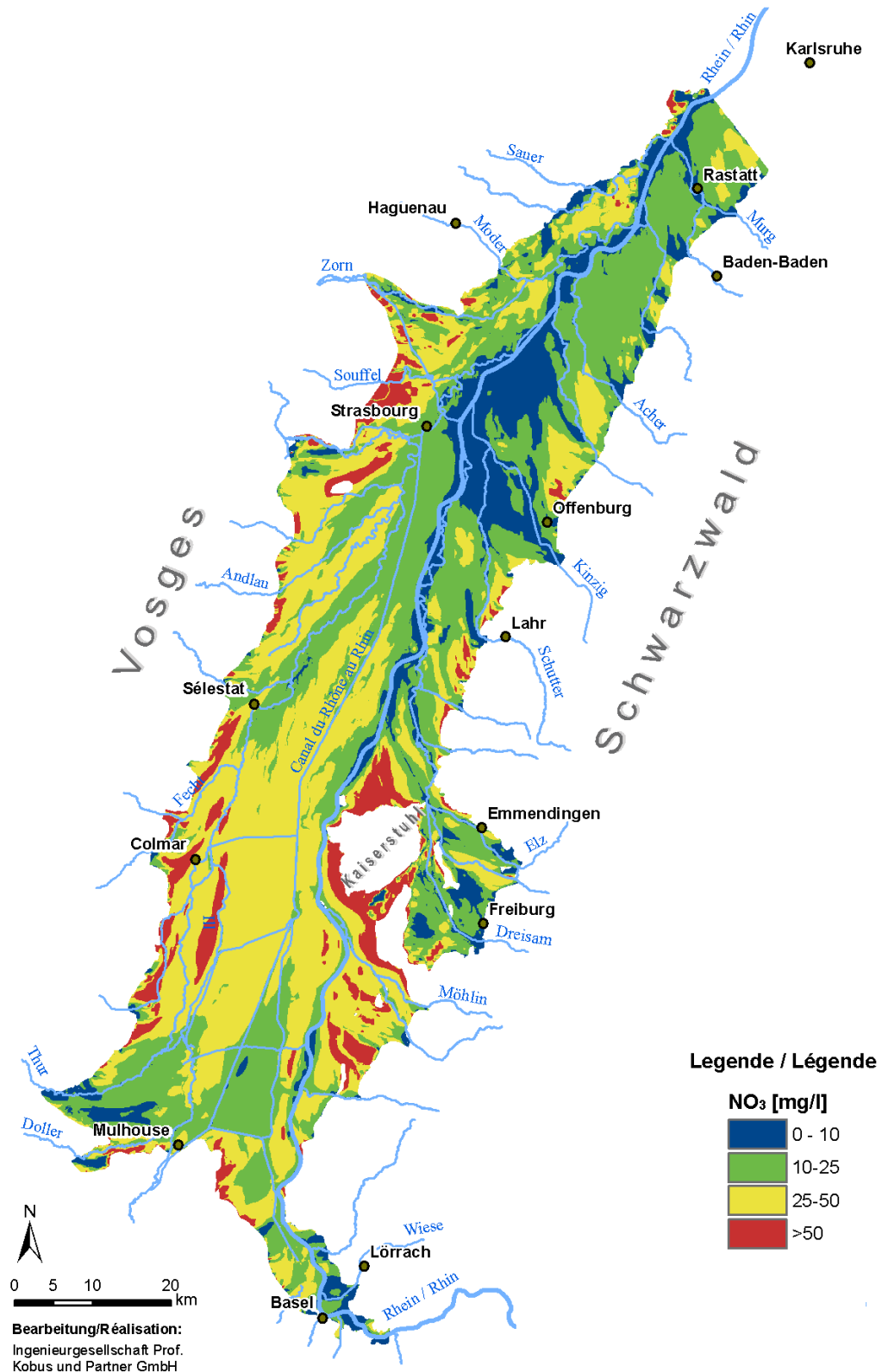


Abbildung 9.8.8: Berechnete mittlere Nitratverteilung 2050 in der Tiefenstufe 0 – 10 m für 2050 für den Sensitivitätslauf S4.
 Figure 9.8.8: Concentrations en nitrates moyennées sur la profondeur 0-10 m pour l'année 2050 obtenues par le calcul S4.

