

**Modélisation de l'aquifère
transfrontalier du Pliocène de
Wissembourg – Bad Bergzabern**

Rapport final

BRGM/RP-60230-FR
Novembre 2011

89 3740 46 -625 5

Novembre 2011



géosciences pour une
brgm



3 5000 00091222 9

Modélisation de l'aquifère transfrontalier du Pliocène de Wissembourg – Bad Bergzabern

Rapport final

BRGM/RP-60230-FR

Novembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2010 10EAU71

V. Hamm, S. Schomburgk

Vérificateur :

Nom : Y. Barthélémy

Date : 06/09/11

Signature :

Approbateur :

Nom : A. – V. Barras

Date : 23/11/11

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Modèle hydrodynamique, gestion ressource eau, Pliocène, aquifère transfrontalier, Alsace, Allemagne, Rhénanie – Palatinat, Wissenbourg Bad Bergzabern

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

S. Schomburgk, V. Hamm - Modélisation de la nappe profonde du Pliocène de Wissenbourg/Bad Bergzabern. Rapport final -.2011, Rap. BRGM/RP-60230-FR, 89 p., 76 fig.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Cette étude franco-allemande s'inscrit dans le programme INTERREG IV A, « Gestion transfrontalière de l'approvisionnement en eau potable dans le Palatinat du Sud et en Alsace du Nord 2008-2030. INTERREG IV dans le cadre de la priorité « Assurer un développement durable de l'espace du Rhin Supérieur ». Elle a fait l'objet d'une convention de recherche et développement partagés, signée le 28 mai 2010 entre le GÖZ « WISSEMBOURG – BAD BERGZABERN » et le BRGM.

Ce projet vise, en particulier, à mieux comprendre le fonctionnement de l'aquifère multicouche Pliocène transfrontalier entre le Palatinat-Sud et l'Alsace- et à définir une stratégie de développement pour assurer l'approvisionnement en eau potable en période de pointe, dans le contexte des scénarios climatiques jusqu'à 2030.

Cette étude fait suite à des études antérieures sur l'aquifère du pliocène dans le secteur de Wissembourg-Bad Bergzabern (rapports BRGM/RP-50724-FR de 2001 et BRGM/RP-56610-FR de 2008). Dans le cadre de cette nouvelle étude, 10 nouveaux forages ont été réalisés en 2009 (Haltenhof Nord HN I, II et III, Haltenhof Sud HS II et III, Steinfeld W I et II, Niederotterbach N II et III, Kapsweyer Grillplatz K II) afin de mieux caractériser les différents aquifères, notamment l'aquifère médian du Pliocène qui, dans les études précédentes, était rattaché à l'aquifère supérieur du Quaternaire. Une des questions du groupe de travail transfrontalier est de mieux connaître l'aquifère médian et ses relations avec l'aquifère supérieur et l'aquifère profond en vue d'une meilleure gestion de la ressource en eau.

Il a donc été procédé, à partir du logiciel MARTHE, à la réalisation d'un modèle hydrodynamique affiné de l'aquifère multicouche de Wissembourg - Bad Bergzabern. La nouvelle structure du modèle intègre l'étude géologique détaillée du site qui a été réalisée dans le cadre du projet Interreg par le bureau d'étude allemand. La nouvelle structure verticale du modèle (3 niveaux aquifères séparés par des intercalaires peu perméables), a donné lieu à un recalage des paramètres hydrodynamiques caractérisant chaque aquifère (perméabilité, emmagasinement libre et captif) et niveau intercalaire (drainance) ainsi que des paramètres hydriques pour le calcul de la recharge à travers la zone non saturée. Le modèle permet de reproduire de manière satisfaisante la charge hydraulique de chaque niveau aquifère aux piézomètres de référence. Un calcul des bilans hydriques permet d'identifier les périodes de stockage et déstockage du système aquifère multicouche.

La modélisation des trois scénarii prévisionnels basés sur différents débits d'exploitation et de différents taux de pluies montre les différentes répercussions sur l'aquifère et l'exploitabilité de la ressource. Ces simulations permettent les conclusions suivantes :

Dans l'aquifère intermédiaire MGWL, un prélèvement de 300.000 m³/a est possible d'une manière durable, sans que cela ait une influence significative sur l'aquifère supérieur OGWL. Des pics de consommation en période estivale peuvent être couverts

par des prélèvements parallèles dans l'aquifère MGWL et l'aquifère profond UGWL, mais une exploitation sur une longue période engendrerait néanmoins des rabattements importants.

Il est possible de prélever durablement un volume annuel de 300.000 m³/a dans l'aquifère profond UGWL. En périodes de pics de consommation en eau potable, le débit peut être augmenté temporairement, car le niveau piézométrique se régénère très rapidement dans cet aquifère fortement captif. Ces apports viennent de l'amont de ce même aquifère et de l'aquifère médian.

Ces aquifères constituent un réservoir qui pourrait sans doute être exploité à des débits plus importants. Pour confirmer et préciser cette assertion, le suivi continu des niveaux des nappes et des débits pompés est cependant indispensable (pompage d'essai au sein des puits d'exploitation). Ainsi même si des réserves en eaux souterraines sont disponibles, leur exploitation devra s'accompagner d'un suivi piézométrique à long terme (programme de monitoring).

Il convient de s'assurer qu'une exploitation de l'aquifère intermédiaire ne provoque pas une baisse significative et généralisée de son niveau naturel. A une échelle plus locale associée à l'aire rapprochée du pompage, il convient de vérifier si un transfert vertical s'effectue vers l'aquifère intermédiaire.

Le calcul de l'âge indique des eaux souterraines de l'aquifère profond peuvent atteindre 200 à 400 ans suivant les paramètres choisis. L'analyse de sensibilité du modèle hydrodynamique suivant les variables d'entrées révèle que les âges des eaux calculés par le modèle varient très peu avec un changement de porosité, perméabilité ou recharge. L'âge important des eaux souterraines profondes garanti une bonne protection de cette ressource, dans l'aquifère profond comme dans l'aquifère intermédiaire.

Les connaissances actuelles de l'extension et des conditions aux limites au sud-ouest de la zone d'étude ne permettent pas de déterminer l'origine de l'eau souterraine au sud et son exutoire. Pour cette raison, le modèle hydrodynamique a été simplifié. Il s'arrête à la hauteur du piézomètre installé le plus au sud. Son niveau piézométrique correspond au potentiel imposé de la limite. Toutefois la sensibilité du modèle par rapport au niveau imposé à cette limite sud-ouest est faible, même en considérant le scénario « pessimiste » d'une sécheresse observée pendant 3 ans et transposée à une période de 30 ans.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Modélisation du système aquifère multicouche	13
2.1. RAPPEL SUR LES CARACTERISTIQUES GENERALES DE CET AQUIFERE	13
2.2. CONSTRUCTION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE	13
2.2.1. Passage du modèle géologique au modèle hydrodynamique.....	13
2.2.2. Conditions aux limites	24
2.3. CALAGE DU MODELE	26
2.3.1. Les données d'« entrée » du modèle	26
2.3.2. Les données en « sortie » du modèle.....	34
2.4. BILANS HYDRODYNAMIQUES.....	51
3. Scenarii de gestion de l'aquifère multicouche.....	57
3.1. PRÉCIPITATIONS ET ÉVAPOTRANSPIRATION APPLIQUÉES AUX SCENARII	60
3.2. RÉSULTATS DES TROIS SCENARII	62
3.2.1. Schéma du bilan global.....	62
3.3. RÉSULTATS DU SCÉNARIO I : PIEZOMETRIE.....	64
3.3.1. Impact des prélèvements du scénario I sur les trois nappes à proximité du puits d'exploitation.....	64
3.3.2. Impact des prélèvements du scénario I sur les nappes dans la zone d'étude	65
3.4. RÉSULTATS DU SCÉNARIO I : BILANS HYDROLOGIQUES DES 3 AQUIFERES	69
3.4.1. Bilan de l'aquifère supérieur.....	69
3.4.2. Bilan de l'aquifère intermédiaire	70
3.4.3. Bilan de l'aquifère profond.....	71
3.5. RÉSULTATS DU SCÉNARIO II : PIEZOMETRIE.....	71
3.5.1. Impact des prélèvements du scénario II sur les trois nappes à proximité des puits d'exploitation	72
3.5.2. Impact des prélèvements du scénario II sur la nappe profonde dans la zone d'étude	74

3.6. RÉSULTATS DU SCÉNARIO II : BILANS HYDROLOGIQUES DE L'AQUIFERE PROFOND	75
3.7. RÉSULTATS DU SCÉNARIO III : PIÉZOMÉTRIE	76
3.7.1. Impact des prélèvements du scénario III sur les trois nappes à proximité des puits d'exploitation	76
3.7.2. Impact des prélèvements du scénario III sur la nappe profonde dans la zone d'étude.....	77
3.8. RÉSULTATS DU SCÉNARIO III: BILANS HYDROLOGIQUES DE AQUIFERE PROFOND	78
3.9. ARTESIANISME ET DIFFERENCE DES CHARGES	79
3.10. TRAJECTOIRES ET TEMPS DE RESIDENCE	81
4. Conclusions et perspectives	87
5. Bibliographie	89

Liste des illustrations

Figure 1: Géométrie 2001 et 2010 de l'aquifère multicouche	15
Figure 2: Toit (MNT) et extension pour l'aquifère supérieur du Quaternaire. Gauche : modèle géologique, droite : modèle hydrodynamique	16
Figure 3 : Mur de l'Aquifère supérieur du Quaternaire. Gauche : modèle géologique, droite : modèle hydrodynamique.....	17
Figure 4 : Mur de l'intercalaire séparant l'aquifère supérieur et médian. Gauche : modèle géologique, droite : modèle hydrodynamique	18
Figure 5 : Mur de l'Aquifère médian du Pliocène. Gauche : modèle géologique, droite : modèle hydrodynamique.....	19
Figure 6 : Mur de l'intercalaire séparant l'aquifère médian de l'aquifère profond. Gauche : modèle géologique, droite : modèle hydrodynamique	20
Figure 7 : Mur de l'aquifère profond du Pliocène. Gauche : modèle géologique, droite : modèle hydrodynamique.....	21
Figure 8 : Localisation des plans de coupe dans le modèle	22
Figure 9 : Coupe 1 N-S du modèle (mailles de 250 m de côté)	23
Figure 10 : Coupe 2 W-E du modèle (mailles de 250 m de côté).....	23
Figure 11 : Coupe 3 W-E du modèle (mailles de 250 m de côté).....	24
Figure 12 : Conditions aux limites du système aquifère multicouche :les bordures vertes représentent les potentiels imposés, ailleurs flux nul). De gauche à droite : aquifère supérieur, médian et profond.	25

Figure 13 : Pluie et ET ^P journalières (Tagesniederschlag und Verdunstung).....	27
Figure 14 : Répartition de la réserve disponible pour l'évapotranspiration (NFK : Nutzbare Feld kapazität)	28
Figure 15 : Plan de positionnement des puits et piézomètres à Steinfeld	29
Figure 16 : Prélèvements en eau potable dans l'aquifère médian (II) et profond (III).....	30
Figure 17 : Répartition spatiale des perméabilités par niveau aquifère	32
Figure 18 : Répartition spatiale du facteur de drainance par niveau intercalaire.....	33
Figure 19 : Localisation des piézomètres par aquifère	35
Figure 20 : Charges hydrauliques à Deutschhof, aquifères II et III (pompage d'essai dans All en Oct-Nov 2006)	36
Figure 21 : Charges hydrauliques à Dierbachpegel 1477, aquifères I et II.....	36
Figure 22 : Charges hydrauliques à Dierbach I, aquifère II.....	37
Figure 23 : Charges hydrauliques à Heidenbrunnenho, aquifères II et III	37
Figure 24 : Charges hydrauliques à Haltenhof Nord, aquifères I, II et III.....	38
Figure 25 : Charges hydrauliques à Haltenhof Sud, aquifères II et III	38
Figure 26 : Charges hydrauliques à Otterbach, aquifères I, II et III (pompage d'essai dans All en mai 2000)	39
Figure 27 : Charges hydrauliques à Niederotterbach, aquifères II et III	39
Figure 28 : Charges hydrauliques à Wasserwerk Steinfeld W, aquifères I et II (pompage d'essai à WII).....	40
Figure 29 : Charges hydrauliques à Steinfeld Brunnen, aquifères I, II et III (pompage d'essai à Steinfeld WII en nov 2009).....	40
Figure 30 : Charges hydrauliques à Schweighofen, aquifères I et II	41
Figure 31 : Charges hydrauliques à Kapsweyer Bahnhof, aquifère I.....	41
Figure 32 : Charges hydrauliques à Kapsweyer Grillplatz, aquifères I et II	42
Figure 33 : Charges hydrauliques à Flugplatz, aquifères I et III (débordement par la Lauters dans aquifère I).....	42
Figure 34 : Charges hydrauliques à Hippodrom, aquifères I, II et III	43
Figure 35 : Charges hydrauliques à Bienwald 1339, aquifères I et III	43
Figure 36 : Charges hydrauliques à Bienwald 1339 aquifères I et III	44
Figure 37 : Charges hydrauliques à Mundat, aquifère III	44
Figure 38 : Charges hydrauliques à Geitershof, aquifères I, II et III (avril 2007 : pompage pour l'irrigation).....	45
Figure 39 : Cartes des isopièzes « observées » et simulées pour l'aquifère superficiel	46
Figure 40 : Cartes des isopièzes « observées » et simulées pour l'aquifère médian	47
Figure 41 : Cartes des isopièzes « observées » et simulées pour l'aquifère profond	48
Figure 42 : Graphique des charges calculées en fonction des charges mesurées (référence du 2 juillet 2009).....	49

Figure 43 : Différences des charges (m) entre aquifère II/I et III/II	50
Figure 44 : Zone d'artésianisme de l'aquifère profond (violet : artésien).....	51
Figure 45 : Bilans mensuels pour l'aquifère superficiel (A I).....	53
Figure 46 : Bilans mensuels pour l'aquifère médian (A II).....	54
Figure 47 : Prélèvements et stockages mensuels pour l'aquifère médian (A II), avec indication de l'infiltration sur l'axe secondaire.....	54
Figure 48 : Bilans mensuels pour l'aquifère profond (A III).....	55
Figure 49 : Prélèvements en eau potable dans l'aquifère médian (II) et profond (III) et chronique piézométrique du piézomètre D (aquifère III).....	57
Figure 50 : Plan de positionnement des puits et piézomètres à Steinfeld.....	58
Figure 51 : Prélèvements dans le puits Bienwald (courbe rouge, m3/h) et charges imposées pour les scénario II et III (courbe bleue).....	59
Figure 52 : Valeurs moyennes mensuelles des pluies et ETPs, ainsi que des pluies efficaces simulées par le modèle.....	60
Figure 53 : Bilan hydro-climatique mesuré (1999-2009) et simulé (2009-2030)	61
Figure 54 : Bilan hydraulique et échanges entre les différents aquifères.Exemple du mois de décembre 2030 (Scénario II).....	62
Figure 55 : Impact des prélèvements du scénario I sur les trois aquifères à Steinfeld (au voisinage direct du puits d'exploitation. Traduction : verfüllt : abandonné ; Entnahmepumpe : puits d'exploitation, Modellzelle : maille du modèle).....	64
Figure 56 : Impact des prélèvements du scénario I sur l'aquifère supérieur (aquifère I)	65
Figure 57 : Impact des prélèvements du scénario I sur l'aquifère intermédiaire	66
Figure 58 : Impact des prélèvements du scénario I sur l'aquifère profond dans toute la zone d'étude.....	67
Figure 59 : Impact des prélèvements du scénario I sur l'aquifère supérieur (aquifère I). Les courbes en tirets correspondent au scénario sans pompes Ibis.....	68
Figure 60 : Composantes du bilan hydraulique pour l'aquifère supérieur, de 1999 à 2030 (Scénario I et II).....	69
Figure 61 : Composantes du bilan hydraulique pour l'aquifère intermédiaire, de 1999 à 2030 (Scénario I).....	70
Figure 62 : Composantes du bilan hydraulique pour l'aquifère profond, de 1999 à 2030 (Scénario I).....	71
Figure 63 : Impact des prélèvements du scénario II sur les trois aquifères à Steinfeld (- 2030)	72
Figure 64 : Impact des prélèvements du scénario II et du scénario III sur les niveaux aquifères à Bienwald.....	73
Figure 65 : Impact des prélèvements du scénario IIb sur l'aquifère profond (aquifère III)	74
Figure 66 : Composantes du bilan hydraulique de l'aquifère profond, de 1999 à 2030 (Scénario II).....	75

Figure 67 : Répercussions des prélèvements et de la pluie efficace réduite du scénario III (courbes bleues) sur les trois aquifères en comparaison avec le scénario II)	76
Figure 68 : Impact des prélèvements du scénario III sur le niveau profond (aquifère III) de la zone d'étude(-2030), avec deux niveaux de charge imposés (ligne discontinue : niveau minimal imposé).....	77
Figure 69 : Composantes du bilan hydraulique pour l'aquifère profond, de 1999 à 2030 (Scénario III), avec les deux niveaux de potentiel imposé : 155.75 m NN (lignes continues) et 154.8 mNN (lignes discontinues).....	79
Figure 70 : Différence Aquifère intermédiaire – Aquifère supérieur 2000 (à gauche) et 2030 (à droite) (valeurs jaunes : aquifère intermédiaire supérieure à l'aquifère intermédiaire).....	80
Figure 71 : Différence Aquifère profond – Aquifère supérieur 2000 (à gauche) et 2030 (à droite). Drainance vers le bas dans les zones oranges	80
Figure 72 : Trajectoires et âges des eaux dans l'aquifère profond calculés par le modèle hydrodynamique.....	81
Figure 73 : Profil schématique des temps de percolation et de résidence dans l'aquifère profond (temps en années)	82
Figure 74 :: Répartition de l'âge dans l'aquifère profond pour une perméabilité divisée par dix et la recharge diminuée de 15%.....	84
Figure 75 :: Répartition de l'âge dans l'aquifère profond pour une recharge de $\pm 20\%$	84
Figure 76: Répartition de l'âge dans l'aquifère profond pour une recharge de 120 et 50 mm/an.....	85
Tableau 1 : Pompages d'essai dans l'aquifère II et III de 2000 à 2010 (m ³ /h)	30
Tableau 2 : Répartition des perméabilités du système multicouche.....	31

1. Introduction

Cette étude se profile dans la continuité des travaux réalisés par le BRGM depuis 2001 en partenariat avec des bureaux d'étude allemands sur des modèles de simulation de l'aquifère transfrontalier multicouche du Pliocène dans le secteur de Wissembourg – Bad Bergzabern (rapports BRGM/RP-50724-FR et BRGM/RP-56610-FR) en vue de la gestion de la ressource en eau potable de ces deux communes.

Cette étude s'inscrit dans le projet INTERREG IV qui a débuté en octobre 2008 et s'achèvera en 2012. Elle a fait l'objet d'une convention de recherche et développement partagés, signée le 28 mai 2010 entre le GÖZ « WISSEMBOURG – BAD BERGZABERN » et le BRGM.

Les travaux de modélisation réalisés à cette occasion vont dans le sens d'une meilleure connaissance du système aquifère multicouche. Ainsi, un modèle géologique a été réalisé par le bureau allemand LGB-RP¹ sur la zone concernée (côté allemand et français) à partir de nouveaux piézomètres et mesures géo-électriques. Ce modèle a permis de convertir le modèle existant en un modèle d'écoulement souterrain à cinq couches, lequel a ensuite été utilisé pour différentes simulations hydrodynamiques.

Cette étude a eu pour objet le calage du modèle hydrodynamique (conditions aux limites, perméabilité des couches, emmagasinement, recharge de la nappe) et la réalisation de scénarii d'exploitation des aquifères médian et profond en vue d'une gestion maîtrisée de la ressource en eau potable.

Le présent rapport présente les différentes étapes réalisées à savoir :

- La conceptualisation du système multicouche hydrogéologique (chapitre 2.1) et la caractérisation des paramètres hydrodynamiques des horizons aquifères et, notamment du niveau imperméable (chapitre 2.2 à 2.3), en intégrant :
 - les nouvelles données acquises (coupes géologiques des forages, données sur les eaux de surface, etc.) et la définition de la géométrie du modèle à 3 couches
 - des données Pluie/Recharge ainsi que des différents prélèvements des puits installés dans différents niveaux ;
 - des données du réseau hydrographique de surface en fonction des connaissances actuelles (relation eaux surfaces/eaux souterraines) ;
- Le calage du modèle à partir des nouvelles données et avec prise en compte de la couche complémentaire (niveau semi-perméable ?) du modèle (chapitre 2.2) ;

¹ Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz

- L'établissement de bilans des écoulements pour les trois aquifères étudiés (chapitre 2.4)
- La simulation de 3 principaux scénarios différents selon les taux de prélèvements, le type d'aquifères exploités et selon des taux de précipitations variable (chapitres 3.2 à 3.10).
- Le calcul de l'âge des eaux souterraines de l'aquifère profond a été appréhendé à l'aide du modèle et au regard des résultats fournis par Wolfram, 2011.

2. Modélisation du système aquifère multicouche

2.1. RAPPEL SUR LES CARACTERISTIQUES GENERALES DE CET AQUIFERE

Dans la zone de Wissembourg / Bad Bergzabern où se trouve également le Bienwald, on peut distinguer généralement trois formations perméables : les deux aquifères du Pliocène (aquifères III et II) et l'aquifère du Quaternaire (aquifère I), séparés par des couches argileuses. Ici, l'objet de la recherche est l'aquifère III, le plus profond, découvert à Kapsweyer en 1979.

Cet aquifère a été découvert par hasard, au cours de recherches d'eau à Kapsweyer près de la frontière franco-allemande. L'eau jaillissait avec une pression de 1,3 bar d'un aquifère graveleux du Pliocène à une profondeur de 50 m. Ce niveau captif est séparé des aquifères superficiels par une couche d'argile imperméable.

A partir des interprétations des coupes géologiques des piézomètres et des observations du Service Géologique Régional, un modèle du système aquifère avait été bâti en 2000. Il s'agit d'une alternance de sables moyens à grossiers, en partie des sables argileux, formant des couches perméables. Ces aquifères sont séparés par des intercalaires argileux à silteux.

Les aquifères et intercalaires sont décrits dans la figure 1.

2.2. CONSTRUCTION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

La modélisation géologique d'un aquifère est un préalable à la réalisation de modèles d'écoulement : elle consiste à construire une représentation en 3D des formations géologiques et éventuellement de leurs propriétés physiques (porosité, perméabilité). Le modèle géologique du système aquifère multicouche de la nappe du Pliocène de Wissembourg – Bad Bergzabern a été réalisé avec le géo modeleur GOCAD par le Service Géologique de la Rhénanie-Palatinat (LGB-RP). Il a servi de cadre au modèle de simulation dynamique des écoulements développé avec le logiciel MARTHE™ pour une structure en 5 couches dont 3 niveaux aquifères. Le code MARTHE™ a déjà été utilisé pour les modèles précédents de l'aquifère multicouche, en 2001 et 2007 (phases 1 et 2 du projet INTERREG II). Il permet notamment de calculer les écoulements en 3 dimensions et en multicouche (2.5 D) pour des nappes libres ou captives, avec prise en compte des échanges nappe-rivière.

2.2.1. Passage du modèle géologique au modèle hydrodynamique

Un modèle géologique à 5 couches (dont 3 couches aquifères) a été construit avec GOCAD à partir de l'étude géologique affinée du site (données de forages et mesures géophysiques). Ce modèle couvre une fenêtre de 12 km x 25 km. Ces couches représentent du sommet à la base :

- L'aquifère supérieur du Quaternaire (Pléistocène), constitué de sables moyens à grossiers sur une épaisseur de 2 à 53 m (moyenne de 22,7 m)
- Un niveau intercalaire argileux à fort pourcentage de fines, de 0 à 20 m d'épaisseur (moyenne de 5,6 m)
- L'aquifère médian du Pliocène, constitué de sables fins à moyens sur une épaisseur de 4 à 87 m (moyenne de 38,4 m)
- Un niveau intercalaire d'argiles et de limons sur une épaisseur de 1 à 30 m (moyenne de 13 m)
- L'aquifère profond du Pliocène, constitué de sables moyens à grossiers épais de 0 à 36 m (moyenne de 15,2 m)

La figure 1 donne une représentation schématique de la géologie du site ainsi que de la géométrie utilisée dans le modèle 2001 (2 couches aquifères, aquifère supérieur et médian regroupés) et la nouvelle géométrie 2010 avec 3 couches aquifères distinctes séparées par des intercalaires peu perméables.

Les différentes informations des couches (toit et substratum des couches) ont ensuite été exportées à un format approprié (X ; Y ; Z SUB 1 ; Z SUB 2 ;... ; Z SUB 5) au pas de 250 m pour être importées directement dans le préprocesseur du code MARTHE.

Les figures 2 à 7 montrent la géométrie du toit et du mur de chaque couche du modèle géologique et du modèle hydrodynamique selon une grille uniforme constituée de mailles carrées de 250 m de côté, maille retenue pour les simulations hydrodynamiques.

Le modèle hydrodynamique présente une extension latérale différente de celle du modèle géologique pour des raisons hydrogéologiques et de conditions aux limites hydrauliques. Aucun forage n'étant connu dans la partie sud de la nappe, les connaissances se limitent à l'interprétation des coupes géophysiques (étude 1999). Il a de ce fait été décidé par le groupe de travail transfrontalier (LAG) de limiter vers le sud le modèle d'écoulement au piézomètre profond le plus méridional.

Sur ces figures sont également représentées les failles majeures qui peuvent mettre en connexion les aquifères profond et médian (cas de la faille transversale au nord du modèle où l'on note une remontée du substratum marneux). La figure 8 indique la position de trois plans de coupe, une coupe Nord-Sud et deux coupes Ouest-Est. Les figures 9 à 11 représentent les sections de ces coupes, avec projection des piézomètres les plus proches.

Modèle multicouche „Bienwald“, 1999/2001

Substratum des couche modelisée avec „MARTHE“, BRGM

2010

Schichten Séquences	Aquifer bzw. Aquiclude Aquifère ou aquiclude	Stratigraphie Stratigraphie	Lithologie Lithologie	Mächtigkeit Épaisseur	GW-Modell Modèle	Modèle multi-couche (6)
OSF	Aquifer I (OGWL) <i>Aquifère I</i>	Quartär (Pleistozän) <i>Quaternaire (Pleistocène)</i>	mittel- bis grobkörnige Sande, wahrscheinlich im Süden nicht vertreten <i>sables moyens à grossiers, vraisemblablement non représentés au sud</i>	max. 15 m <i>max. 15 m</i>	Schicht 1 <i>couche 1</i>	OGWL (1)
	Zwischenschicht <i>Intercalaire</i>	Quartär (Pleistozän) <i>Quaternaire (Pleistocène)</i>	mehrere Lagen mit hohem feinkörnigen Anteil, im Mittelbereich durchgängig <i>plusieurs niveaux à fort % de fines, continus dans la zone centrale</i>	einige Meter <i>quelques m</i>		OZH (2)
MSF	Aquifer II (MGWL) <i>Aquifère II</i>	Tertiär (Pliozän) <i>Tertiaire (Pliocène)</i>	Fein- und Mittelsande, Zwischenlagen von Silt, org. Mat., durchgängig <i>sables fins à moyens, intercalaires de limons, mat. org., continus</i>	> 20 m <i>> 20 m</i>		MGWL (3)
UZH	Zwischenschicht (UZH) <i>Intercalaire</i>	Tertiär (Pliozän) <i>Tertiaire (Pliocène)</i>	Tone und Silte, geringer Kalkanteil, durchgängig <i>argiles et limons, faible % de calcaire, continu</i>	5 - 20 m <i>5 - 20 m</i>	Schicht 2 <i>couche 2</i>	TZH (4)
USF	Aquifer III (UGWL) <i>Aquifère III</i>	Tertiär (Pliozän) <i>Tertiaire (Pliocène)</i>	mittel- bis grobkörnige Sande, org. Mat., durchgängig <i>sables moyens à grossiers, mat. org., continu</i>	5 - 30 m <i>5 - 30 m</i>	Schicht 3 <i>couche 3</i>	UGWL (5)
t	Aquiferbasis <i>Substratum</i>	Tertiär (Mio/Oligozän) <i>Tertiaire (Mio/Oligocène)</i>	Tone, Tonmergel, Torsteine, Siltsteine, Kalksteine <i>Argile, marnes, argile et limons, calcaire</i>	einige 100 m <i>quelques 100 m</i>		Substratum (6)

Figure 1: Géométrie 2001 et 2010 de l'aquifère multicouche

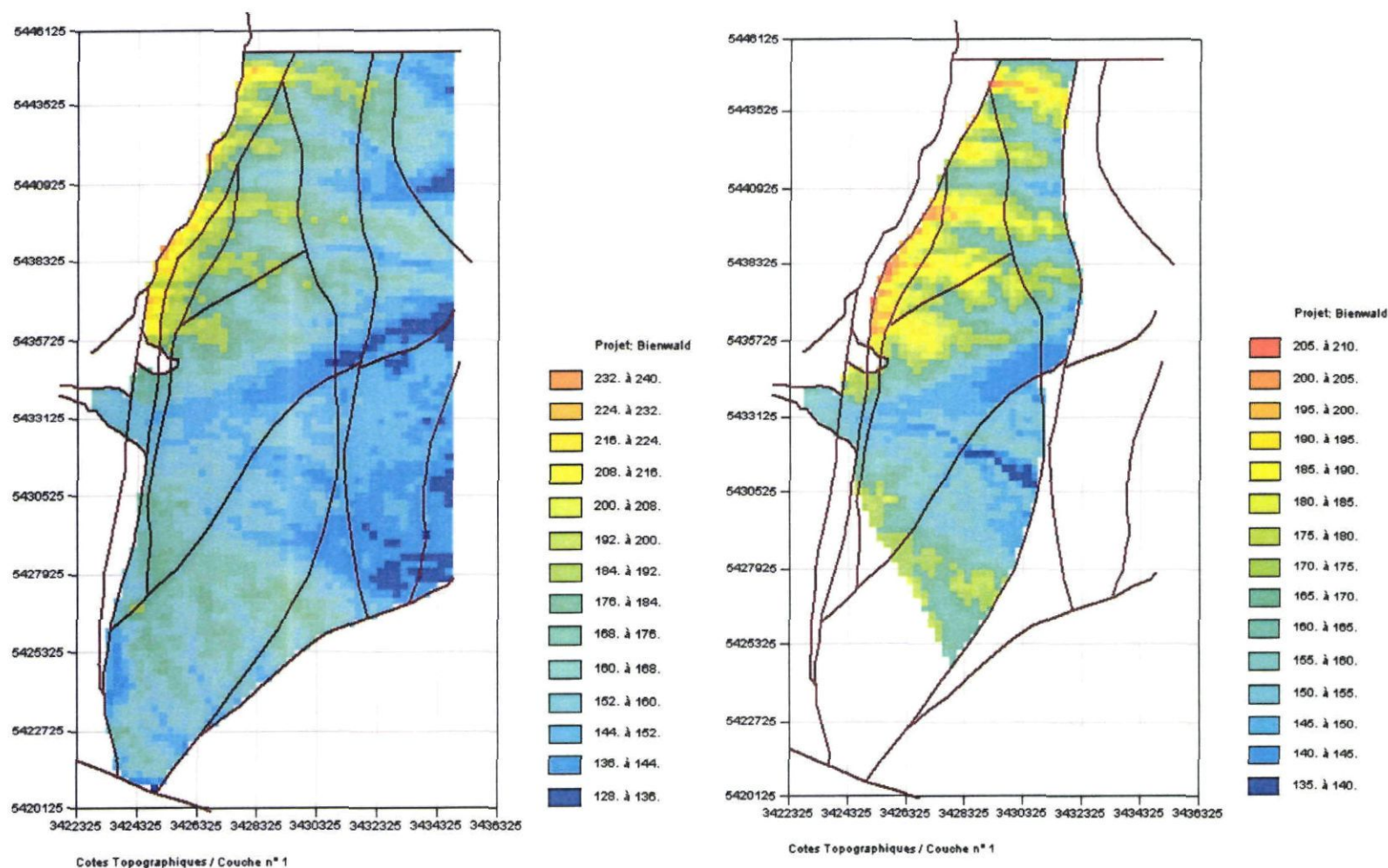


Figure 2: Toit (MNT) et extension pour l'aquifère supérieur du Quaternaire. Gauche : modèle géologique, droite : modèle hydrodynamique

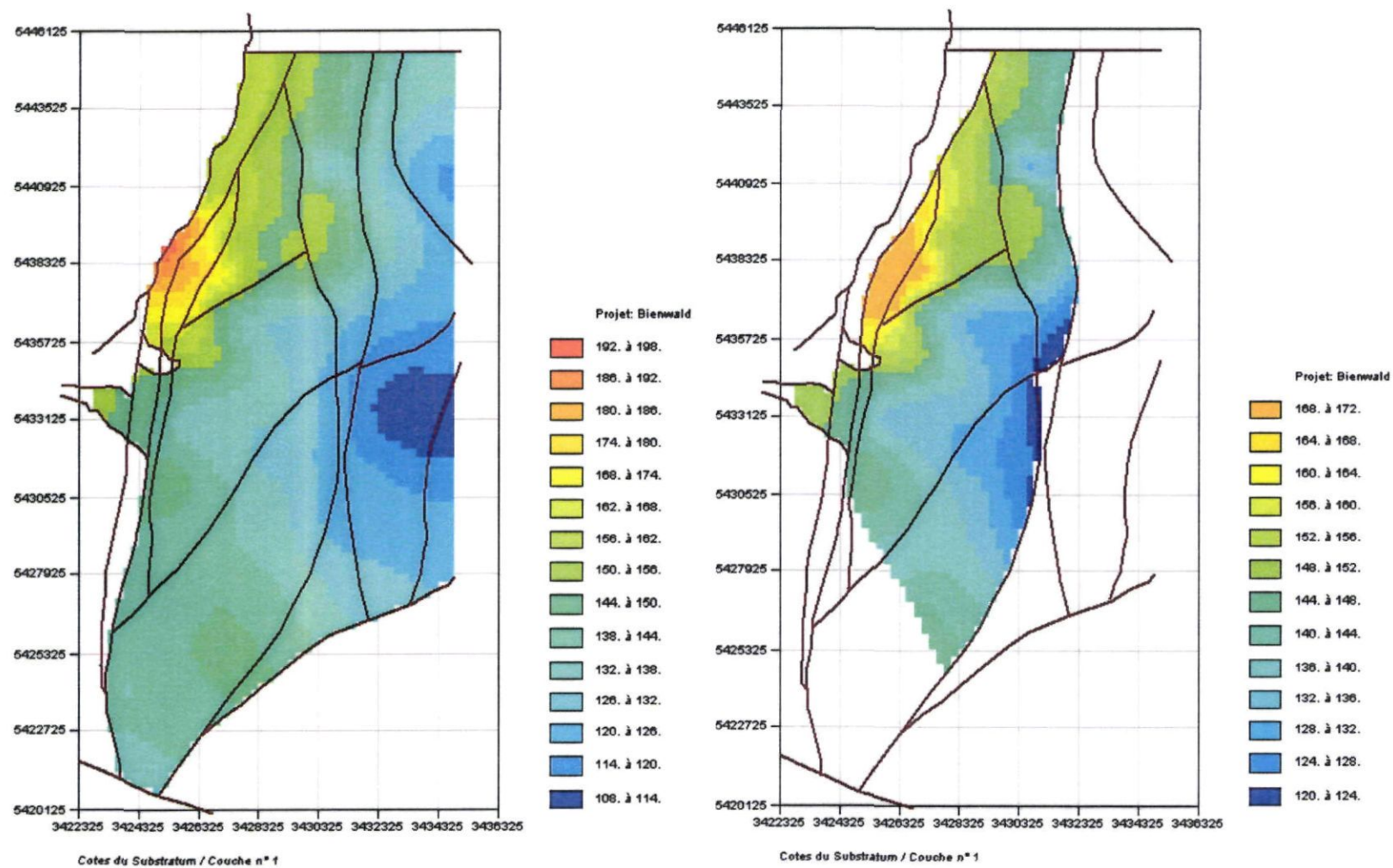


Figure 3 : Mur de l'Aquifère supérieur du Quaternaire. Gauche : modèle géologique, droite : modèle hydrodynamique

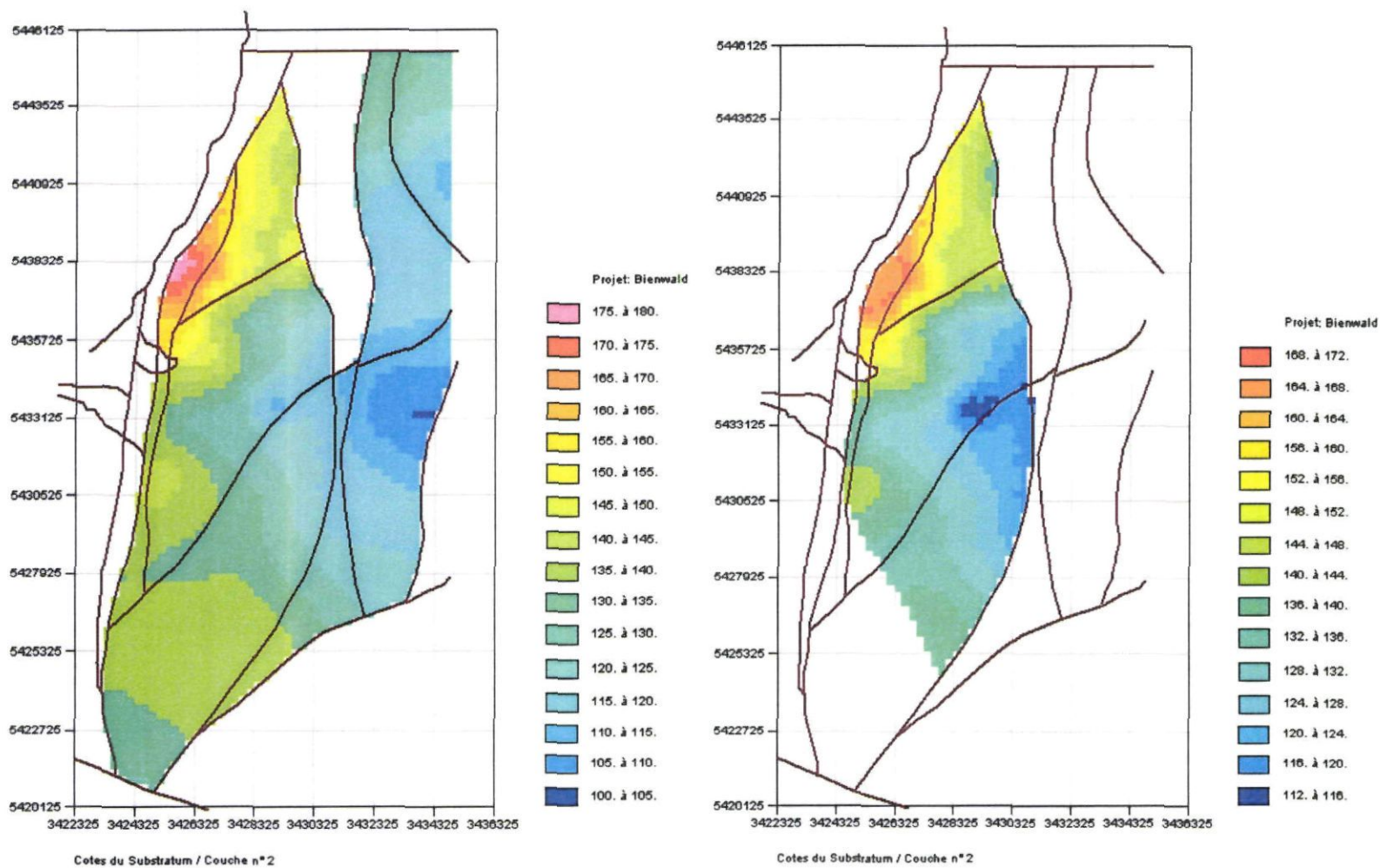


Figure 4 : Mur de l'intercalaire séparant l'aquifère supérieur et médian. Gauche : modèle géologique, droite : modèle hydrodynamique

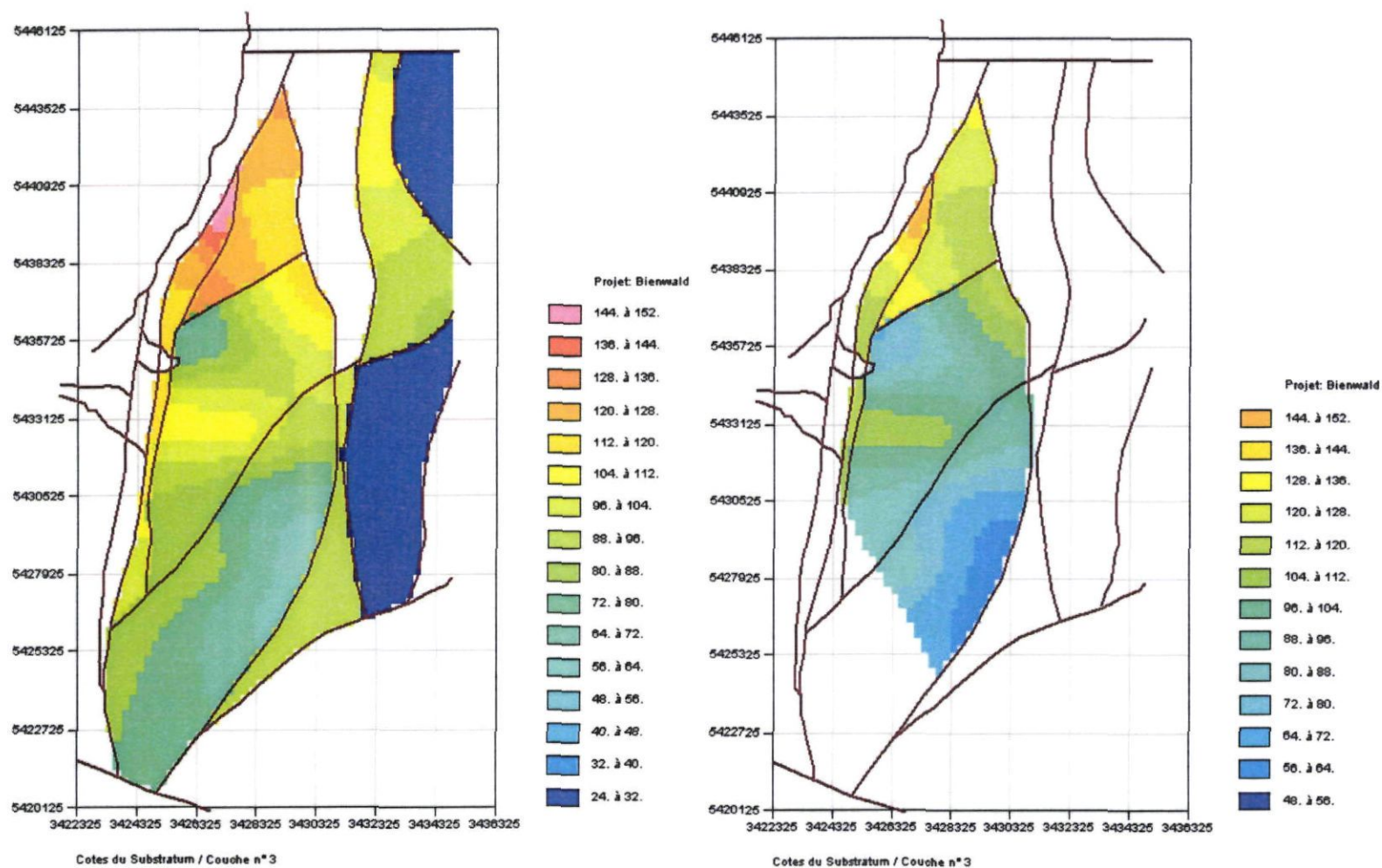


Figure 5 : Mur de l'Aquifère médian du Pliocène. Gauche : modèle géologique, droite : modèle hydrodynamique

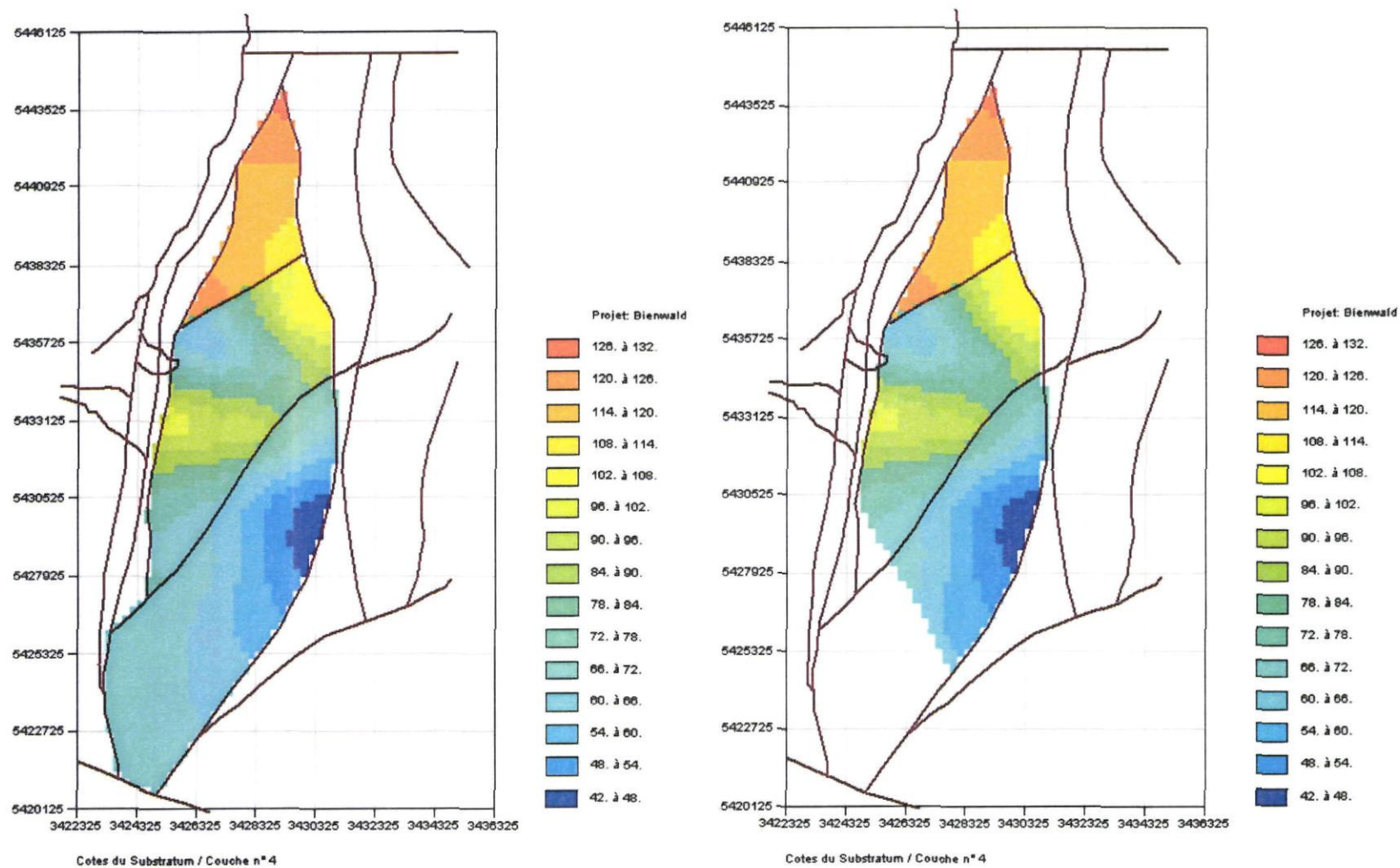


Figure 6 : Mur de l'intercalaire séparant l'aquifère médian de l'aquifère profond. Gauche : modèle géologique, droite : modèle hydrodynamique

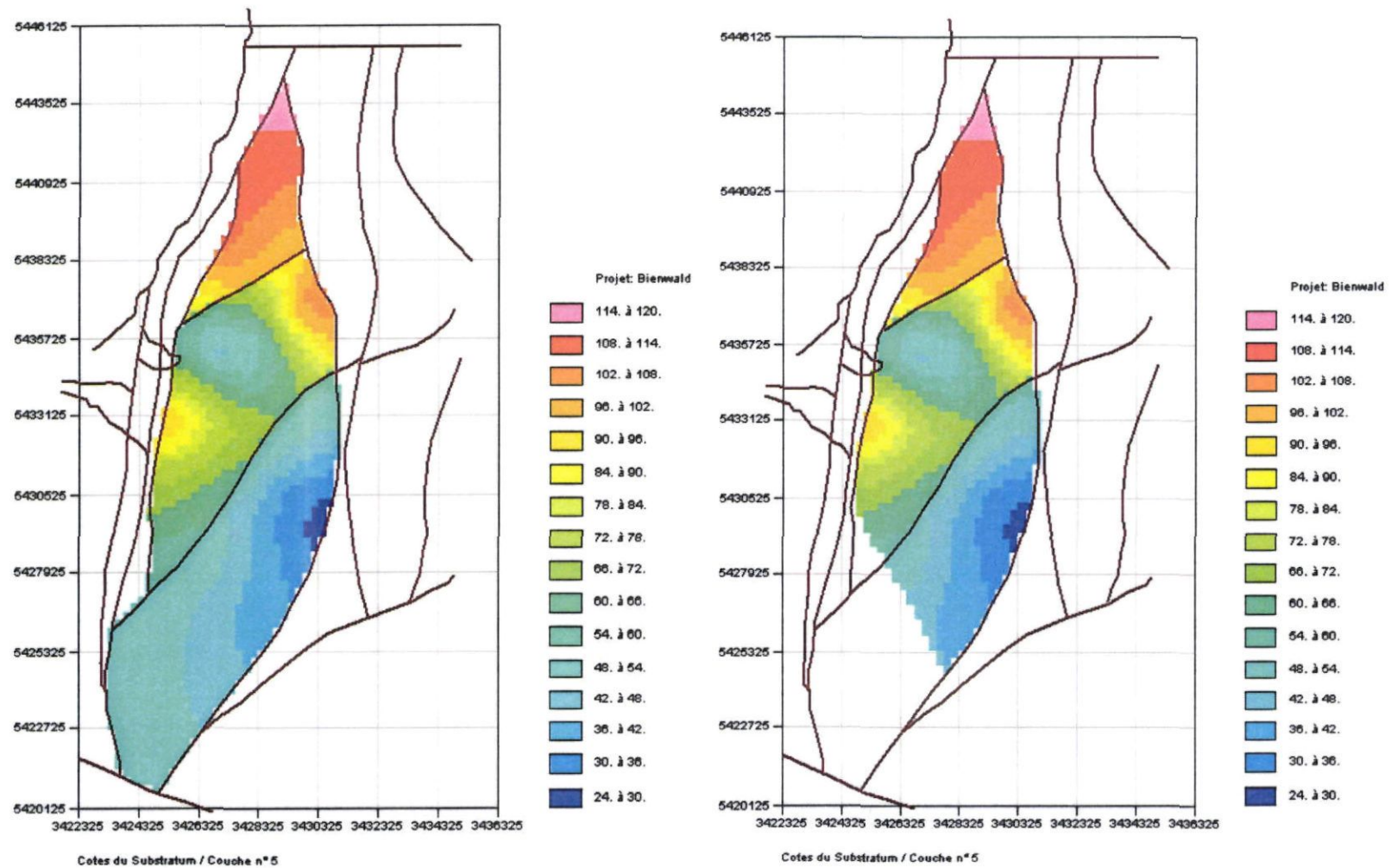


Figure 7 : Mur de l'aquifère profond du Pliocène. Gauche : modèle géologique, droite : modèle hydrodynamique

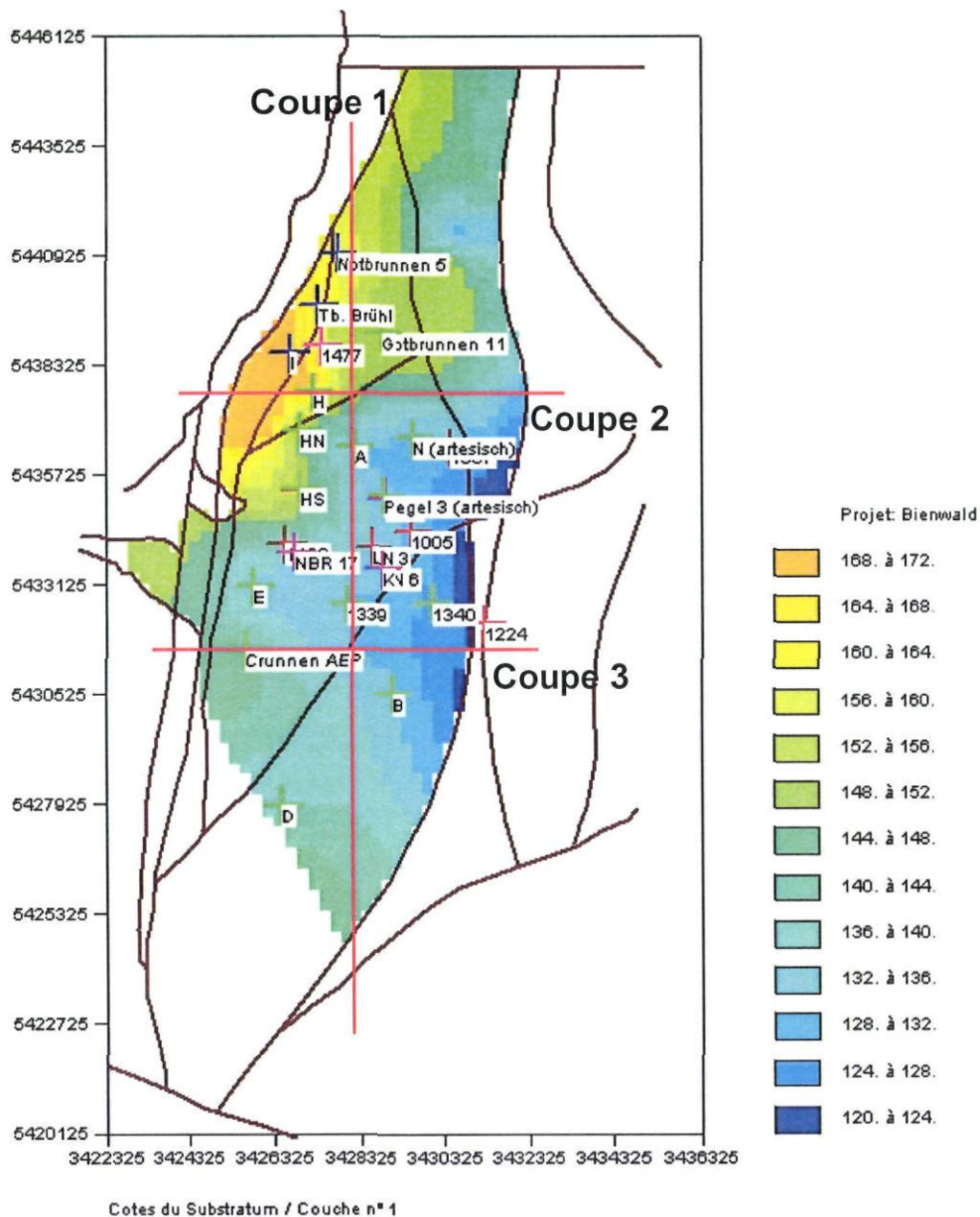


Figure 8 : Localisation des plans de coupe dans le modèle

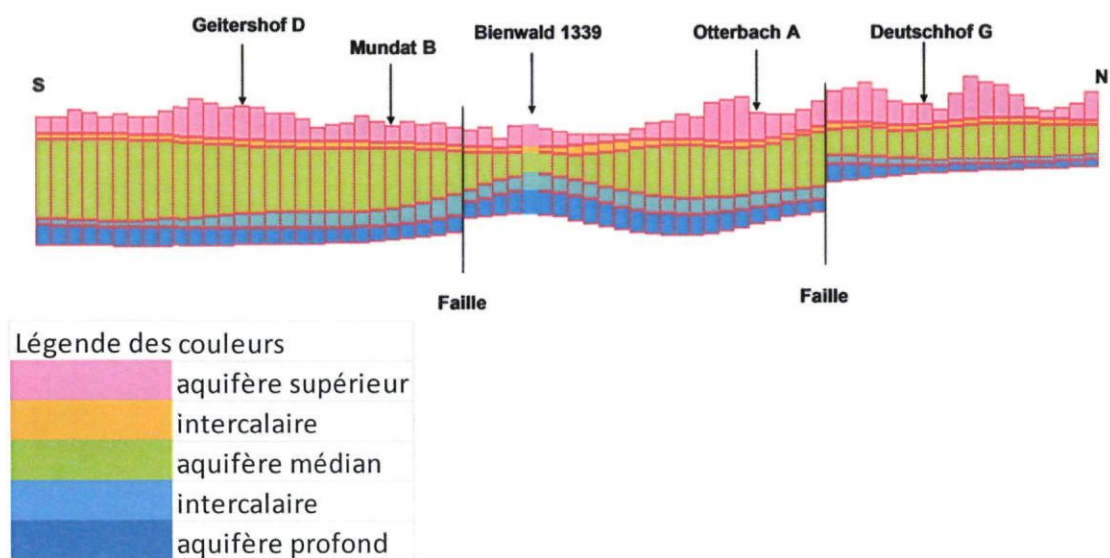


Figure 9 : Coupe 1 N-S du modèle (mailles de 250 m de côté)

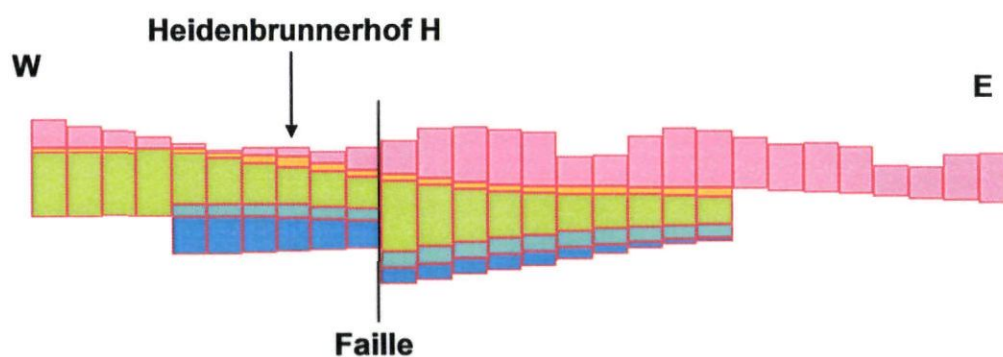


Figure 10 : Coupe 2 W-E du modèle (mailles de 250 m de côté)

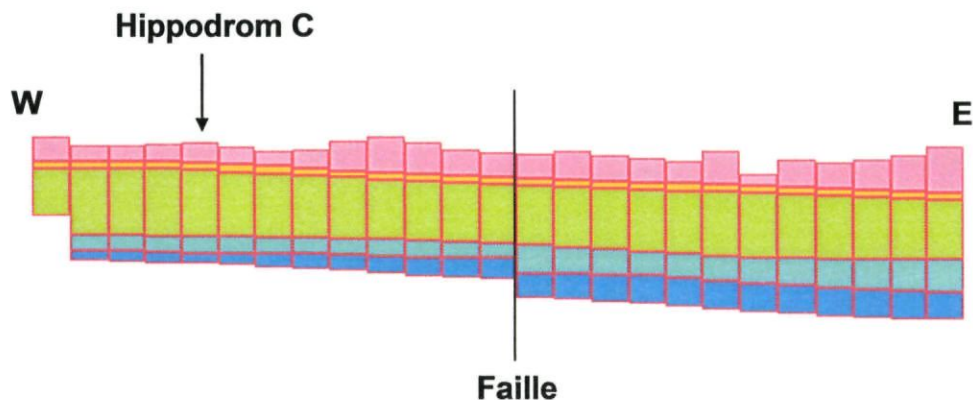


Figure 11 : Coupe 3 W-E du modèle (mailles de 250 m de côté)

2.2.2. Conditions aux limites

Les conditions aux limites du modèle sont essentiellement définies par les grands rejets de failles à l'est et l'ouest du système aquifère qui mettent en particulier l'aquifère profond et médian en contact direct avec les marnes du tertiaire. Dans ce cas précis, ce sont des limites à flux nul. Autre type de condition aux limites : les limites à potentiel imposé², elles concernent d'une part la limite sud-ouest du modèle pour l'ensemble du système aquifère, faute de données hydrogéologiques au-delà, et d'autre part pour partie les limites ouest et est des aquifères supérieur et médian qui ne sont pas affectées par le rejet des failles. Les conditions aux limites sont représentées sur la figure 12.

² Une limite à potentiel imposée fixe la charge hydraulique à un pas de temps donné.

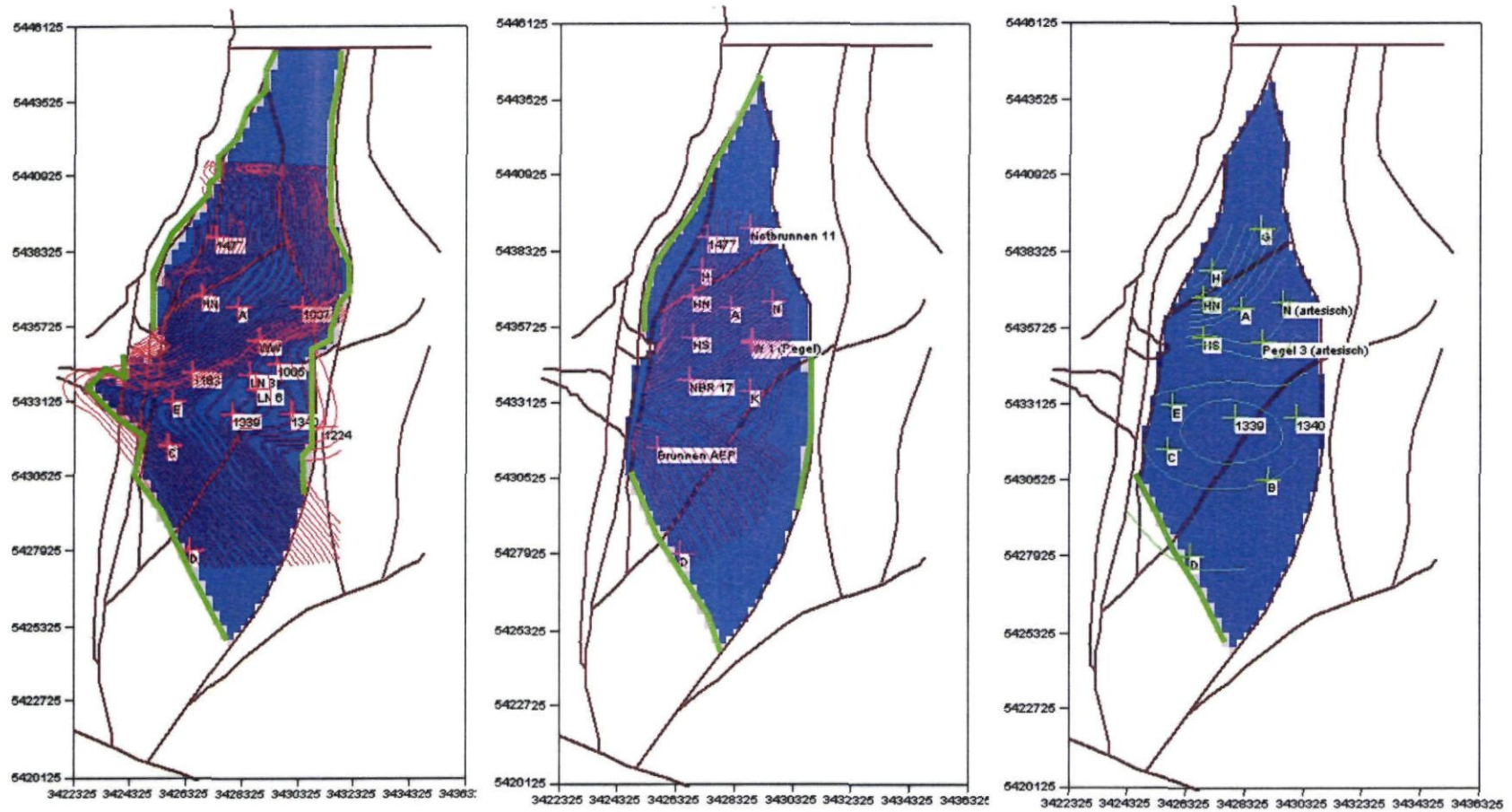


Figure 12 : Conditions aux limites du système aquifère multicouche : les bordures vertes représentent les potentiels imposés, ailleurs flux nul). De gauche à droite : aquifère supérieur, médian et profond.

2.3. CALAGE DU MODELE

2.3.1. Les données d'« entrée » du modèle

Les données d'« entrée » d'un modèle d'écoulement souterrain sont en général des données spatialisées de différentes natures :

- Les **données d'alimentation** du modèle qui sont, d'une part la recharge de l'aquifère (partie de la pluie s'infiltrant jusqu'à la nappe), et d'autre part les entrées possibles par les limites latérales du modèle (potentiel imposé) ;
- Les **données de prélèvement** qui correspondent ici aux prélèvements pour l'eau potable des communes de Wissembourg et Bad Bergzabern ;
- Les **données hydrologiques** (cote de l'eau de la rivière, cote du lit, perméabilité du lit,...) qui sont utilisées pour les calculs des flux nappe-rivière. Dans le cadre de ce modèle, la rivière principale qui est la Lauter est représentée par une cote de débordement ;
- Les **données hydrodynamiques** qui sont les paramètres caractérisant l'aquifère (perméabilité et emmagasinement libre ou captif).

a) Alimentation du système multicouche

Le calcul de l'infiltration est basé sur un calcul de bilan hydro-climatique au pas journalier selon le schéma de GARDÉNIA (Thiéry, 2003) et couplé au calcul des charges dans MARTHE. Les données nécessaires au calcul sont:

- La pluie brute (mm/j) ;
- L'ETP (mm/j) ;
- La RDE (mm) (Réserve Disponible pour l'Evapotranspiration) pour les premiers mètres du sol (équivalent de la RFU utilisée par les agronomes) ;
- Le temps de demi-percolation (TPERC) et la hauteur d'équi-ruissellement-percolation (NRUIP) pour la décomposition de l'écoulement en deux composantes (rapide: ruissellement, lente: percolation vers la nappe).

Les valeurs de pluie et d'ETP sont issues du Service Météorologique Allemand (DWD). La figure 13 montre les chroniques de pluie et d'ETP journalières utilisées dans le modèle.

Les valeurs de la réserve disponible pour l'évapotranspiration (RDE) ont été fournies au pas de 30 m côté français (modèle transfrontalier MoNit) et 200 m côté allemand (par le LGB Mainz). Elles sont restituées à la grille de 250 m (cf. figure 14).

Les paramètres de l'écoulement souterrain (TPERC et NRUIP) sont fixés par calage du modèle numérique. Le paramètre NRUIP est fixé à 300 mm et TPERC entre 1 et 3 jours suivant l'épaisseur de la zone non saturée.

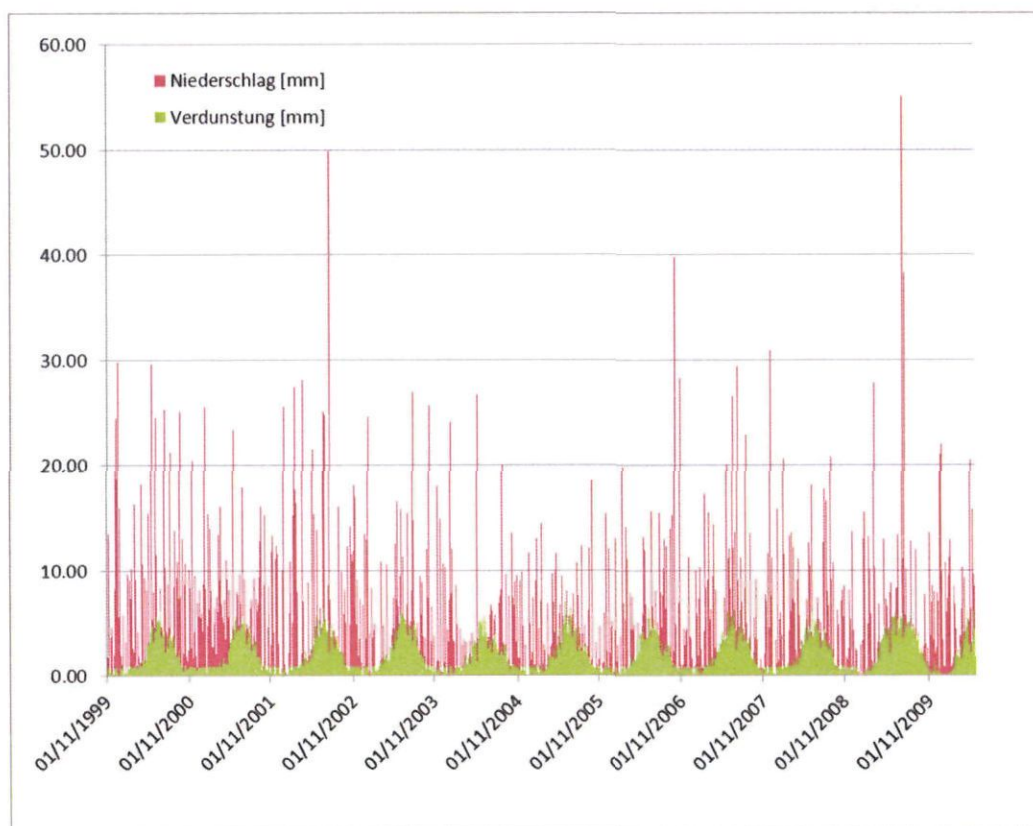


Figure 13 : Pluie et ET*P journalières (Tagesniederschlag und Verdunstung)

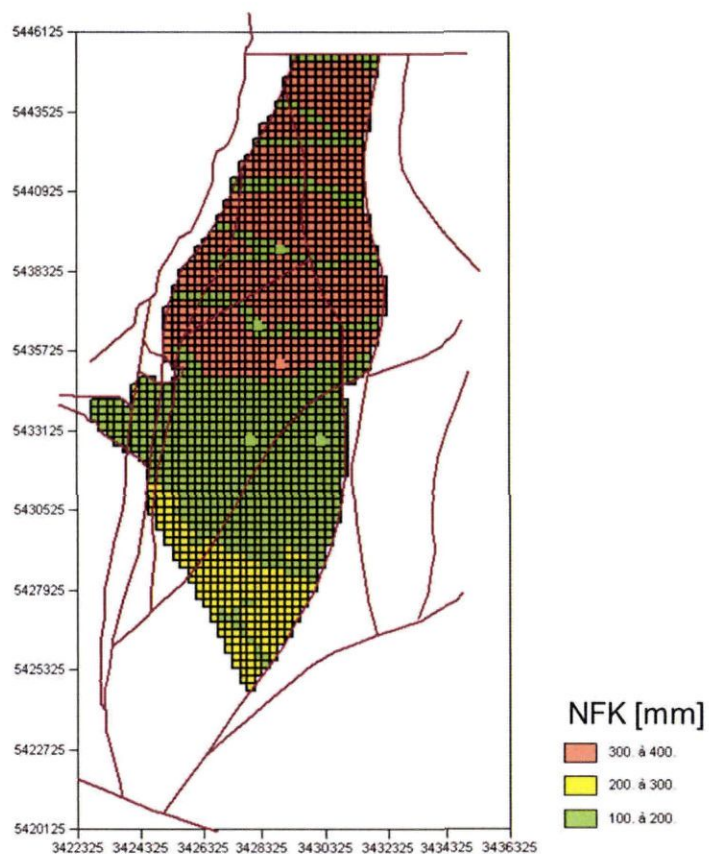


Figure 14 : Répartition de la réserve disponible pour l'évapotranspiration
(NFK : Nutzbare Feld kapazität)

b) Prélèvements dans le système multicouche

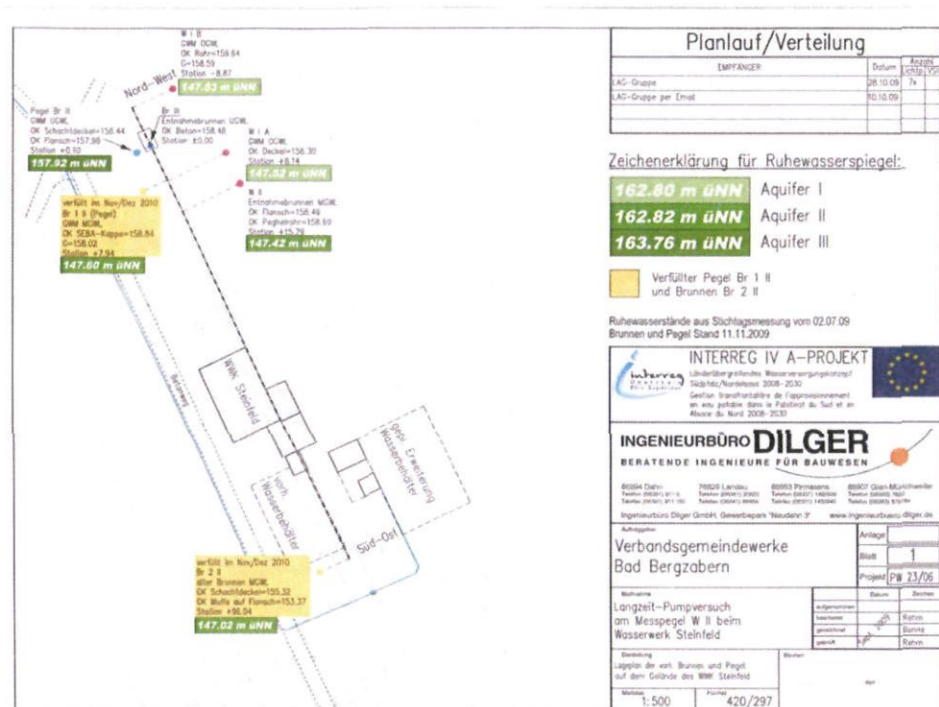


Figure 15 : Plan de positionnement des puits et piézomètres à Steinfeld

Les prélèvements pour la ressource en eau potable des communes de Wissembourg côté français et Bad Bergzabern côté allemand sont assurés par quatre forages dont trois captant l'aquifère profond (Ancien puits Artese, Brunnen III Steinfeld, Bienwaldbrunnen) et un captant l'aquifère médian (puits Brunnen Br II). Les puits Artese, Brunnen Br II et Br III sont respectivement arrêtés depuis 2005 et 2009. La quasi-totalité des prélèvements est réalisée dans le puits Bienwaldbrunnen depuis 2004 (cf. figure 15). Des pompages d'essai ont par ailleurs été réalisés au cours de la période 2000-2010 dans cinq forages (Bienwald 1339, Otterbach All, Deutschhof GIII, WWK Steinfeld Br II et WII). Le tableau 1 récapitule les débits et durées des essais par forage.

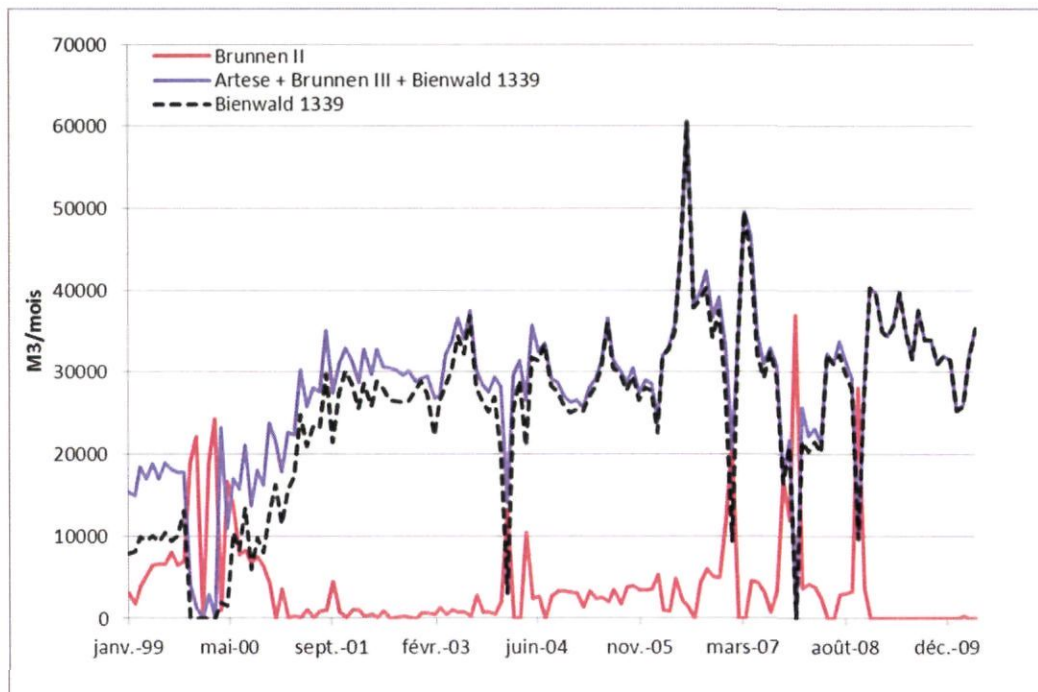


Figure 16 : Prélèvements en eau potable dans l'aquifère médian (II) et profond (III)

Date	Bienwald 1339 III	Otterbach A II	Deutschhof G III	WWK Steinfeld Br II	WWK Steinfeld W II
14/02/00 au 14/03/00	180.0				
18/05/00 au 29/05/00		18.7			
10/10/06 au 20/11/06			11.7		
01/10/08 au 10/10/08				44.0	
11/10/08 au 17/10/08				55.0	
18/10/08 au 19/10/08				95.0	
20/10/08 au 24/10/09				55.0	
18/11/09 au 21/11/09					35.0
22/11/09 au 21/12/10					55.0
22/12/09 au 06/01/10					72.0

Tableau 1 : Pompages d'essai dans l'aquifère II et III de 2000 à 2010 (m^3/h)

c) Paramètres hydrodynamique du système multicouche

Les valeurs des paramètres hydrodynamiques que sont la perméabilité et le coefficient d'emménagement (libre ou spécifique) ont été obtenues par calage des charges hydrauliques dans chaque niveau aquifère. Les valeurs des perméabilités par aquifère (A I, A II et A III) et niveaux intercalaires (I I et I II) sont récapitulées dans le tableau 2. Les figures 16 et 17 montrent leur répartition spatiale. En moyenne, les perméabilités varient de 9.10^{-5} à 2.10^{-4} m/s pour les aquifères, et 6.10^{-10} à 5.10^{-8} m/s pour les niveaux intercalaires peu perméables (facteur de drainance entre couches aquifères). Les

perméabilités des niveaux aquifères sont assez voisines avec néanmoins une perméabilité un peu plus forte dans les aquifères médian et profond. Pour les couches intercalaires, l'intercalaire II séparant l'aquifère médian du profond est moins perméable de deux ordres de grandeur (facteur 100) par rapport à l'intercalaire I séparant l'aquifère superficiel du médian. Une zone plus perméable au nord-ouest du modèle permet la recharge depuis l'aquifère superficiel vers le médian et le profond. Le coefficient d'emménagement libre est de 10% et l'emménagement spécifique varie entre 5.10^{-6} et 4.10^{-5} m^{-1} .

Perméabilité [m/s]	A I	I I	A II	I II	A III
Minimum	5.0E-06	2.0E-10	5.0E-06	2.5E-11	3.0E-05
Maximum	2.5E-04	1.0E-06	4.0E-04	2.1E-08	3.1E-04
Moyenne	9.3E-05	4.8E-08	1.3E-04	5.9E-10	1.7E-04
Ecartype	6.5E-05	1.5E-07	1.4E-04	3.3E-09	8.0E-05

Tableau 2 : Répartition des perméabilités du système multicouche

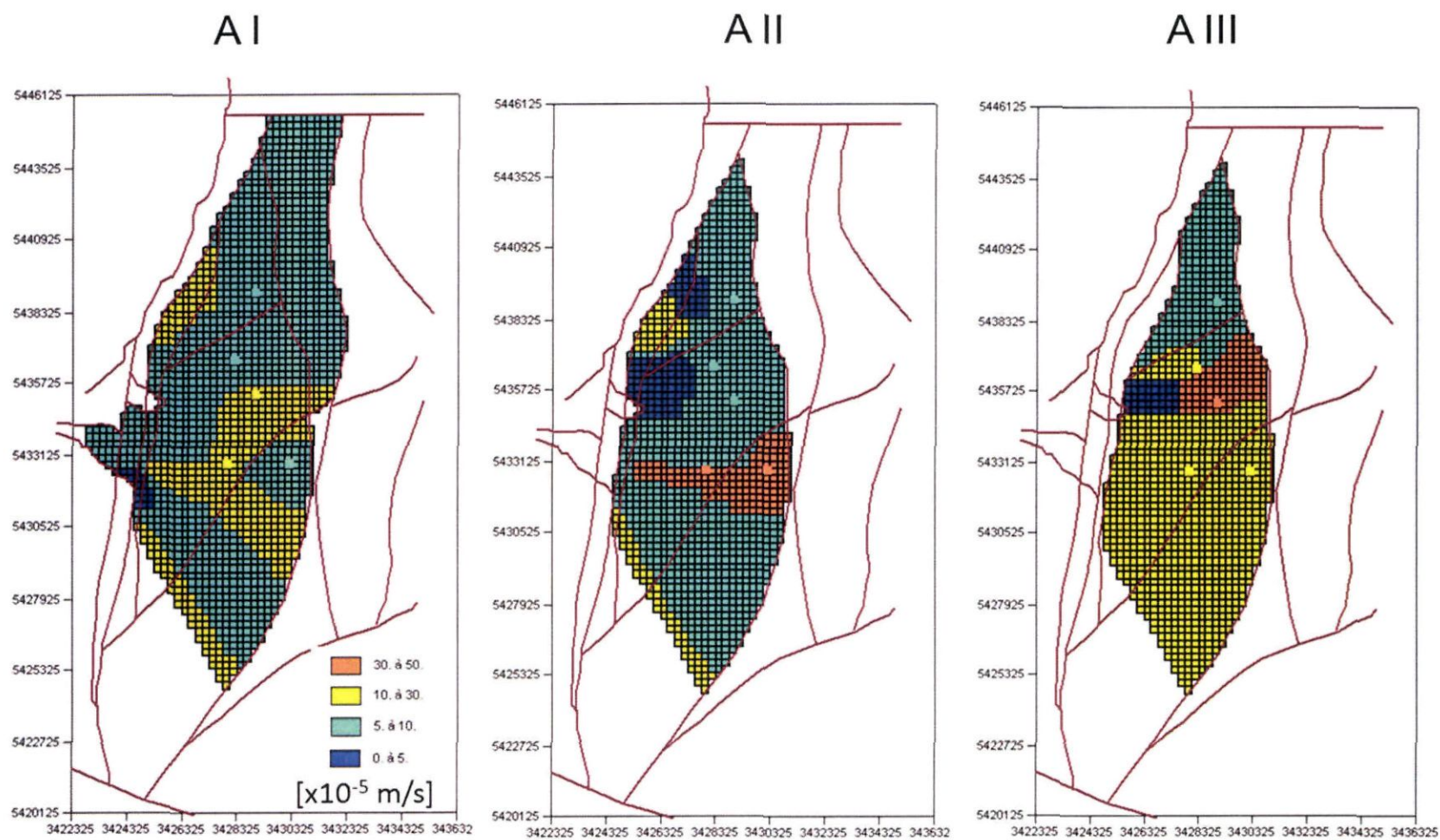


Figure 17 : Répartition spatiale des perméabilités par niveau aquifère

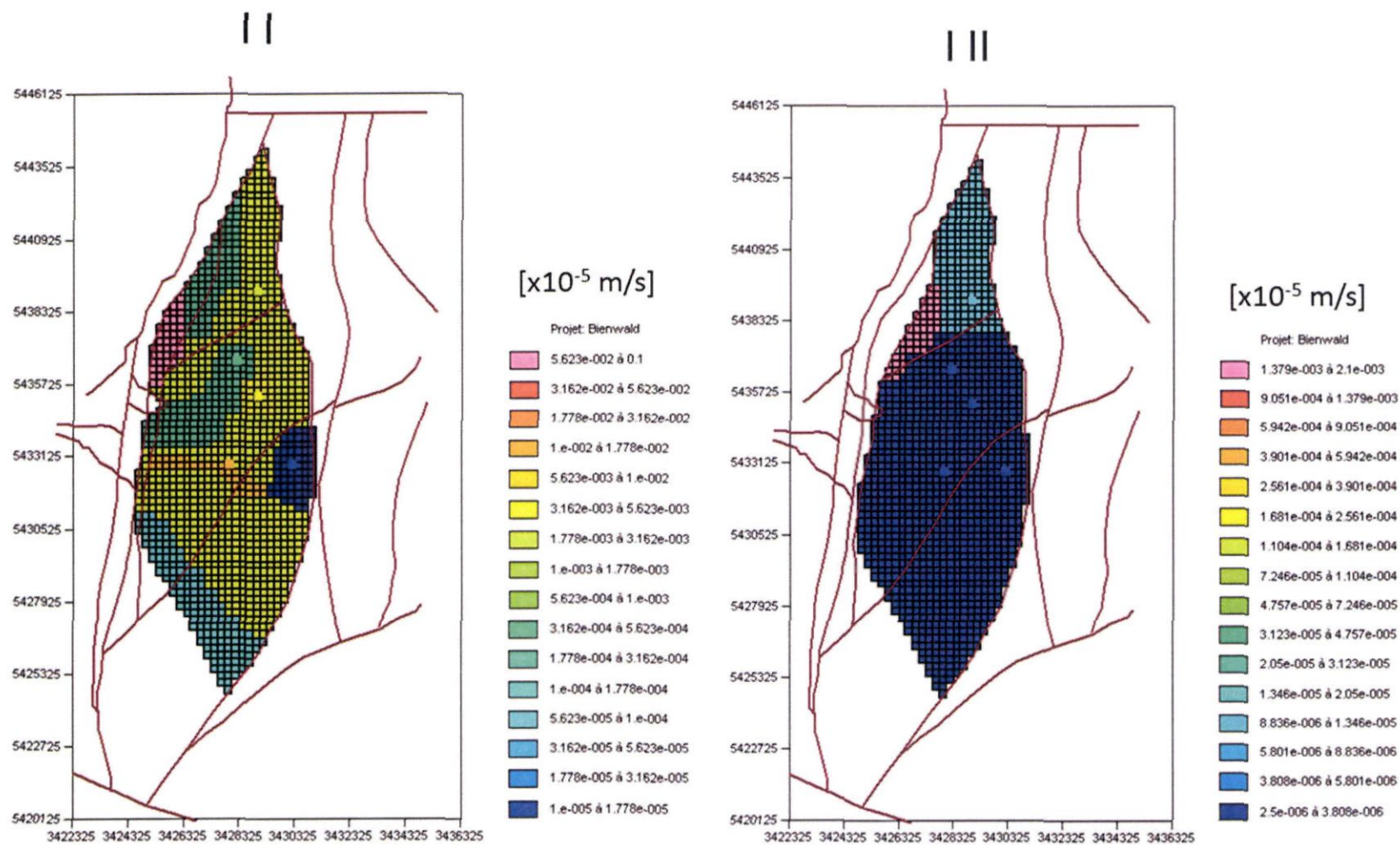


Figure 18 : Répartition spatiale du facteur de drainage par niveau intercalaire

2.3.2. Les données en « sortie » du modèle

a) *Calage en régime transitoire des niveaux piézométriques*

Le système multicouche est suivi par un réseau de 43 piézomètres, dont 16 captant l'aquifère superficiel, 14 l'aquifère médian et 13 le profond (cf. figure 18). Pour les plus anciens on dispose du suivi en continu ou manuel depuis 1999, et pour les plus récents depuis 2009. Les figures 19 à 37 montrent les variations temporelles des charges hydrauliques simulées et mesurées dans chacun des piézomètres. Sur un même graphe sont représentés les niveaux dans les trois aquifères lorsque leur niveau est capté. Les croix représentent les niveaux mesurés et les lignes continues les niveaux simulés par le modèle numérique. Pour chaque aquifère, les niveaux hydrauliques simulés sont parfaitement cohérents en dynamique de variation et en niveau relatif avec les observations. Des écarts en amplitude, de l'ordre métrique ou inférieurs, sont parfois mesurables. Pour le pompage d'essai à Steinfeld WII, de novembre 2009 à janvier 2010 (cf. figure 27), la charge hydraulique sur la maille est corrigée pour tenir compte du diamètre du forage. En effet, le modèle calculant un rabattement pour une maille de 25 m localement (maillage gigogne sur les mailles à débit hydraulique imposé), ce rabattement doit ensuite être corrigé d'un rabattement supplémentaire qui est fonction du rayon du puits, du débit et de la transmissivité de l'aquifère (formule de J.P. Sauty, 1973).

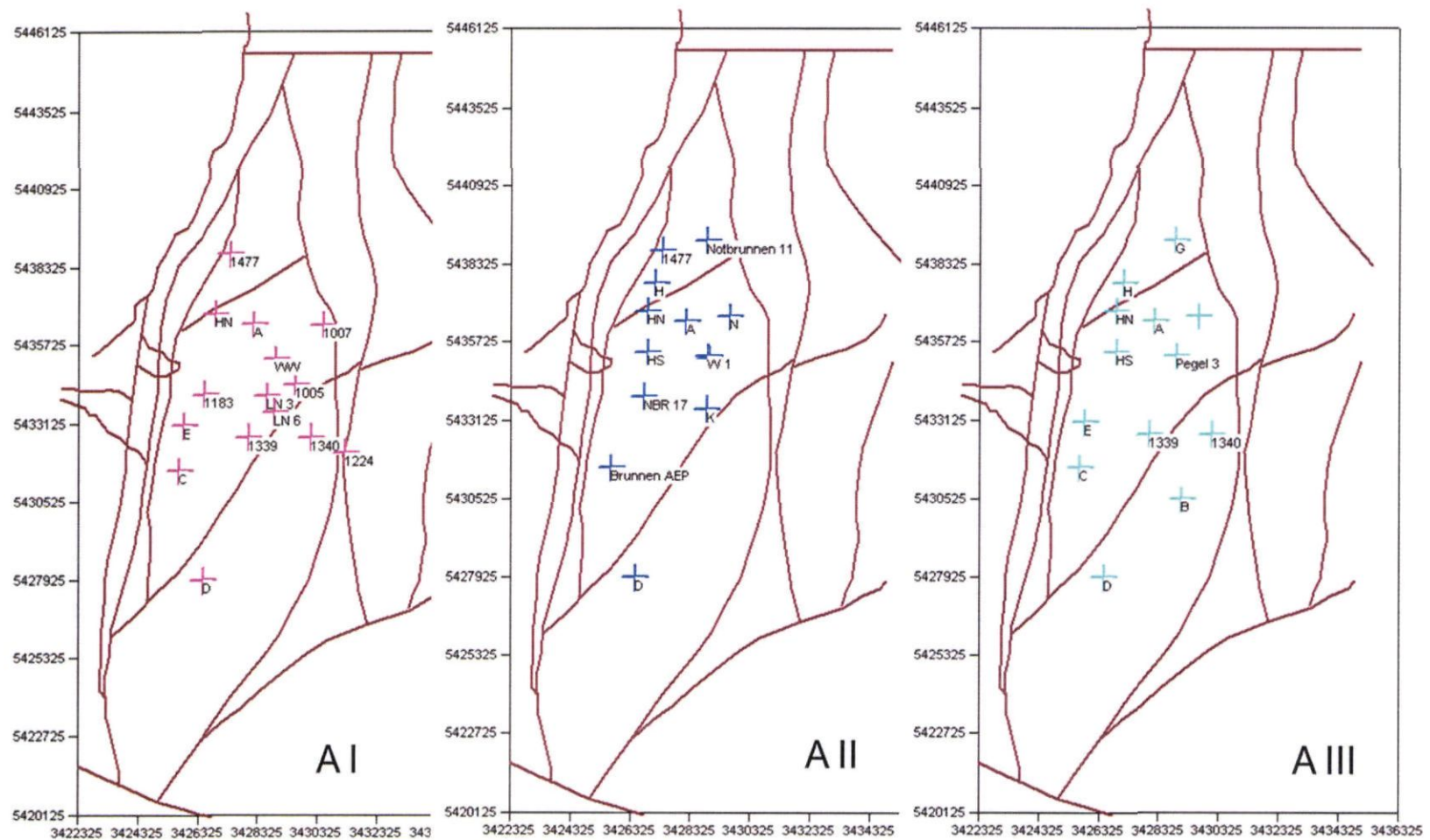


Figure 19 : Localisation des piézomètres par aquifère

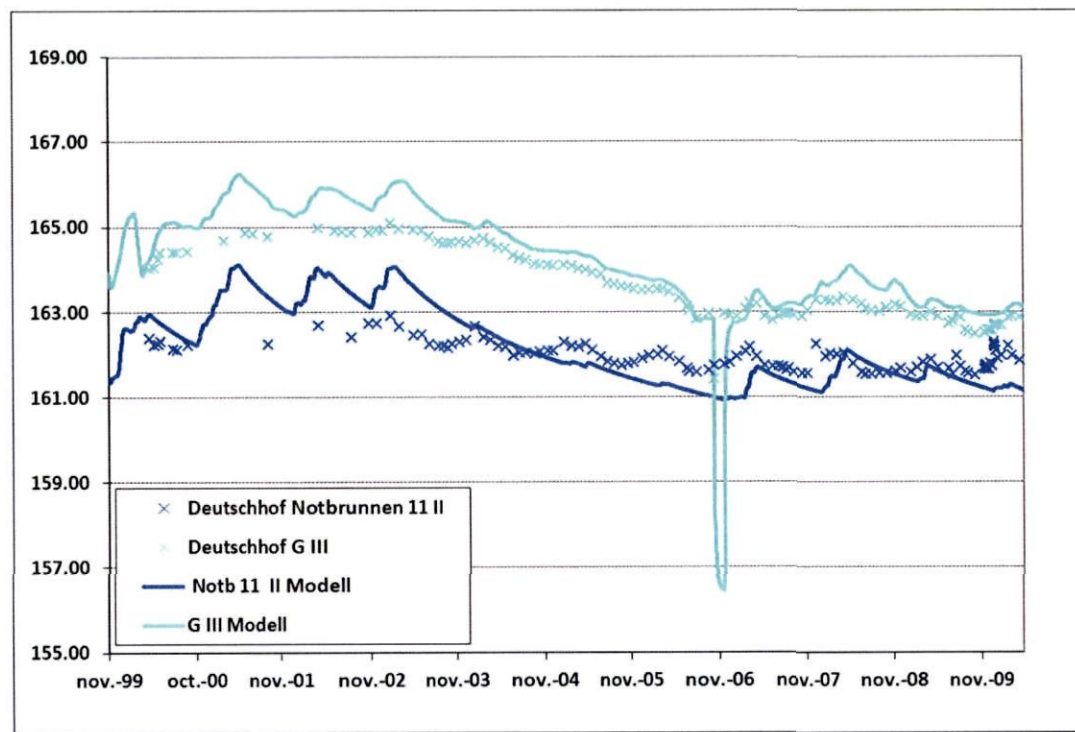


Figure 20 : Charges hydrauliques à Deutschhof, aquifères II et III
(pompage d'essai dans AIII en Oct-Nov 2006)