Namen und Anschriften der Autoren

Nom et directions des auteurs

- Ackerer, Philippe, Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, F-67000 Strasbourg
- Gudera, Thomas, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Referat 42 Grundwasser, Baggerseen, Postfach 210752, D-76157 Karlsruhe
- Huggenberger, Peter, Departement Geowissenschaften, Angewandte und Umweltgeologie, Universität Basel, Bernoullistr. 32, CH-4056 Basel
- Ihringer, Jürgen, Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe
- Koch, Peter, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Referat 42 Grundwasser, Baggerseen, Postfach 210752, D-76157 Karlsruhe
- Krieger, Simone, Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe
- Lang, Ulrich, Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH, Wilhelmstr. 11, D-70182 Stuttgart
- Lindenmaier, Falk, Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe
- Maidel-Türk, Barbara, Bundesanstalt für Wasserbau, Kussmaulstr. 17, D-76187 Karlsruhe
- Maier, Armin, Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH, Wilhelmstr. 11, D-70182 Stuttgart
- Morhard, Andreas, GIT HydroS Consult GmbH, Fahnenbergplatz, D-79098 Freiburg i.Br.
- Pollet, Ingrid, Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, F-67000 Strasbourg
- Schäfer, Wolfgang, Steinbeis-Transferzentrum Grundwassermodellierung, Odenwaldstr. 6, D-69168 Wiesloch
- Wingering, Michel, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Referat 42 Grundwasser, Baggerseen, Postfach 210752, D-76157 Karlsruhe
- Wirsing, Gunther, Regierungspräsidium Freiburg, Abteilung 9 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Albertstraße 5, D-79104 Freiburg i. Br.
- Zentgraf, Rolf, Bundesanstalt für Wasserbau, Kussmaulstr. 17, D-76187 Karlsruhe

Abkürzungen im Text

Abréviations dans le texte

ARAA	Association pour la Relance Agronomique en Alsace
ARC/INFO	DV-Anwendung eines Geographischen Informationssystems
APRONA	Association pour la Protection de la Nappe phréatique de la Plaine d'Alsace
AUE	Amt für Umweltschutz und Energie, Kanton Basel-Landschaft
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BL	Basel Landschaft
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières d'Alsace
BS	Basel Stadt
BÜK	Bodenübersichtskarte
CASCADE	Programmsystem der BAW zur numerischen Modellierung
DRAF	Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt
DGK 5	Deutsche Grundkarte im Maßstab 1 :5.000
DHM	Digitales Höhenmodell
DIREN	Direction de l'Environnement
DWD	Deutschem Wetterdienst
GIS	Geographisches Informationssystem
GPI	Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Basel
GWN_BW	Modell zur Berechnung der Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg
HGK	Hydrogeologische Karte
HBV:	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
HN-Modell:	Hydrodynamisches Modell
IWK	Institut für Wasserwirtschaft und Kultur-technik der Universität Karlsruhe
Landsat TM:	Fernerkundungssatellit Landsat – Thematic Mapper
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
LGRB	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg im Regierungspräsidium Freiburg
LUFA	Staatl. Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Augustenberg, Karlsruhe-Durlach
MCH	Meteo Schweiz
MFR	Meteo France
MLR	Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum
MODFLOW	Modular Ground-Water Flow Model
MT3DMS	A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems
nFK	nutzbare Feldkapazität
OW	Oberwasser
Q	Abfluss
REKLIP	Regio-Klima-Projekt

pF	Saugspannung des Bodens
StaLa	Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart
STICS	Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard
TK	Topographische Karte
TK 50	Topographische Karte im Maßstab 1 :50.000
TU Dresden	Technische Universität Dresden
UMEG	Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg
UW	Unterwasser
W	Wasserstand
WISKI	Wasserwirtschaftliches Informationssystem der Wasser- und Schiff-fahrtsverwaltung des Bundes