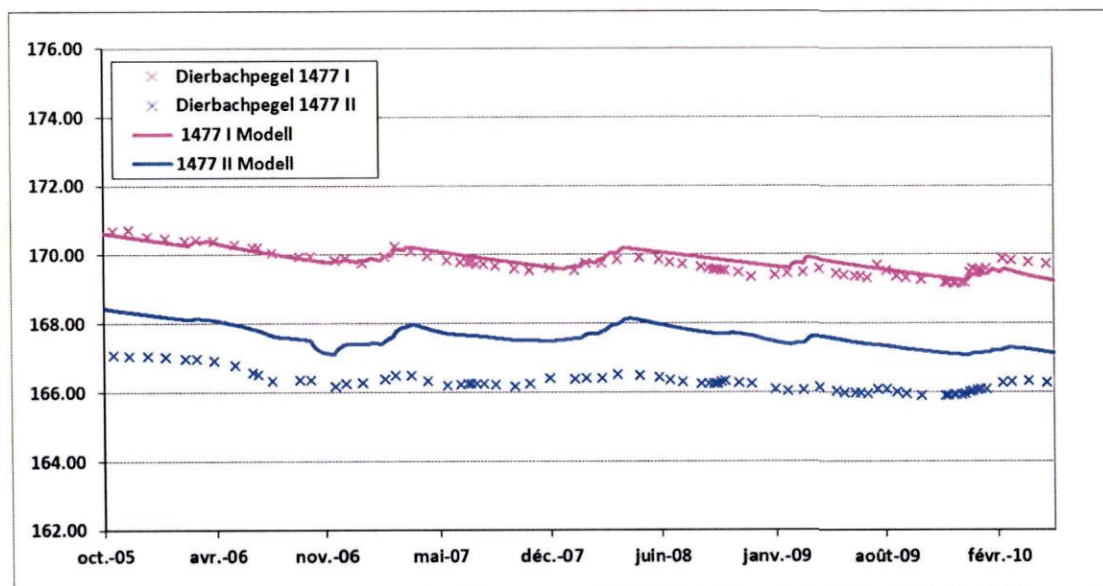


Figure 21 : Charges hydrauliques à Dierbachpegel 1477, aquifères I et II

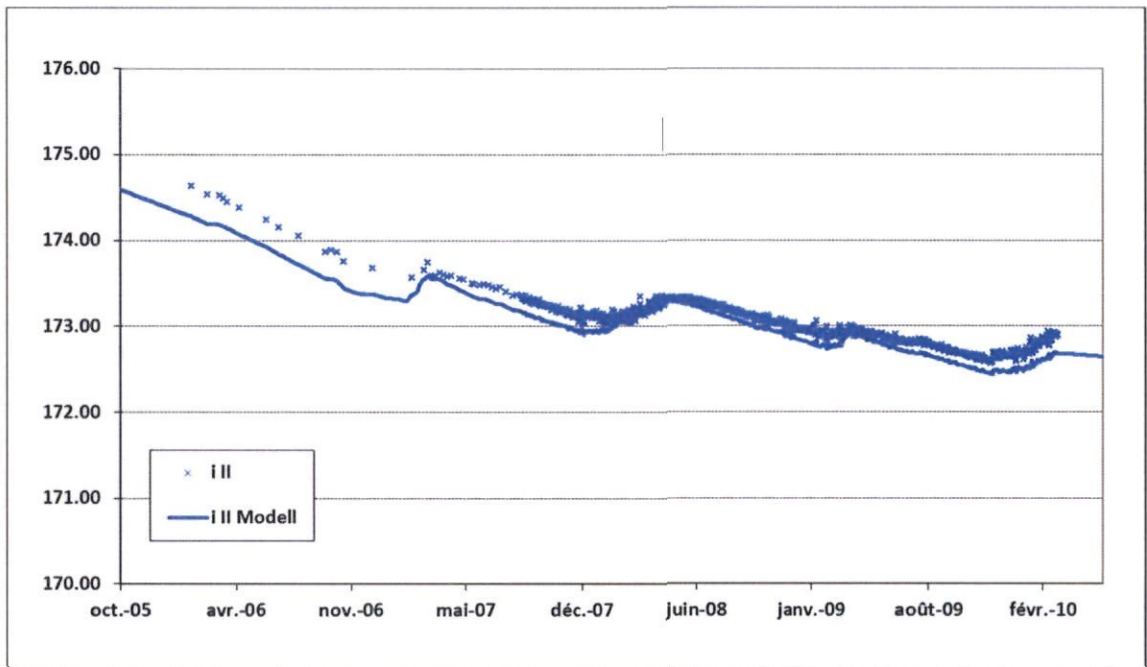


Figure 22 : Charges hydrauliques à Dierbach I, aquifère II

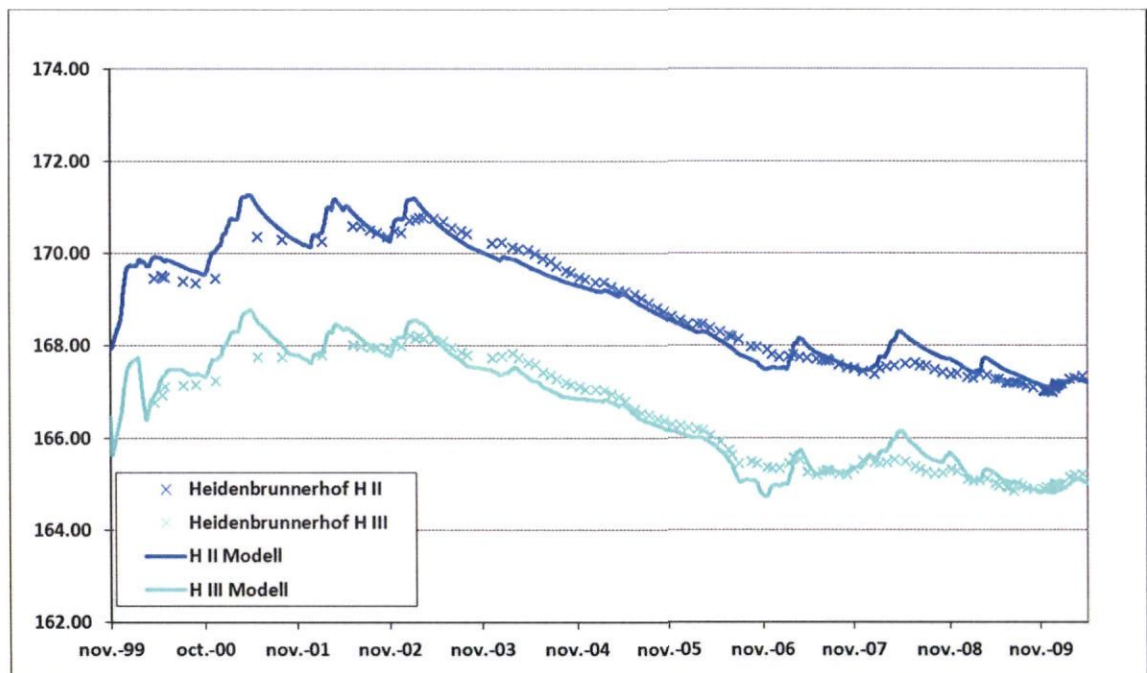


Figure 23 : Charges hydrauliques à Heidenbrunnhenho, aquifères II et III

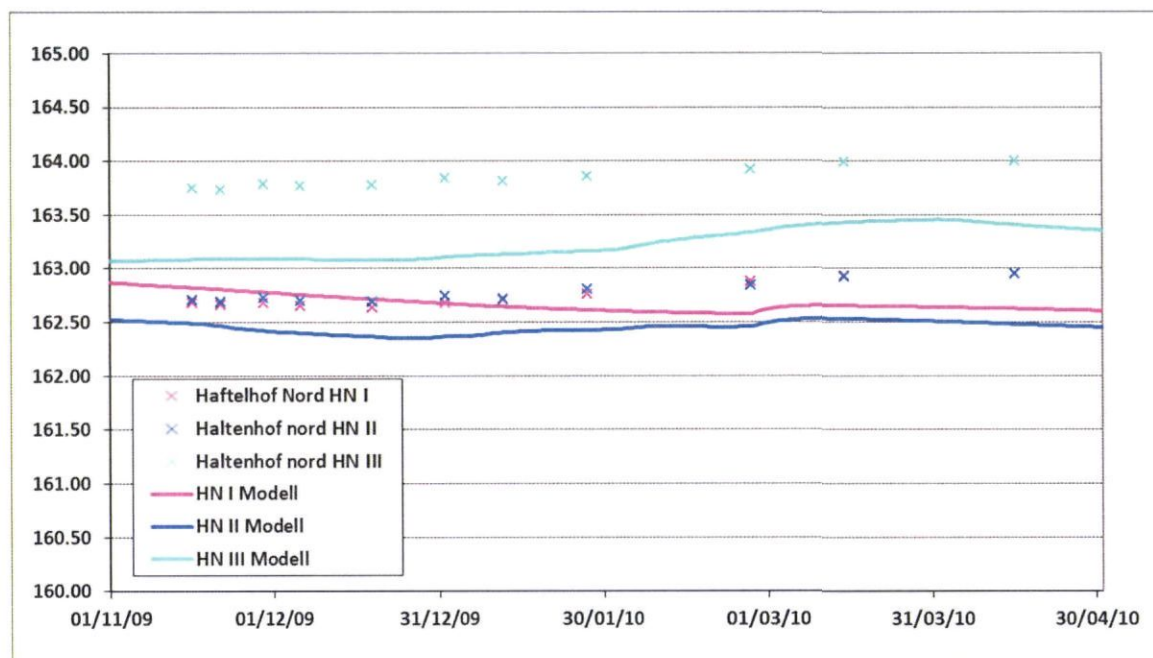


Figure 24 : Charges hydrauliques à Haltenhof Nord, aquifères I, II et III

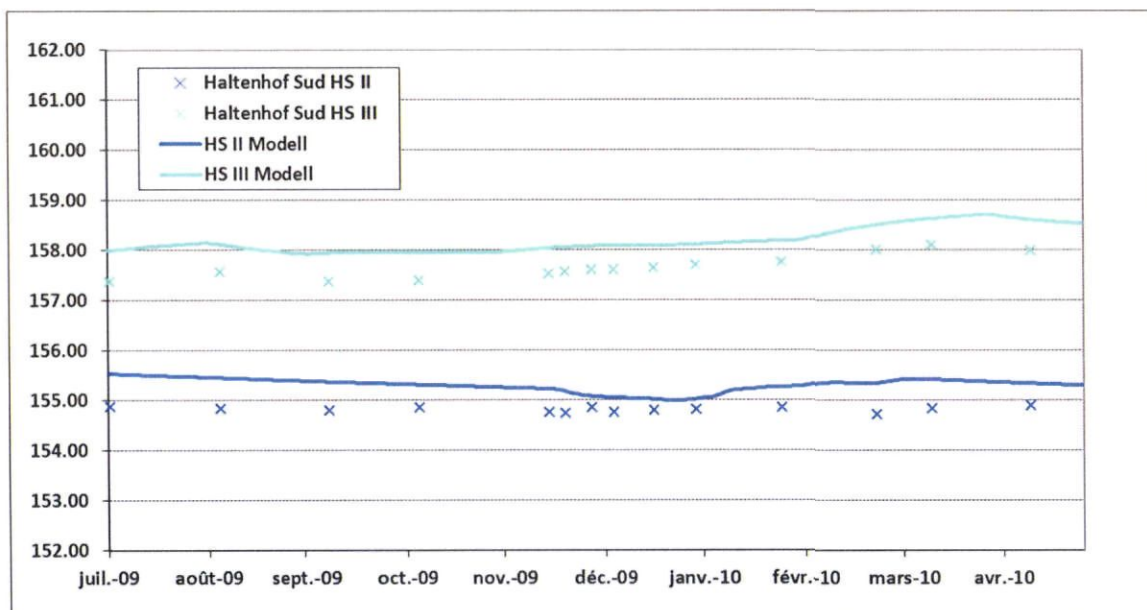


Figure 25 : Charges hydrauliques à Haltenhof Sud, aquifères II et III

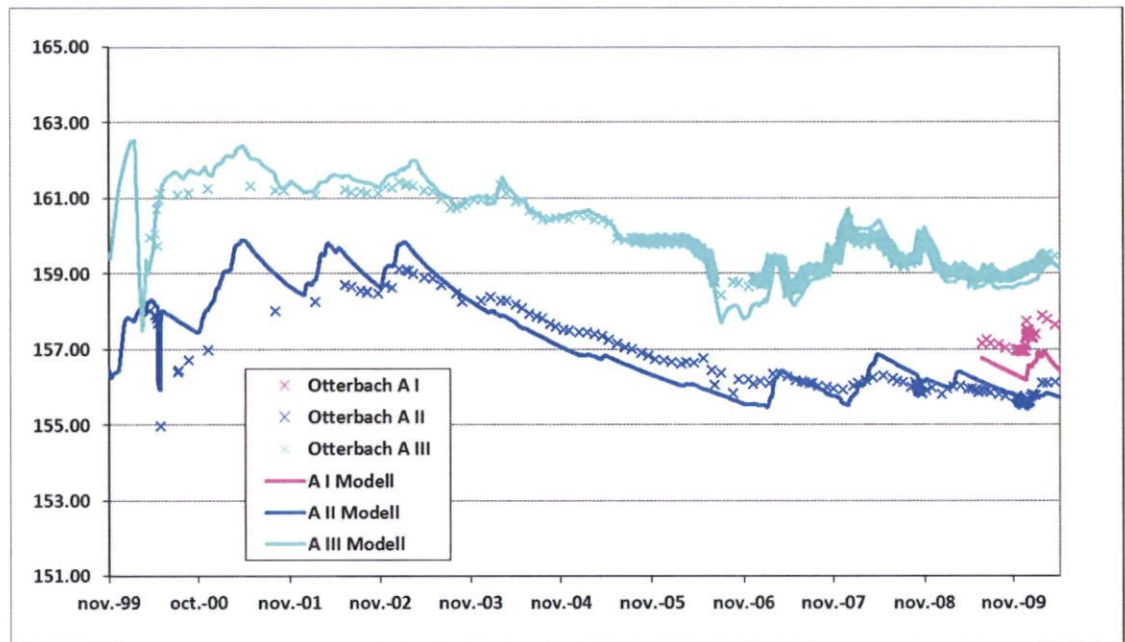


Figure 26 : Charges hydrauliques à Otterbach, aquifères I, II et III
(pompage d'essai dans AII en mai 2000)

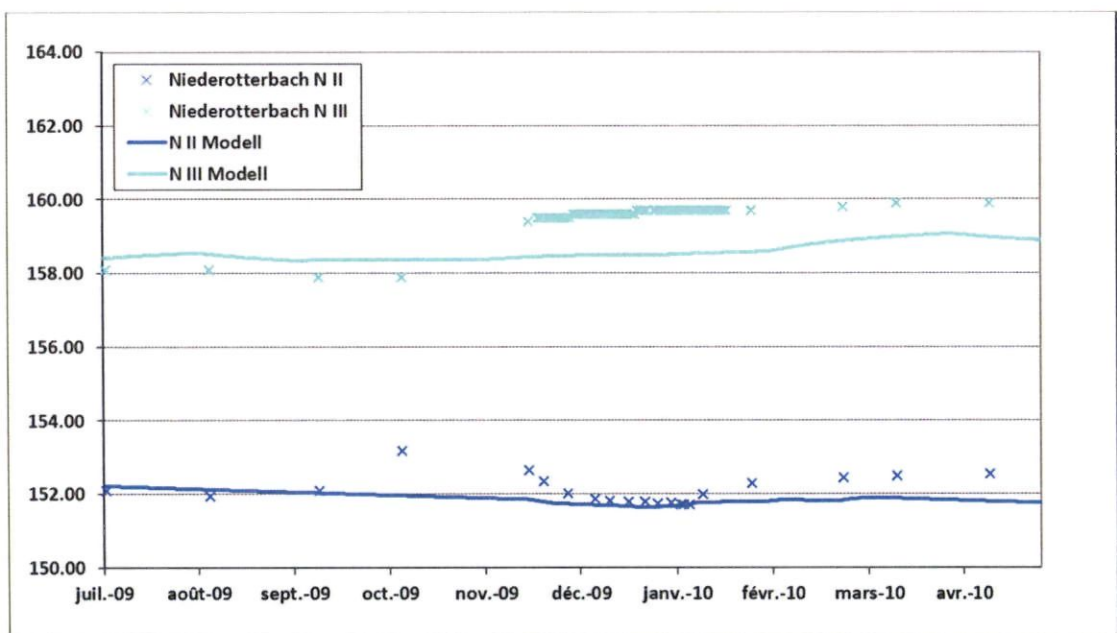


Figure 27 : Charges hydrauliques à Niederrotterbach, aquifères II et III

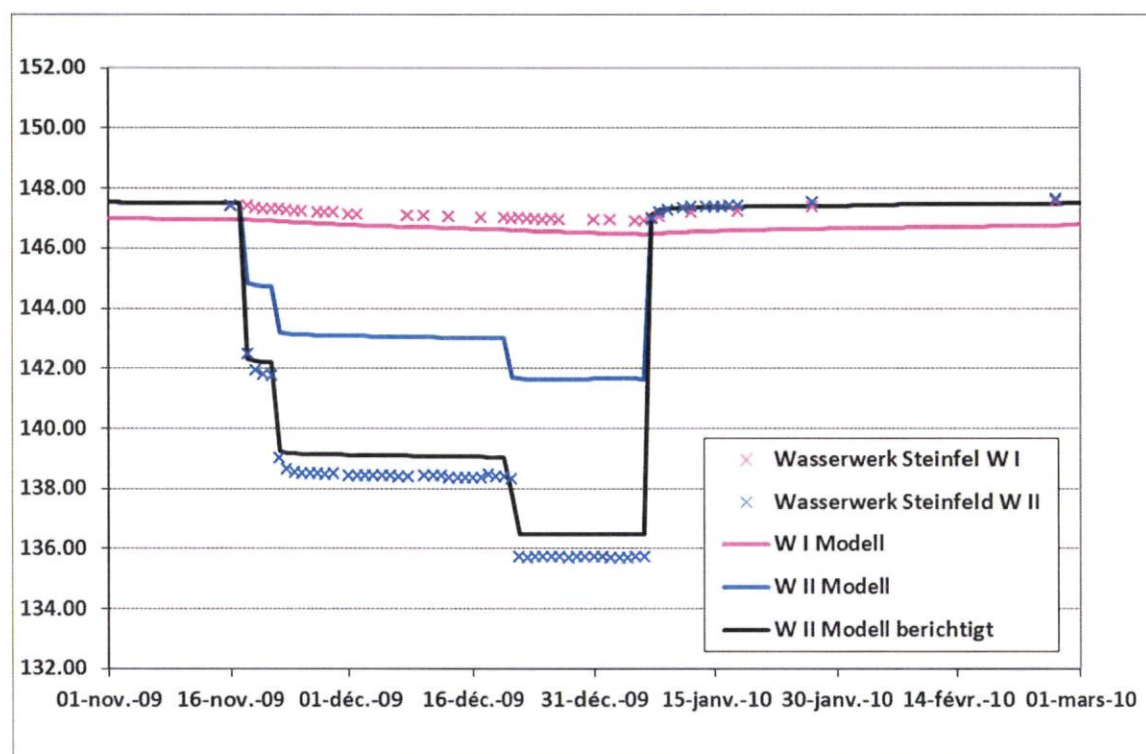


Figure 28 : Charges hydrauliques à Wasserwerk Steinfeld W, aquifères I et II (pompage d'essai à WII)

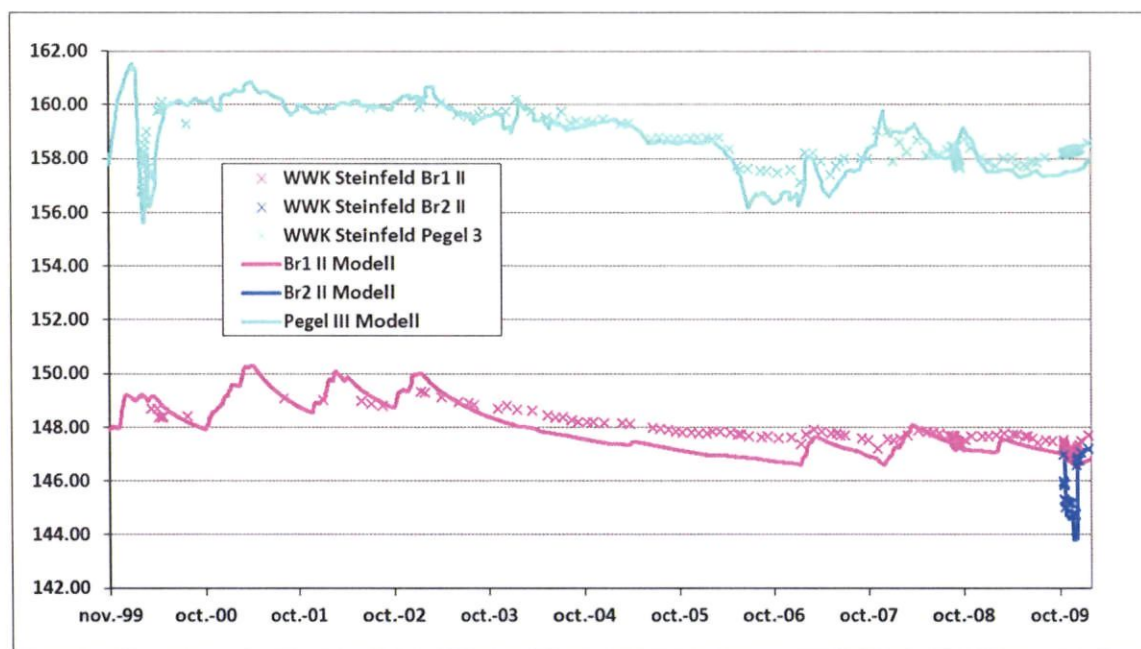


Figure 29 : Charges hydrauliques à Steinfeld Brunnen, aquifères I, II et III (pompage d'essai à Steinfeld WII en nov 2009)

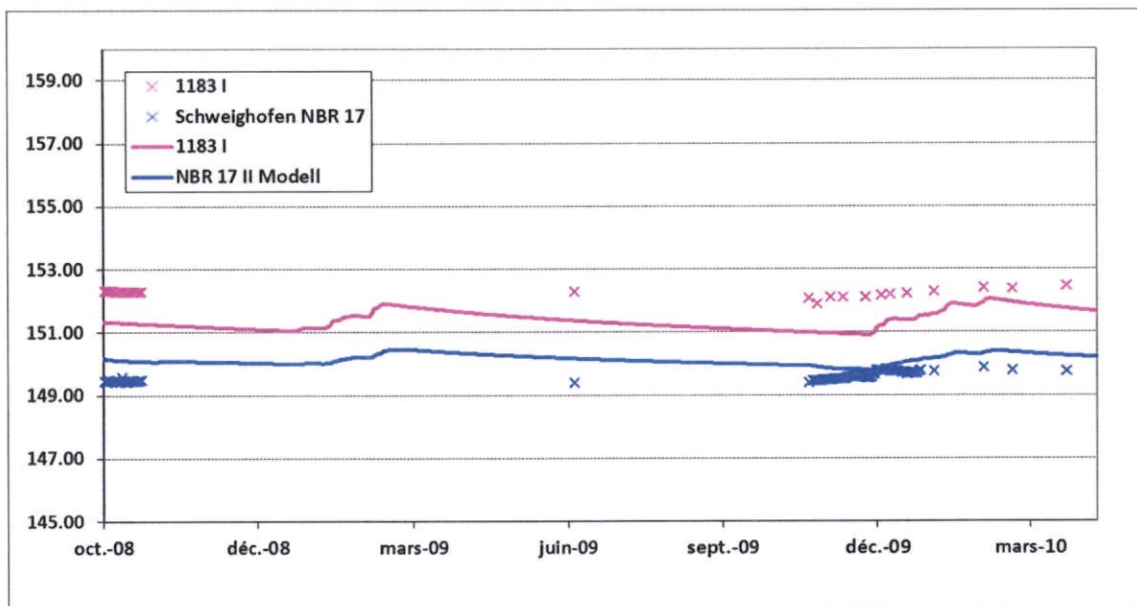


Figure 30 : Charges hydrauliques à Schweighofen, aquifères I et II

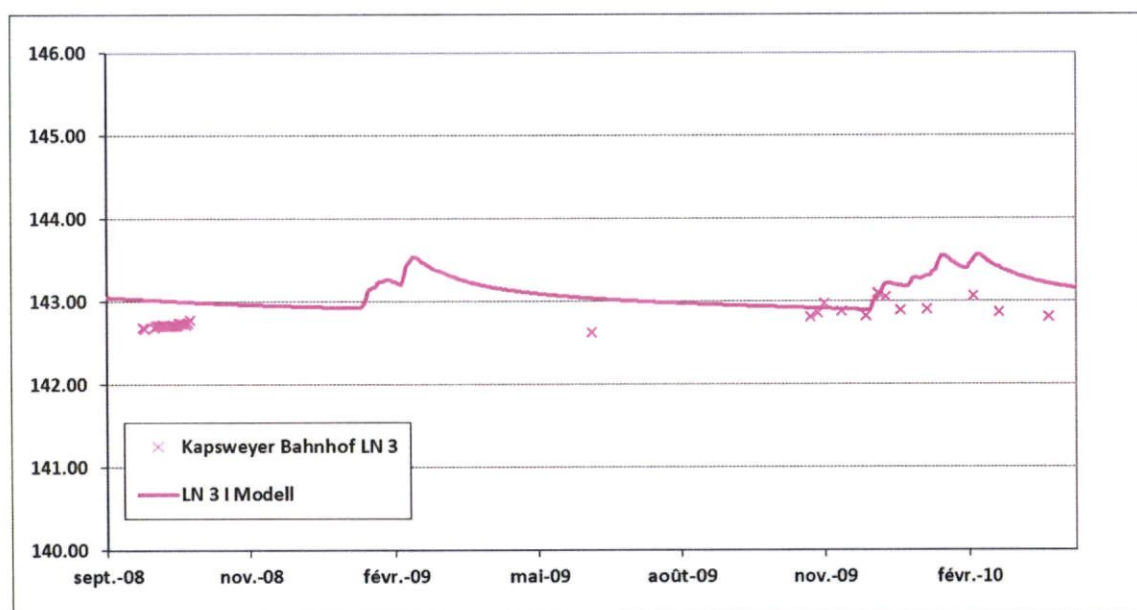


Figure 31 : Charges hydrauliques à Kapsweyer Bahnhof, aquifère I

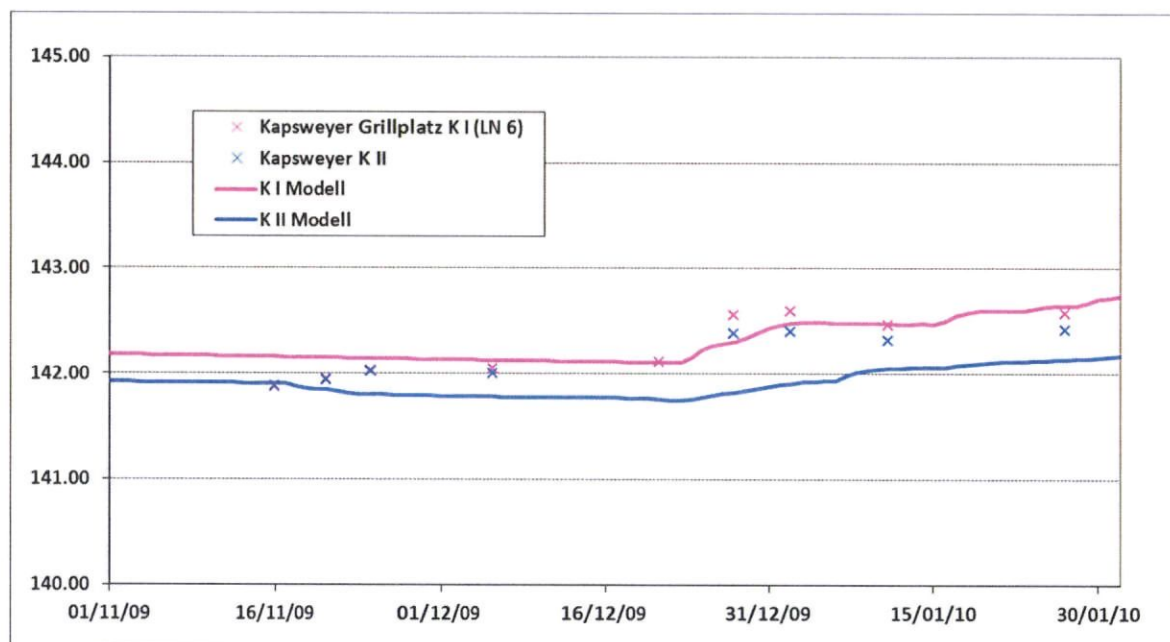


Figure 32 : Charges hydrauliques à Kapsweyer Grillplatz, aquifères I et II

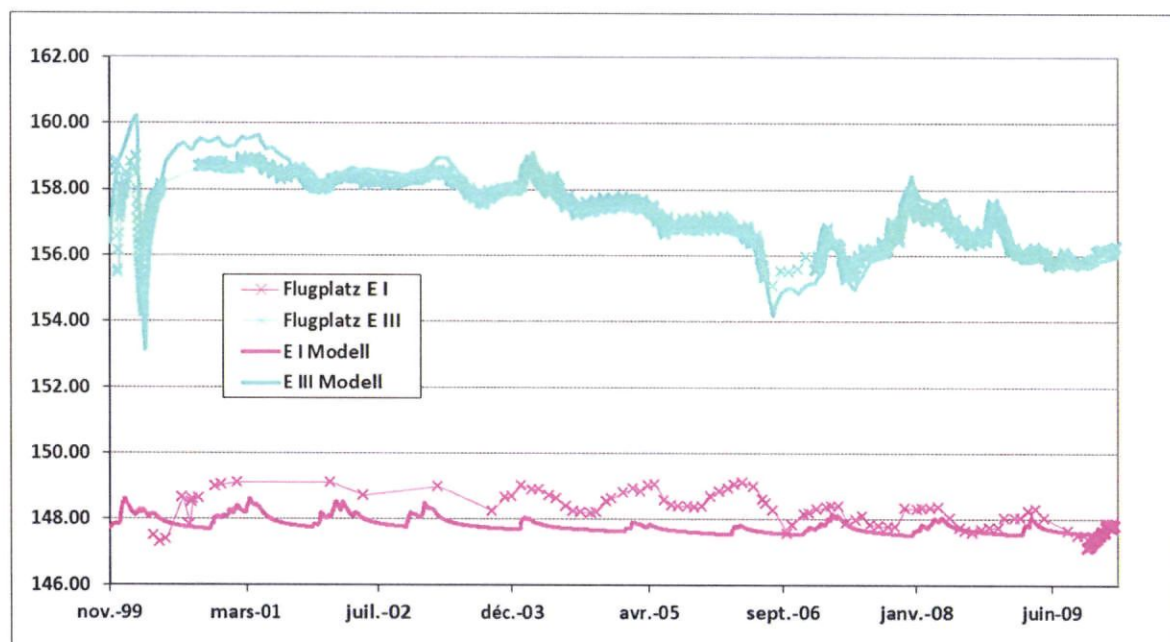


Figure 33 : Charges hydrauliques à Flugplatz, aquifères I et III
(débordement par la Lauters dans aquifère I)

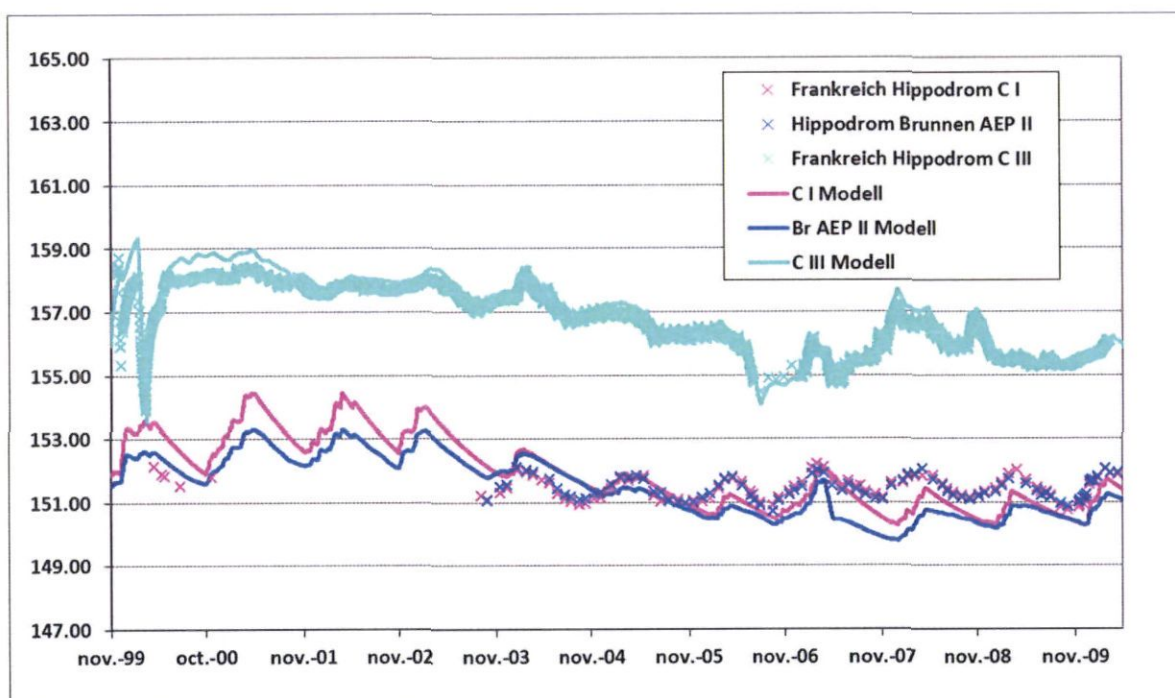


Figure 34 : Charges hydrauliques à Hippodrom, aquifères I, II et III

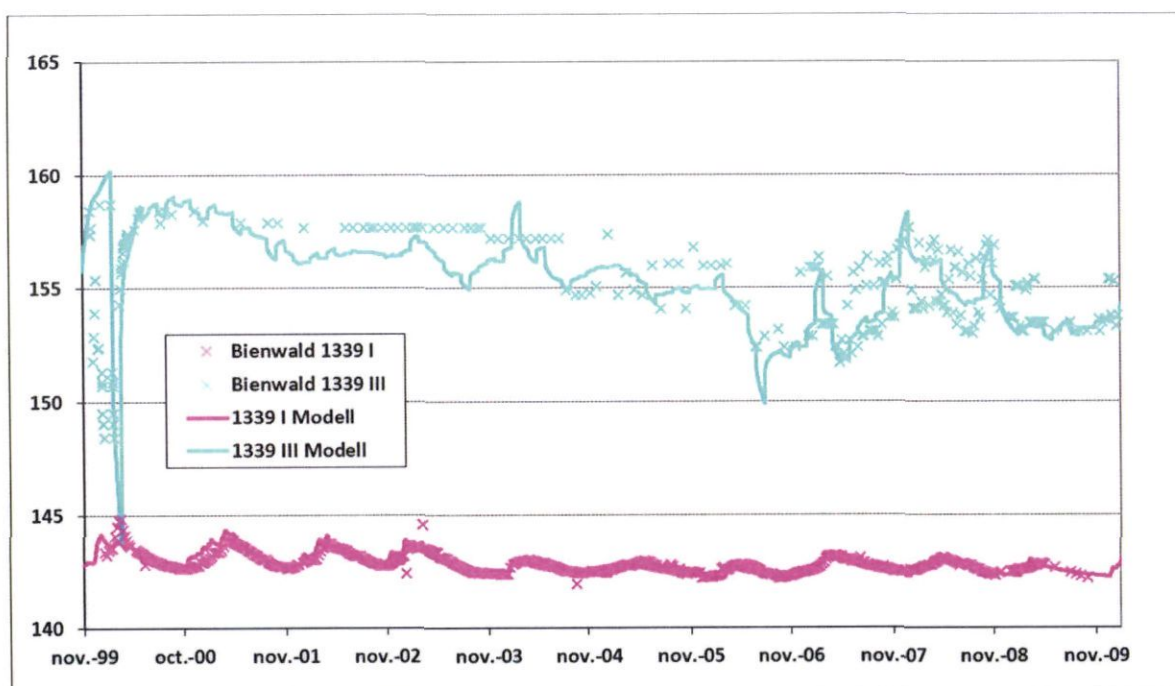


Figure 35 : Charges hydrauliques à Bienwald 1339, aquifères I et III

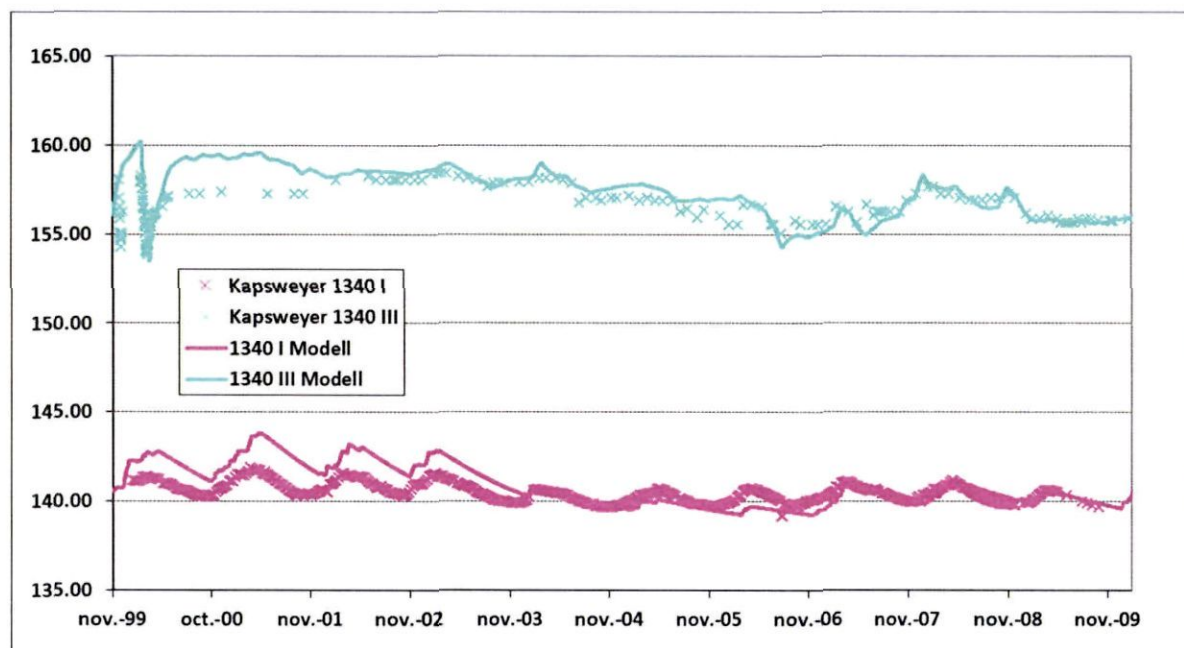


Figure 36 : Charges hydrauliques à Bienwald 1339 aquifères I et III

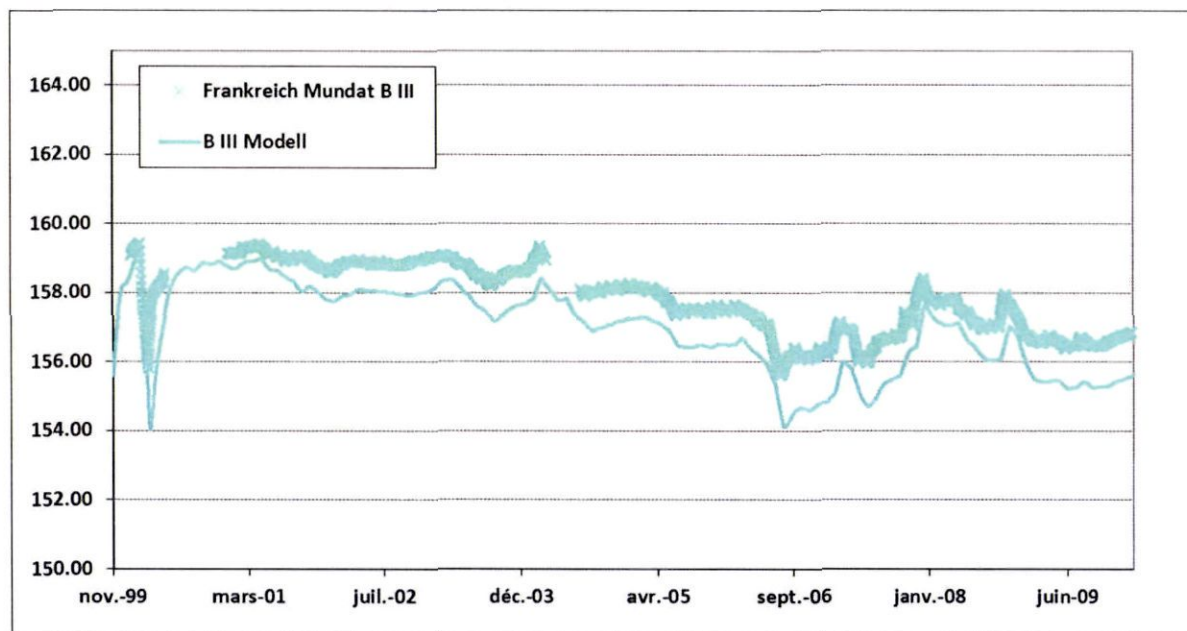


Figure 37 : Charges hydrauliques à Mundat, aquifère III

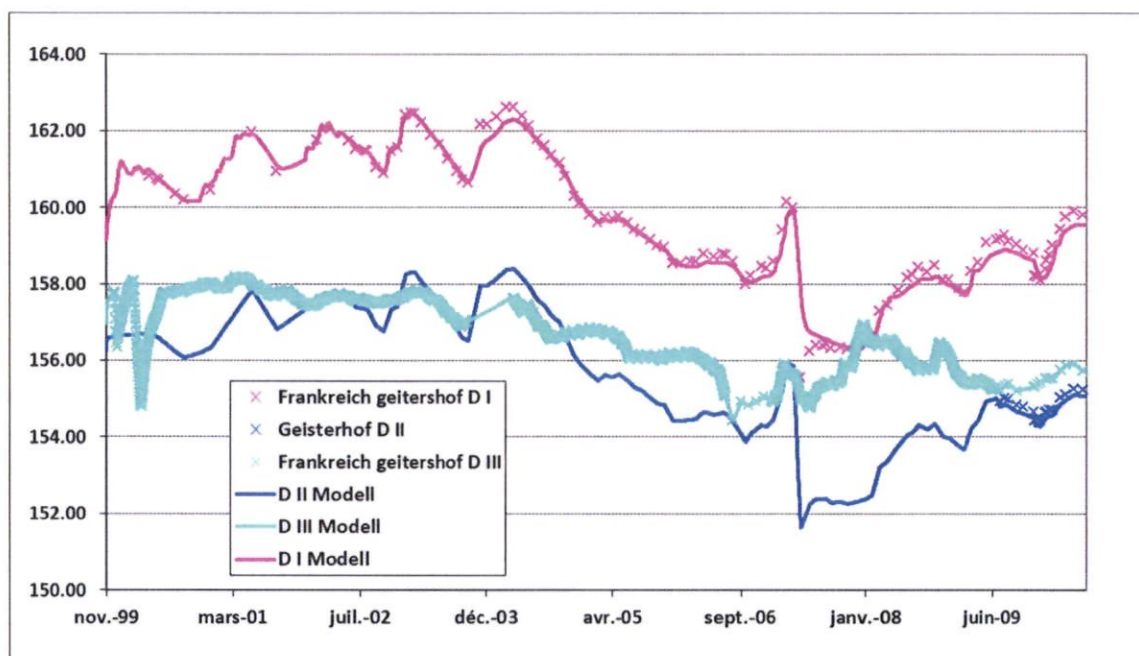


Figure 38 : Charges hydrauliques à Geitershof, aquifères I, II et III
(avril 2007 : pompage pour l'irrigation)

b) Charges hydrauliques du 2 juillet 2009

Des relevés piézométriques ont été effectués le 2 juillet 2009 dans chaque aquifère. Ils ont permis de tracer les courbes isopièzes associées, desquelles découlent directions et gradients d'écoulement. Les isopièzes simulées et celles tracées à partir de mesures de terrain dites « observées » sont comparées en figures 38 à 40 par aquifère.

Pour les aquifères superficiel et médian où les gradients d'écoulements sont les plus élevés, elles sont représentées tous les 5 m, et pour l'aquifère profond tous les 1 m. Le graphique de la figure 42 illustre par ailleurs la qualité du calage aux piézomètres de référence en comparant les charges calculées aux charges observées pour chaque aquifère. Les points doivent se trouver alignés sur une droite passant par le point moyen de coordonnées (moyenne(X); moyenne(Y)) avec un coefficient directeur proche de 1. Le coefficient de corrélation linéaire permet de quantifier la qualité de l'ajustement : plus il est proche de la valeur 1, meilleur est l'ajustement.

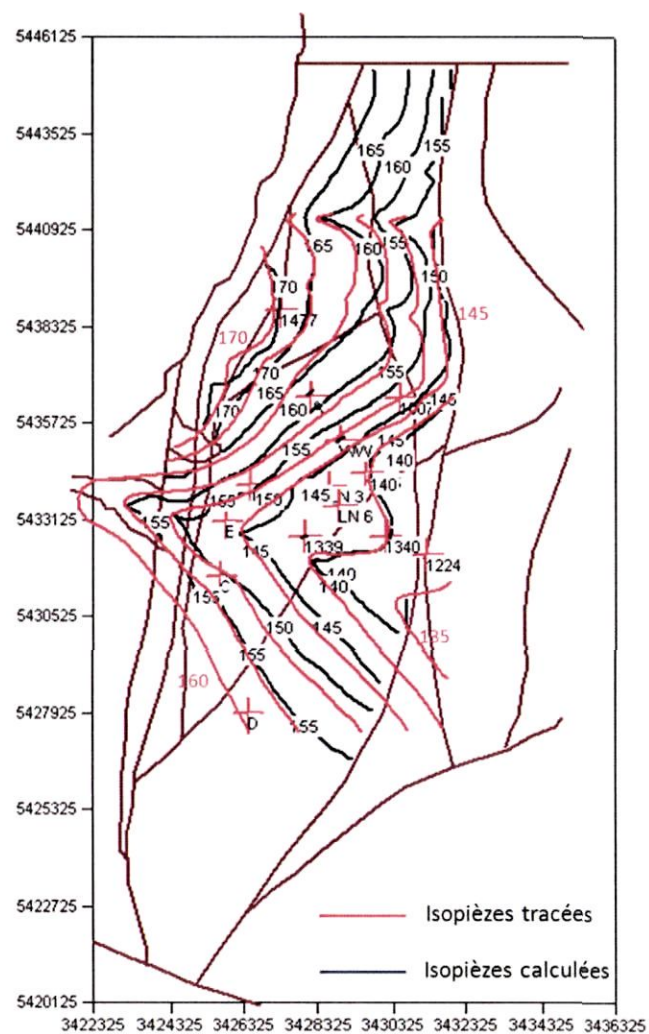


Figure 39 : Cartes des isopièzes « observées » et simulées pour l'aquière superficielle

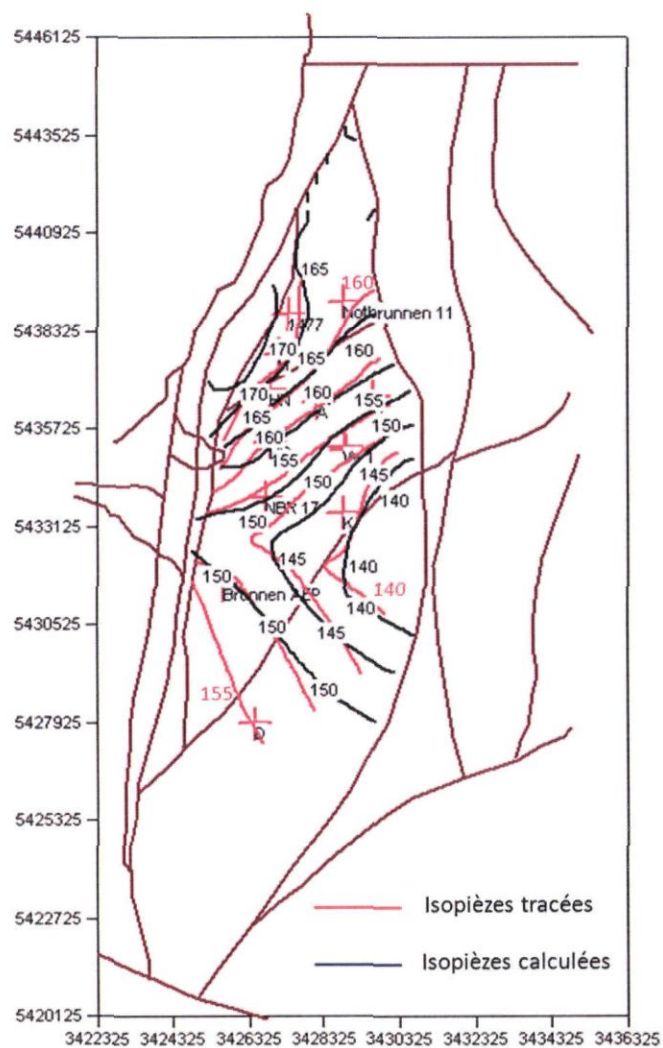


Figure 40 : Cartes des isopièzes « observées » et simulées pour l'aquière médian

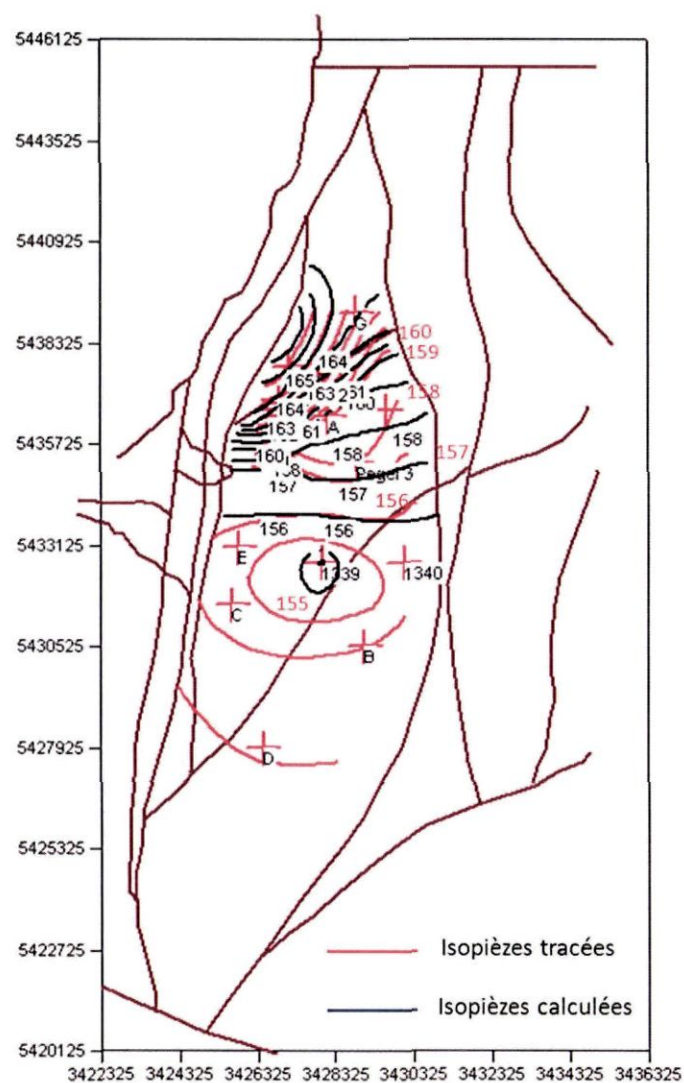


Figure 41 : Cartes des isopièzes « observées » et simulées pour l'aquière profond

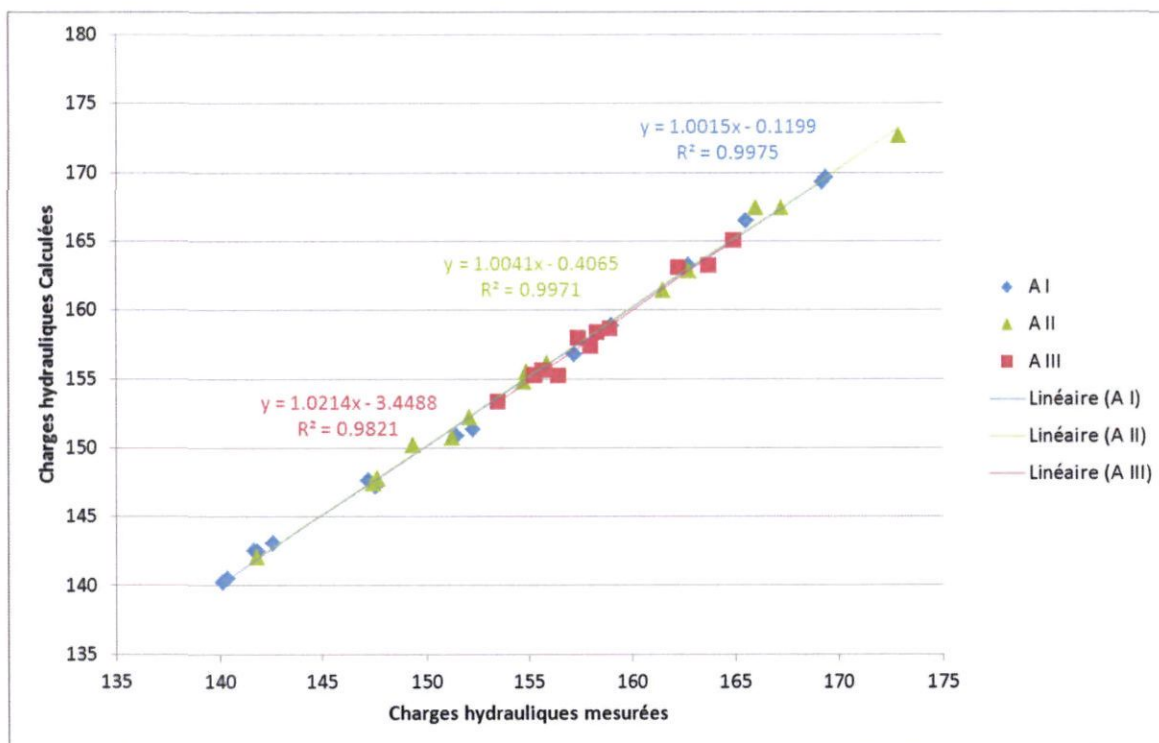


Figure 42 : Graphique des charges calculées en fonction des charges mesurées
(référence du 2 juillet 2009)

c) Carte des différences de charge entre aquifères et du niveau artésien de l'aquifère profond

Afin d'identifier les zones de surpression ou dépression des niveaux relatifs d'eau de chaque aquifère, des cartes de la différence de charge entre les aquifères II et I ainsi que III et II ont été calculées à la date du 2 juillet 2009 (cf. figure 42). Ces cartes montrent que l'aquifère médian est en grande partie en dépression par rapport à l'aquifère superficiel dans trois zones du modèle (nord-ouest, sud et est). Ainsi dans ces zones, il y a un écoulement vertical possible depuis l'aquifère I vers l'aquifère II. L'aquifère profond est majoritairement en surpression par rapport à l'aquifère médian excepté sur une bande au nord-ouest où il est en dépression. Cette bordure du modèle constitue la seule zone de recharge potentielle depuis l'aquifère II. La figure 43 indique les zones d'artésianisme de l'aquifère profond en été 2009. Elles sont localisées essentiellement en zone centrale.

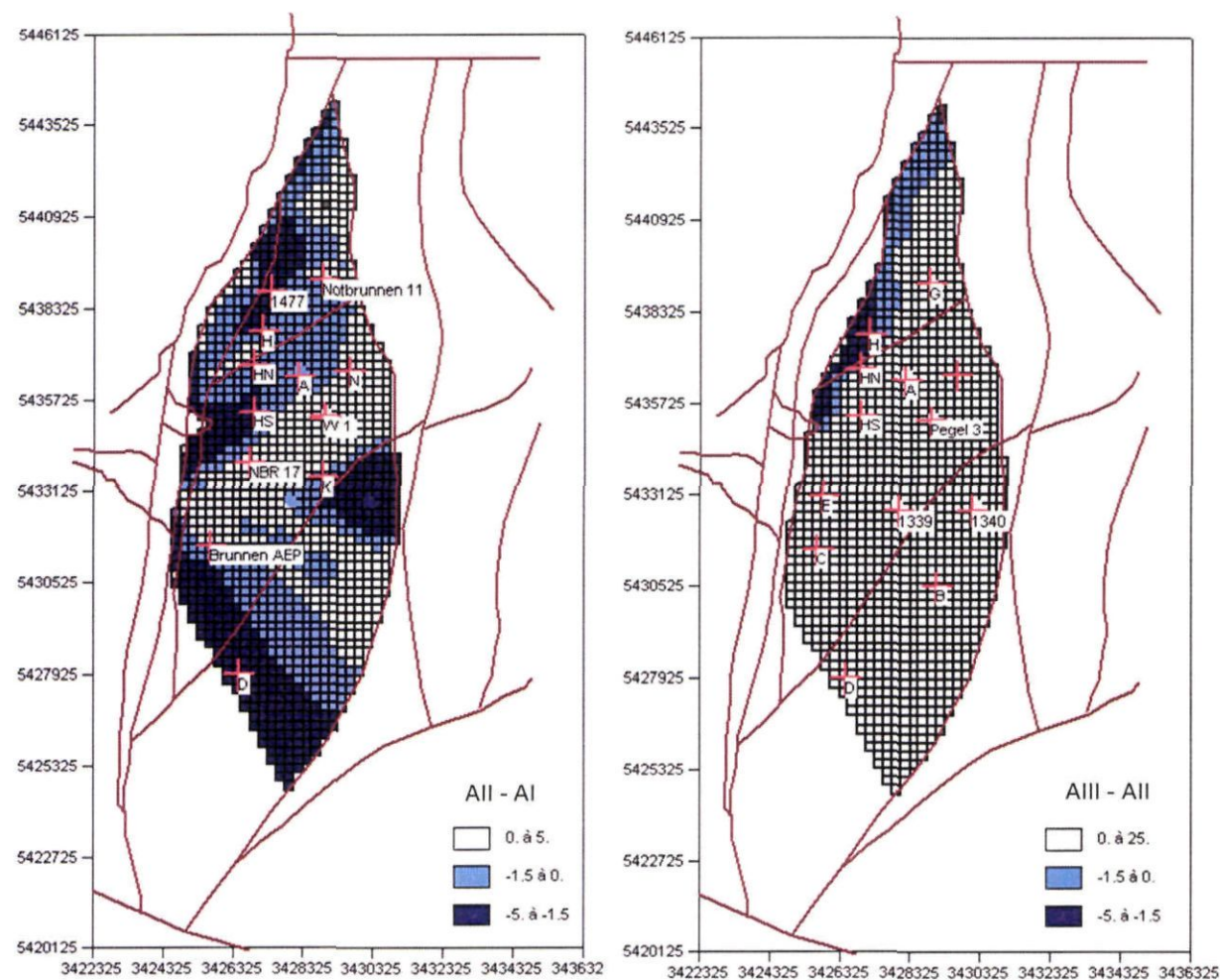


Figure 43 : Différences des charges (m) entre aquifère II/I et III/II

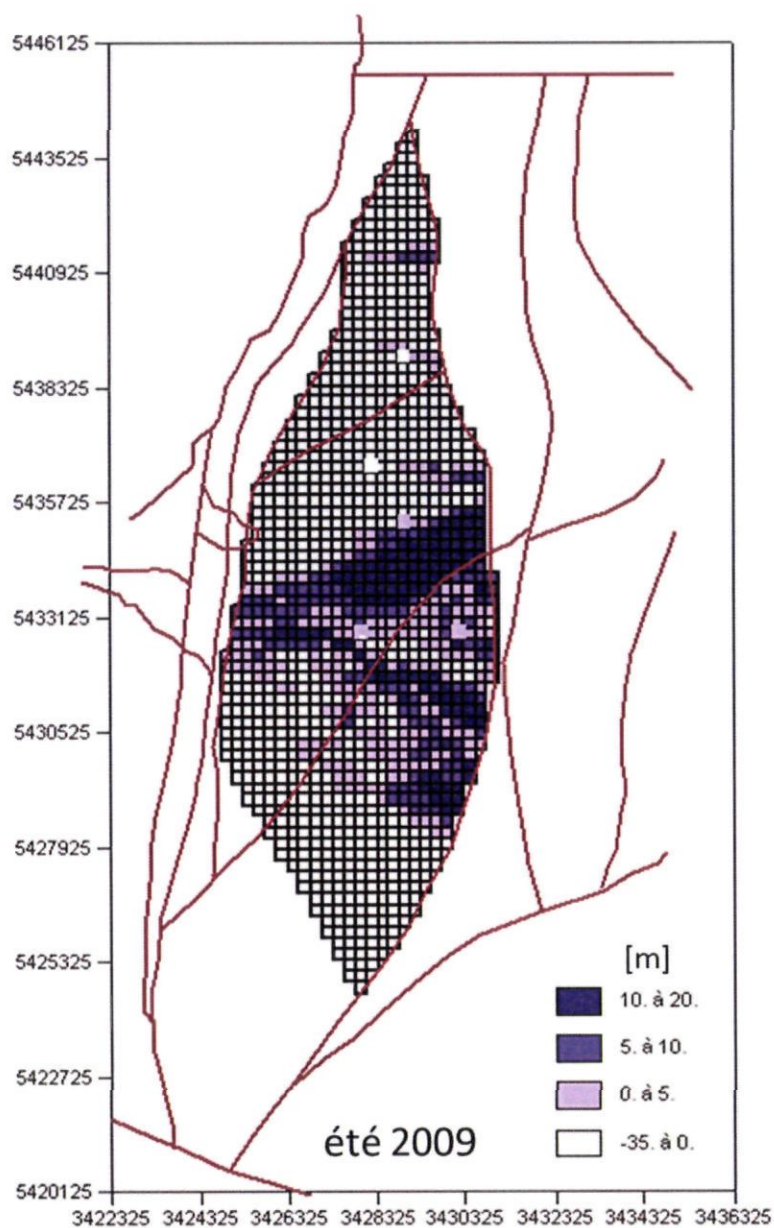


Figure 44 : Zone d'artésianisme de l'aquifère profond (violet : artésien)

2.4. BILANS HYDRODYNAMIQUES

Les bilans des volumes d'eau par aquifère au pas mensuel ont été calculés sur la période de novembre 1999 à mai 2010 (cf. figures 45 à 48). Ils permettent de visualiser les périodes excédentaires (stockage) ou déficitaires (déstockage) en eau. Les composantes du bilan sont :

- Les entrées ou sorties par les limites latérales (potentiel imposé) du modèle,
- Les échanges avec les couches aquifères inférieure et/ou supérieure (drainance ascendante ou descendante),
- L'infiltration dans l'aquifère superficiel (recharge par la pluie),
- Les débordements en surface (rivières)
- Les prélèvements dans les aquifères médian et profond
- Les volumes stockés (positifs) ou déstockés (négatifs)

L'analyse des bilans hydrodynamiques calculés montre une période de recharge de la nappe importante par les pluies efficaces hivernales pour 4 hivers successifs de 1999 à 2002. La pluie efficace la plus forte ayant été enregistrée en hiver 2000/2001 avec une infiltration de l'ordre de 43 Mm³ due à 3 fortes pluies successives qui ont eu lieu en novembre 2000, janvier et mars 2001. L'hiver précédent fut également marqué par de fortes pluies avec 34 Mm³ d'infiltration, dont la moitié a eu lieu sur le seul mois de décembre 1999. Les deux hivers suivants (2001/2002 et 2002/2003) ont été marqués par des pluies efficaces de l'ordre de 29 et 23 Mm³. Les 3 hivers qui ont ensuite suivi (2003 à 2005) ont été marqués par de faibles pluies efficaces (moins de 5 Mm³ d'eau infiltrés). Les hivers 2006/2007 et 2007/2008 sont à nouveau un peu plus pluvieux mais sans atteindre les niveaux précédents (entre 17 et 18 Mm³). Enfin, les pluies hivernales de 2008/2009 et 2009/2010 sont à nouveau moins efficaces (entre 8 et 10 Mm³). Ainsi, on distingue une période excédentaire en pluie de 1999 à 2002 qui s'accompagne d'un fort stockage dans l'aquifère superficiel mais aussi médian, suivie d'une période de sécheresse (2003 à 2005) et d'une période de recharge moyenne de 2006 à 2010.

Le stockage (positif) ou déstockage (négatif) ainsi que les volumes prélevés montrent une évolution similaire au cours du temps pour l'aquifère profond mais différente pour l'aquifère médian. En effet, ce dernier est soumis à des prélèvements très inférieurs à l'aquifère profond et est également plus marqué par les infiltrations. Dans l'aquifère médian, les déstockages ont lieu durant l'été lorsqu'il n'y a plus de pluies efficaces. En avril 2007, on note un déstockage plus marqué qui a lieu également dans l'aquifère superficiel du fait d'une irrigation durant cette période (du 03/04/07 au 03/05/07).

L'aquifère profond montre un déstockage marqué en février 2000, suite à l'essai de pompage au piézomètre « Bienwald 1339 ». Les périodes de déstockage important coïncident avec les forts prélèvements dans cet aquifère. On peut également noter que la limite à potentiel imposée (limite sud) de l'aquifère profond induit essentiellement une sortie d'eau vers l'extérieur, situation qui peut temporairement s'inverser.

En effet, le potentiel imposé le long de cette limite correspond au niveau piézométrique du piézomètre « D » installé le plus au sud de l'aquifère profond. L'écoulement naturel va du nord (zone de recharge) au sud-sud-ouest dans la zone d'étude, pour sortir par la limite sud. En cas de prélèvements importants dans l'aquifère profond (cf. Chap. 2.3 Tab. 1, pompages d'essai), l'ensemble de la nappe est affecté d'un rabattement, et ce jusqu'à la limite sud où est implanté le piézomètre D (cf. Fig. 41 : Cartes des isopièzes « observées » et « simulées » pour l'aquifère profond). Ainsi l'écoulement vers le sud

diminue et peut temporairement s'inverser suivant les mesures piézométriques, avec des apports le long de la limite sud. Les calculs du modèle montrent que ce flux ne représente toutefois qu'une faible contribution par rapport aux flux de la limite nord, avec moins de 6% pour les flux maximaux (sauf pendant les 3 pompages d'essai avec des débits supérieurs à $70 \text{ m}^3/\text{h}$ contre $34 \text{ m}^3/\text{h}$ en moyenne).

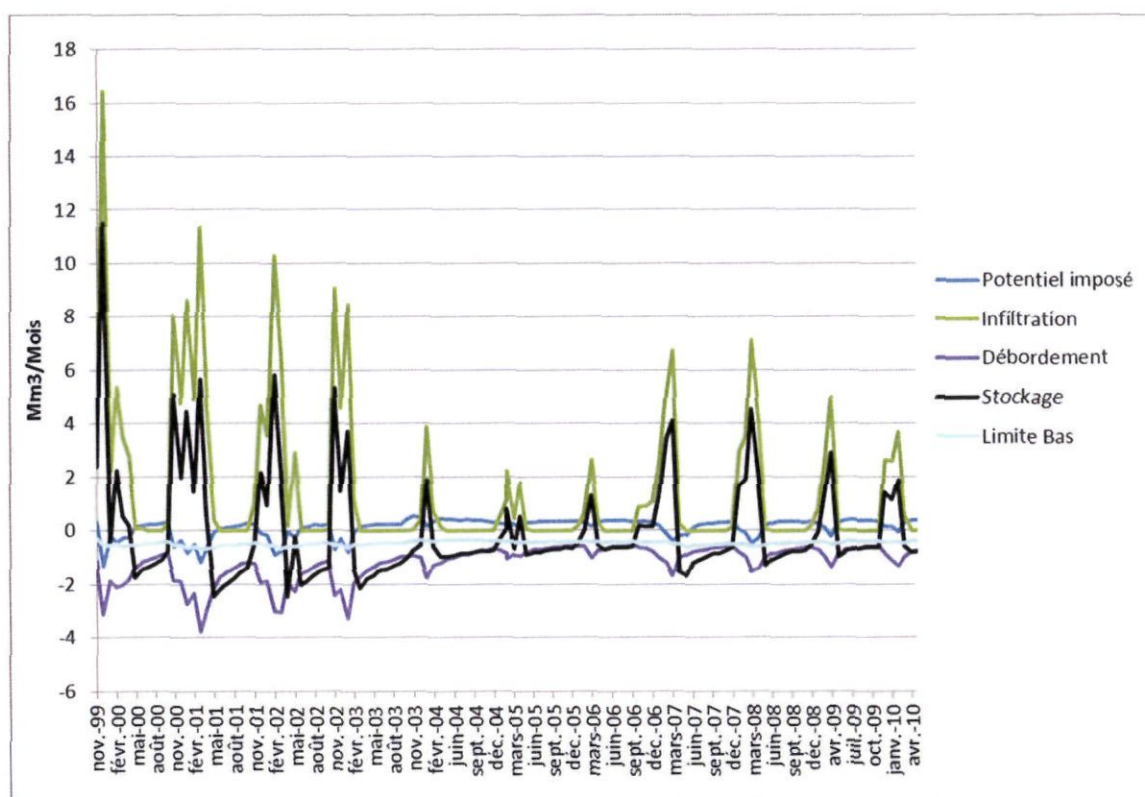


Figure 45 : Bilans mensuels pour l'aquifère superficiel (A I)

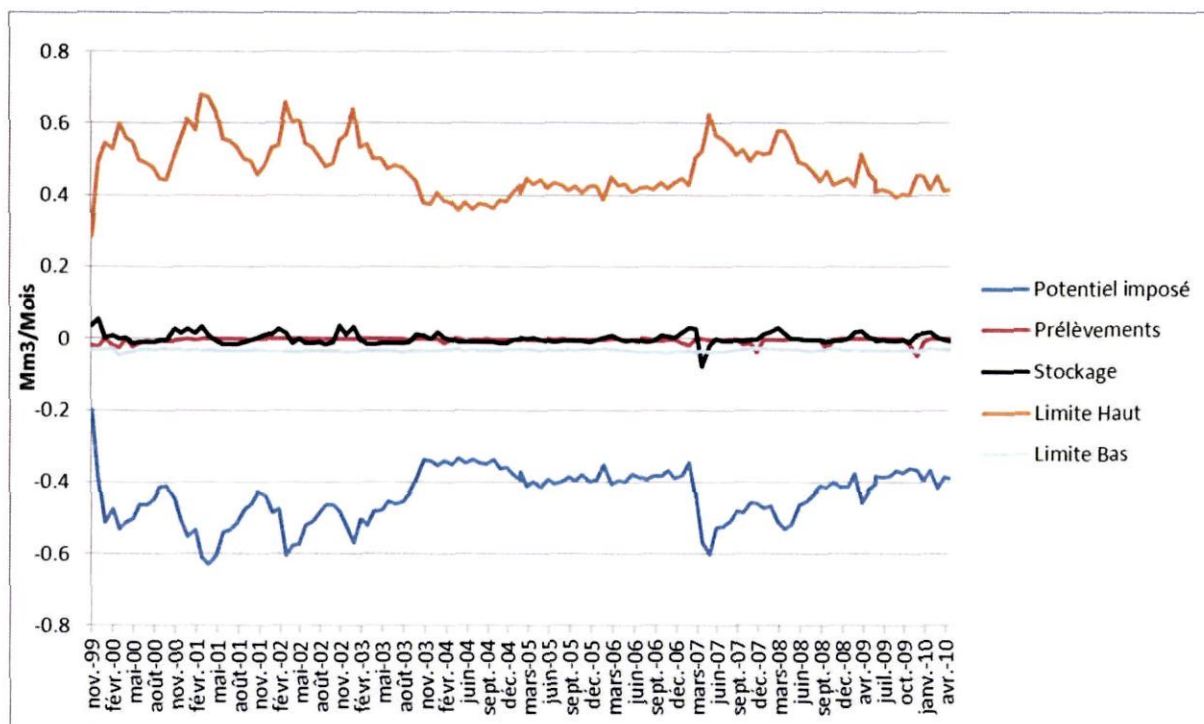


Figure 46 : Bilans mensuels pour l'aquifère médian (A II)

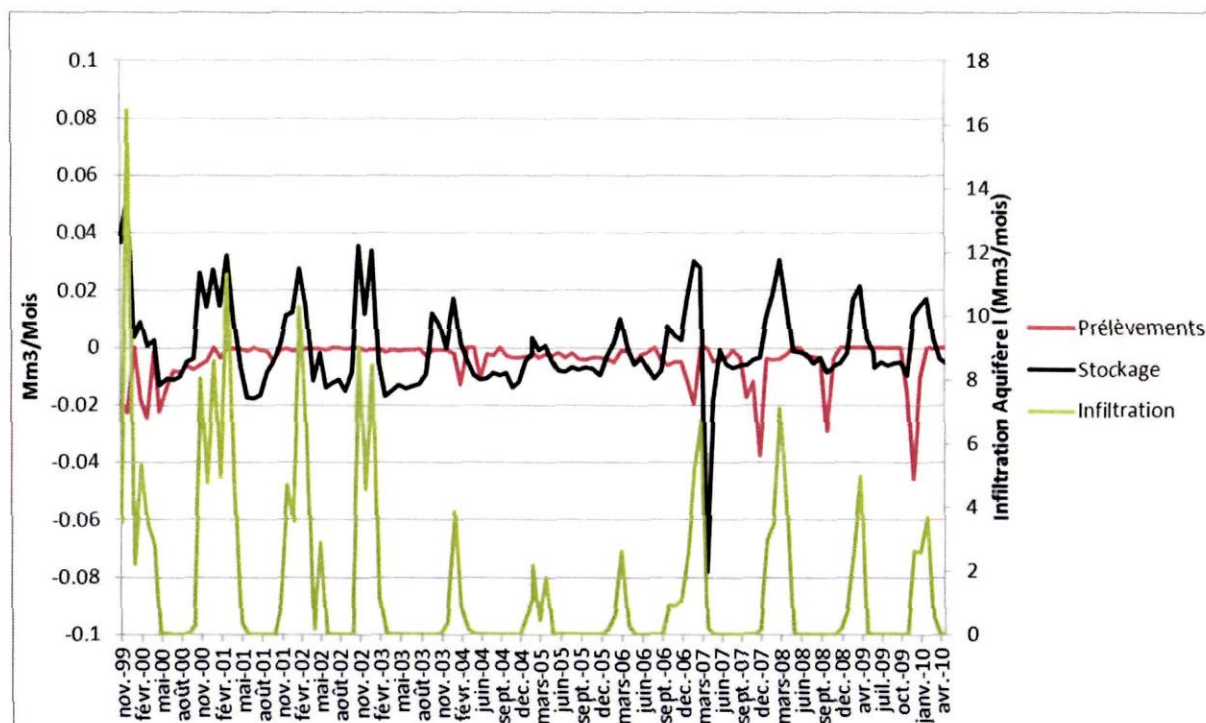


Figure 47 : Prélèvements et stockages mensuels pour l'aquifère médian (A II), avec indication de l'infiltration sur l'axe secondaire

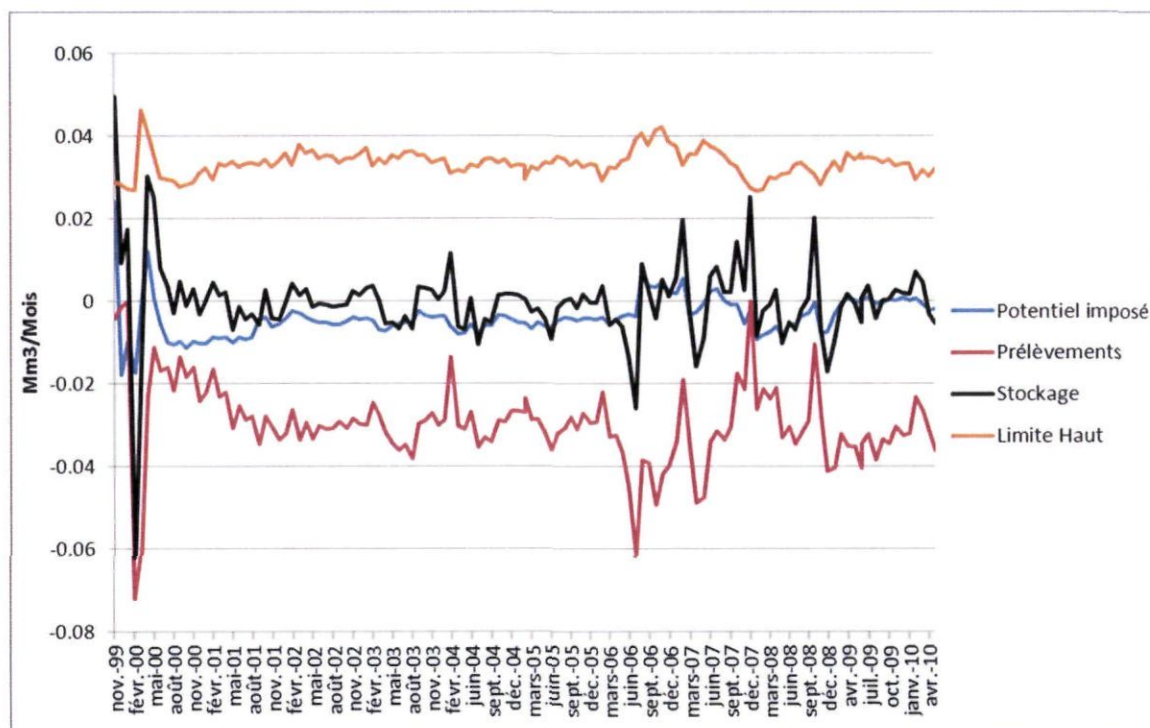


Figure 48 : Bilans mensuels pour l'aquifère profond (A III)

3. Scenarii de gestion de l'aquifère multicouche

Le groupe de travail scientifique transfrontalier (LAG, Länderübergreifende Arbeitsgruppe) a décidé de simuler trois scenarii prévisionnels pour évaluer l'influence des prélèvements dans les deux aquifères profonds exploités par le syndicat des eaux (cf. Fig. 49). Ces calculs sont nécessaires pour mieux gérer cette ressource, car la phase d'étude antérieure (2005-2007) a montré l'aquifère profond offrirait une ressource limitée vis-à-vis d'une augmentation importante des prélèvements actuels.

Pour répondre au problème posé, le groupe de travail transfrontalier a décidé d'améliorer la connaissance de l'aquifère médian et de ses relations avec l'aquifère supérieur et l'aquifère profond.

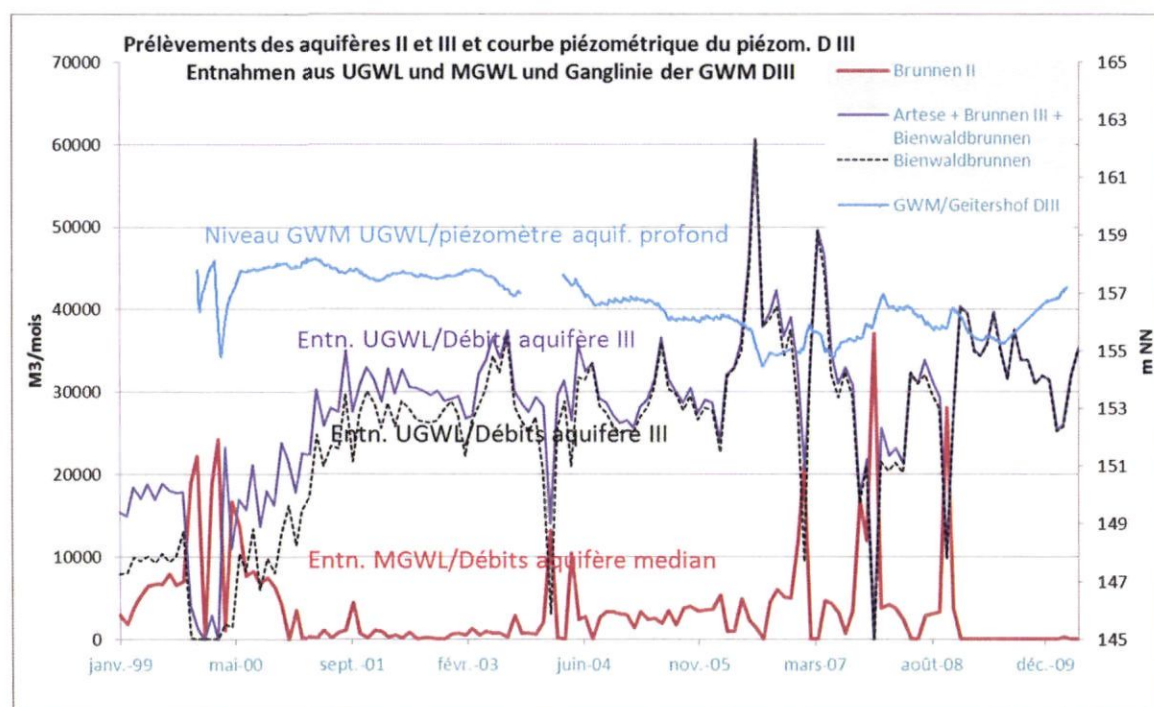


Figure 49 : Prélèvements en eau potable dans l'aquifère médian (II) et profond (III) et chronique piézométrique du piézomètre D (aquifère III)

LES 3 SCENARI

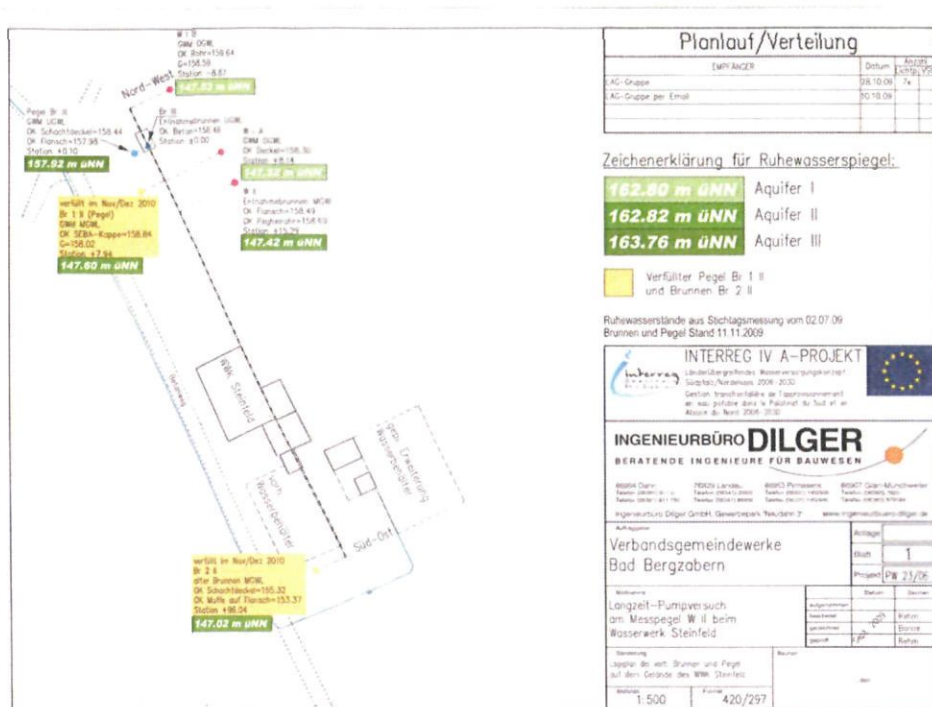


Figure 50 : Plan de positionnement des puits et piézomètres à Steinfeld

Scénario I

Ce scénario I se propose de simuler une modification du régime d'exploitation des réservoirs pour n'exploiter que l'aquifère intermédiaire (« MGWL », mittlerer Grundwasserleiter ou aquifère II). Par rapport au régime d'exploitation actuel, ce scénario I correspond donc à un transfert des pompages de l'aquifère profond (aquifère III) vers l'aquifère intermédiaire, sans modifier l'amplitude globale des prélèvements moyens.

Les données d'entrée correspondent donc à un arrêt des prélèvements dans l'aquifère profond et à un pompage fictif continu de 300 000 m³/an (=34 m³/h) dans l'aquifère intermédiaire, dans le nouveau puits d'exploitation temporelle WII, à condition que la nappe puisse satisfaire la demande.

Jusqu'à présent, l'aquifère intermédiaire a été exploité temporairement, en complément à l'aquifère profond, à des débits variant de 0 à 40 000 m³/mois (=0 à 55 m³/h, cf. Fig. 49).

Scénario II

Le scénario II teste les effets d'un fort besoin en eau, à hauteur des besoins actuels pendant les pics de consommation en eau potable. Le scénario simule une exploitation

conjointe de l'aquifère intermédiaire et de l'aquifère profond. Pour chacun des aquifères, le débit pompé est de 300 000 m³/an (34.25 m³/h), soit un débit annuel total de 600 000 m³/an.

Jusqu'à présent l'aquifère profond, majoritairement sollicité, a été exploité avec des débits variant de 20 000 à 40 000 m³/mois (27 à 55 m³/h, cf. Fig. 49). L'année précédant le démarrage du scénario (2009/2010), la moyenne des prélèvements a été environ de 31000 m³/mois (43 m³/h).

Scénario III

Le scénario III vise à simuler l'impact d'une longue période de sécheresse (recharge réduite) pour évaluer les effets du changement climatique, en association avec l'exploitation intensive des deux aquifères décrite pour le scénario II.

La simulation se base sur la période de sécheresse observée entre 2003 et 2006, avec une précipitation égale à 80 % de celle d'une année moyenne et une pluie efficace égale à 76 % de la moyenne

Remarque : La charge imposée le long de la limite sud-ouest influence le débit qui sort ou entre vers la zone d'étude dans l'aquifère profond. Pour les scénarios II et III, un niveau fixe de 155.75 m a été retenu, égal au niveau piézométrique observé dans le piézomètre « Geitershof DIII » pour un débit de prélèvement de 34 m³/h dans l'aquifère profond (=300000 m³/an), ce qui correspond à celui appliqué aux scénarios II et III. À titre d'analyse de sensibilité, un calcul complémentaire encore plus pessimiste a été réalisé avec le niveau minimal observé de 154.82 m NN pour évaluer l'influence de la charge imposée sur les niveaux simulés et le bilan hydraulique.

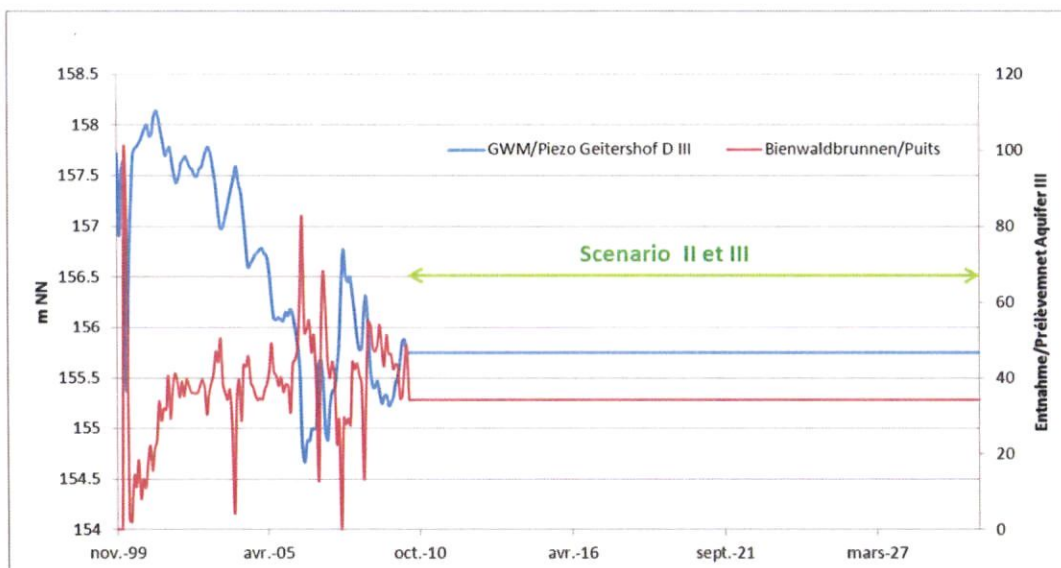


Figure 51 : Prélèvements dans le puits Bienwald (courbe rouge, m³/h) et charges imposées pour les scénarios II et III (courbe bleue)

3.1. PRÉCIPITATIONS ET ÉVAPOTRANSPIRATION APPLIQUÉES AUX SCENARI

La figure 52 montre les valeurs moyennes mensuelles des pluies et de l'évapotranspiration au cours des 10 dernières années (1999 à 2009). Ces valeurs ont été appliquées pour les Scenarii I et II. Le calcul de l'infiltration dans le modèle hydrodynamique est basé sur un calcul de bilan hydro-climatique (cf. chap. 2.3).

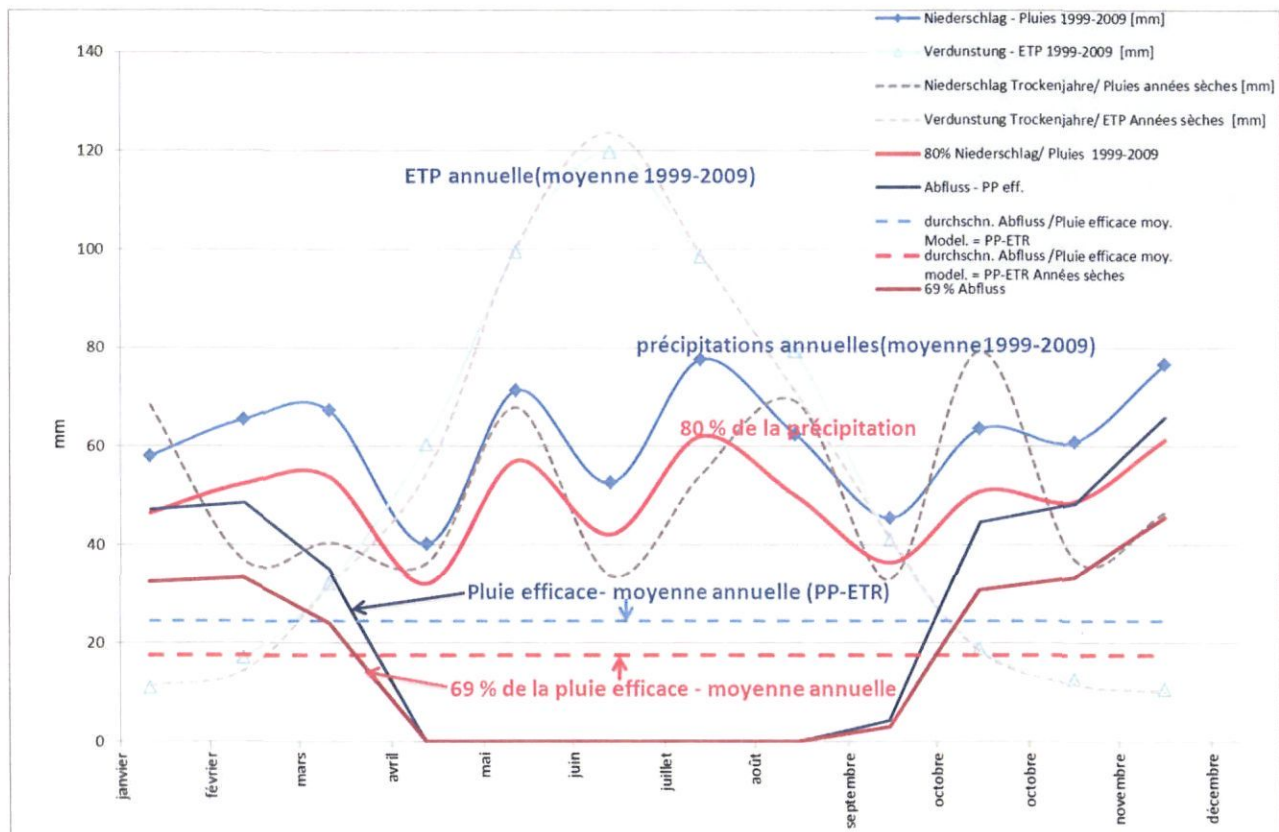


Figure 52 : Valeurs moyennes mensuelles des pluies et ETPs, ainsi que des pluies efficaces simulées par le modèle

Le scénario III simule une pluie réduite de 20 %. Les 3 années 2003 à 2006 sont connues comme période de sécheresse dans la zone d'étude, avec de faibles pluies hivernales. Malgré quelques mois de fortes précipitations (janvier et octobre), les pluies efficaces y sont de 31 % inférieures aux moyennes.

Pour ne pas surestimer les fortes pluies ponctuelles durant la période de sécheresse, 80% des pluies moyennes ont été appliquées. Les pluies efficaces atteignent alors 69% des valeurs moyennes. Ces valeurs sont jugées plus représentatives pour l'application dans le scénario III (cf. Fig. 52).

La figure 53 présente les résultats du calcul du bilan hydro-climatique pour des pluies moyennes et des pluies d'une période sèche (2003 à 2006), correspondant à 80 % de pluies moyennes. L'infiltration moyenne vers les nappes diminue fortement, de 126 mm/an à 34 mm/an (avec une recharge maximale de 11 mm dans le mois d'avril). Une réduction des pluies de 20% se traduit donc par une diminution beaucoup plus importante de l'infiltration vers les nappes, de l'ordre de $(126-34)/126 = 73\%$.

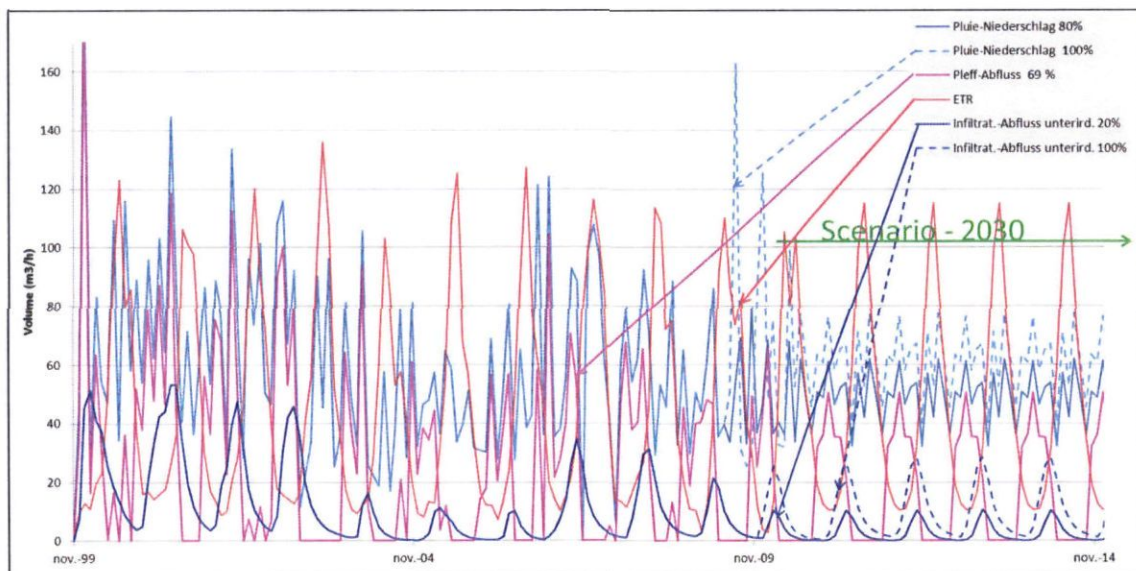


Figure 53 : Bilan hydro-climatique mesuré (1999-2009) et simulé (2009-2030)

3.2. RÉSULTATS DES TROIS SCENARI

3.2.1. Schéma du bilan global

Le bilan global sur l'ensemble de la zone d'étude, avec l'exemple de décembre 2030 (fin de la simulation du scénario II), montre des échanges importants entre les différents niveaux aquifères :

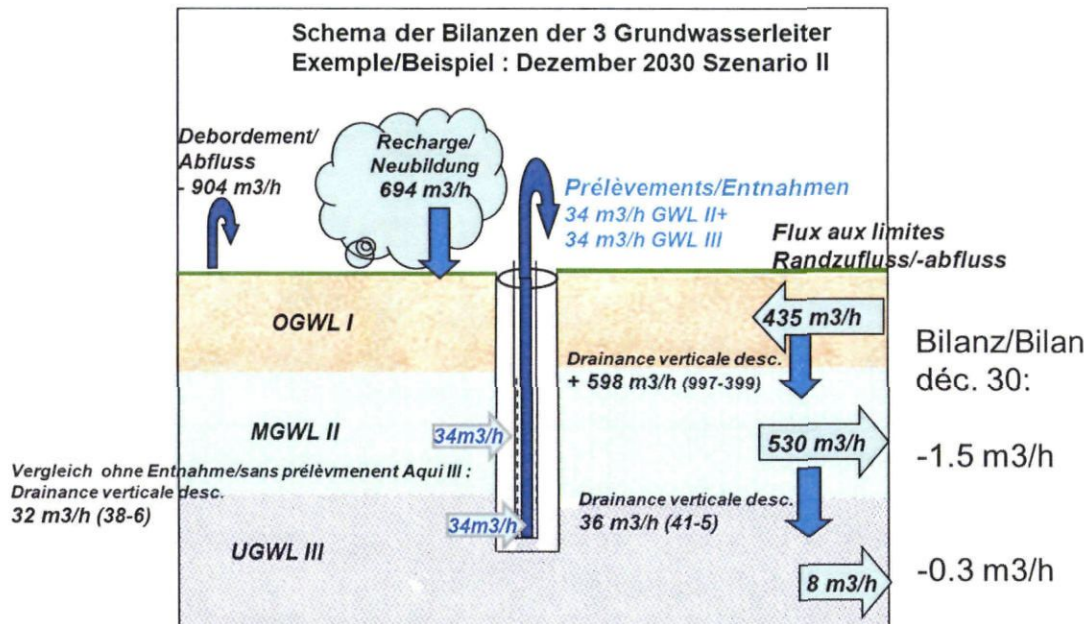


Figure 54 : Bilan hydraulique et échanges entre les différents aquifères. Exemple du mois de décembre 2030 (Scénario II)

Niveau aquifère supérieur, OGWL I

L'alimentation latérale souterraine de la zone d'étude par le nord-ouest est simulée par une limite à potentiel imposé, à un débit de 435 m³/h.

La recharge vers la nappe supérieure (OGWL I) par infiltration s'élève à 694 m³/h dans la zone d'étude.

De cette somme des deux sources d'entrée dans l'aquifère supérieur, 904 m³/h ressortent par débordement du système et 598 m³/h traversent la couche semi-perméable vers l'aquifère intermédiaire. Pour ce mois de décembre, le bilan de l'aquifère supérieur présente alors un solde négatif.

Niveau aquifère intermédiaire, MGWL II

Cet aquifère est captif sur une partie de son extension. Dans ce contexte particulier, son niveau piézométrique est plus élevé que celui de l'aquifère supérieur. Les zones captives sont ainsi caractérisées par une drainance ascendante de la nappe intermédiaire (399 m³/h). La différence entre l'infiltration de l'aquifère supérieur vers la nappe médiane (997 m³/h) et cette drainance vers la nappe supérieure est alors de 598 m³/h.

Un flux de 530 m³/h sort par la limite est de la zone du modèle ; 34 m³/h sont prélevés du puits à Steinfeld (puits d'exploitation temporaire WII) et 36 m³/h traversent la couche inférieure semi-perméable vers la nappe profonde

Niveau aquifère inférieur (UGWL III)

La somme des flux souterrains, égale à 36 m³/h, est calculée par différence entre la drainance descendante (41 m³/h) et la drainance ascendante (5 m³/h) dans la zone captive, et notamment dans la zone artésienne du Bienwald.

8 m³/h sortent de la zone d'étude par la limite sud-ouest, définie par une limite imposée. 34 m³/h sont prélevés du puits d'exploitation du Bienwald (puits 1339).

Le bilan indique un système équilibré pour décembre 2030 (très faiblement négatif - 1.5 m³/h pour l'aquifère intermédiaire et 0.3 m³/h pour l'aquifère profond, sans doute pas significatifs car ils correspondent à un petit écart de convergence du modèle).

3.3. RÉSULTATS DU SCÉNARIO I : PIEZOMETRIE

3.3.1. Impact des prélèvements du scénario I sur les trois nappes à proximité du puits d'exploitation

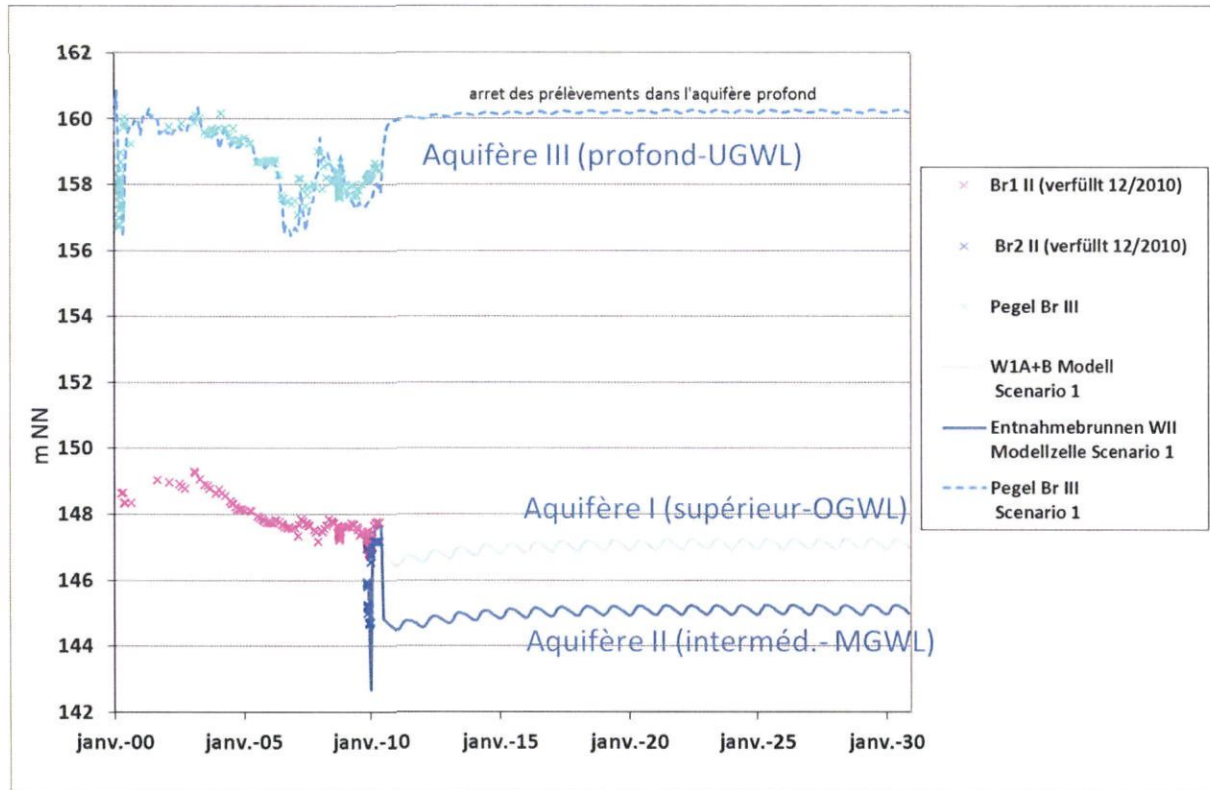


Figure 55 : Impact des prélèvements du scénario I sur les trois aquifères à Steinfeld (au voisinage direct du puits d'exploitation. Traduction : verfüllt : abandonné ; Entnahmeverbrennen : puits d'exploitation, Modellzelle : maille du modèle)

La figure 55 montre les 3 piézomètres au voisinage du puits d'exploitation qui réagissent le plus aux prélèvements: on constate que les nappes atteignent un nouvel état d'équilibre au bout d'une dizaine d'années pour une exploitation de 300 000m³/a dans l'aquifère intermédiaire. La nappe peut donc fournir le débit demandé.

Impact du Scénario 1 sur les puits et piézomètres de Steinfeld :

- Aquifère profond : Sans prélèvement dans l'aquifère III (profond), le niveau piézométrique remonte en l'espace de 6 mois pour se stabiliser à un niveau de 160.2 m NN (NN=niveau 0 d'Allemagne).
- Les nouveaux piézomètres WIA+B (aquif. I) réagissent instantanément avec une douzaine de centimètres de rabattement aux prélèvements dans l'aquifère intermédiaire du puits d'exploitation WII (de 147,0 m à 146,88 m), pour atteindre un

état d'équilibre, variable en fonction de la saison, de 146.4 m NN à 146.8 m NN (0.3 à 0.5 m de rabattement);

- Le modèle calcule pour la cellule du puits d'exploitation WII (25X25 m) un fort rabattement correspondant au centre du cône de rabattement. Si on déduit les variations saisonnières, le rabattement maximal est atteint en l'espace d'un pas de temps (1 mois), puis le niveau piézométrique remonte légèrement à un niveau de 144.5 m NN (charge hydraulique moyenne dans la maille, supérieure à celle du puits).