Literaturverzeichnis

Bibliographie

Publikationen / Publications

- INTERREG II (2000): Bestandsaufnahme der Grundwasserqualität im Oberrheingraben. Région Alsace (Hrsg.). Strasbourg
- INTERREG II (2002): Grenzüberschreitende Erkundung des tiefen rheinnahen Grundwasserleiters zwischen Fessenheim und Breisach. Endbericht, Regierungspräsidium Freiburg.
- LfU (LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG) UND RÉGION ALSACE) (1996): Demonstrationsvorhaben zum Schutz und zur Bewirtschaftung des Grundwassers des deutsch-französisch-schweizerischen Oberrheingrabens. Karlsruhe.
- LFU (LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG) (2001): Grundwasserüberwachungsprogramm – Grundwasser-oberfläche im Oktober 1986, April 1988 und September 1991 im Oberrheingraben, Erläuterungen und Karten. Karlsruhe.
- RÉGION ALSACE Hrsg. (2000): Inventaire de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin Supérieur – Bestandsaufnahme der Grundwasserqualität im Oberrheingraben. Strasbourg.
- RÉGION ALSACE Hrsg. (2005): Inventaire de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin supérieur - Bestandsaufnahme der Grundwasserqualität im Oberrheingraben. Strasbourg.
- WaBoA (2004): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (Hrsg.).

Sonstige Quellen / autres sources

- BAW (Bundesanstalt für Wasserbau), 2005: Wasserspiegellagen des Rheins zwischen Basel und Karlsruhe von 1996 bis 2002, Tagesmittelwerte. Unveröffentlichter Bericht. Karlsruhe.
- BfG (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE), (2005): Jahresmittelwerte der Tritiumkonzentration im Rhein bei Weil am Rhein, Breisach und Worms und im Neckar bei Oberürkheim für den Zeitraum 1978 bis einschließlich 2005. Auszug aus einer Datenbank. Koblenz.
- GEOLOGISCH-PALÄONTOLOGISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT BASEL (2003): Lange Erlen – Grundwassermodell 2002. Technischer Bericht. Baudepartement Basel-Stadt.
- GIT (2004): Bestimmung der Sickerwassermenge für das Projektgebiet INTERREG III / MONIT - Validierung der Modellergebnisse. Unveröffentlichter Projektbericht der GIT HydroS Consult GmbH
- GIT (2004): MONIT - Bestimmung der Sickerwassermenge - Informationen zu Simulation und Datenaufbereitung. Unveröffentlichter Projektbericht der GIT HydroS Consult GmbH
- IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY), (2004): Isotope Hydrology Information System. The ISOHIS Database. Accessible at: <http://isohis.iaea.org>
- IWK (INSTITUT FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURTECHNIK DER UNIVERSITÄT KARLSRUHE), (2005): Bereitstellung von Zuflussdaten auf französischer und deutscher Seite des Grundwassermodells des Oberrheingrabens (INTERREG III). Karlsruhe.
- KOROM, S.F. (1992): Natural denitrification in the saturated zone. A review. Water Resour. Res. 28(6), 1657-1668.

- LANG, U., KEIM, B., MAIER, A., ACKERER, PH, SCHÄFER, W. (2004): Modellierung der Grundwasserbelastung durch Nitrat im Oberrheingraben (MoNit) – Vorstudie zur Konzeption des Strömungs- und Transportmodells. Unveröffentlichter Projektbericht.
- LIFE (1996): Demonstrationsvorhaben zum Schutz und zur Bewirtschaftung des Grundwassers des deutsch-französisch-schweizerischen Oberrheingrabens.
- MCDONALD, M.G., HARBAUGH, A.W. (1988): A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586 p
- REKLIP (1995): Klimaatlas Oberrhein Mitte-Süd. Hrsg: Trinationale Arbeitsgemeinschaft Regio-Klima-Projekt.
- RICHERT, J (2004): Détermination des vitesses de transfert de l'eau, des nitrates et d'autres solutés dans la zone non saturée dans un loess profond. Rap. Chambre d'Agriculture du Bas Rhin, 85p, 77 ill.
- SEVRUK, B., KLEMM, S. (1989): Catalogue of national standard precipitation gauges. World Meteorological Organization (WMO), Instruments and Observing Methods Report. WMO / TD-No. 313.
- STARR, R.C., GILLHAM, R. W. (1993): Denitrification and organic carbon availability in two aquifers, *Ground Water* 31(6), 934-947.
- ZeBIS (2004): Zentrales BaggerseeInformationssystem für Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.).
- ZECHNER E. (1996): Hydrogeologische Untersuchungen und Tracertransport – Simulation zur Validierung eines Grundwassermodells der Langen Erlen (Basel-Stadt). Dissertation. Universität Basel.
- ZENG Z., WANG P.P. (1999): MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide. University of Alabama, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Contract Report SERDP-99-1.



Kanton Basel-Landschaft