3.3.2. Impact des prélèvements du scénario I sur les nappes dans la zone d'étude

Impact du Scénario I sur l'aquifère superficiel (aquifère I)

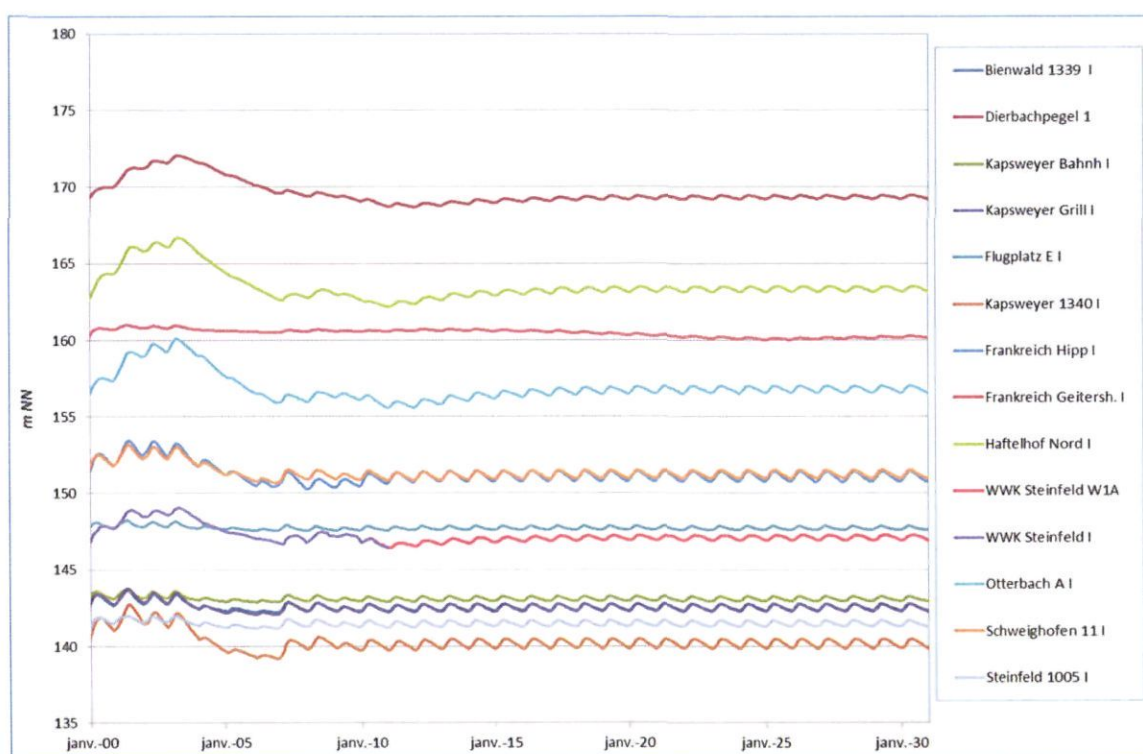


Figure 56 : Impact des prélèvements du scénario I sur l'aquifère supérieur (aquifère I)

Les prélèvements dans l'aquifère intermédiaire n'ont que des répercussions très limitées sur l'aquifère superficiel (figure 56). Cette influence est notamment visible par une comparaison avec un scénario sans aucun prélèvement (cf. chap. Scénario Ibis, Fig. 59).

On observe dans une grande partie des piézomètres un niveau de nappe qui remonte légèrement à partir de juin 2010 sous l'effet de valeurs moyennes d'infiltration légèrement supérieures aux infiltrations des années antérieures (2008 et 2009, cf. Fig. 54).

Impact du Scénario I sur l'aquifère intermédiaire (aquifère II) dans la zone d'étude (fig. 56)

L'évolution du niveau piézométrique de l'aquifère intermédiaire montre des fluctuations saisonnières comparables entre les piézomètres de cet aquifère.

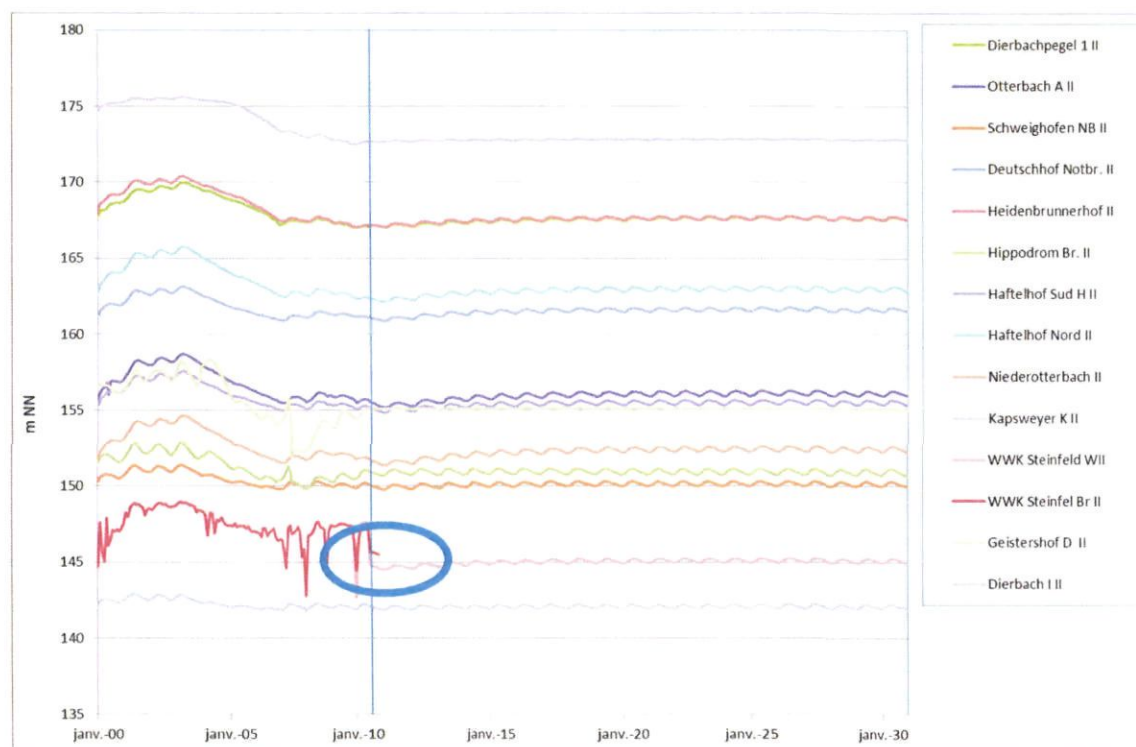


Figure 57 : Impact des prélèvements du scénario I sur l'aquifère intermédiaire

Avec une simulation de prélèvements de 300 000 m³/an dans l'aquifère intermédiaire à partir de juin 2010 (ligne verticale sur la Fig. 57), le niveau piézométrique du puits de pompage WWK Steinfeld WII et du piézomètre Steinfeld BrII baissent instantanément de 2 à 3 m. Ce rabattement immédiat et fort n'est pas observé sur les autres piézomètres de cet aquifère : Le niveau de ces derniers baisse pendant quelques mois pour ensuite remonter pendant 4 à 5 années, avant de se stabiliser à un niveau qui correspond au niveau de l'année 2005. Comme pour la nappe supérieure, cette évolution est liée aux valeurs moyennes d'infiltration qui sont légèrement supérieures aux infiltrations des années antérieures (2008 et 2009, cf. Fig. 52).

Tous les piézomètres sont influencés par un battement saisonnier.

Impact du Scénario I sur la nappe profonde (aquifère III) dans la zone d'étude (fig. 58)

Dans le cas de prélèvements uniquement dans l'aquifère intermédiaire, objet de ce scénario I, le niveau de la totalité des piézomètres de la nappe profonde remonte en l'espace de 4 à 5 mois ; il s'équilibre à un niveau comparable à celui du printemps 2004 au bout de 5 ans.

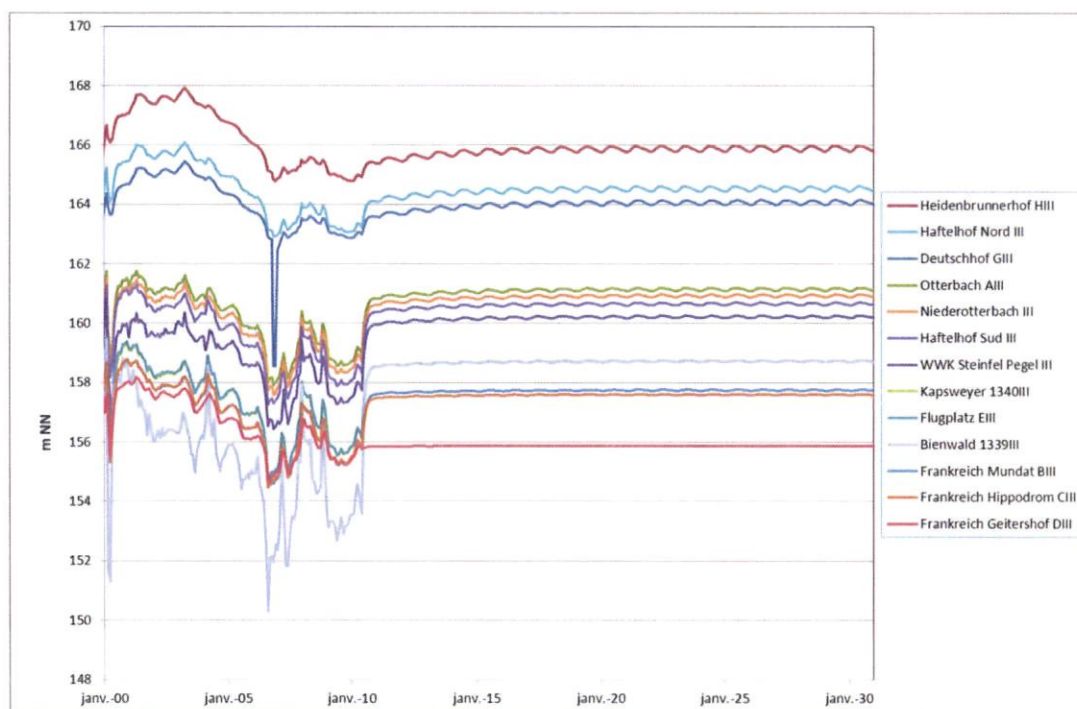


Figure 58 : Impact des prélèvements du scénario I sur l'aquifère profond dans toute la zone d'étude

L'évolution piézométrique de la nappe profonde montre une variabilité saisonnière pour les piézomètres situés au nord près de la zone de recharge. Dans la zone centrale, cette variabilité se réduit et disparaît entièrement dans le sud (piézomètre Geitershof DIII), ce qui s'explique par les potentiels imposés le long de la limite sud.

Effet du scénario I sur l'aquifère superficiel : comparaison avec une situation sans aucun prélèvement (scénario Ibis)

L'aquifère superficiel constitue un enjeu particulier. S'étendant sur l'ensemble de l'entité géographique de Bienwald, il est associé à l'écosystème de la forêt de Bienwald. A ce titre, il convient de s'assurer qu'une exploitation de l'aquifère intermédiaire ne provoque pas une baisse significative et généralisée de son niveau naturel. A une échelle plus locale, associée à l'aire rapprochée du pompage, il convient de vérifier si un transfert vertical s'effectue vers l'aquifère intermédiaire.

C'est le but du scénario I bis où l'on simule l'impact piézométrique d'un arrêt total de tous les prélèvements. La comparaison des niveaux piézométriques simulés pour les scénarios I et Ibis (sans aucune exploitation et avec l'exploitation du seul aquifère médian) permet de quantifier les connexions entre la nappe superficielle et l'aquifère médian.

La comparaison est également effectuée entre l'aquifère intermédiaire et l'aquifère profond afin d'identifier d'éventuels transferts.

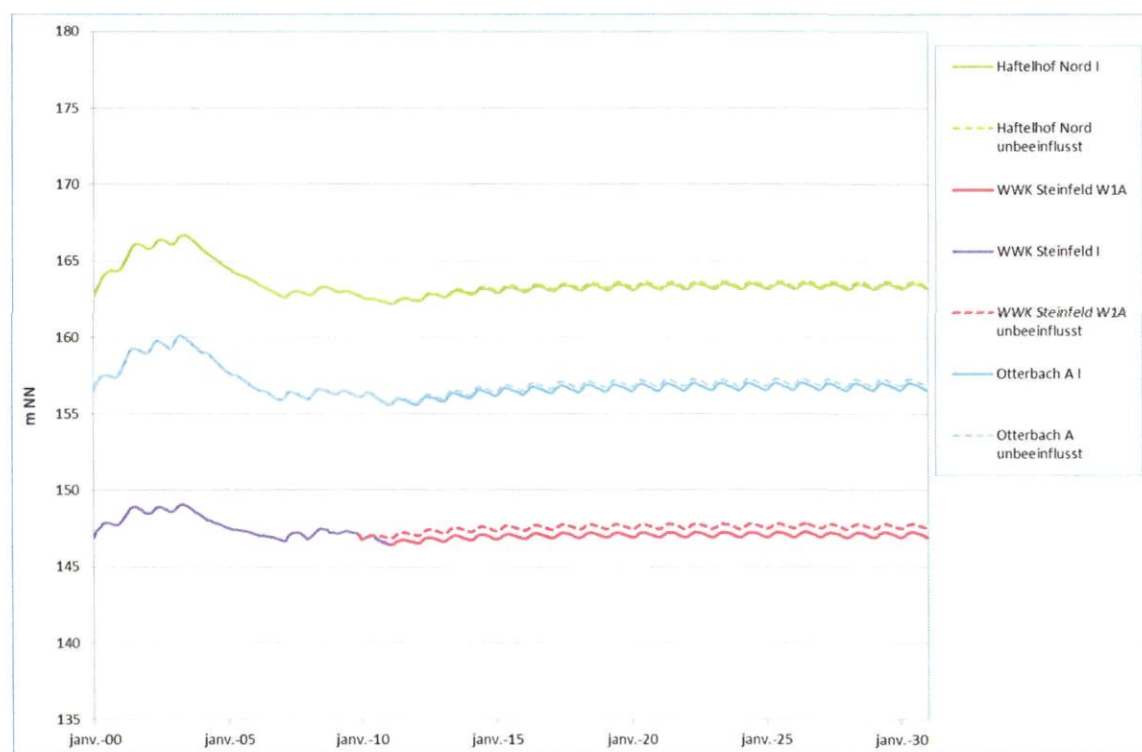


Figure 59 : Impact des prélèvements du scénario I sur l'aquifère supérieur (aquifère I).
Les courbes en tiretés correspondent au scénario sans pompes Ibis

On observe les points suivants :

- Quelques centimètres de rabattement aux piézomètres Haftelhof und Otterbach A. Ce rabattement est largement inférieur aux battements saisonniers ;
- Directement au voisinage du « Wasserwerk Steinfeld », le nouveau GWM W1A réagit avec ~ 60 cm aux prélèvements ;
- Les 8 autres piézomètres **de l'aquifère superficiel** ne réagissent pas aux prélèvements dans l'aquifère intermédiaire.

L'influence des prélèvements de l'aquifère II sur l'aquifère III est très faible, avec une drainance légèrement plus importante de l'aquifère III vers l'aquifère II, le niveau

piézométrique de l'aquifère profond étant de 2 à 4 cm inférieur à celui d'un réservoir totalement non influencé.

3.4. RÉSULTATS DU SCÉNARIO I : BILANS HYDROLOGIQUES DES 3 AQUIFERES

Les figures suivantes présentent différents composants :

1. les débits entrants par l'infiltration et recharge de la nappe ;
2. les débits sortants des puits d'exploitation de l'aquifère concerné ;
3. les débits sortants par des débordements, un drainage de l'aquifère supérieur ;
4. l'échange avec la limite basse (aquifère sous-jacentes) et avec la limite haute (aquifère sus-jacente), ce débit d'infiltration ou de drainance peut varier avec le temps suivant la différence entre les surfaces piézométriques ;
5. le stockage mensuel et le stockage annuel, correspondant à une moyenne lissée des derniers douze mois (qui permet de mieux saisir l'évolution pluriannuelle).

3.4.1. Bilan de l'aquifère supérieur

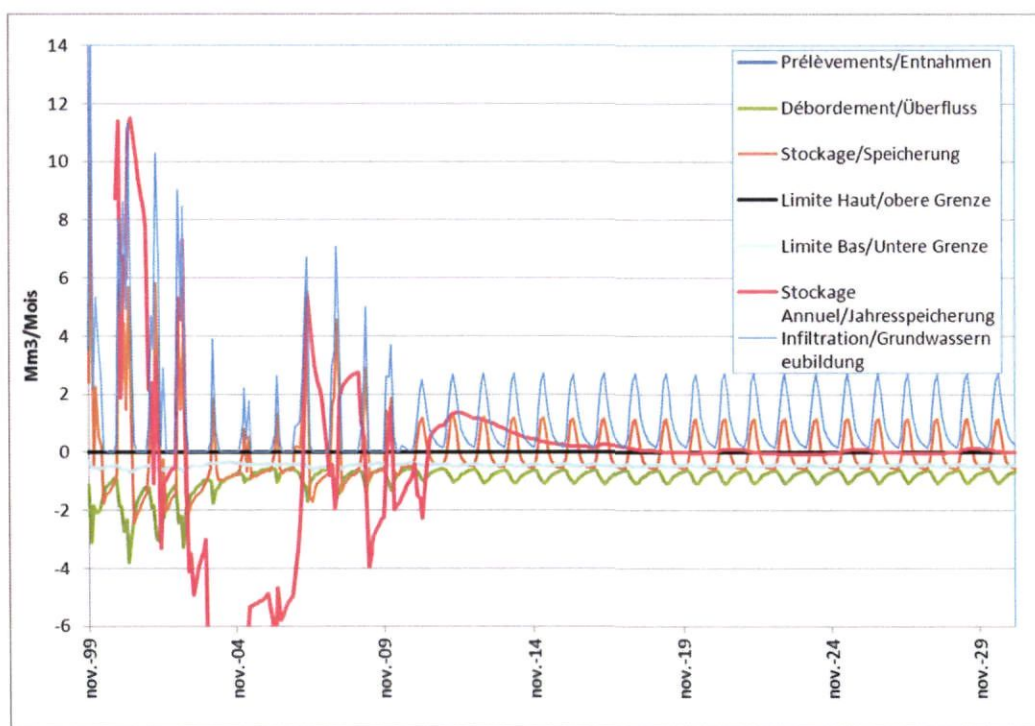


Figure 60 : Composantes du bilan hydraulique pour l'aquifère supérieur, de 1999 à 2030 (Scénario I et II)

Les scénarii I et II présentent les mêmes résultats pour l'aquifère supérieur. Le bilan de la période 1999 à 2009 est fortement influencé par les fluctuations météorologiques : une période de fortes pluies et infiltrations jusqu'en 2002 est caractérisée par un

débordement important vers les eaux de surface (débordement vers la rivière Lauter). En même temps, cette période est marquée par une recharge élevée et un stockage annuel positif dans l'aquifère supérieur.

La période de sécheresse 2003-2006, au contraire, est marquée par une faible recharge et un stockage annuel résultant négatif.

A partir de 2007, les périodes de stockage et déstockage se succèdent régulièrement. Les recharges moyennes appliquées pour les scénarios permettent d'atteindre un équilibre au bout de quelques années, conservé jusqu'en 2030.

3.4.2. Bilan de l'aquifère intermédiaire

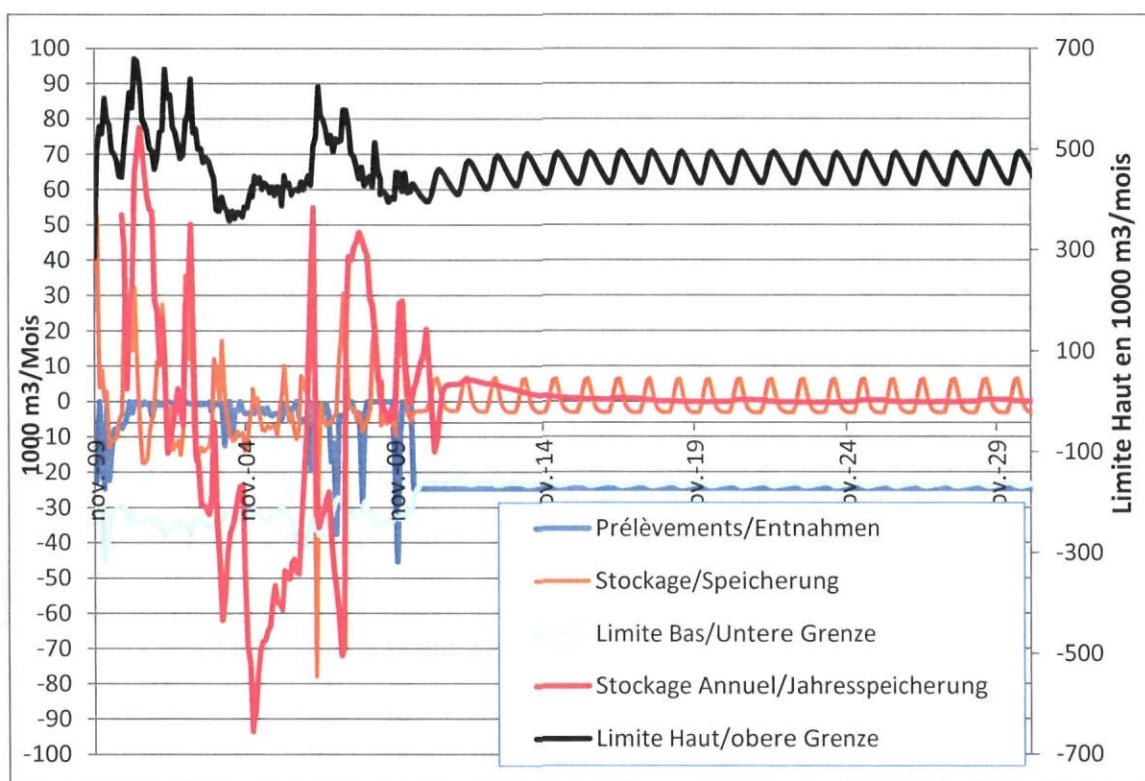


Figure 61 : Composantes du bilan hydraulique pour l'aquifère intermédiaire, de 1999 à 2030 (Scénario I)

Le bilan des eaux souterraines de l'aquifère intermédiaire est caractérisé par la période de fortes pluies jusqu'en 2002 et la période de sécheresse jusqu'en 2006 et par la drainance descendante venant de l'aquifère supérieur (courbe noire, valeurs correspondant à l'axe secondaire à droite). On observe au début de la période de simulation un bilan positif avec un stockage important dans l'aquifère intermédiaire (courbe rouge). Vient ensuite un bilan négatif pendant les 3 années de sécheresse. L'année suivante (2007) est encore marquée par un bilan négatif de l'aquifère intermédiaire, conséquence de prélèvements importants dans cette nappe.

De 2009 à 2030, avec un prélèvement de $34 \text{ m}^3/\text{h}$, le bilan s'équilibre progressivement avec un stockage nul, des échanges avec les limites (potentiel imposé) et les prélèvements.

3.4.3. Bilan de l'aquifère profond

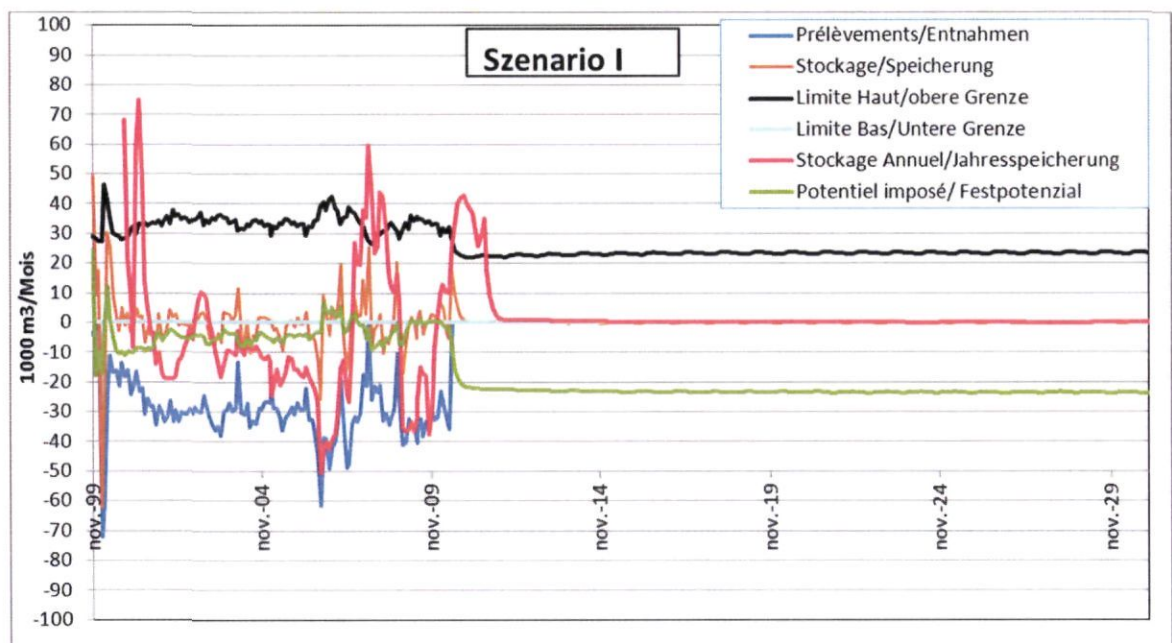


Figure 62 : Composantes du bilan hydraulique pour l'aquifère profond, de 1999 à 2030 (Scénario I)

Les périodes de sécheresse et de fortes pluies n'ont qu'une répercussion limitée sur l'aquifère profond. Le débit de drainance venant de l'aquifère intermédiaire (courbe noire) est directement conditionné par la différence piézométrique entre l'aquifère intermédiaire et l'aquifère supérieur.

En période de forts prélèvements, le flux venant du haut augmente et la drainance ascendante diminue. Le modèle calcule pour le scénario I, sans prélèvements dans l'aquifère profond, une drainance descendante de $23\,000 \text{ m}^3/\text{mois}$.

Avec le prélèvement de $24\,600 \text{ m}^3/\text{mois}$ ($=34 \text{ m}^3/\text{h}$) dans l'aquifère profond du scénario I, la drainance augmente à $30\,000 \text{ m}^3/\text{mois}$. On observe parallèlement un flux plus faible sortant du système par la limite au sud-ouest (définie par une charge imposée).

3.5. RÉSULTATS DU SCÉNARIO II : PIEZOMETRIE

Le scénario II prévoit l'exploitation conjointe de l'aquifère intermédiaire et de l'aquifère profond ; il a été simulé selon deux options.

Le pompage de l'aquifère intermédiaire s'effectue comme pour le scénario I par le puits « WWK Steinfeld II ». Pour l'exploitation de l'aquifère profond, deux puits de pompage sont possibles. La simulation a donc amené à tester deux sous-scénarios (Fig. 63), le puits de pompage de l'aquifère intermédiaire restant le même :

- le puits à Steinfeld : « Entnahmebrunnen UGWM BrIII » : Scénario IISt
- le puits de Bienwald : « Entnahmebrunnen Bienwald » : Scénario IIBi

3.5.1. Impact des prélèvements du scénario II sur les trois nappes à proximité des puits d'exploitation

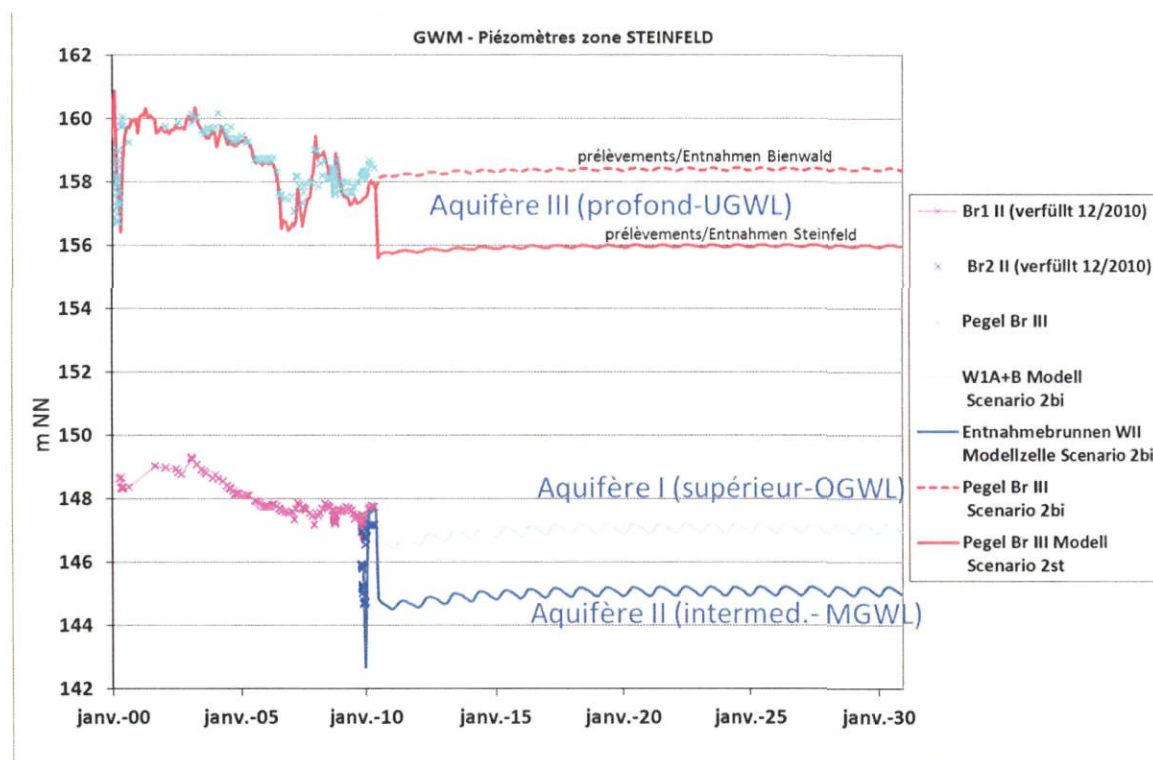


Figure 63 : Impact des prélèvements du scénario II sur les trois aquifères à Steinfeld (-2030)

Un état d'équilibre piézométrique est atteint au bout d'une dizaine d'années avec un débit d'exploitation de 300 000 m³/an dans chacun des aquifères intermédiaire et profond. Le système aquifère permet donc de fournir le débit global de 600 000 m³/an.

Impact du Scénario II sur les puits et piézomètres Steinfeld (Fig. 63):

- Avec un prélèvement dans l'aquifère profond à Steinfeld, Br III (Scénario II St), le niveau de l'aquifère profond baisse au 1^{er} pas de temps (1 mois) à 155.8 m NN, puis atteint un état d'équilibre après une légère remontée de la nappe à un niveau de 156 m NN au cours des 5 années suivantes ;

- Avec un prélèvement de l'aquifère profond à Bienwald, 5 km au sud du puits de Steinfeld (Scénario II Bi), le niveau de la nappe profonde à Steinfeld remonte légèrement et s'équilibre à un niveau de 158.2 m NN ;
- Les piézomètres de la nappe supérieure WIA et B (GWL I) à Steinfeld réagissent pratiquement avec les mêmes évolutions que pour le scénario I. Les courbes piézométriques montrent la même évolution que celles du Scénario 1 avec un rabattement additionnel de 3 centimètres (faible compensation de pression entre l'aquifère profond et l'aquifère intermédiaire par drainance). Cet aquifère réagit indépendamment du choix de puits d'exploitation, au Bienwald (Scénario IIbi) ou à Steinfeld (Scénario IISt) ;
- Comme pour le scénario I, le modèle calcule pour la cellule du puits d'exploitation WII un fort rabattement correspondant au centre du cône de rabattement. Si on déduit les variations saisonnières, le rabattement maximal est atteint en l'espace d'un pas de temps (1 mois) à 144.5 m NN au cours des 5 années (comme le Scénario I).

Impact du Scénario II sur les piézomètres de Bienwald (Fig. 64)

Jusqu'au début du scénario, le puits de Bienwald a été exploité pendant la dernière année avec un débit de 43 m³/h en moyenne. Avec un prélèvement de 34.25 m³/h (300 000 m³/a) dans la zone de Bienwald, le niveau profond remonte et se stabilise en quelques mois à un niveau de 155 m NN. La nappe supérieure s'équilibre à un niveau de 142.7 m NN.

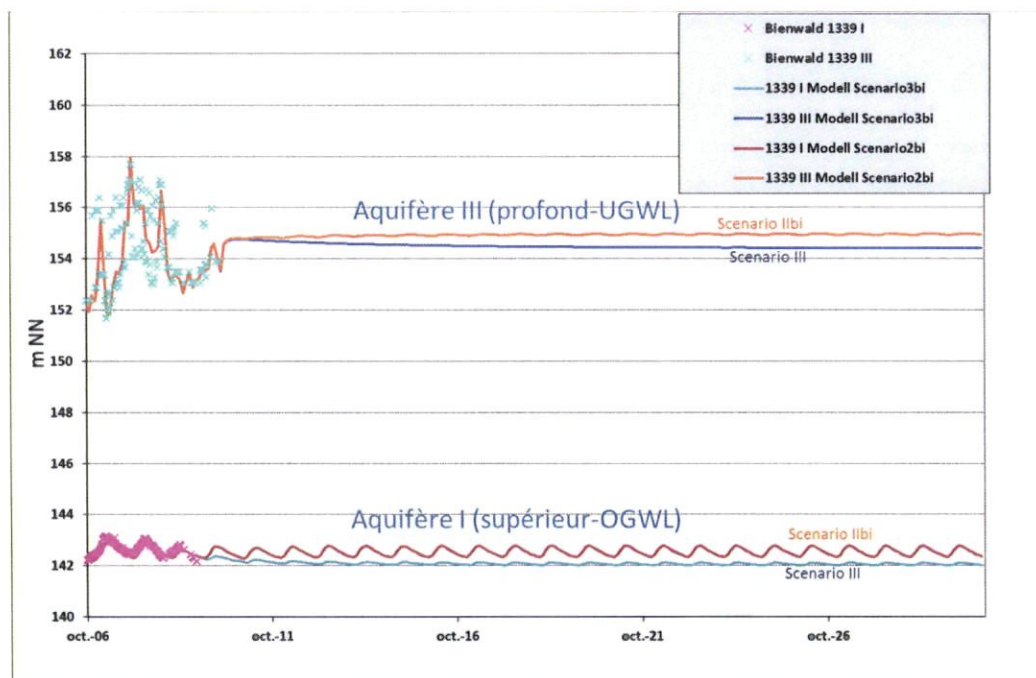


Figure 64 : Impact des prélèvements du scénario II et du scénario III sur les niveaux aquifères à Bienwald

3.5.2. Impact des prélèvements du scénario II sur la nappe profonde dans la zone d'étude

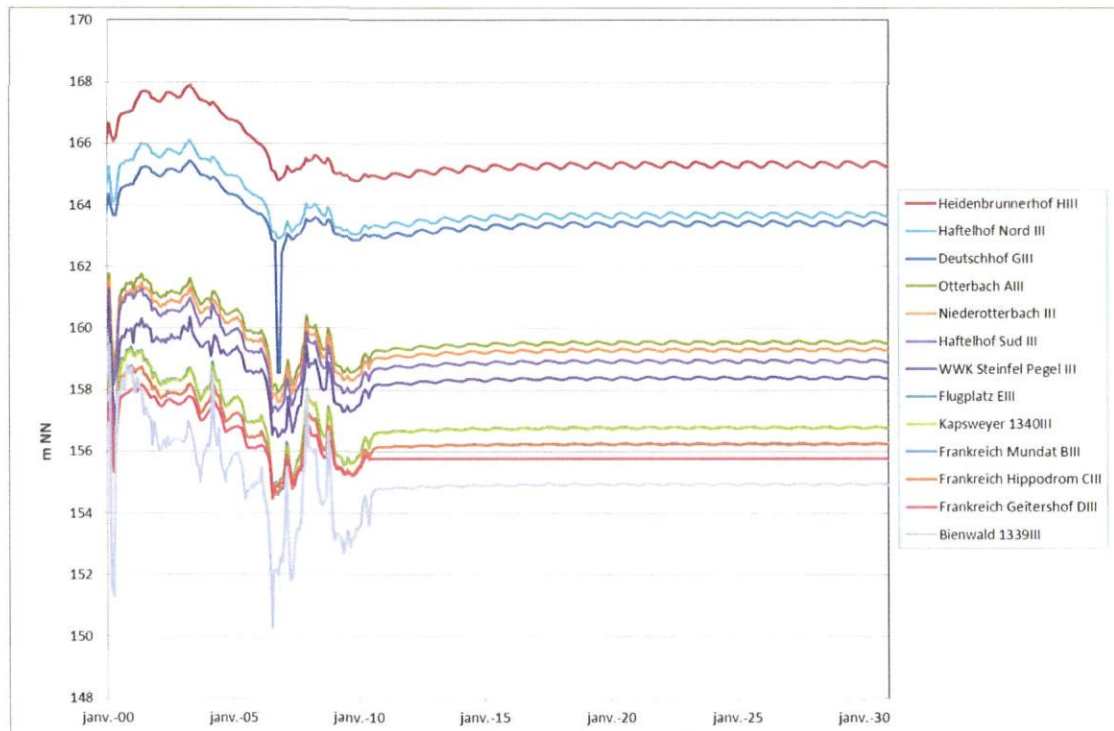


Figure 65 : Impact des prélèvements du scénario II sur l'aquifère profond (aquifère III)

En cas d'un prélèvement de 300 000 m³/a dans l'aquifère profond, le niveau piézométrique remonte en quelques mois dans l'ensemble des piézomètres et se stabilise en 5 ans à un niveau comparable au niveau observé en fin 2008. Dans la maille du puits d'exploitation "Bienwald 1339 III" le niveau piézométrique se stabilise 4 mètres au-dessous du niveau sans prélèvements dans l'aquifère profond ; dans les piézomètres voisins, les rabattements sont de l'ordre de 2 mètres.

L'influence du prélèvement se fait sentir sur l'ensemble des piézomètres, jusqu'au piézomètre le plus au nord où le rabattement est d'environ 0.6 m.

Il est possible de prélever durablement un volume annuel de 300.000 m³/a dans l'aquifère profond UGWL. En périodes de pics de consommation en eau potable, le débit peut être augmenté temporairement, car le niveau piézométrique se régénère très rapidement dans cet aquifère fortement captif.

3.6. RÉSULTATS DU SCÉNARIO II : BILANS HYDROLOGIQUES DE L'AQUIFÈRE PROFOND

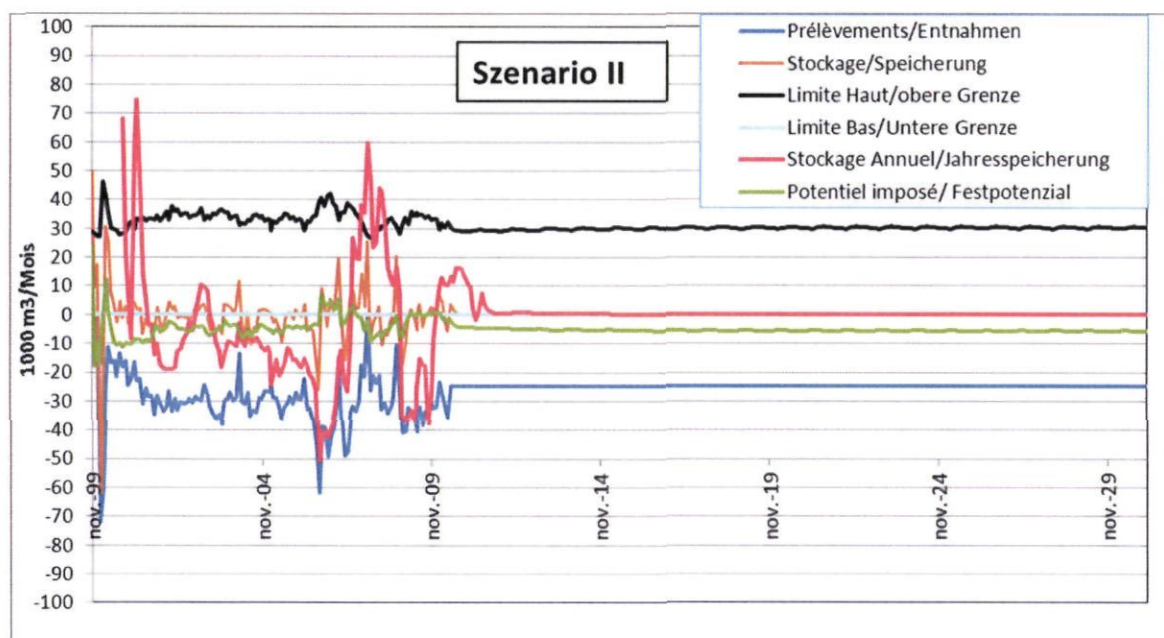


Figure 66 : Composantes du bilan hydraulique de l'aquifère profond, de 1999 à 2030 (Scénario II)

Les périodes de sécheresse et de fortes pluies n'ont qu'une répercussion limitée sur l'aquifère profond. Le volume d'infiltration venant de l'aquifère intermédiaire (courbe noire) vers l'aquifère profond est directement dépendant de la différence piézométrique entre ces deux aquifères.

En période de forts prélèvements, le flux venant du haut est en augmentation, en même temps le taux de drainance vers le haut diminue. Avec les prélèvements de 24600 m³/mois (=34 m³/h) de l'aquifère profond du scénario II, la drainance augmente jusqu'à 30 000 m³/mois. On observe parallèlement un flux plus faible sortant du système par la limite au sud-ouest (définie par une charge imposée).

Avec ces prélèvements et les entrées du haut et du sud-ouest, le bilan de l'aquifère est équilibré (stockage annuel= 0).

Remarque : une partie de l'eau souterraine de l'aquifère profond vient de la limite sud-ouest pour s'écouler vers le puits d'exploitation du Bienwald. Les connaissances actuelles de l'extension et des conditions aux limites en bordure sud-ouest de la zone d'étude ne permettent pas de déterminer l'origine de l'eau souterraine au sud et son

exutoire. La direction de l'écoulement de la nappe peut changer dans la partie sud du modèle à proximité de sa limite. Dans cette zone, le modèle hydrodynamique a donc été simplifié. Il s'arrête à la hauteur du piézomètre installé le plus au sud. Son niveau piézométrique correspond au potentiel imposé de la limite.

3.7. RÉSULTATS DU SCÉNARIO III : PIÉZOMÉTRIE

Similaire au scénario II et avec les mêmes débits de pompage, le scénario III simule l'évolution des aquifères pour une recharge de période sèche. La période 2003-2006 a été retenue comme référence, avec des pluies efficaces inférieures de 30 % à la moyenne.

3.7.1. Impact des prélèvements du scénario III sur les trois nappes à proximité des puits d'exploitation

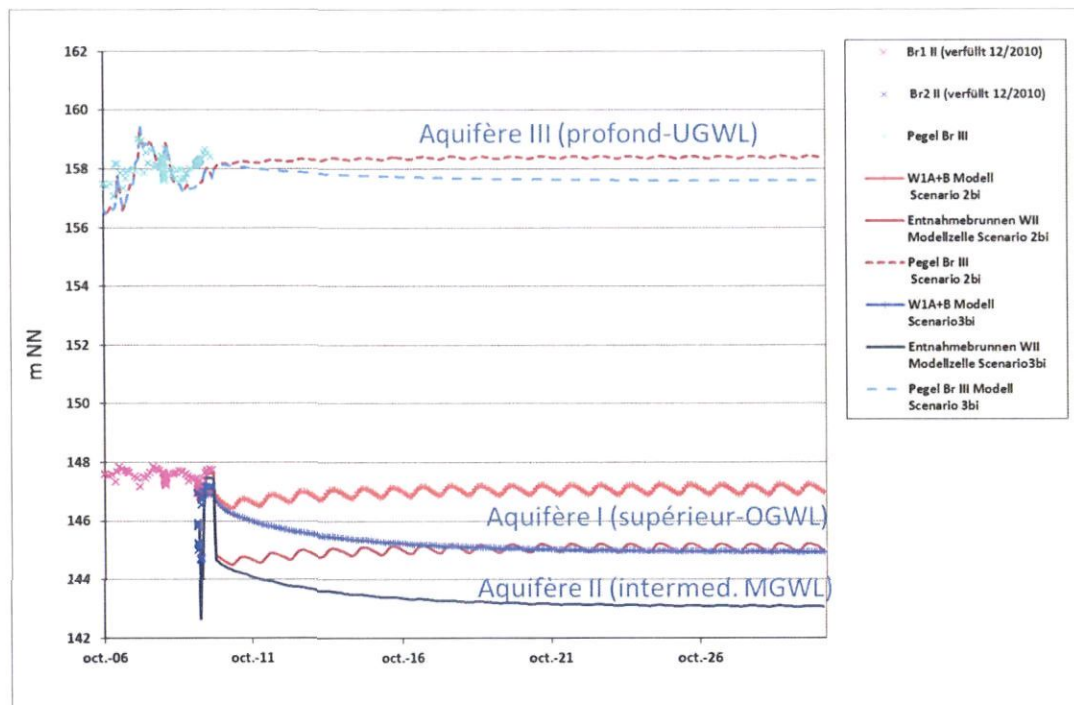


Figure 67 : Répercussions des prélèvements et de la pluie efficace réduite du scénario III (courbes bleues) sur les trois aquifères en comparaison avec le scénario II)

Avec des pluies efficaces réduites de 30%, le niveau piézométrique de la nappe moyenne baisse pendant 10 ans environ, avant de se stabiliser 2 m sous le niveau actuel. Les fluctuations saisonnières, bien visibles pour le scénario II, ne sont pratiquement plus visibles, probablement dû aux plus faibles infiltrations.

La nappe profonde montre un rabattement de 0.8 m par rapport au scénario II ; elle atteint un état d'équilibre également au bout de 10 ans.

Ce scénario est caractérisé par une baisse des niveaux piézométriques pendant une dizaine d'années avant stabilisation. L'infiltration réduite augmente le rabattement global.

Impact du Scénario III sur les piézomètres de Bienwald (Fig. 67, courbes bleues)

La nappe profonde baisse du fait des prélèvements de 300 000 m³/a dans l'aquifère profond et des pluies efficaces réduites. Elle atteint un équilibre en 8 ans à un niveau de 154.5 m NN.

L'aquifère supérieur réagit au taux réduit d'infiltration par un rabattement de 0.5 m et la nappe se stabilise en espace de 5 ans.

3.7.2. Impact des prélèvements du scénario III sur la nappe profonde dans la zone d'étude

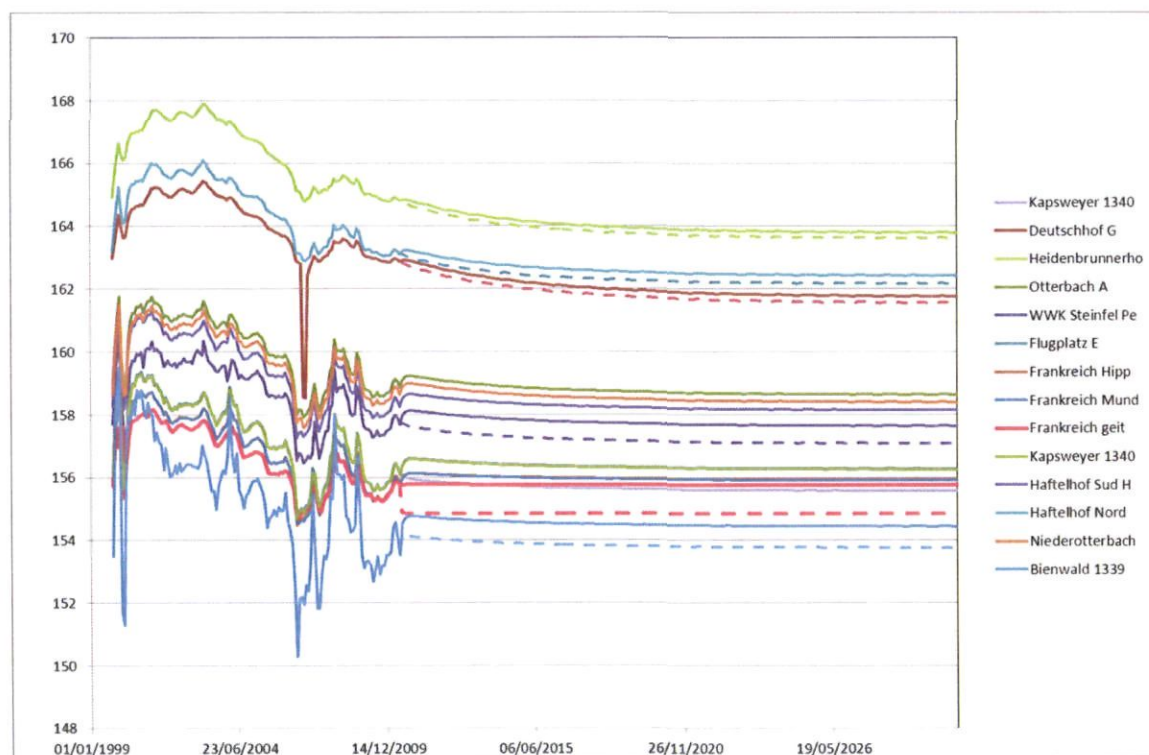


Figure 68 : Impact des prélèvements du scénario III sur le niveau profond (aquifère III) de la zone d'étude(-2030), avec deux niveaux de charge imposés (ligne discontinue : niveau minimal imposé)

Avec un volume additionnel de 300 000 m³/a pompé dans l'aquifère profond et des pluies réduites de 20% par rapport aux pluies moyennes, le niveau piézométrique se stabilise environ 1 m plus bas qu'en juin 2009, date de début du scénario.

Une **deuxième simulation** a été menée avec des charges imposées abaissées d'un mètre sur la limite SW. Le niveau de 154.8 m imposé correspond au niveau le plus bas observé dans le piézomètre « Frankreich Geitershof, D », contre 155.8 m appliqué dans le Scénario III. Ce dernier niveau piézométrique correspond au niveau observé lors d'un pompage de 300 000 m³/h. On observe alors un niveau global plus bas d'un mètre dans la partie sud de la zone d'étude ; au nord, le niveau est réduit d'une vingtaine de centimètres.

3.8. RÉSULTATS DU SCÉNARIO III: BILANS HYDROLOGIQUES DE L'AQUIFÈRE PROFOND

Avec les mêmes prélèvements que le scénario II (34 m³/h dans chacun des aquifères intermédiaire et profond), le scénario III montre la répercussion sur la nappe profonde d'une pluie efficace réduite.

L'équilibre est pratiquement atteint au bout d'une dizaine d'années :

- La drainance descendante venant de l'aquifère intermédiaire diminue de 30 000 à 26 000 m³/mois ;
- Le flux sortant du système vers le sud diminue de 5 600 à 1 500 m³/mois. Ainsi le bilan est pratiquement équilibré : le stockage annuel tend vers une valeur de 0 (2030 : 0.03 m³/mois).

Un calcul du bilan avec un potentiel imposé à un niveau minimal observé (154,8 m contre 155.8 m) le long de la limite SW permet d'évaluer la sensibilité de ce paramètre :

Par rapport aux débits entrants par la drainance descendante de 26 000 m³/mois, les 1 500 m³/mois sortants du système correspondent à 6 %. Avec un niveau imposé « bas », le flux sortant augmente à 3 500 m³/mois, correspondant à 14 % du flux entrant. Un niveau piézométrique globalement plus bas influence le flux de drainance descendant venant de l'aquifère intermédiaire : le débit augmente et équilibre le bilan.

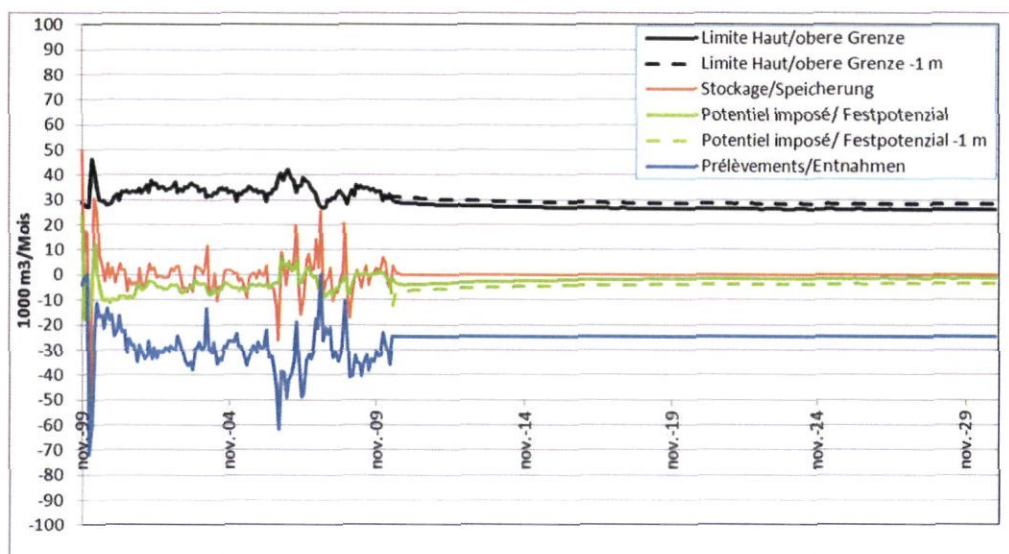


Figure 69 : Composantes du bilan hydraulique pour l'aquifère profond, de 1999 à 2030 (Scénario III), avec les deux niveaux de potentiel imposé : 155.75 m NN (lignes continues) et 154.8 mNN (lignes discontinues)

Remarque : La sensibilité du modèle par rapport au niveau imposé sur la limite SW apparaît limitée, même avec le scénario « pessimiste » d'une sécheresse observée pendant 3 ans et transposée à une période de 30 ans et avec un niveau bas imposé sur la limite à potentiel au sud du modèle.

3.9. ARTESIANISME ET DIFFERENCE DES CHARGES

Les cartes des Figures 70 et 71 montrent, pour le scénario III, la différence entre la surface piézométrique de :

- l'aquifère supérieur et l'aquifère profond ;
- l'aquifère supérieur et l'aquifère intermédiaire.

Cette différence maintient l'aquifère profond à une pression supérieure à celle des deux aquifères sus-jacents, ce qui évite un écoulement du haut vers le bas.

Les cartes montrent une différence entre les deux aquifères supérieurs et entre l'aquifère inférieur et supérieur avec l'exemple du scénario III. L'aquifère baisse plus fortement que l'aquifère intermédiaire. La différence entre l'aquifère inférieur et l'aquifère intermédiaire augmente par un plus fort rabattement de ce dernier.

La majeure partie de la zone artésienne garde son artésianisme pour les trois scénarios. De faibles différences peuvent s'observer dans la zone du Bienwald et sont dûes au rabattement de l'aquifère à proximité du puits d'exploitation.

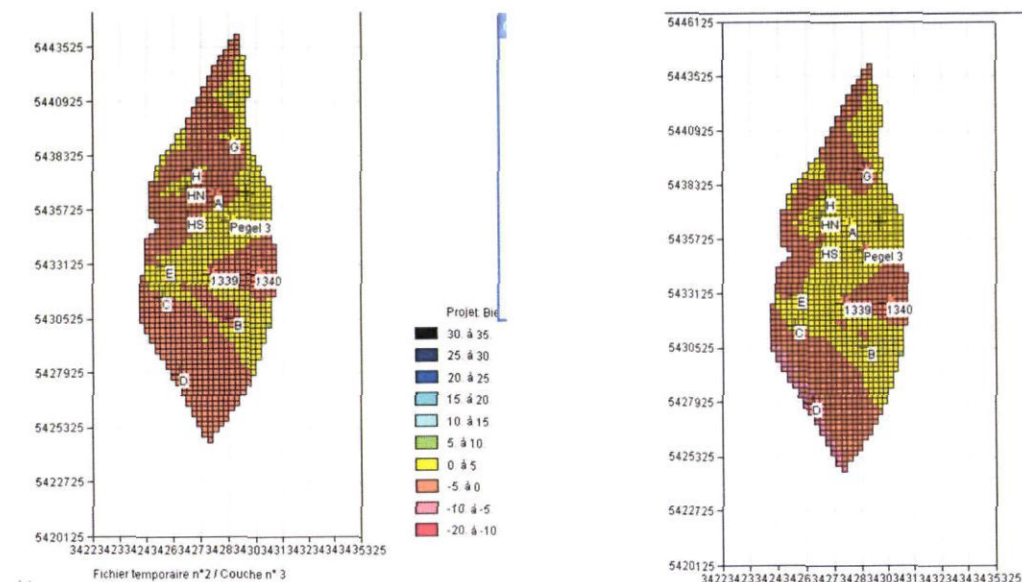


Figure 70 : Différence Aquifère intermédiaire – Aquifère supérieur
2000 (à gauche) et 2030 (à droite) (valeurs jaunes : aquifère intermédiaire supérieure à l'aquifère intermédiaire)

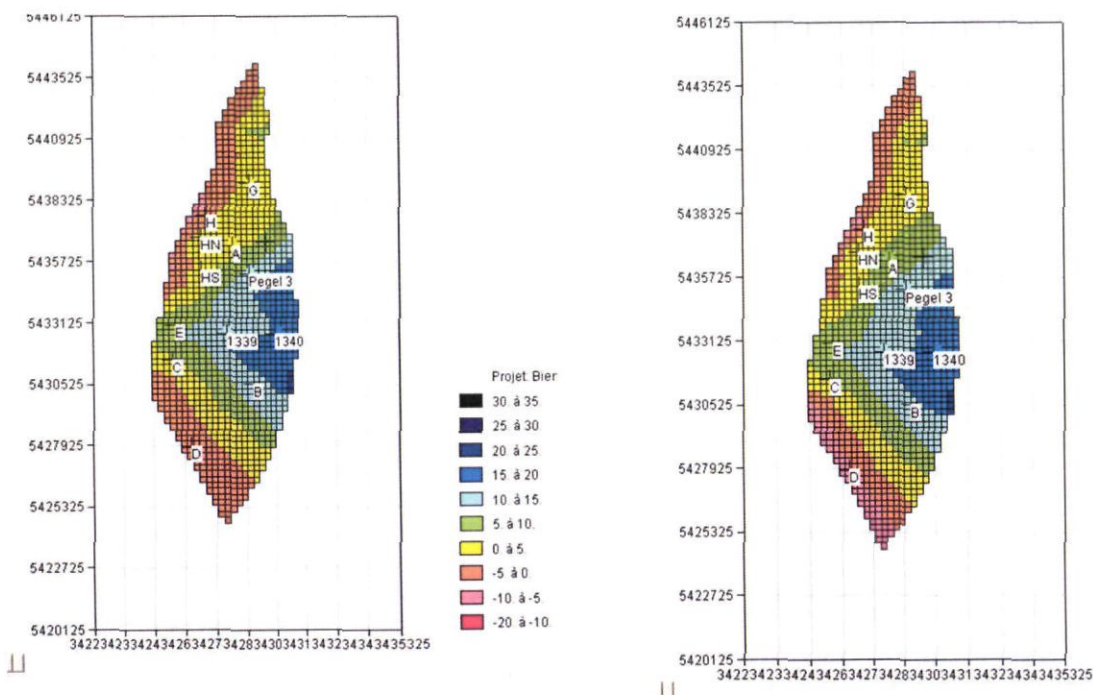


Figure 71 : Différence Aquifère profond – Aquifère supérieur
2000 (à gauche) et 2030 (à droite). Drainance vers le bas dans les zones oranges .

3.10. TRAJECTOIRES ET TEMPS DE RESIDENCE

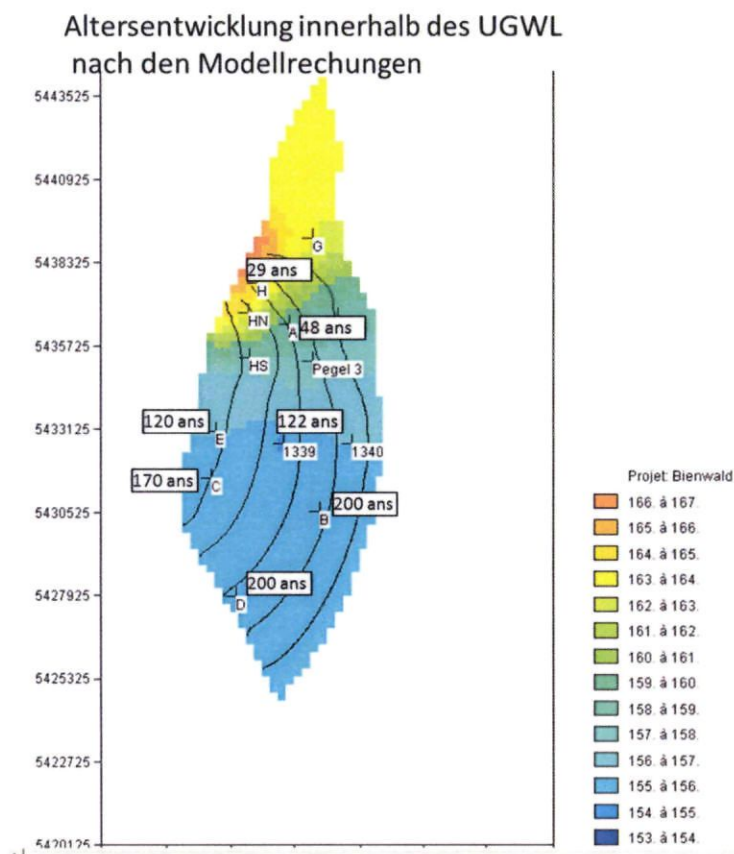


Figure 72 : Trajectoires et âges des eaux dans l'aquifère profond calculés par le modèle hydrodynamique

Les trajectoires (fig. 72) et le schéma des âges des eaux souterraines (fig. 73) confirment une direction d'écoulement du nord-ouest, où se trouve la zone de recharge, vers le sud puis le sud-ouest pour sortir par la limite du modèle au sud-ouest de la zone d'étude. Le profil schématisé montre des eaux souterraines traversant à partir de la zone de recharge d'abord plusieurs dizaines de mètres de l'aquifère supérieur avant d'atteindre l'aquifère profond. En fonction de la porosité et de la perméabilité, les eaux souterraines traversent une distance de 30 mètres en plusieurs décades ou bien plusieurs centaines d'années.

L'étude «Evolution géochimique et isotopique des eaux du Pliocène de Wissembourg/Bad Bergzabern 1999 – 2010» (W. Kloppmann, 2011) a analysé des eaux souterraines prélevées dans les puits d'observation G (à proximité de H) et A. Ils contiennent des CFCs et SF₆, ce qui confirme qu'il y a des de eaux jeunes, issues d'infiltrations datant de moins de 60 ans :

Une partie des eaux de l'aquifère profond arrivent également par infiltration à travers l'aquifère intermédiaire au nord de la zone d'étude, où le niveau moyen indique une

piézométrie supérieure à celle de l'aquifère profond. Les calculs du modèle indiquent au niveau du piézomètre H un temps de parcours de 70 ans qui correspond au temps d'infiltration de la surface jusqu'à l'aquifère profond.

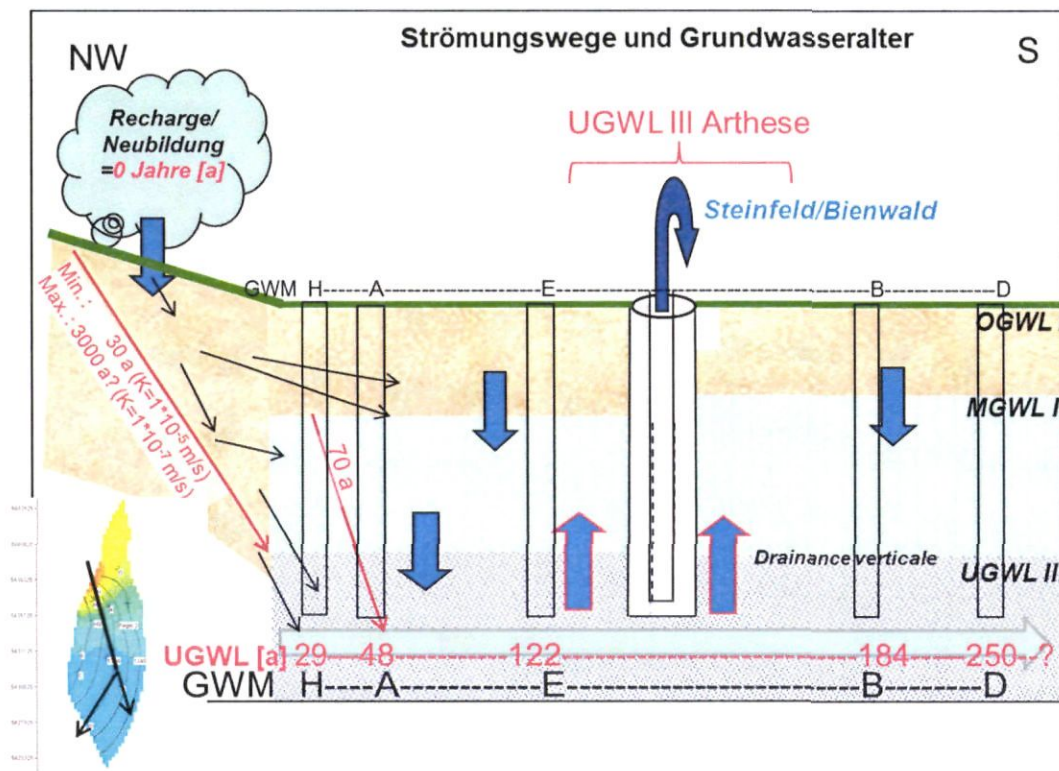


Figure 73 : Profil schématique des temps de percolation et de résidence dans l'aquifère profond (temps en années)

Une fois que les eaux souterraines ont atteint l'aquifère profond, elles s'écoulent avec une vitesse supérieure d'après les calculs du modèle. Les âges relatifs à l'intérieur de l'aquifère profond sont indiqués sur une échelle en bas du schéma : l'âge augmente le long de l'écoulement en direction du sud puis du sud-ouest. Le modèle donne pour les piézomètres les plus en aval des âges d'environ 200 ans. Le long de la limite SW du modèle, les âges atteignent 300 ans.

Les prélèvements dans l'aquifère profond provoquent une drainance plus importante de l'aquifère intermédiaire vers l'aquifère profond ; en conséquence des eaux plus jeunes atteignent dans l'aquifère profond. En même temps, le flux au sud s'inverse et apporte des eaux venant du limite sud-ouest de la zone d'étude, d'où viennent plutôt des eaux plus anciennes.

Les datations des eaux souterraines par la méthode des isotopes du carbone ^{14}C confirment l'âge relatif, qui augmente du nord vers le sud. Mais les âges ainsi calculés sont de 10 à 20 fois supérieures à ceux calculés par le modèle hydrodynamique. Ces datations sont discutées dans le rapport de W. Kloppmann (2011).

Une des explications pourrait être la structure complexe de la géométrie de l'aquifère, fortement simplifiée dans le modèle d'écoulement : dans cette structure en « mille-feuilles » (multicouche complexe), des eaux souterraines pourraient rester captives plus longtemps dans des zones peu perméables. Ces eaux peuvent être libérées ultérieurement et poursuivre leurs parcours. L'âge moyen des eaux souterraines serait ainsi plus élevé que celui des eaux souterraines qui s'écoulent dans les niveaux les plus perméables.

Le modèle hydrodynamique, calé sur les rabattements résultant des pompages, montre les chemins de parcours les plus rapides.

Il est certain par la piézométrie non influencée que les eaux souterraines ont une vitesse d'écoulement naturelle très faible, laquelle est accélérée par le développement des prélèvements depuis 12 ans. Ainsi l'âge de ces eaux sera probablement de plus en plus jeune. L'étude de W. Kloppmann (2011) confirme d'ailleurs un rajeunissement des eaux souterraines par une comparaison des activités du carbone 14C entre l'année 1999 et l'année 2010.

L'analyse de sensibilité du modèle hydrodynamique suivant les variables d'entrées, réalisée par Radja Mouloudi dans le cadre de sa thèse « **Temps de résidence des eaux souterraines sub-récentes : comparaison entre les méthodes de datation par traceurs et la modélisation hydrodynamique des transferts** » révèle que les âges des eaux calculés par le modèle varient très peu avec un changement de porosité, perméabilité ou recharge.

Le tableau indique les résultats des âges suivant ces variantes d'entrées :

Piézomètres	H	A	1339	B	D	C	E
Porosité 20%	30	52	142	250	250	190	138
Porosité 40%	40	60	152	260	262	210	144
K/10	55	78	163	270	280	190	160
K*10	15	28	102	170	180	150	90
Recharge +20%	60	88	155	240	250	190	130
Recharge -20%	20	38	90	120	140	90	70
Recharge 127 mm/an	40	68	140	240	240	190	170
Recharge 50 mm/an	60	100	180	320	340	230	200
K/10 + Recharge - 15%	70	108	205	360	370	220	200

Tableau 1 : Synthèse des âges obtenus suite à l'analyse de sensibilité pour l'aquifère profond

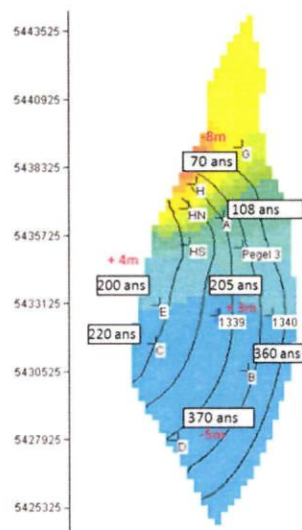


Figure 74 :: Répartition de l'âge dans l'aquifère profond pour une perméabilité divisée par dix et la recharge diminuée de 15%

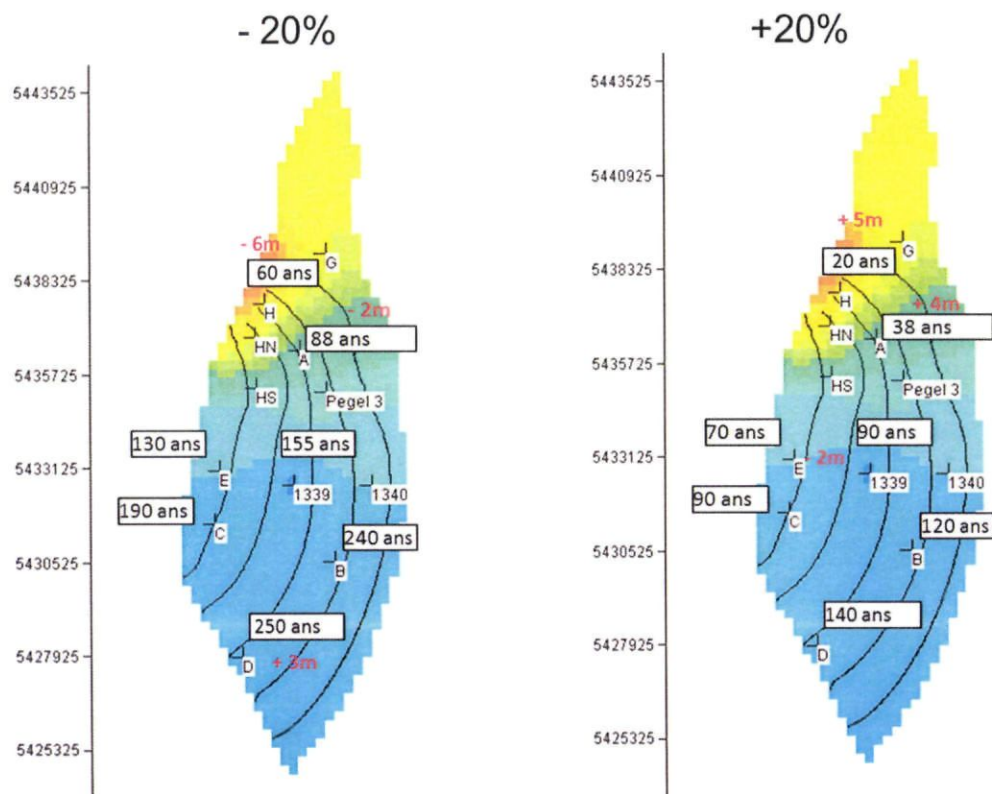


Figure 75 :: Répartition de l'âge dans l'aquifère profond pour une recharge de $\pm 20\%$

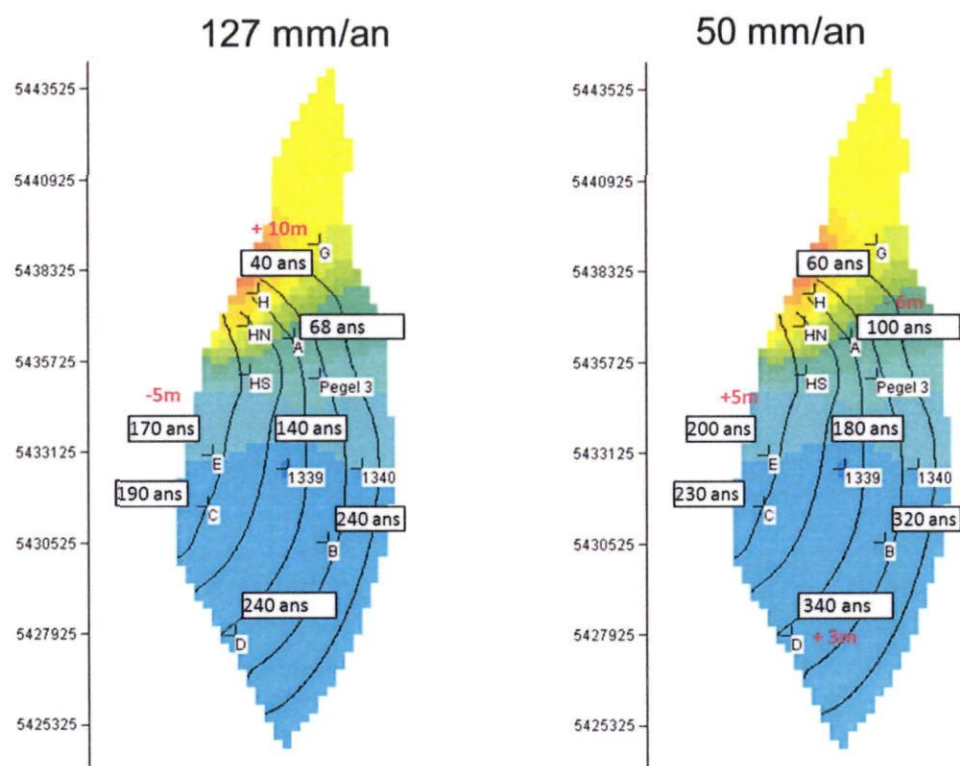


Figure 76: Répartition de l'âge dans l'aquifère profond pour une recharge de 120 et 50 mm/an

4. Conclusions et perspectives

Les simulations du modèle hydrodynamique avec le logiciel MARTHE, avec le calcul des 3 scénarii permettent les conclusions suivantes :

Un prélèvement de 300.000 m³/a dans l'aquifère intermédiaire MGWL est possible d'une manière durable, sans que cela ait une altération dans l'aquifère supérieur OGWL.

Des pics de consommation en période estivale peuvent être couverts par des prélèvements parallèles dans l'aquifère intermédiaire MGWL et l'aquifère profond UGWL, mais une exploitation sur une longue période engendrerait néanmoins des rabattements importants.

Il est possible de prélever durablement un volume annuel de 300.000 m³/a dans l'aquifère profond UGWL. En périodes de pics de consommation en eau potable, le débit peut être augmenté temporairement, car le niveau piézométrique se régénère très rapidement dans cet aquifère fortement captif. Ces apports proviennent de l'amont de ce même aquifère et de l'aquifère médian.

L'âge important des eaux souterraines profondes démontre une bonne protection de cette ressource, dans l'aquifère profond comme dans l'aquifère intermédiaire.

Même si des réserves en eaux souterraines sont disponibles, leur évaluation demande un suivi piézométrique à long terme (programme de monitoring).

Ces aquifères constituent un réservoir qui pourrait sans doute être exploité à des débits plus importants. Pour confirmer et préciser cette assertion, le suivi continu des niveaux des nappes et des débits pompés est cependant indispensable (pompages d'essai au sein des puits d'exploitation).

Il convient de s'assurer qu'une exploitation de l'aquifère intermédiaire ne provoque pas une baisse significative et généralisée de son niveau naturel. A une échelle plus locale, associée à l'aire rapprochée du pompage, il convient de vérifier si un transfert vertical s'effectue vers l'aquifère intermédiaire.

Le calcul de l'âge indique des eaux souterraines de l'aquifère profond peuvent atteindre 200 à 400 ans suivant les paramètres choisis. L'analyse de sensibilité du modèle hydrodynamique suivant les variables d'entrées révèle que les âges des eaux calculés par le modèle varient très peu avec un changement de porosité, perméabilité ou recharge.

Les connaissances actuelles de l'extension et des conditions aux limites au sud-ouest de la zone d'étude ne permettent pas de déterminer l'origine exacte de l'eau souterraine du sud et son exutoire. Pour cette raison, le modèle hydrodynamique a été simplifié, il s'arrête à la hauteur du piézomètre installé le plus au sud. Son niveau piézométrique correspond au potentiel imposé de la limite.

Cependant, la sensibilité du modèle par rapport au niveau imposé sur la limite sud - ouest apparaît limitée, même avec le scénario « pessimiste » d'une sécheresse observée pendant 3 ans et transposée à une période de 30 ans et avec un niveau bas imposé sur la limite à potentiel au sud du modèle.

5. Bibliographie

Kloppmann W. (2000) – INTERREG II. Caractérisation géochimique et isotopique des eaux du Pliocène de Wissembourg/Bad Bergzabern. Geochemische und isotopenchemische Charakterisierung der Grundwässer des Pliozäns von Wissembourg/Bad Bergzabern. Rap. BRGM RP -50432-FR, 68 p., 11 fig.

Schomburgk.S., Amraoui.N., Elsass.P., Kloppmann.W. (2001) INTERREG II. Modélisation de la nappe profonde du Pliocène de Wissembourg/Bad Bergzabern. Modellierung des tieferen Aquifers des Pliozäns von Wissembourg/Bad Bergzabern. Rapport BRGM/RP-50724-FR

Schomburgk.S., Hamm.V (2008) Modélisation de la nappe profonde du Pliocène de Wissembourg/Bad Bergzabern. Modellierung des tieferen Aquifers des Pliozäns von Wissembourg/Bad Bergzabern. Phase 2 : 2007. Rapport final - Endbericht. Rapport BRGM/RP-56610-FR



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Alsace
15, rue du Tanin,
BP 70177 - Lingolsheim
67834 – Tanneries Cedex - France
Tél. : 03 88 77 48 90 – Fax 03.88.76.12.26

The background of the slide is a geological map. It features a network of yellow lines representing geological boundaries or faults. Various labels in small black text are scattered across the map, including 'f13a-b', 'f3a-b', 'f3c', 'f3a-b', 'f3a-b', 'dab', 'f11b-2', and 'f11a'. In the top right corner, the coordinates '2113.21 6786 130' are visible. In the bottom left corner, the coordinates '1.89 3740.46 -625 5' are present. The overall color scheme of the map is light blue and yellow.

**Modélisation de l'aquifère
transfrontalier du Pliocène de
Wissembourg – Bad Bergzabern**

**Modellierung des
grenzübergreifenden pliozänen
Grundwasserleiters Wissembourg –
Bad Bergzabern**

Rapport final / Abschlussbericht

BRGM/RP-60230-FR

BRGM/RP-60230-FR
Novembre 2011



Geosciences pour une
brgm



3 5000 00091215 3

**Modélisation de l'aquifère
transfrontalier du Pliocène de
Wissembourg – Bad Bergzabern**

**Modellierung des
grenzübergreifenden pliozänen
Grundwasserleiters Wissembourg –
Bad Bergzabern**

Rapport final / Abschlussbericht

BRGM/RP-60230-FR
November 2011

Im Rahmen der öffentlichen Projekte des BRGM durchgeführte
Studie 2010 10EAUK71

V. Hamm, S. Schomburgk

Geprüft:

Name: Y. Barthélémy

Datum: 06.09.11

Unterschrift:

Genehmigt:

Name: A. – V. Barras

Datum: 23.11.11

Unterschrift:

Bei fehlender Unterschrift, insbesondere im Fall von digital verbreiteten Dokumenten, ist das unterschriebene
Original im Archiv des BRGM einsehbar.

Das Qualitätsmanagementsystem des BRGM ist AFAQ ISO 9001:2008 zertifiziert.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Schlüsselwörter: Grundwassermodell, Wasserressourcen-Management, Pliozän, grenzüberschreitender Grundwasserleiter, Elsass, Deutschland, Rheinland-Pfalz, Wissembourg Bad Bergzabern

Bibliografisch wird der Bericht wie folgt geführt:

Modellierung des tieferen Aquifers des Pliozäns von Wissembourg/Bad Bergzabern. Endbericht – 2011, Rap. BRGM/RP-60230-FR, 95 S., 76 Abb.

© BRGM, 2011, dieses Dokument darf ohne ausdrückliche Genehmigung des BRGM weder teilweise noch ganz vervielfältigt werden.

Zusammenfassung

Die vorliegende deutsch-französische Studie ist Teil des INTERREG IV A Projektes "Länderübergreifendes Wasserversorgungskonzept Südpfalz / Nordelsass 2008-2030" INTERREG IV im Rahmen der Priorität "Die Entwicklung des Oberrheinraums nachhaltig gestalten". Sie ist Gegenstand eines am 28. Mai 2010 zwischen dem GÖZ "WISSEMBOURG – BAD BERGZABERN" und dem BRGM unterzeichneten Partnerschaftsvertrages.

Mit dem Projekt wird ein besseres Verständnis der Funktionsweise des aus mehreren Stockwerken gebildeten, grenzübergreifenden Grundwasserleiters zwischen der Südpfalz und dem Nordelsass sowie die Ausarbeitung einer Entwicklungsstrategie zur Gewährleistung der Trinkwasserversorgung bei Verbrauchsspitzen vor dem Hintergrund der Klimaprognosen bis 2030 angestrebt.

Die Studie schließt an Erkundungen an, die bei dem pliozänen Grundwasserleiter im Gebiet Wissembourg-Bad Bergzabern durchgeführt wurden (Berichte BRGM/RP-50724-FR von 2001 und BRGM/RP-56610-FR von 2008). Im Rahmen dieser neuen Untersuchung wurden 2009 10 Bohrungen durchgeführt (Haltenhof Nord HN I, II und III, Haltenhof Süd HS II und III, Steinfeld W I und II, Niederotterbach N II und III, Kapsweyer Grillplatz K II), um die einzelnen Aquifere, insbesondere den mittleren pliozänen Grundwasserleiter, der bei den vorausgegangenen Studien dem oberen quaternären Grundwasserleiter zugeordnet worden war, näher zu bestimmen. Eine der Fragestellungen der grenzüberschreitenden Arbeitsgruppe ist die bessere Kenntnis des mittleren Grundwasserleiters und seiner Beziehungen zum oberen und unteren Grundwasserleiter im Hinblick auf ein besseres Wasserressourcen-Management.

Dementsprechend wurde mit dem MARTHE Programm ein verfeinertes Strömungsmodell des Mehrschicht-Grundwasserleiters von Wissembourg - Bad Bergzabern erstellt. Die neue Modellstruktur wird in die im Rahmen des INTERREG Projektes auf deutscher Seite durchgeführte detaillierte geologische Erkundung des Gebietes aufgenommen. Die neu entwickelte vertikale Struktur des Modells (drei durch gering durchlässige Zwischenschichten voneinander getrennte Grundwasserschichten) hat zu einer Anpassung der hydrodynamischen Parameter der einzelnen Grundwasserleiter (Durchlässigkeit, freie und gespannte Grundwasserverhältnisse) und Zwischenschichten (Leakage-Effekt) sowie der Wasserparameter zur Ermittlung der Grundwasserneubildung über die ungesättigte Zone geführt. Mit dem Modell kann die Druckhöhe jedes Grundwasserleiters an den Messstellen auf zufriedenstellende Weise reproduziert werden. Durch Berechnung der Wasserbilanz können die Phasen der Speicherung und der Entleerung des aus mehreren Stockwerken bestehenden Grundwassersystems bestimmt werden.

Die Modellierung der drei auf unterschiedlichen Entnahmemengen und unterschiedlichen Niederschlagsverhältnissen basierenden Szenarien zeigt die unterschiedlichen Auswirkungen auf den Grundwasserleiter und die Nutzbarkeit der Ressource. Die Simulationen lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

Im mittleren Grundwasserleiter MGWL können 300.000 m³/Jahr nachhaltig entnommen

werden, ohne dass sich dies signifikant auf den oberen Grundwasserleiter OGWL auswirkt. Verbrauchsspitzen in den Sommermonaten können durch parallele Entnahmen im MGWL und im unteren Aquifer UGWL abgedeckt werden, doch würde eine langzeitige Bewirtschaftung starke Absenkungen zur Folge haben.

Die nachhaltige Entnahme von 300.000 m³/Jahr im unteren Aquifer (UGWL) ist möglich. Bei Verbrauchsspitzen kann die Fördermenge vorübergehend erhöht werden, da sich der Grundwasserstand in dem stark gespannten Aquifer sehr schnell regeneriert. Dieser Zufluss kommt aus dem stromaufwärts gelegenen Bereich des unteren GWL und vom mittleren GWL.

Diese Grundwasserleiter bilden einen Speicher, aus dem zweifellos größere Mengen entnommen werden können. Zur Bestätigung und Präzisierung dieser Aussage müssen die Grundwasserstände und Fördermengen jedoch fortlaufend überwacht werden (Pumpversuche bei den Entnahmebrunnen). Auch wenn Grundwasservorräte vorhanden sind, kann zu deren Nutzung auf eine langzeitige Beobachtung der Grundwasserstände nicht verzichtet werden (Monitoring-Programm).

Es muss sichergestellt werden, dass eine Bewirtschaftung des mittleren Grundwasserleiters keine signifikante und großräumige Absenkung seines natürlichen Grundwasserspiegels nach sich zieht. Auf lokalerer Ebene sollte im Zusammenhang mit dem nächstgelegenen Fassungsbereich geprüft werden, ob ein vertikaler Transfer zum mittleren Grundwasserleiter stattfindet.

Der Altersberechnung zufolge kann das Grundwasser des unteren Grundwasserleiters je nach den gewählten Kenngrößen zwischen 200 und 400 Jahre alt werden. Die Sensitivitätsstudie des hydrodynamischen Modells zeigt je nach den Eingangsvariablen auf, dass das mit dem Modell berechnete Grundwasseralter bei unterschiedlicher Porosität, Durchlässigkeit und Neubildung nur geringen Schwankungen unterliegt. Das hohe Alter des tiefen Grundwassers beweist, dass es im unteren wie auch im mittleren Grundwasserleiter gut geschützt ist.

Der derzeitige Kenntnistand über die Ausdehnung und die Rahmenbedingungen im Südwesten des Untersuchungsgebietes erlaubt es nicht, den genauen Ursprung des südlichen Grundwassers und dessen Auslass zu bestimmen. Das hydrodynamische Modell wurde deshalb vereinfacht und reicht nur bis zur südlichsten Messstelle. Die Piezometerhöhe entspricht dem vorgegebenen Festpotential. Die Sensitivität des Modells im Verhältnis zu dem an der südwestlichen Grenze vorgegebenen Grundwasserstand ist gering, auch wenn man das "pessimistische" Szenario einer während 3 Jahren beobachteten und auf einen Zeitraum von 30 Jahren übertragenen Trockenperiode in Betracht zieht.

Inhalt

1. Einführung.....	13
2. Modellierung des mehrschichtigen Grundwassersystems.....	15
2.1. ÜBERBLICK ÜBER DIE ALLGEMEINEN EIGENSCHAFTEN DES GRUNDWASSERLEITERS.....	15
2.2. AUFBAU DES HYDRODYNAMISCHEN MODELLS.....	15
2.2.1. Übergang vom geologischen Modell zum hydrodynamischen Modell.....	16
2.2.2. Randbedingungen.....	27
2.3. KALIBRIERUNG DES MODELLS	29
2.3.1. Eingangsdaten des Modells	29
2.3.2. Ausgangsdaten des Modells	38
2.4. WASSERBILANZEN	56
3. Szenarien der Grundwasserbewirtschaftung.....	61
3.1. NIEDERSCHLAG UND EVAPOTRANSPIRATION ANGEWENDET AUF DIE SZENARIEN	64
3.2. ERGEBNISSE DER DREI SZENARIEN.....	67
3.2.1. Schema der globalen Bilanz.....	67
3.3. ERGEBNISSE VON SZENARIO I : PIEZOMETERHÖHEN.....	69
3.3.1. Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf die drei Grundwasserleiter in der Nähe des Entnahmebrunnens.....	69
3.3.2. Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf die Grundwasserleiter des Untersuchungsgebietes.....	70
3.4. ERGEBNISSE VON SZENARIO I: HYDROLOGISCHE BILANZ DER 3 GRUNDWASSERLEITER	74
3.4.1. Bilanz des oberen Grundwasserleiters	75
3.4.2. Bilanz des mittleren Grundwasserleiters	76
3.4.3. Bilanz des unteren Grundwasserleiters	77
3.5. ERGEBNISSE VON SZENARIO II: PIEZOMETERHÖHEN.....	77
3.5.1. Auswirkung der Entnahmen von Szenario III auf die drei GWL in der Nähe des Entnahmebrunnens	78

3.5.2. Auswirkung der Entnahmen von Szenario II auf den unteren GWL im Untersuchungsgebiet	81
3.6. ERGEBNISSE VON SZENARIO II: HYDROLOGISCHE BILANZ DES UNTEREN GRUNDWASSERLEITERS.....	82
3.7. ERGEBNIS VON SZENARIO III: PIEZOMETERHÖHEN	83
3.7.1. Auswirkung der Entnahmen von Szenario III auf die drei Grundwasserleiter in der Nähe der Entnahmepumpen.....	83
3.7.2. Auswirkung von Szenario III auf den unteren Grundwasserleiter im Untersuchungsgebiet	84
3.8. ERGEBNISSE VON SZENARIO III: HYDROLOGISCHE BILANZ DES UNTEREN GRUNDWASSERLEITERS.....	85
3.9. ARTESE UND PIEZOMETERHÖHENUNTERSCHIED.....	86
3.10. STRÖMUNGSWEGE UND GRUNDWASSERALTER.....	88
4. Schlussfolgerungen und Perspektiven	93
5. Bibliografie	95

Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Geometrie 2001 und 2010 des mehrschichtigen Grundwasserleiters	17
Abbildung 2: Decke (DGM) und Ausdehnung des quaternären oberen GWL. Links : geologisches Modell, rechts: hydrodynamisches Modell	19
Abbildung 3: Sohle des oberen quartären GWL. Links: geologisches Modell, rechts: hydrodynamisches Modell.....	20
Abbildung 4: Sohle der Zwischenschicht zwischen dem oberen und mittleren GWL. Links: geologisches Modell, rechts: hydrodynamisches Modell.....	21
Abbildung 5: Sohle des pliozänen mittleren GWL. Links: geologisches Modell, rechts: hydrodynamisches Modell.....	22
Abbildung 6: Sohle der Zwischenschicht zwischen dem mittleren und unteren GWL. Links: geologisches Modell, rechts: hydrodynamisches Modell.....	23
Abbildung 7: Sohle des unteren pliozänen GWL. Links: geologisches Modell, rechts: hydrodynamisches Modell.....	24
Abbildung 8: Lokalisierung der Profilebenen im Modell	25
Abbildung 9: Profil 1 N-S des Modells (Modellzelle mit einer Seitenlänge von 250 m)	26
Abbildung 10: Profil 2 W-E des Modells (Modellzelle mit einer Seitenlänge von 250 m)	27
Abbildung 11: Profil 3 W-E des Modells (Modellzelle mit einer Seitenlänge von 250 m)	27

Abbildung 12: Randbedingungen des mehrschichtigen Aquifersystems (die grünen Ränder stellen ein Festpotential dar, ansonsten Null Fluss). Von links nach rechts: oberer, mittlerer und unterer GWL.	28
Abbildung 13: Tagesniederschlag und Verdunstung	31
Abbildung 14: Verteilung des für die Evapotranspiration zur Verfügung stehenden Vorrats (NFK: Nutzbare Feldkapazität)	32
Abbildung 15: Lageplan der Brunnen und Messstellen in Steinfeld.....	33
Abbildung 16: Trinkwasserentnahmen aus dem mittleren (II) und unteren (III) GWL.....	34
Abbildung 17 : Räumliche Verteilung der Durchlässigkeiten pro Grundwasserstockwerk	36
Abbildung 18: Räumliche Verteilung des Leakage-Faktors pro Zwischenschicht	37
Abbildung 19: Lokalisierung der Messstellen pro GWL	39
Abbildung 20: Piezometerhöhen in Deutschhof GWL II und III (Pumpversuch bei AIII im Okt./Nov. 2006)	40
Abbildung 21: Piezometerhöhen am Dierbachpegel 1477, GWL I und II	40
Abbildung 22: Piezometerhöhen in Dierbach I, GWL II.....	41
Abbildung 23: Piezometerhöhen in Heidenbrunnenhof, GWL II und III	41
Abbildung 24: Piezometerhöhen in Haltenhof Nord, GWL I, II und III.....	42
Abbildung 25: Piezometerhöhen in Haltenhof Süd, GWL II und III	42
Abbildung 26: Piezometerhöhen in Otterbach, GWL I, II und III (Pumpversuch in D im Mai 2000).....	43
Abbildung 27: Piezometerhöhen in Niederotterbach, GWL II und III	43
Abbildung 28: Piezometerhöhen beim Wasserwerk Steinfeld W, GWL I und II (Pumpversuch bei WII)	44
Abbildung 29: Piezometerhöhen in Steinfeld Brunnen, GWL I, II und III (Pumpversuch in Steinfeld WII im Nov. 2009).....	44
Abbildung 30: Piezometerhöhen in Schweighofen, GWL I und II	45
Abbildung 31: Piezometerhöhen in Kapsweyer Bahnhof, GWL I.....	45
Abbildung 32: Piezometerhöhen in Kapsweyer Grillplatz, GWL I und II	46
Abbildung 33: Piezometerhöhen am Flugplatz, GWL I und III (Übertreten der Lauter im GWL I)	46
Abbildung 34: Piezometerhöhen beim Hippodrom, GWL I, II und III	47
Abbildung 35: Piezometerhöhen im Bienwald 1339, GWL I und III	47
Abbildung 36: Piezometerhöhen im Bienwald 1339 GWL I und III	48
Abbildung 37: Piezometerhöhen in Mundat, GWL III	48
Abbildung 38: Piezometerhöhen in Geitershof, GWL I, II und III (April 2007: Entnahme zur Bewässerung).....	49
Abbildung 39: Karten der "beobachteten" und simulierten Grundwassergleichen des oberen GWL	50

Abbildung 40: Karten der "beobachteten" und simulierten Grundwassergleichen des mittleren GWL.....	51
Abbildung 41: Karten der "beobachteten" und simulierten Grundwassergleichen des unteren GWL	52
Abbildung 42: Grafische Darstellung der in Abhängigkeit der gemessenen Piezometerhöhen berechneten Piezometerhöhen (Bezugsmessung vom 2 Juli 2009)	53
Abbildung 43: Piezometerhöhenunterschiede (m) zwischen GWL II/I und III/II.....	54
Abbildung 44: Artesische Zone des unteren GWM (violett: artesisch).....	55
Abbildung 45: Monatsbilanzen beim oberen GWL (A I).....	57
Abbildung 46: Monatsbilanz beim mittleren GWL (A II)	58
Abbildung 47: Monatliche Entnahmen und Speicherung beim mittleren GWL (A II) unter Angabe der Infiltration auf der Nebenachse.....	58
Abbildung 48: Monatsbilanzen beim unteren GWL (A III).....	59
Abbildung 49: Trinkwasserentnahmen im mittleren (II) und unteren (III) FWL und Ganglinie der Messstelle D (GWL III).....	61
Abbildung 50: Plan de positionnement des puits et piézomètres à Steinfeld	62
Abbildung 51: Entnahmen aus dem Brunnen Bienwald (rote Kurve, m ³ /h) und Festpotential bei den Szenarien II und III (blaue Kurve).....	64
Abbildung 52 : Monatliche Durchschnittswerte der Niederschläge und der Evapotranspiration sowie des vom Modell simulierten Abflusses.....	65
Abbildung 53: Hydroklimatische Bilanz, gemessen (1999-2009) und simuliert (2009-2030).....	66
Abbildung 54: Wasserbilanz und Austauschvorgänge zwischen den einzelnen GWL. Beispiel des Monats Dezember 2030 (Szenario II).....	67
Abbildung 55 : Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf die drei GWL in Steinfeld Steinfeld (in unmittelbarer Nähe des Entnahmefunnens). Übersetzung: verfüllt: abandonné; Entnahmefunnens: puits d'exploitation, Modellzelle: maille du modèle).....	69
Abbildung 56: Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf den oberen GWL (GWL I).....	70
Abbildung 57: Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf den mittleren GWL.....	71
Abbildung 58: Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf den unteren GWL im gesamten Untersuchungsgebiet.....	72
Abbildung 59: Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf den oberen Grundwasserleiter (GWL I). Die gestrichelten Kurven entsprechen dem Szenario ohne Entnahmen la	73
Abbildung 60: Komponenten der Wasserbilanz bei dem oberen GWL von 1999 bis 2030 (Szenario I und II).....	75
Abbildung 61: Komponenten der Wasserbilanz bei dem mittleren GWL von 1999 bis 2030 (Szenario I).....	76
Abbildung 62: Komponenten der Wasserbilanz bei dem unteren GWL, von 1999 bis 2030 (Szenario I).....	77

Abbildung 63: Auswirkung der Entnahmen von Szenario II auf die drei GWL von Steinfeld (-2030)	78
Abbildung 64: Auswirkung der Entnahmen von Szenario II und III auf die GWL im Bienwald	80
Abbildung 65: Auswirkung der Entnahmen von Szenario IIbi auf den unteren GWL (GWL III)	81
Abbildung 66: Komponenten der Wasserbilanz bei dem unteren GWL von 1999 bis 2030 (Szenario II)	82
Abbildung 67: Auswirkung der Entnahmen und der reduzierten Sickerwasserbildung von Szenario III (blaue Kurven) auf die drei GWL im Vergleich zu Szenario II	83
Abbildung 68: Auswirkung der Entnahmen von Szenario III auf den tiefen Grundwasserleiter (GWL III) des Untersuchungsgebietes (-2030), mit zwei Festpotentialgrenzen (unterbrochene Linie: vorgegebener Mindestgrundwasserstand)	84
Abbildung 69: Komponenten der Wasserbilanz bei dem unteren GWL von 1999 bis 2030 (Szenario III), mit den beiden Festpotentialgrenzen: 155.75 m NN (durchgehende Linien) und 154.8 mNN (unterbrochene Linien)	86
Abbildung 70: Differenz MGWL – OGWL 2000 (links) und 2030 (rechts) (gelbe Werte: mittlerer oberer GWL bis mittlerer GWL)	87
Abbildung 71: Differenz UGWL - OGWL 2000 (links) und 2030 (rechts). Leakage-Effekt nach unten in den orangefarbenen Bereichen.	87
Abbildung 72: Strömungswege und Grundwasseralter im unteren GWL, mit dem hydrodynamischen Modell berechnet	88
Abbildung 73: Schematisches Profil der Perkulations- und Verweilzeiten im unteren GWL (Zeit in Jahren)	89
Abbildung 74: Altersverteilung im unteren GWL bei einer durch zehn geteilten Durchlässigkeit und einer um 15 % reduzierten Wiederergänzung	91
Abbildung 75: Altersverteilung im unteren GWL bei einer Wiederergänzung von $\pm 20\%$	91
Abbildung 76: Altersverteilung im unteren GWL bei einer Wiederergänzung von 120 und 50 mm/Jahr	92
 Tabelle 1: Pumpversuche im GWL II und III von 2000 bis 2010 (m^3/h)	35
Tabelle 2: Verteilung der Durchlässigkeiten bei dem mehrschichtigen Grundwassersystem	36

1. Einführung

Die vorliegende Studie erfolgt in der Kontinuität der Arbeiten, die vom BRGM in Zusammenarbeit mit deutschen Ingenieurbüros anhand von Simulationsmodellen des grenzübergreifenden Grundwasserleiters des Pliozäns von Wissembourg – Bad Bergzabern (Berichte BRGM/RP-50724-FR und BRGM/RP-56610-FR) im Hinblick auf ein besseres Wasserressourcen-Management dieser beiden Gemeinden seit 2001 durchgeführt werden.

Die Studie ist Teil des INTERREG IV Projektes, das im Oktober 2008 begonnen wurde und 2012 abgeschlossen wird. Sie ist Gegenstand eines am 28. Mai 2010 unterzeichneten Partnerschaftsvertrages zwischen dem GÖZ "WISSEMBOURG – BAD BERGZABERN" und dem BRGM.

Ziel der im Zuge der Studie durchgeführten Modellierungsarbeiten ist die bessere Kenntnis des mehrschichtigen Grundwasserleiters. Zu diesem Zweck wurde vom LGB-RP¹ in dem betreffenden Gebiet (auf deutscher und französischer Seite) mit neuen Piezometern und geoelektrischen Messungen ein geologisches Modell erstellt. Mit diesem Modell konnte das vorhandene Modell im Hinblick auf ein dreischichtiges Grundwasserströmungsmodell aktualisiert werden, das anschließend für die hydrodynamischen Modellierungen verwendet wurde.

Gegenstand der vorliegenden Studie ist die Kalibrierung des hydrodynamischen Modells (Randbedingungen, Durchlässigkeit der Schichten, Speicherkoeffizient, Grundwasserneubildung) und die Durchführung von Szenarien der Nutzung des mittleren und tiefen Grundwasserleiters im Hinblick auf ein kontrolliertes Management der Trinkwasserressourcen.

Im vorliegenden Bericht werden die einzelnen Phasen der Studie aufgezeigt. Dies sind:

- Die Konzeptualisierung des mehrschichtigen hydrogeologischen Systems (Abschnitt 2.1) und die Charakterisierung der hydrodynamischen Kennwerte der Grundwasser führenden Aquifere und insbesondere des undurchlässigen Stockwerks (Abschnitt 2.2 bis 2.3) unter Einbeziehung:
 - der neu erfassten Daten (geologische Bohrprofile, Daten über die Oberflächenwässer, etc.) und der Bestimmung der Geometrie des Dreischichtenmodells;
 - der Daten Niederschlag/Grundwasserneubildung sowie der einzelnen Entnahmen der auf verschiedenen Stockwerken eingerichteten Brunnen;
 - der Daten der Oberflächenwässer in Funktion der vorliegenden Erkenntnisse (Verhältnis Oberflächenwässer/Grundwässer);

¹ Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz

- Die Kalibrierung des Modells anhand der neuen Daten unter Berücksichtigung der zusätzlichen Schicht (halbdurchlässiges Stockwerk ?) des Modells (Abschnitt 2.2);
- Die Erstellung von Grundwasserströmungsbilanzen bei den drei Aquifern (Abschnitt 2.4)
- Die Simulation der 3 unterschiedlichen Hauptszenarien je nach Entnahmemengen, Art der bewirtschafteten GWL und bei variierenden Niederschlagsraten (Abschnitt 3.2 bis 3.10).
- Das Alter der Grundwässer des tiefen Aquifers wurde mit Hilfe des Modells und in Bezug auf die von Wolfram, 2011, bereit gestellten Ergebnisse berechnet.

2. Modellierung des mehrschichtigen Grundwassersystems

2.1. ÜBERBLICK ÜBER DIE ALLGEMEINEN EIGENSCHAFTEN DES GRUNDWASSERLEITERS

Im Gebiet Wissembourg / Bad Bergzabern, in dem auch der Bienwald liegt, können generell drei durchlässige Schichtfolgen unterschieden werden: die beiden pliozänen Aquifere (GWL III und II) und der quartäre Aquifer (GWL I), die jeweils durch tonige Schichten voneinander getrennt sind. Das Erkundungsobjekt der vorliegenden Studie ist der unterste, 1979 in Kapsweyer entdeckte Aquifer III.

Dieser Grundwasserleiter wurde im Zuge von Wassererschließungsmaßnahmen in Kapsweyer unweit der deutsch-französischen Grenze zufällig entdeckt. Das Wasser trat mit einem Druck von 1,3 Bar aus dem 50 m tiefen grobklastischen pliozänen Grundwasserleiter hervor. Er ist durch eine undurchlässige Tonschicht von den darüber liegenden Aquifern getrennt.

Ausgehend von den Interpretationen der Messstellenprofile und der vom GLA² erstellten Profile konnte im Jahr 2000 ein Modell des Grundwassersystems bestimmt werden: Es handelt sich um eine Wechselfolge von mittel- bis grobkörnigen, teilweise schluffigen Sanden, die die durchlässigen Schichten bilden. Diese Grundwasserleiter sind durch tonige bis schluffige Zwischenschichten voneinander getrennt.

Die Grundwasserleiter und Zwischenschichten sind in Abbildung 1 beschrieben.

2.2. AUFBAU DES HYDRODYNAMISCHEN MODELLS

Die geologische Modellierung eines Grundwasserleiters, die darin besteht eine Darstellung der geologischen Formationen und ggf. ihrer physikalischen Eigenschaften (Porosität, Durchlässigkeit) zu erstellen, ist eine Voraussetzung zur Realisierung von Strömungsmodellen. Das geologische Modell des pliozänen Grundwasserleiters von Wissembourg – Bad Bergzabern wurde vom Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (LGB-RP) mit GoCAD erstellt und diente als Rahmen für ein mit der MARTHETM Software entwickeltes dynamisches Simulationsmodell der Strömungen für eine aus 5 Schichten, darunter 3 Grundwasserstockwerke, bestehende Struktur. Der MARTHETM Code wurde bereits bei den vorhergehenden Modellen des Grundwasserleiters 2001 und 2007 verwendet (Phasen 1 und 2 des INTERREG II-Projektes). Er dient insbesondere zur Berechnung der Strömungen in 3 Dimensionen oder Mehrschichten-Strömungen (2.5 D) bei freiem oder gespanntem Grundwasser sowie bei Austausch Grundwasser-Fluss.

² Geologisches Landesamt

2.2.1. Übergang vom geologischen Modell zum hydrodynamischen Modell

Ausgehend von der verfeinerten geologischen Studie des Gebietes (Bohrungsdaten und geophysikalische Messungen) wurde mit GoCAD ein 5-Schichten-Modell (davon 3 Grundwasserleiter) erstellt. Das Modell deckt ein 12 km x 25 km großes Fenster ab. Die Abfolge der Schichten von oben bis unten ist folgende:

- Quartärer oberer Grundwasserleiter (Pleistozän) aus mittel- bis grobkörnigen Sanden, Mächtigkeit zwischen 2 und 53 m (durchschnittlich 22,7 m)
- Tonhaltige Zwischenschicht mit hohem feinkörnigem Anteil, Mächtigkeit zwischen 0 und 20 (durchschnittlich 5,6 m)
- Pliozäner mittlerer Grundwasserleiter aus feinem Sand, Mächtigkeit zwischen 4 und 87 (durchschnittlich 38,4 m)
- Ton- und lehmhaltige Zwischenschicht, Mächtigkeit zwischen 1 und 30 m (durchschnittlich 13 m)
- Pliozäner unterer Grundwasserleiter aus mittel- bis grobkörnigen Sanden, Mächtigkeit zwischen 0 und 36 m (durchschnittlich 15,2 m).

Die Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung der Geologie des Gebietes sowie der bei dem Modell 2001 verwendeten Geometrie (2 Schichten, oberer und mittlerer GWL zusammen) und der neuen Geometrie 2010 mit 3 unterschiedlichen, durch gering durchlässige Zwischenschichten voneinander getrennten Schichten.

Die einzelnen, von den Schichten (Decke und Sohle der Schichten) gelieferten Informationen wurden in einem geeigneten Format (X; Y; Z SUB 1; Z SUB 2; Z SUB 5) in einer Auflösung von 250 m exportiert und anschließend direkt in den Vorprozessor des MARTHE Codes importiert.

Die Abbildungen 2 bis 7 zeigen jeweils die Geometrie der Decke und der Sohle in einem einheitlichen Gitternetzraster mit einer Seitenlänge von 250 m wie sie bei Strömungsberechnungen verwendet wird.

Die seitliche Ausdehnung des hydrodynamischen Modells unterscheidet sich aufgrund der hydrogeologischen Verhältnisse und der hydraulischen Randbedingungen von derjenigen des geologischen Modells. Da im südlichen Teil des Grundwasservorkommens keine Bohrung bekannt ist, beschränken sich die Kenntnisse auf die Interpretierung der geophysikalischen Schnitte (Studie 1999). Die grenzüberschreitende Arbeitsgruppe (LAG) hat deshalb beschlossen, das Strömungsmodell in südlicher Richtung nicht über die am südlichsten gelegene Messstelle hinaus zu führen.

In diesen Abbildungen sind auch die wichtigsten Kluftflächen dargestellt, die den unteren mit dem mittleren Grundwasserleiter verbinden können (z.B. die Querkluftung im Norden des Modells, wo ein Ansteigen der Sohle des Mergelbodens stattfindet). Die Abbildung 8 lokalisiert drei Schnittebenen, einen Nord-Süd-Schnitt und zwei West-Ost-Schnitte. In den Abbildungen 9 bis 11 sind die Querschnitte der Profile mit den Abbildungen der am nächsten gelegenen Messstellen dargestellt.

Modèle multicouche „Bienwald“, 1999/2001						
Substratum des couche modelisée avec „MARTHE“, BRGM						
Schichten Séquences	Aquifer bzw. Aquiclude Aquifère ou aquiclude	Stratigraphie Stratigraphie	Lithologie Lithologie	Mächtigkeit Épaisseur	GW-Modell Modèle	2010 Modèle multi-couche (6)
OSF	Aquifer I (OGWL) Aquifère I	Quartär (Pleistozän) Quaternaire (Pleistocène)	mittel- bis grobkörnige Sande, wahrscheinlich im Süden nicht vertreten sables moyens à grossiers, vraisemblablement non représentés au sud	max. 15 m max. 15 m	Schicht 1 couche 1	OGWL (1)
	Zwischenschicht Intercalaire	Quartär (Pleistozän) Quaternaire (Pleistocène)	mehrere Lagen mit hohem feinkörnigen Anteil, im Mittelbereich durchgängig plusieurs niveaux à fort % de fines, continus dans la zone centrale	einige Meter quelques m		OZH (2)
MSF	Aquifer II (MGWL) Aquifère II	Tertiär (Pliozän) Tertiaire (Pliocène)	Fein- und Mittelsande, Zwischenlagen von Silt, org. Mat., durchgängig sables fins à moyens, intercalaires de limons, mat. org., continus	> 20 m > 20 m	Schicht 2 couche 2	MGWL (3)
	Zwischenschicht (UZH) Intercalaire	Tertiär (Pliozän) Tertiaire (Pliocène)	Tone und Silte, geringer Kalkanteil, durchgängig argiles et limons, faible % de calcaire, continu	5 - 20 m 5 - 20 m		TZH (4)
USF	Aquifer III (UGWL) Aquifère III	Tertiär (Pliozän) Tertiaire (Pliocène)	mittel- bis grobkörnige Sande, org. Mat., durchgängig sables moyens à grossiers, mat. org., continu	5 - 30 m 5 - 30 m	Schicht 3 couche 3	UGWL (5)
t	Aquiferbasis Substratum	Tertiär (Mio/Oligozän) Tertiaire (Mio/Oligocène)	Tone, Tonmergel, Torsteine, Siltsteine, Kalksteine Argile, marnes, argile et limons, calcaire	einige 100 m quelques 100 m		Substratum (6)

Abbildung 1: Geometrie 2001 und 2010 des mehrschichtigen Grundwasserleiters

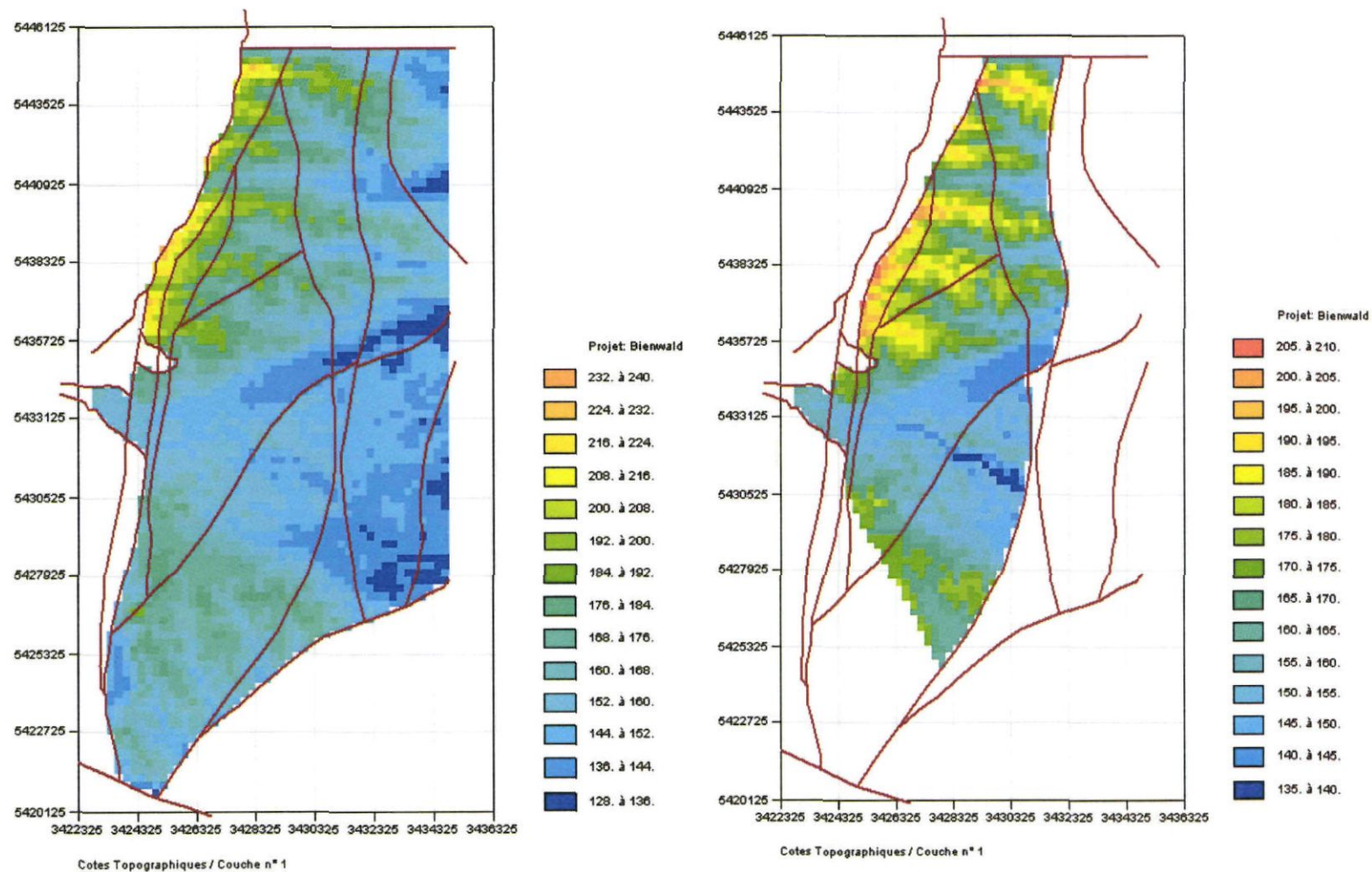


Abbildung 2: Decke (DGM) und Ausdehnung des quaternären oberen GWL. Links : geologisches Modell, rechts: hydrodynamisches Modell

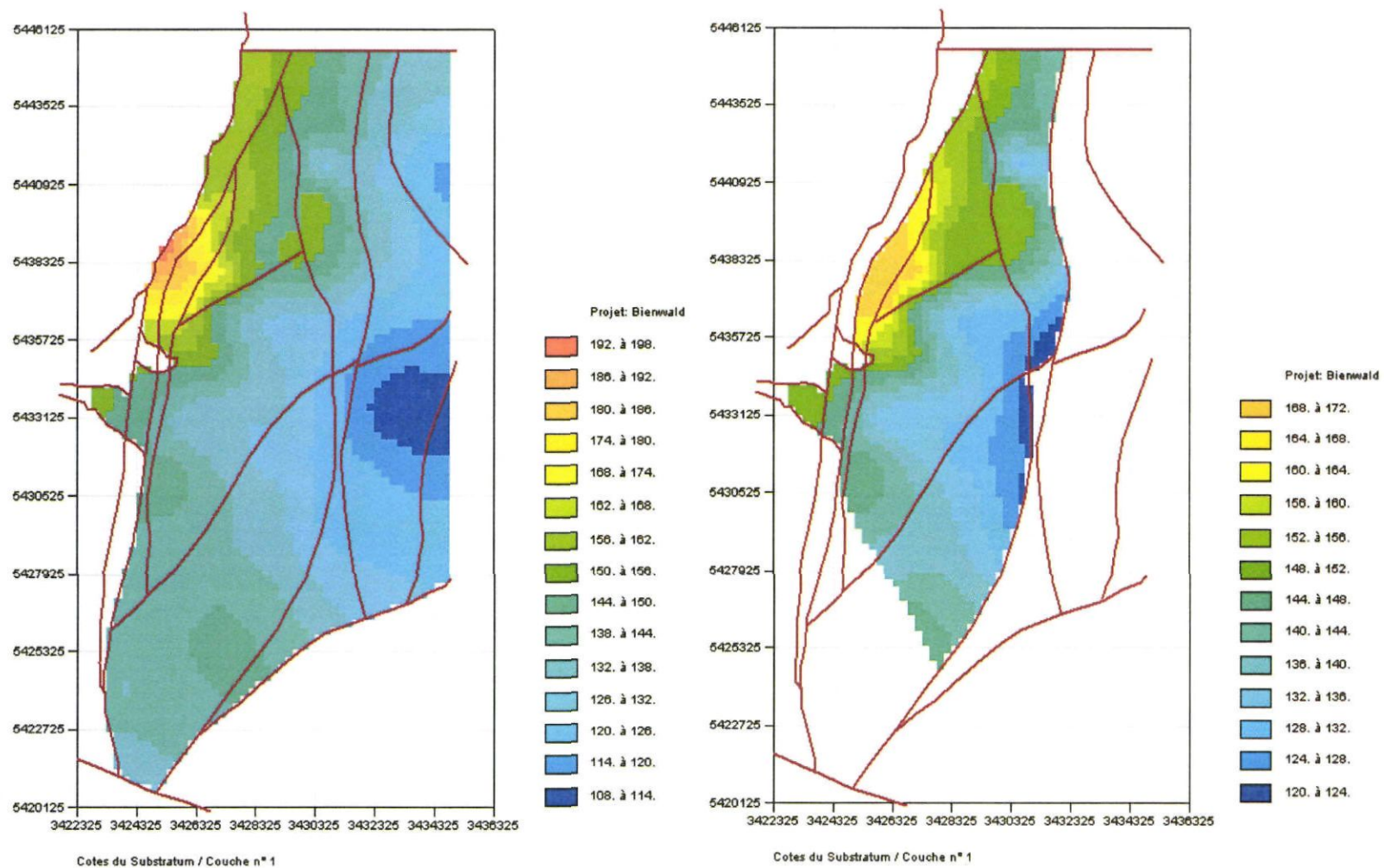


Abbildung 3: Sohle des oberen quartären GWL. Links: geologisches Modell, rechts: hydrodynamisches Modell

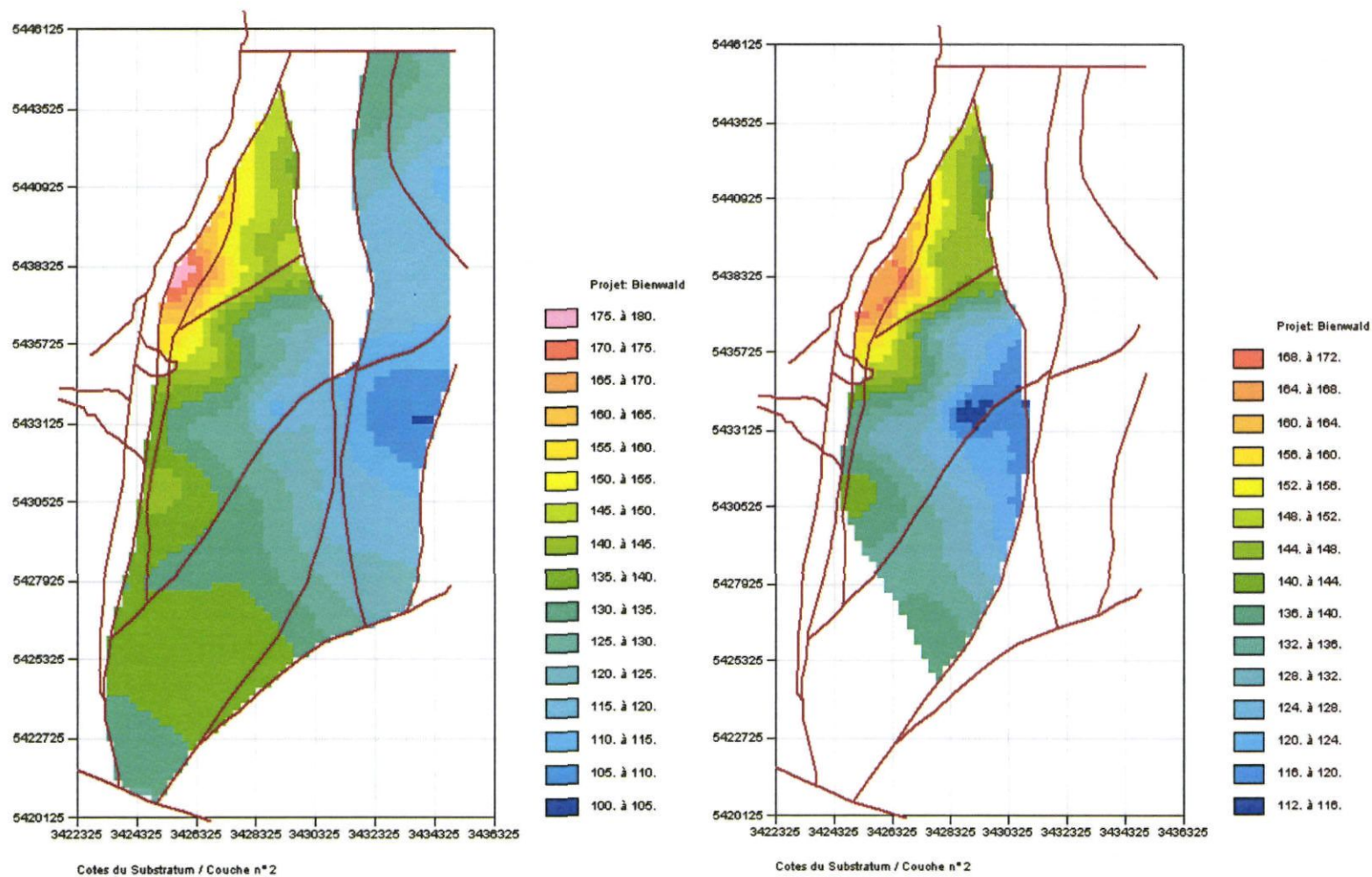


Abbildung 4: Sohle der Zwischenschicht zwischen dem oberen und mittleren GWL. Links: geologisches Modell, rechts: hydrodynamisches Modell

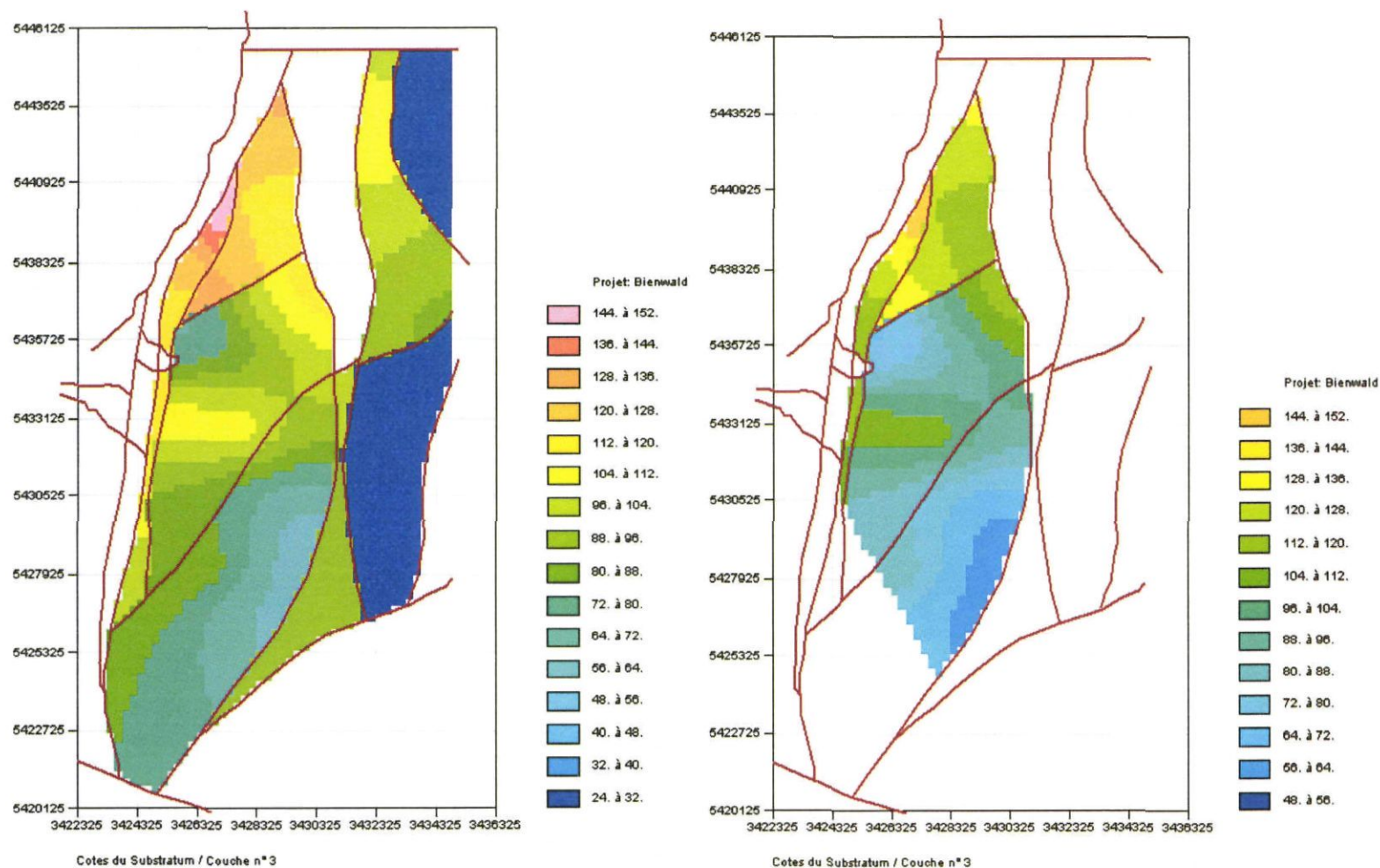


Abbildung 5: Sohle des pliozänen mittleren GWL. Links: geologisches Modell, rechts: hydrodynamisches Modell

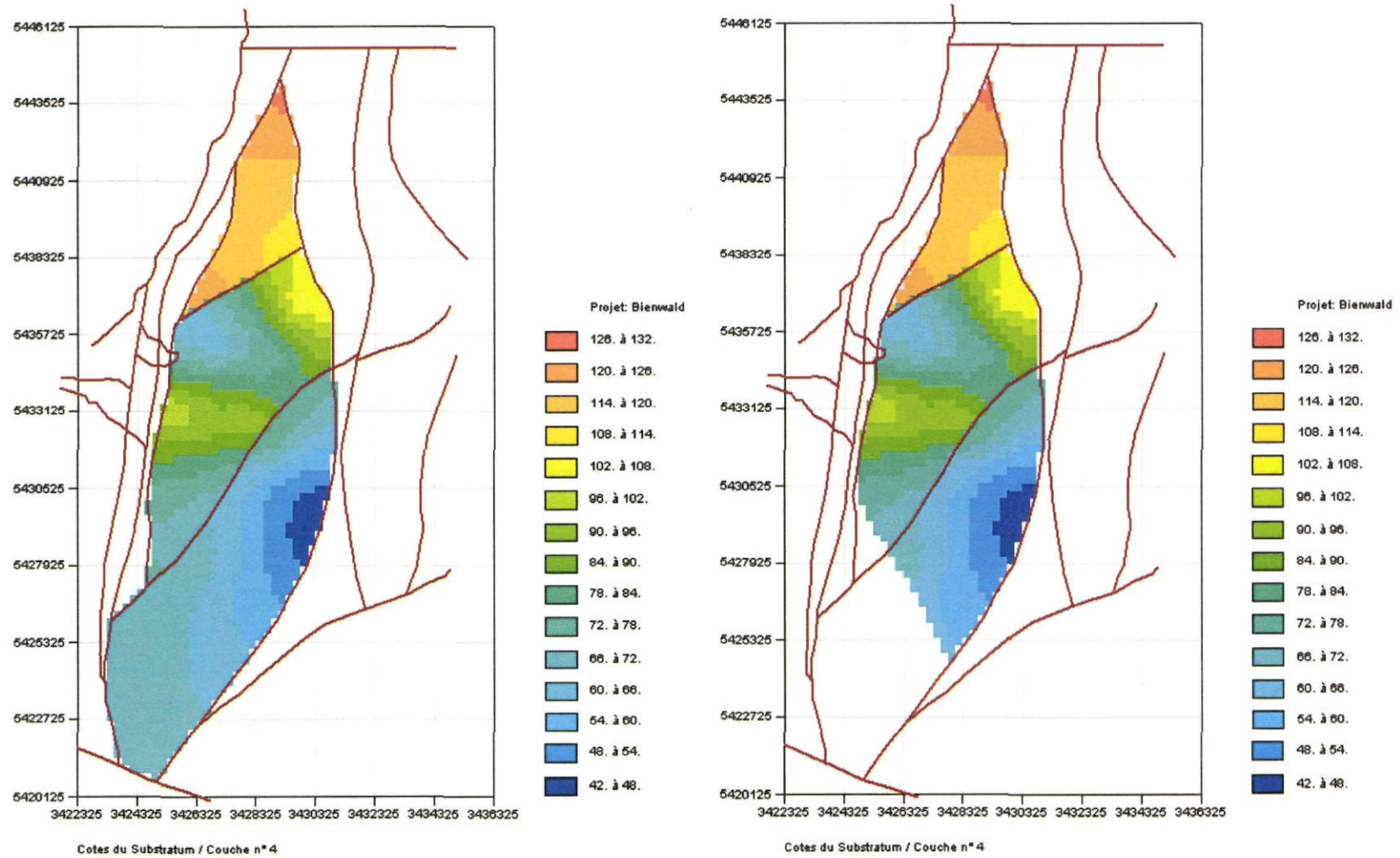


Abbildung 6: Sohle der Zwischenschicht zwischen dem mittleren und unteren GWL. Links: geologisches Modell, rechts: hydrodynamisches Modell

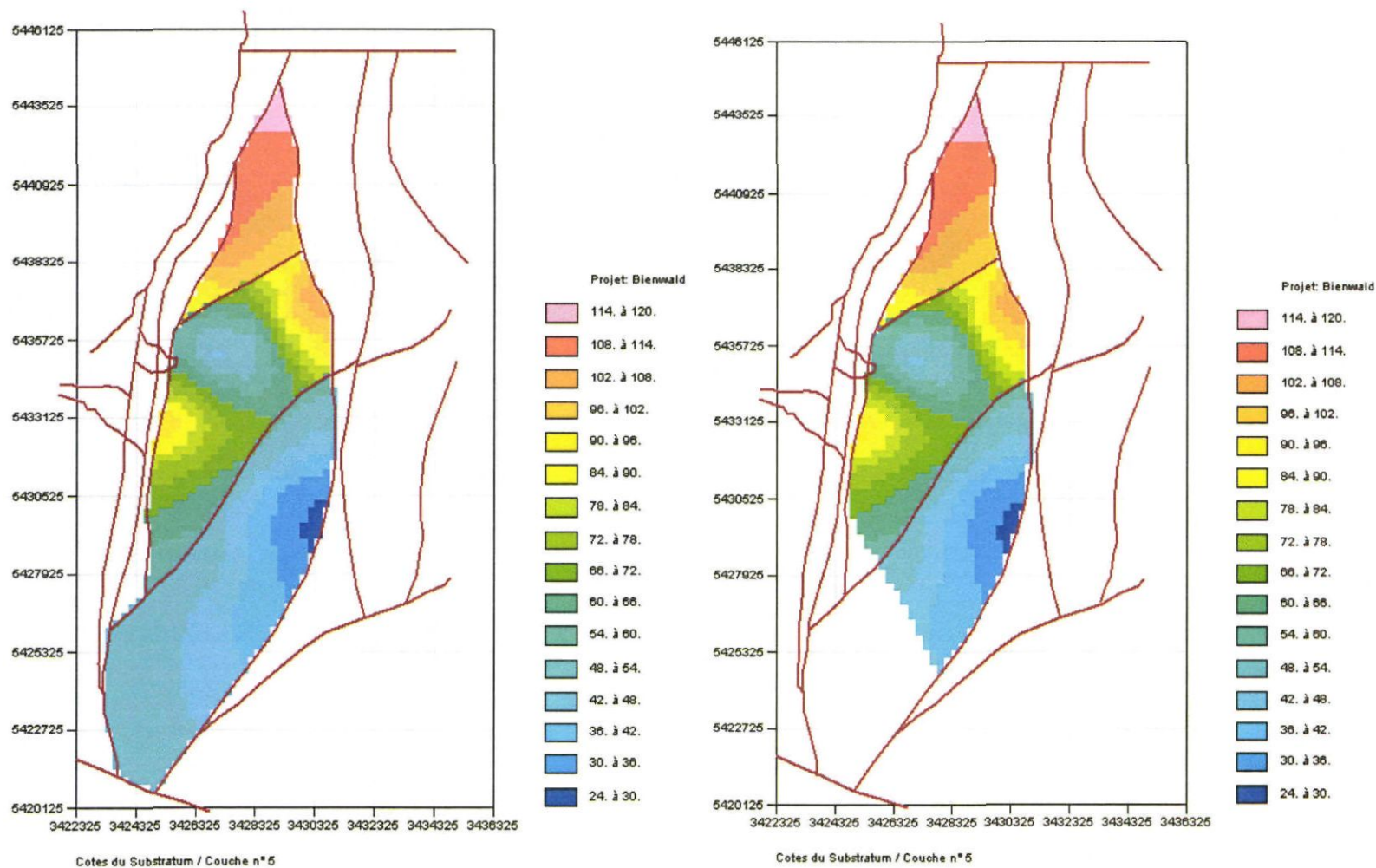


Abbildung 7: Sohle des unteren pliozänen GWL. Links: geologisches Modell, rechts: hydrodynamisches Modell

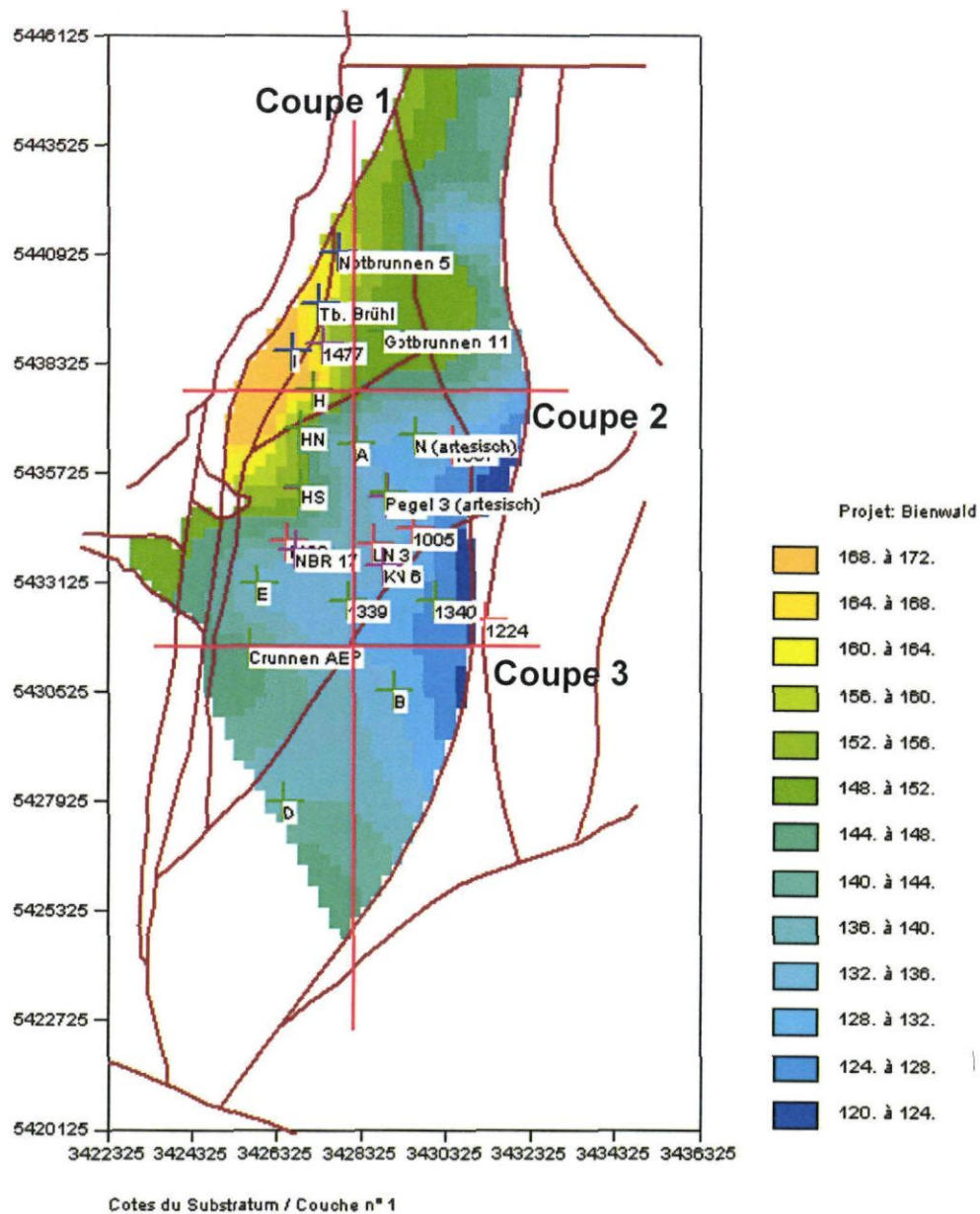


Abbildung 8: Lokalisierung der Profilebenen im Modell

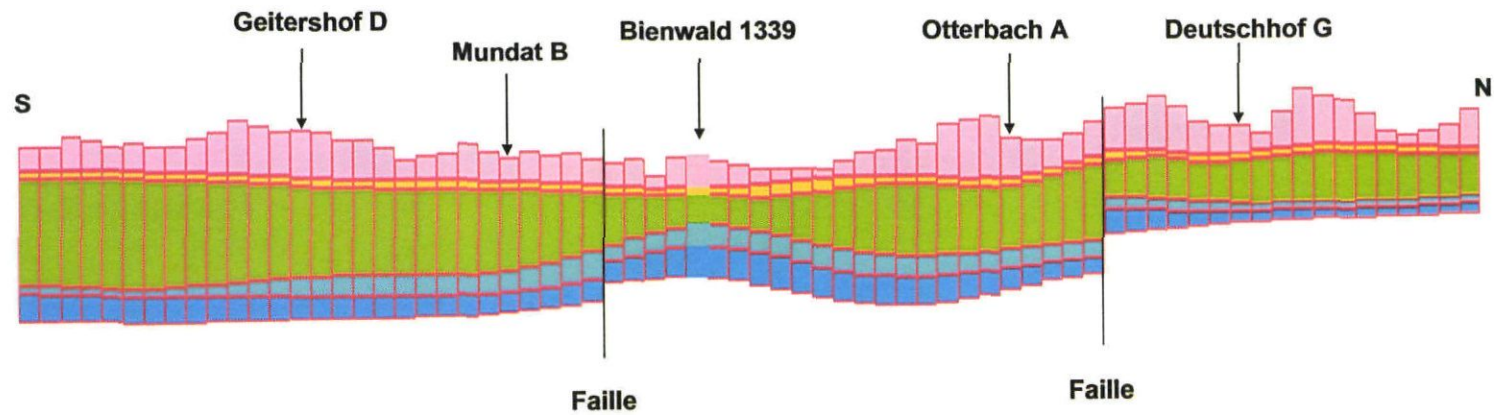


Abbildung 9: Profil 1 N-S des Modells (Modellzelle mit einer Seitenlänge von 250 m)

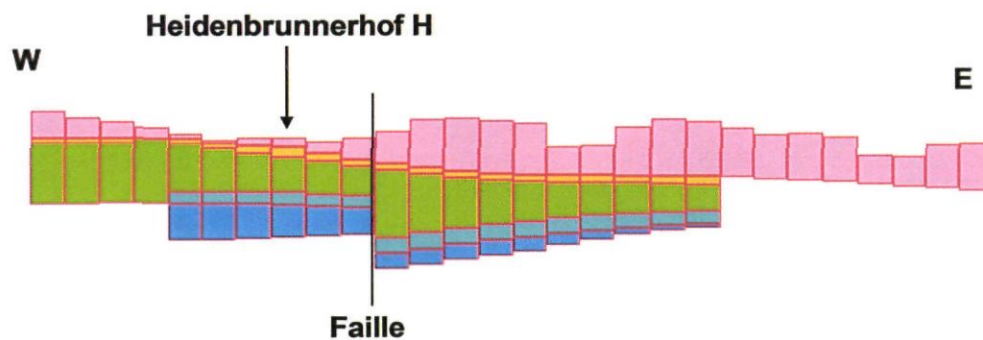


Abbildung 10: Profil 2 W-E des Modells (Modellzelle mit einer Seitenlänge von 250 m)

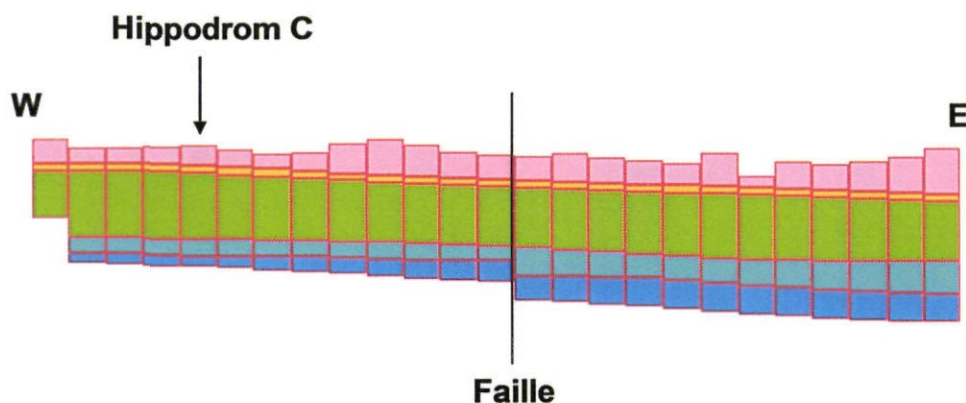
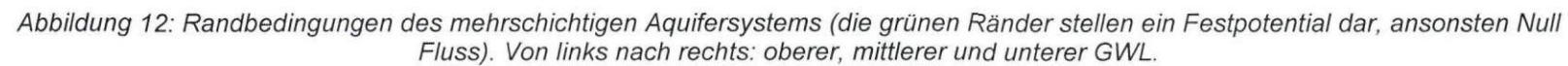


Abbildung 11: Profil 3 W-E des Modells (Modellzelle mit einer Seitenlänge von 250 m)

2.2.2. Randbedingungen

Die Randbedingungen des Modells werden im Wesentlichen durch die großen Versätze der Störungen im Osten und Westen des Aquifersystems definiert, die insbesondere den unteren und mittleren Grundwasserleiter unmittelbar mit dem tertiären Mergel verbinden. In diesem präzisen Fall handelt es sich um undurchlässige Grenzen. Ein weiterer Typ von Randbedingungen sind die Festpotentialränder³; sie betreffen einerseits die Südwestgrenze des Modells bei dem gesamten Grundwassersystem, über die hinaus keine Daten zum Grundwasser vorliegen, und andererseits die West- und Ostgrenzen des oberen und mittleren Grundwasserleiters, die von den Störungsversätzen nicht betroffen sind. Die Randbedingungen sind in Abbildung 12 dargestellt.

³ Die Festpotentialränder bestimmen die piezometrische Höhe, die jedoch zeitlich unterschiedlich sein kann



2.3. KALIBRIERUNG DES MODELLS

2.3.1. Eingangsdaten des Modells

Bei den Eingangsdaten für die numerische Strömungsberechnung handelt es sich in der Regel um räumlich dargestellte Daten verschiedener Art, und zwar um:

- die **Speisungsdaten** des Modells, bei denen es sich einerseits um die Grundwasserneubildung (Teil des Niederschlags, der bis ins Grundwasser eindringt) und die möglichen Eintritte durch die seitlichen Grenzen des Modells (Festpotential) handelt;
- die **Entnahmedaten**, die der Entnahme von Trinkwasser für die Gemeinden Wissembourg und Bad-Bergzabern entsprechen;
- die **hydrologischen Daten** (Höhe des Flusses, Höhe des Bettes, Durchlässigkeit des Bettes,...), die zur Berechnung des Austausches Grundwasser-Fluss eingesetzt werden. Im Rahmen dieses Modells ist die Lauter, der größte Wasserlauf des Untersuchungsgebietes, durch eine Überlaufhöhe dargestellt und
- die **hydrodynamischen Daten**, bei denen es sich um die den Grundwasserleiter kennzeichnenden Parameter handelt (Durchlässigkeit, Speicherkoeffizient, frei oder gespannt).

a) Speisung des Grundwassersystems

Die Berechnung der Infiltration basiert auf einer Berechnung der hydroklimatischen Bilanz pro Tag nach dem GARDENIA Schema (Thiéry, 2003) und ist mit der Berechnung der Piezometerhöhen in MARTHE gekoppelt. Die zur Berechnung erforderlichen Daten sind:

- der Bruttoniederschlag (mm/T);
- die potentielle Evapotranspiration (mm/T);
- der für die Evapotranspiration verfügbare Vorrat (mm) für die ersten Meter des Bodens (entspricht dem leicht nutzbaren Wasservorrat der Agronomen);
- die Halbwertszeit der Versickerung (TPERC) und die Höhe Abfluss-Versickerung (NRUIP) für die Zerlegung der Strömung in zwei Komponenten (schnell: Abfluss, langsam: Versickerung in Richtung Grundwasser).

Die Werte für Tagesniederschlag und potentielle Evapotranspiration stammen vom Deutschen Wetterdienst (DWD). Die Abbildung 13 zeigt die im Modell verwendeten Ganglinien Tagesniederschlag und potentielle Evapotranspiration.

Die Werte für den für die Evapotranspiration verfügbaren Vorrat wurden von französischer Seite in einem 30 m-Raster (grenzüberschreitendes Modell MoNit) und von deutscher Seite (vom LGB Mainz) in einem 200 m-Raster bereit gestellt und sind in einem 250 m-Raster wiedergegeben (cf. Abbildung 14).

Die Parameter der unterirdischen Strömung (TPERC und NRUIP) werden durch Kalibrierung des numerischen Modells festgelegt. Der Parameter NRUIP wird auf 300 mm und TPERC zwischen 1 und 3 Tagen je nach Mächtigkeit der ungesättigten Zone festgesetzt.

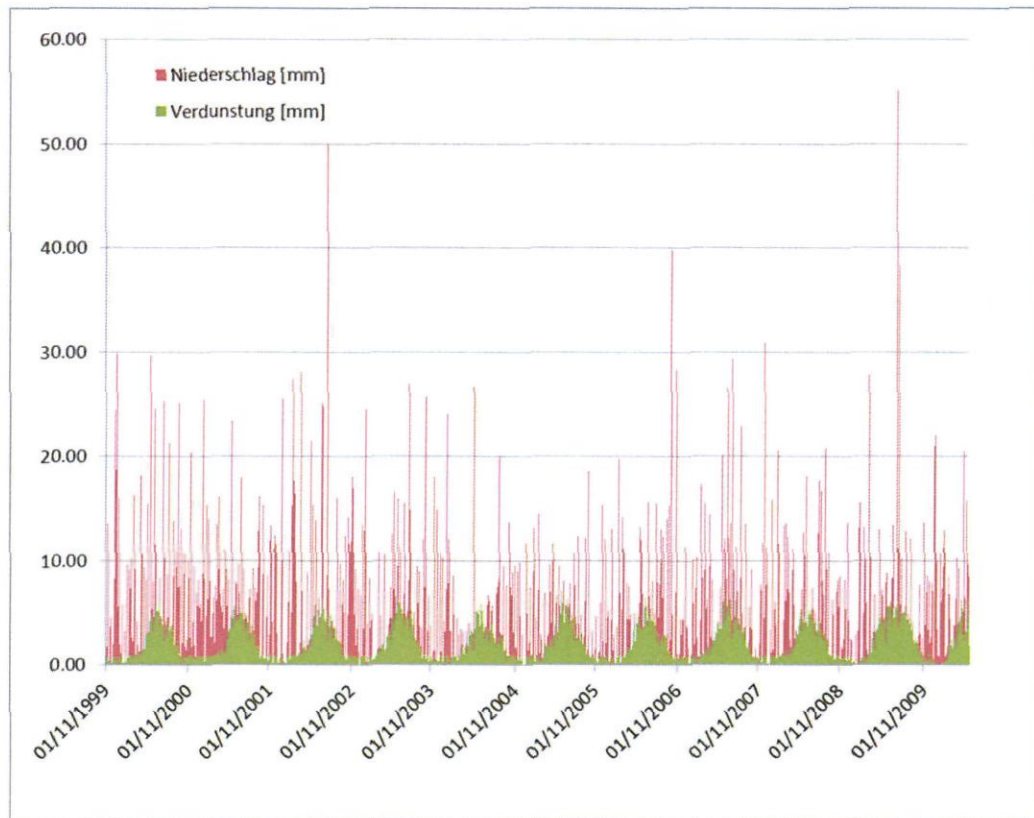


Abbildung 13: Tagesniederschlag und Verdunstung

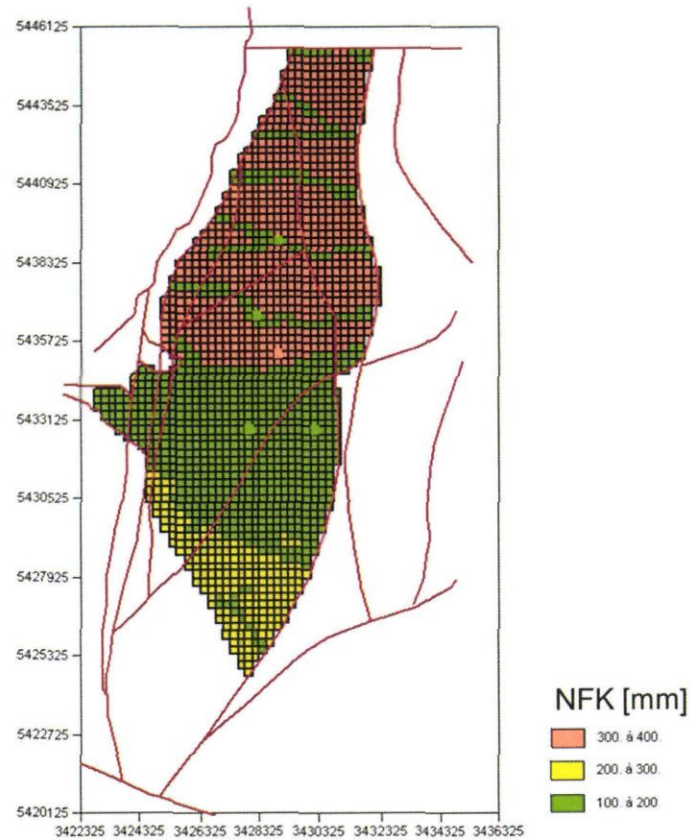


Abbildung 14: Verteilung des für die Evapotranspiration zur Verfügung stehenden Vorrats (NFK: Nutzbare Feldkapazität)

b) Entnahmen aus dem Grundwasserstockwerk

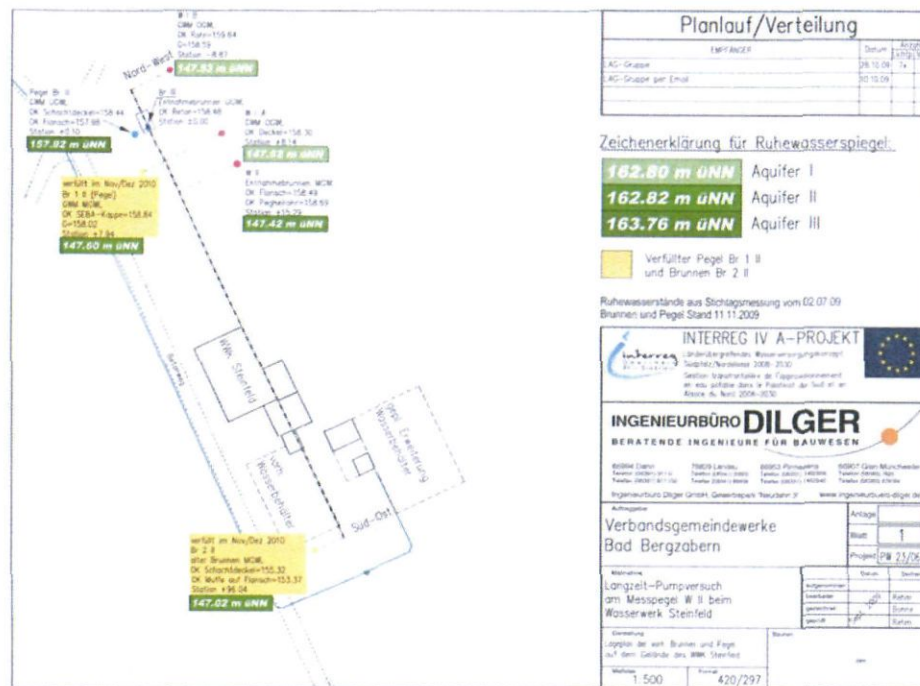


Abbildung 15: Lageplan der Brunnen und Messstellen in Steinfeld

Die Entnahmen zur Trinkwasserversorgung der Gemeinden Wissembourg auf französischer Seite und Bad-Bergzabern auf deutscher Seite erfolgen durch vier Bohrbrunnen, von denen drei den unteren Grundwasserleiter (ehemaliger Artese, Brunnen III, Steinfeld) und einer den mittleren Grundwasserleiter (Brunnen Br II) fassen. Die Brunnen Artese, Br II und Br III sind jeweils seit 2005 und 2009 stillgelegt. Seit 2004 werden die Gemeinden nahezu ganz aus dem Bienwald Brunnen versorgt (cf. Abbildung 15). In der Zeit 2000-2010 wurden im Übrigen Pumpversuche bei fünf Bohrbrunnen (Bienwald 1339, Otterbach All, Deutschhof GIII, WWK Steinfeld Br II und VII) durchgeführt. In Tabelle 1 sind die Ergiebigkeit und die Dauer der Versuche pro Bohrloch zusammengefasst.

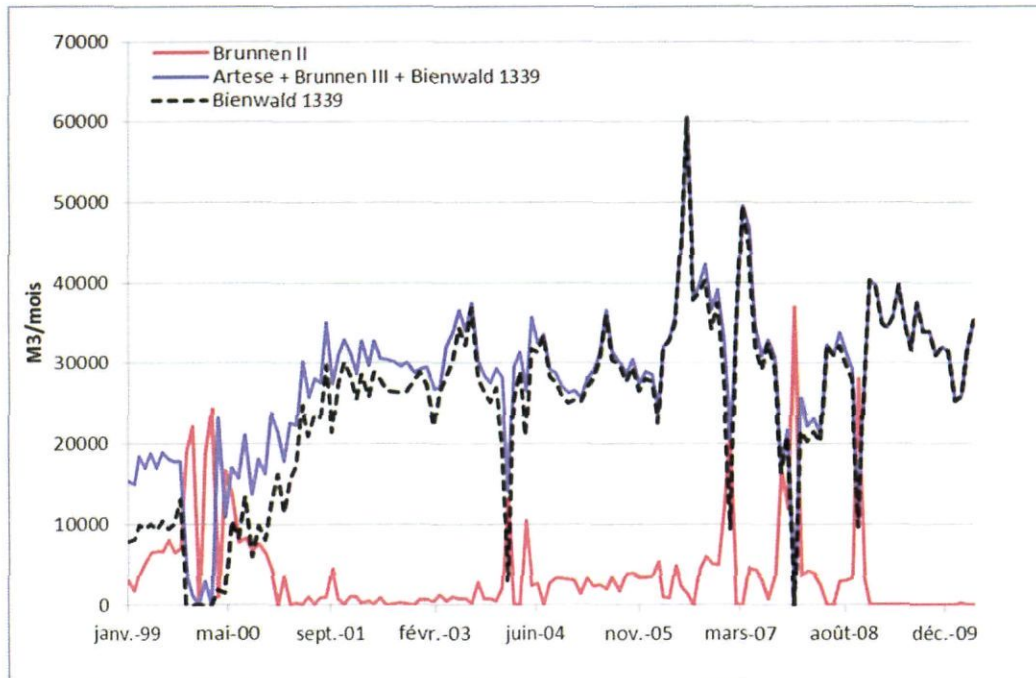


Abbildung 16: Trinkwasserentnahmen aus dem mittleren (II) und unteren (III) GWL

Date	Bienwald 1339 III	Otterbach A II	Deutschhof G III	WWK Steinfeld Br II	WWK Steinfeld W II
14/02/00 au 14/03/00	180.0				
18/05/00 au 29/05/00		18.7			
10/10/06 au 20/11/06			11.7		
01/10/08 au 10/10/08				44.0	
11/10/08 au 17/10/08				55.0	
18/10/08 au 19/10/08				95.0	
20/10/08 au 24/10/09				55.0	
18/11/09 au 21/11/09					35.0
22/11/09 au 21/12/10					55.0
22/12/09 au 06/01/10					72.0

Tabelle 1: Pumpversuche im GWL II und III von 2000 bis 2010 (m3/h)

c) Hydrodynamische Parameter des Grundwassersystems

Die hydrodynamischen Parameter Durchlässigkeit und Speicherkoeffizient (frei oder gespannt) sind Daten, die durch Anpassung der piezometrischen Höhe jedes Grundwasserstockwerks gewonnen werden. Die Durchlässigkeitswerte pro Grundwasserleiter (A I, A II und A III) und Zwischenschicht (I I und I II) sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Abbildungen 16 und 17 zeigen ihre räumliche Verteilung. Die Durchlässigkeitswerte schwanken im Durchschnitt zwischen $9 \cdot 10^{-5}$ und $2 \cdot 10^{-4}$ m/s bei den Grundwasserleitern und zwischen $6 \cdot 10^{-10}$ und $5 \cdot 10^{-8}$ m/s bei den gering

durchlässigen Zwischenschichten (Leakage-Effekt). Die Durchlässigkeitswerte der Grundwasserleiter liegen ziemlich nahe beieinander, wobei die Durchlässigkeit im mittleren und unteren Grundwasserleiter etwas höher ist. Bei den Zwischenschichten ist die Zwischenschicht II, die den mittleren vom unteren Grundwasserleiter trennt, um zwei Größenordnungen (Faktor 100) weniger durchlässig als die Zwischenschicht I, die den oberen vom mittleren Grundwasserleiter trennt. Ein durchlässigerer Bereich im Nordwesten des Modells ermöglicht die Grundwasserneubildung im mittleren und unteren Grundwasserleiter durch den oberen Grundwasserleiter. Der Speicherkoeffizient bei freien Wasserspiegeln beträgt 10 % und der spezifische Speicherkoeffizient liegt zwischen $5 \cdot 10^{-6}$ und $4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$.

Perméabilité [m/s]	A I	I I	A II	I II	A III
Minimum	5.0E-06	2.0E-10	5.0E-06	2.5E-11	3.0E-05
Maximum	2.5E-04	1.0E-06	4.0E-04	2.1E-08	3.1E-04
Moyenne	9.3E-05	4.8E-08	1.3E-04	5.9E-10	1.7E-04
Ecartype	6.5E-05	1.5E-07	1.4E-04	3.3E-09	8.0E-05

Tabelle 2: Verteilung der Durchlässigkeiten bei dem mehrschichtigen Grundwassersystem

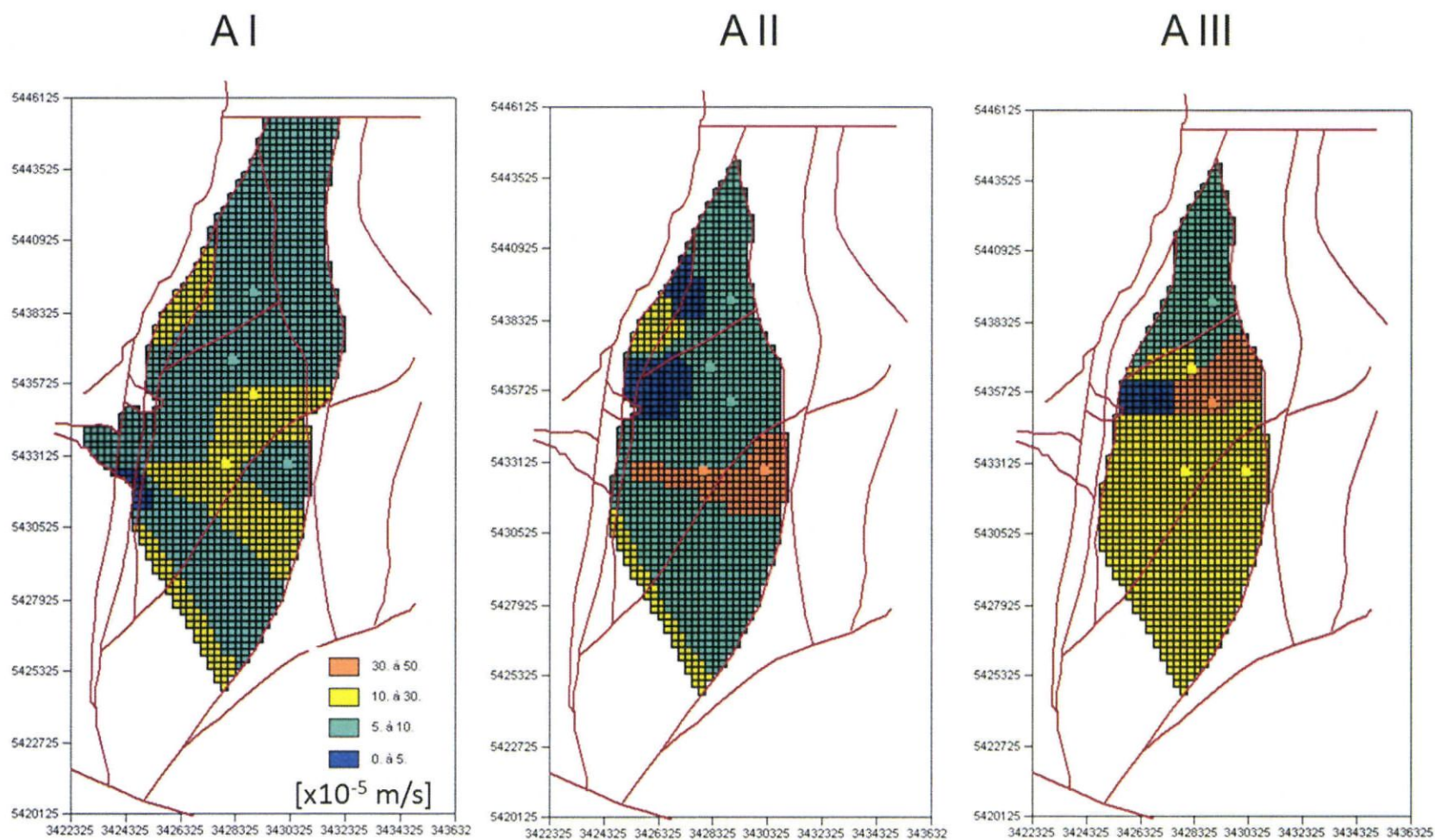


Abbildung 17 : Räumliche Verteilung der Durchlässigkeiten pro Grundwasserstockwerk

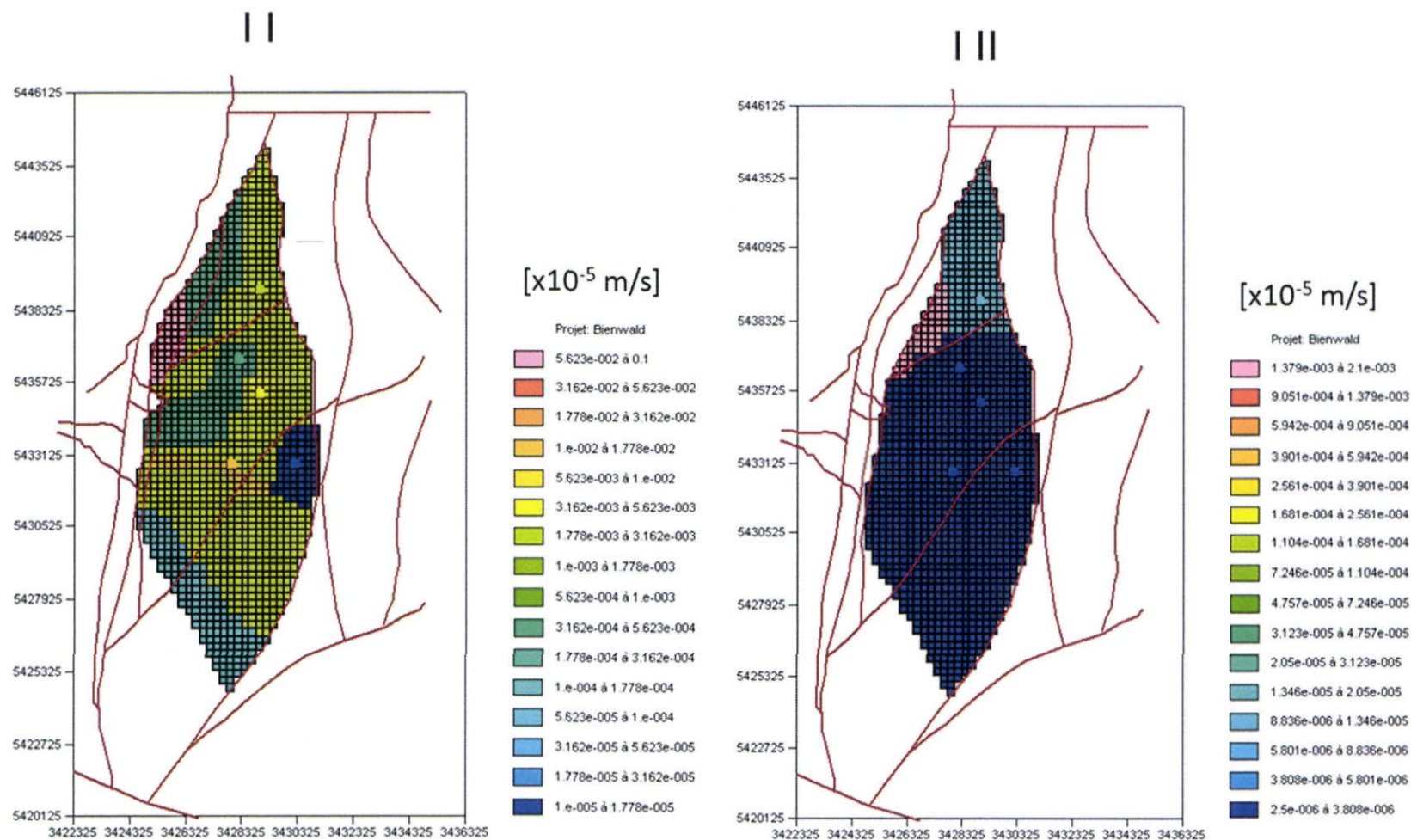


Abbildung 18: Räumliche Verteilung des Leakage-Faktors pro Zwischenschicht

2.3.2. Ausgangsdaten des Modells

a) *Kalibrierung der Grundwasserstände im instationären Regime*

Das Messstellennetz des mehrschichtigen Grundwassersystems umfasst 43 Piezometer, von denen 16 den oberen, 14 den mittleren und 13 den unteren Grundwasserleiter erfassen (cf. Abbildung 18). Bei den ältesten liegen die Ergebnisse der fortlaufenden oder von Hand vorgenommenen Kontrollen seit 1999 und bei den neueren seit 2009 vor. Die Abbildungen 19 bis 37 zeigen die zeitlichen Variationen der jeweils simulierten und gemessenen Piezometerhöhen. Auf ein und demselben Graph sind die Piezometerhöhen in den drei Aquiferen bei gespanntem Grundwasserstand dargestellt. Die Kreuze stellen die gemessenen und die durchgehenden Linien die von dem numerischen Modell simulierten Piezometerhöhen dar. Die simulierten Piezometerhöhen sind was die Variationsdynamik und den relativen Grundwasserstand anbetrifft mit den beobachteten Werten bei jedem Grundwasserleiter völlig konsistent. Amplitudenabweichungen im Meterbereich oder kleiner sind zuweilen messbar. Bei dem Pumpversuch in Steinfeld VII von November 2009 bis Januar 2010 (cf. Abbildung 27) ist die Piezometerhöhe zur Berücksichtigung des Bohrdurchmessers auf dem Raster korrigiert. Das Modell berechnet lokal eine Absenkung für ein 25 m-Raster (überlappendes Raster bei vorgegebener Entnahmemenge). Diese Absenkung muss anschließend um eine zusätzliche, vom Brunnenhalbmesser, von der Ergiebigkeit und von der Transmissivität des Grundwasserleiters abhängige Absenkung korrigiert werden (Formel nach J.P. Sauty (1973)).

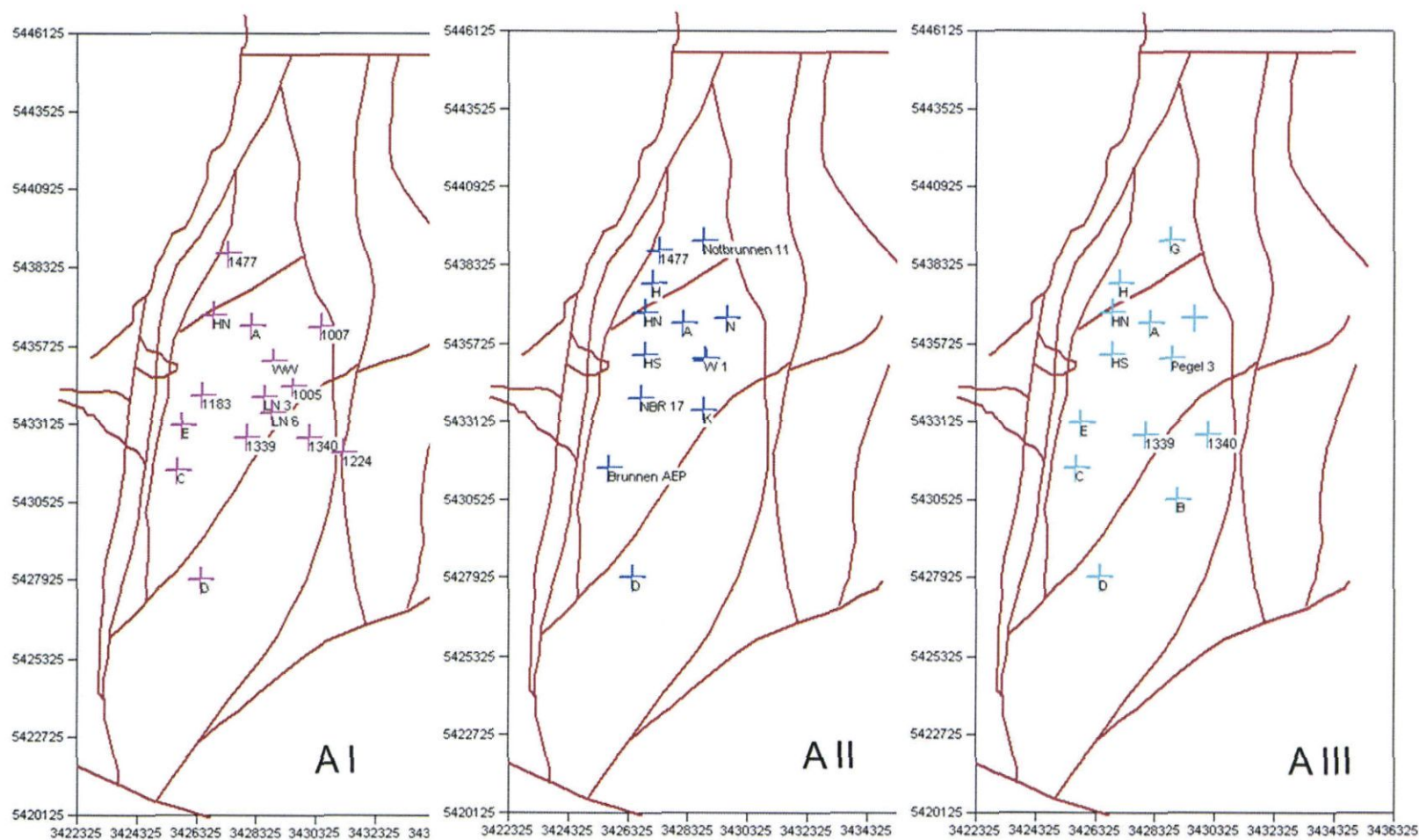


Abbildung 19: Lokalisierung der Messstellen pro GWL

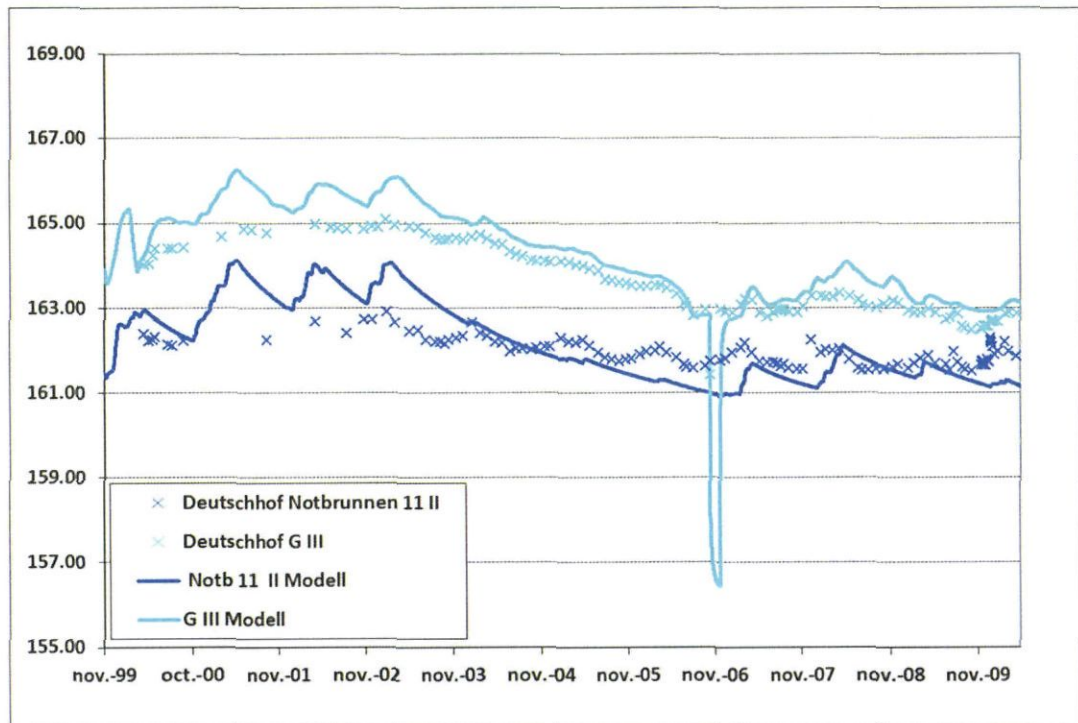


Abbildung 20: Piezometerhöhen in Deutschhof GWL II und III (Pumpversuch bei AIII im Okt./Nov. 2006)

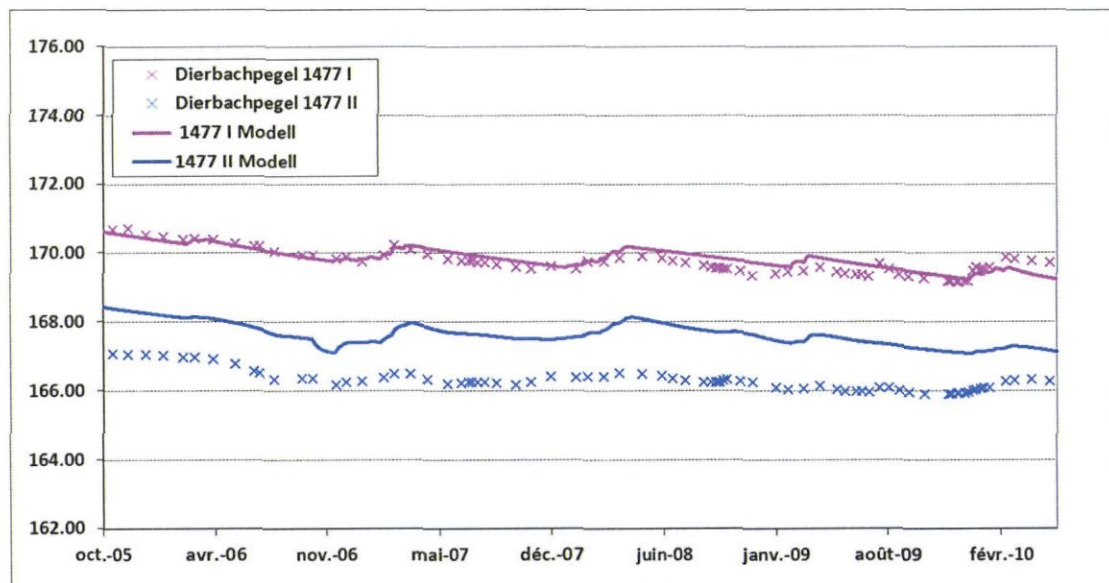


Abbildung 21: Piezometerhöhen am Dierbachpegel 1477, GWL I und II

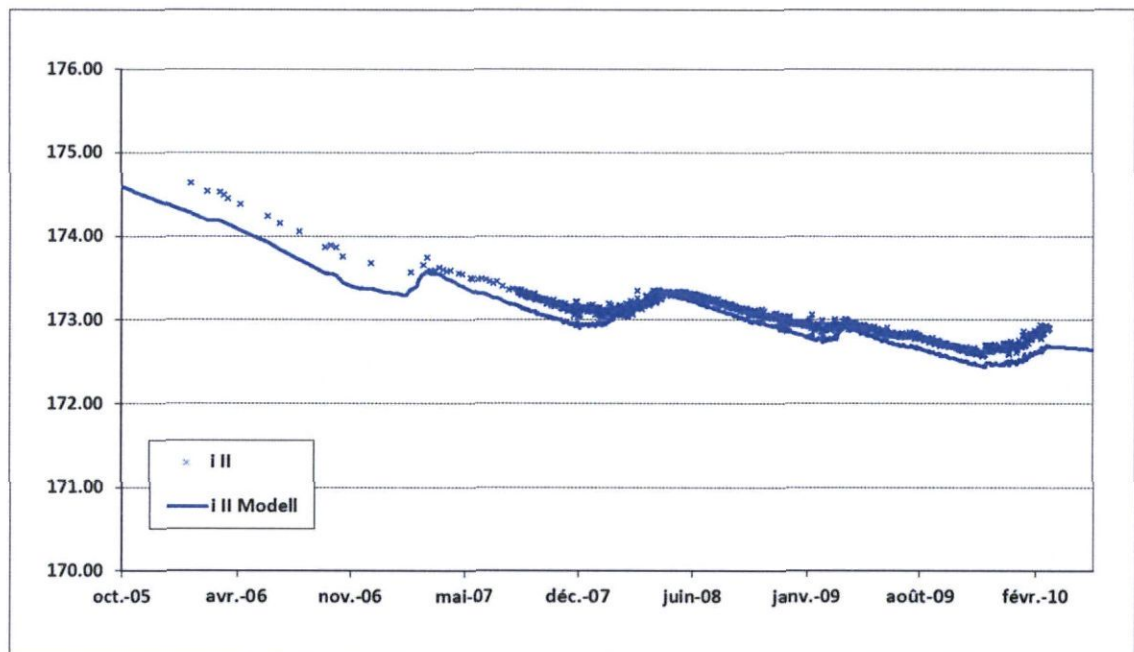


Abbildung 22: Piezometerhöhen in Dierbach I, GWL II

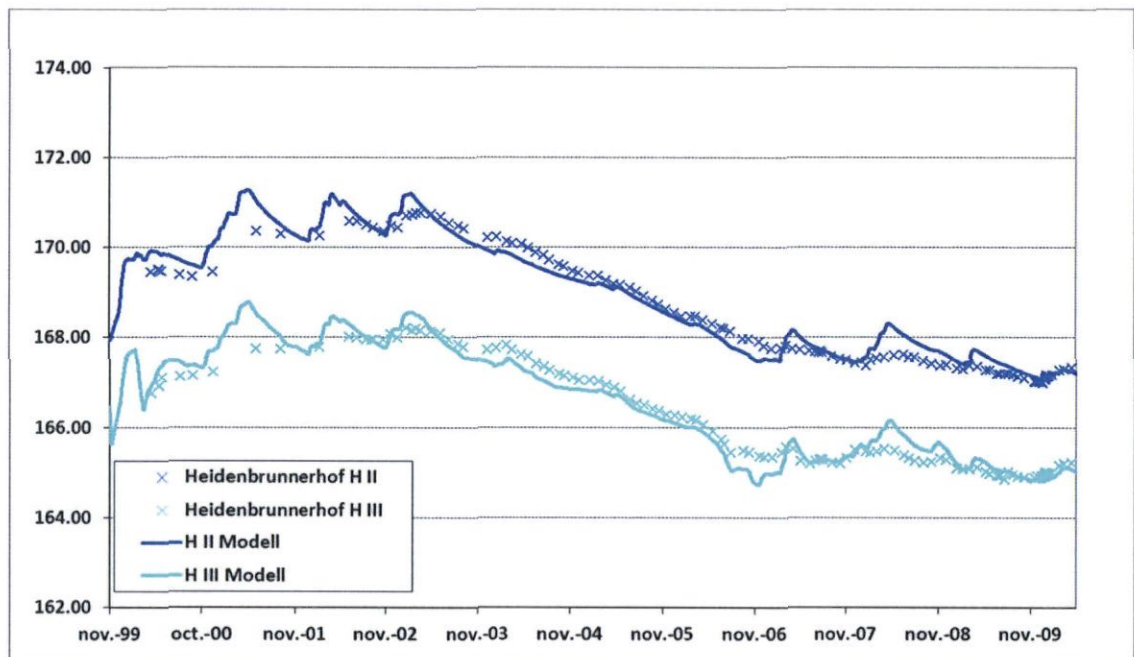


Abbildung 23: Piezometerhöhen in Heidenbrunnhof, GWL II und III

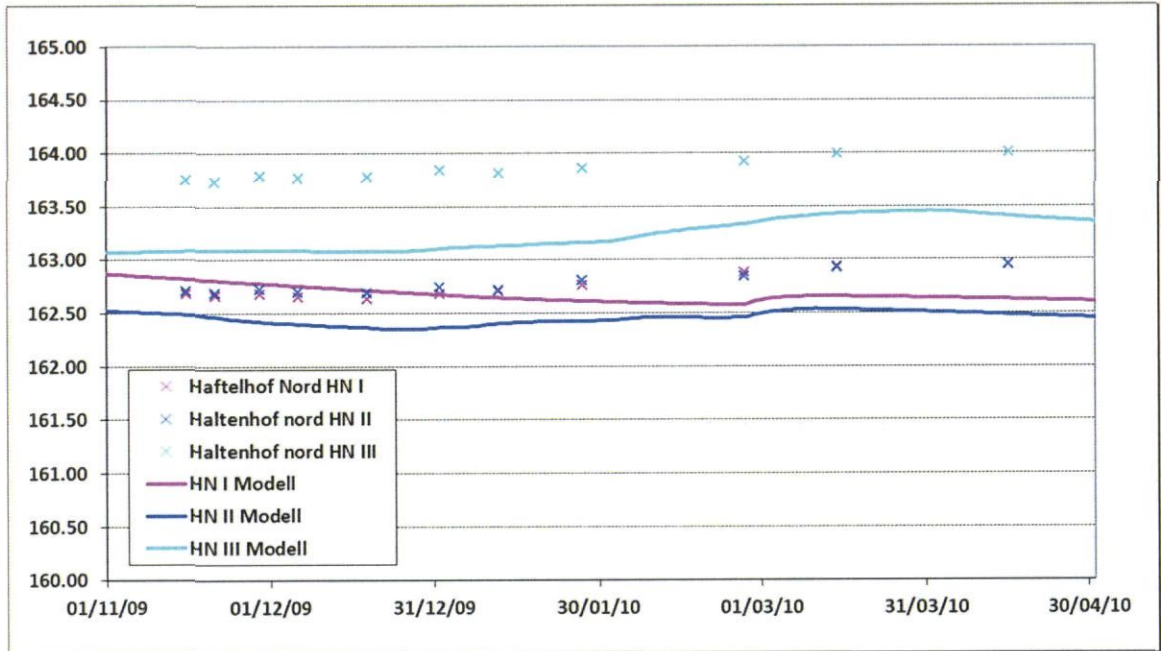


Abbildung 24: Piezometerhöhen in Haltenhof Nord, GWL I, II und III

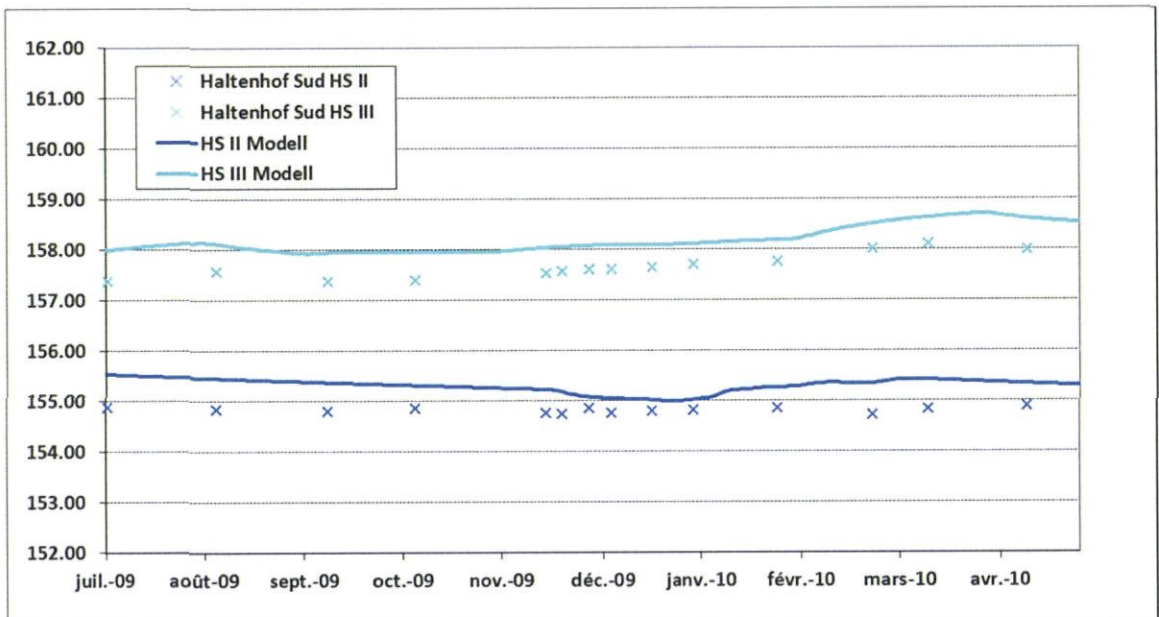


Abbildung 25: Piezometerhöhen in Haltenhof Süd, GWL II und III

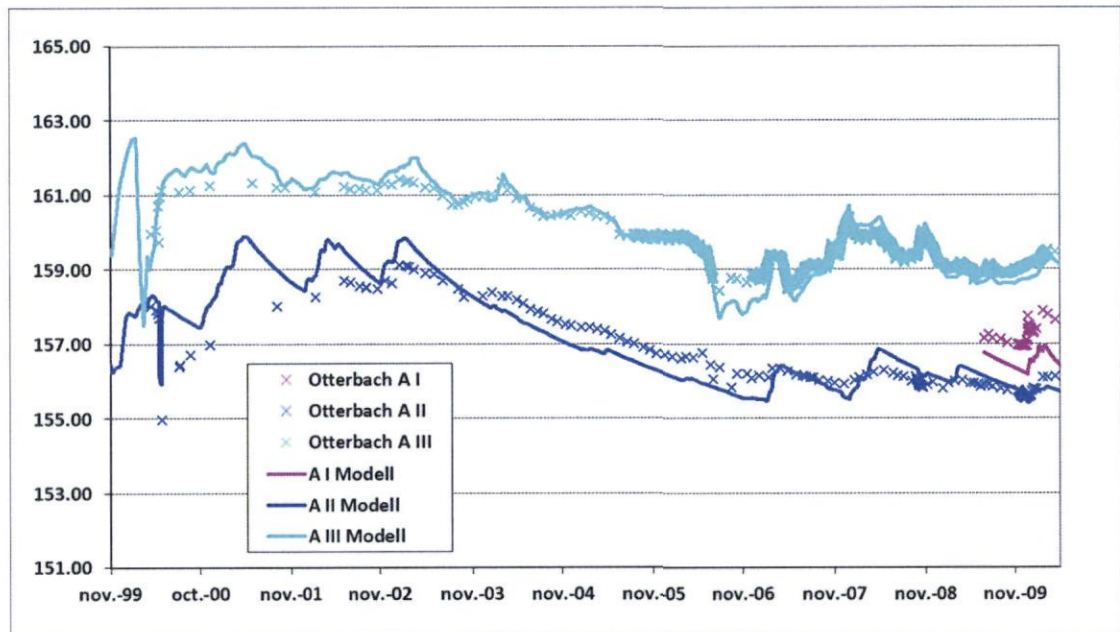


Abbildung 26: Piezometerhöhen in Otterbach, GWL I, II und III (Pumpversuch in D im Mai 2000)

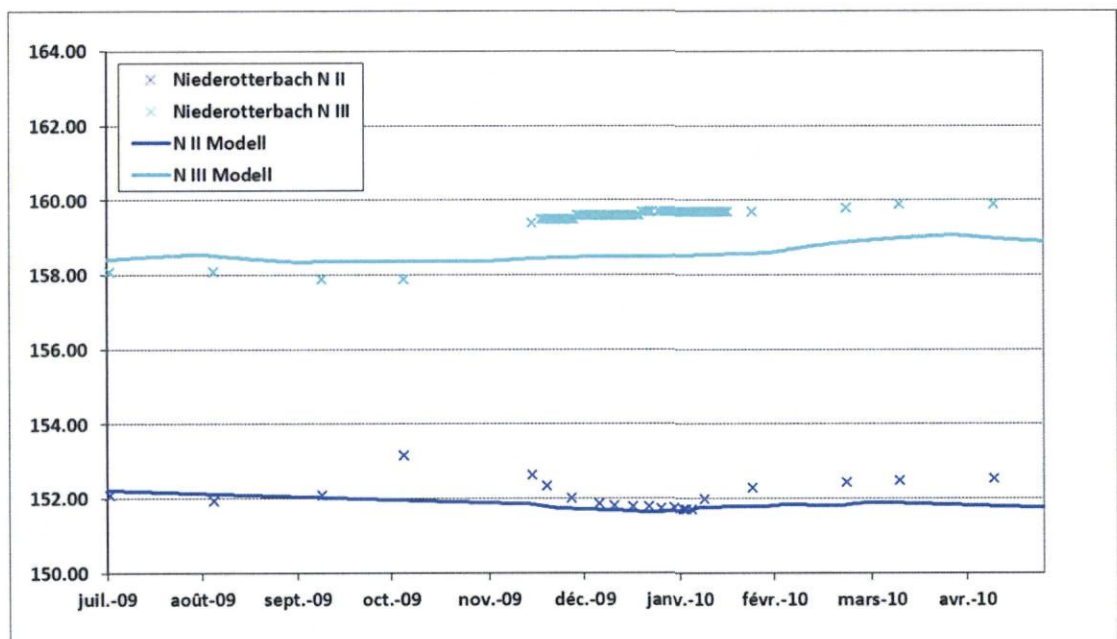


Abbildung 27: Piezometerhöhen in Niederrotterbach, GWL II und III

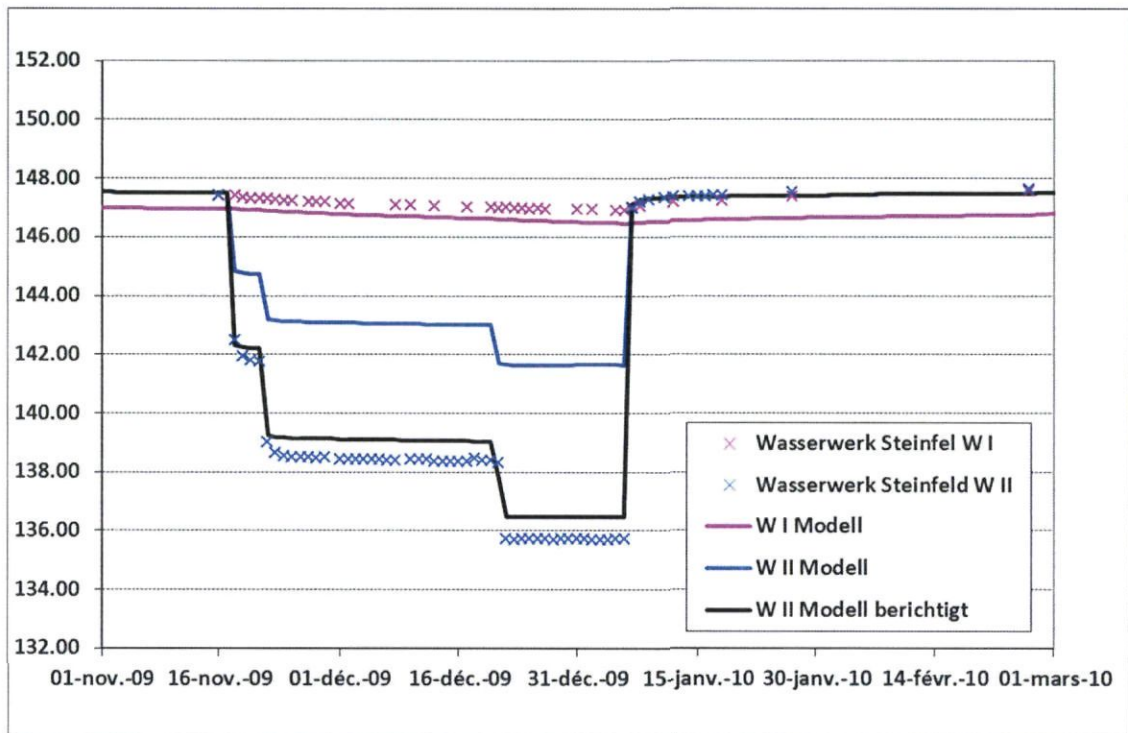


Abbildung 28: Piezometerhöhen beim Wasserwerk Steinfeld W, GWL I und II (Pumpversuch bei WII)

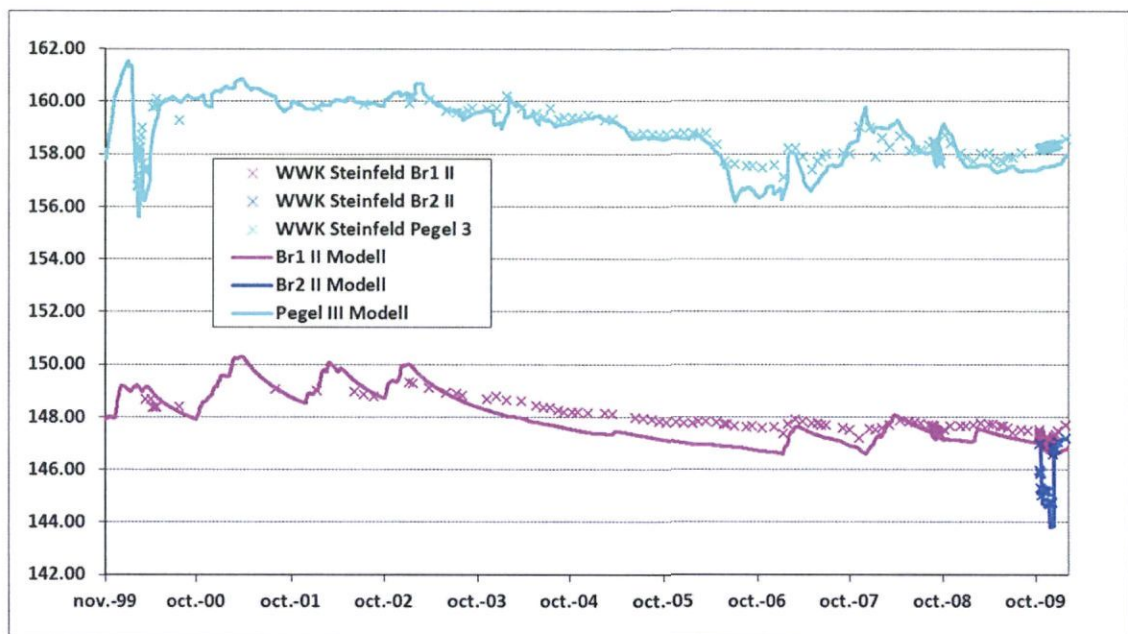


Abbildung 29: Piezometerhöhen in Steinfeld Brunnen, GWL I, II und III (Pumpversuch in Steinfeld WII im Nov. 2009)

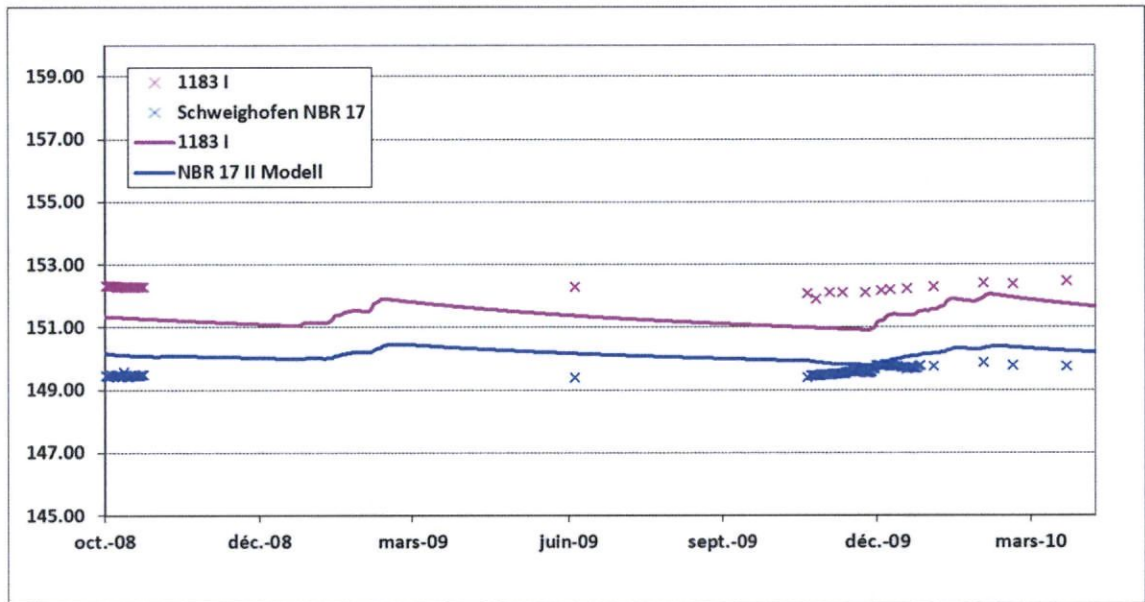


Abbildung 30: Piezometerhöhen in Schweighofen, GWL I und II

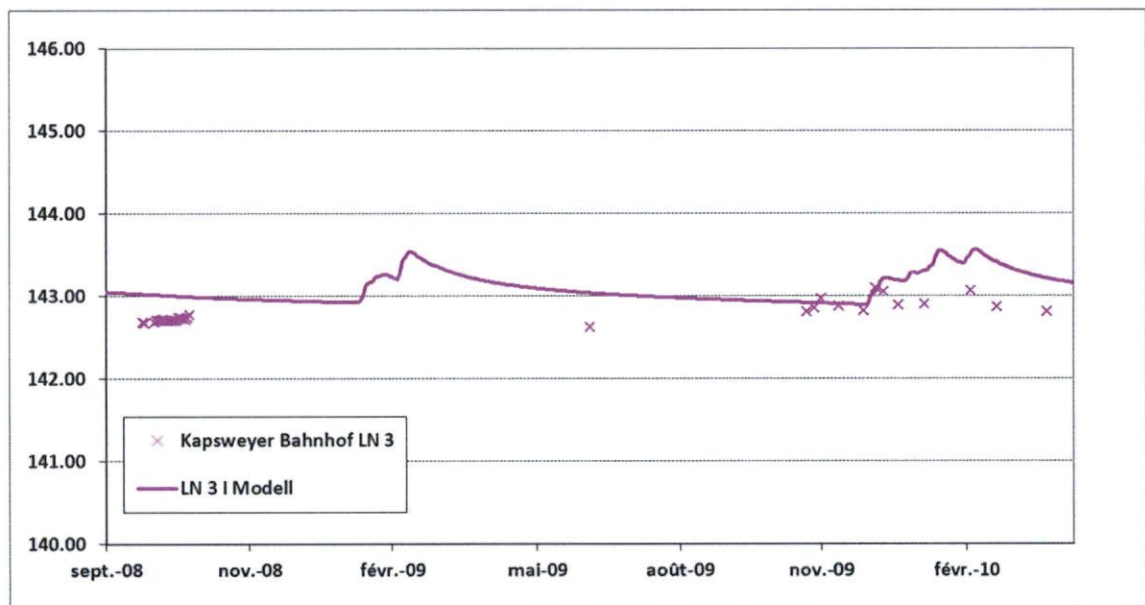


Abbildung 31: Piezometerhöhen in Kapsweyer Bahnhof, GWL I

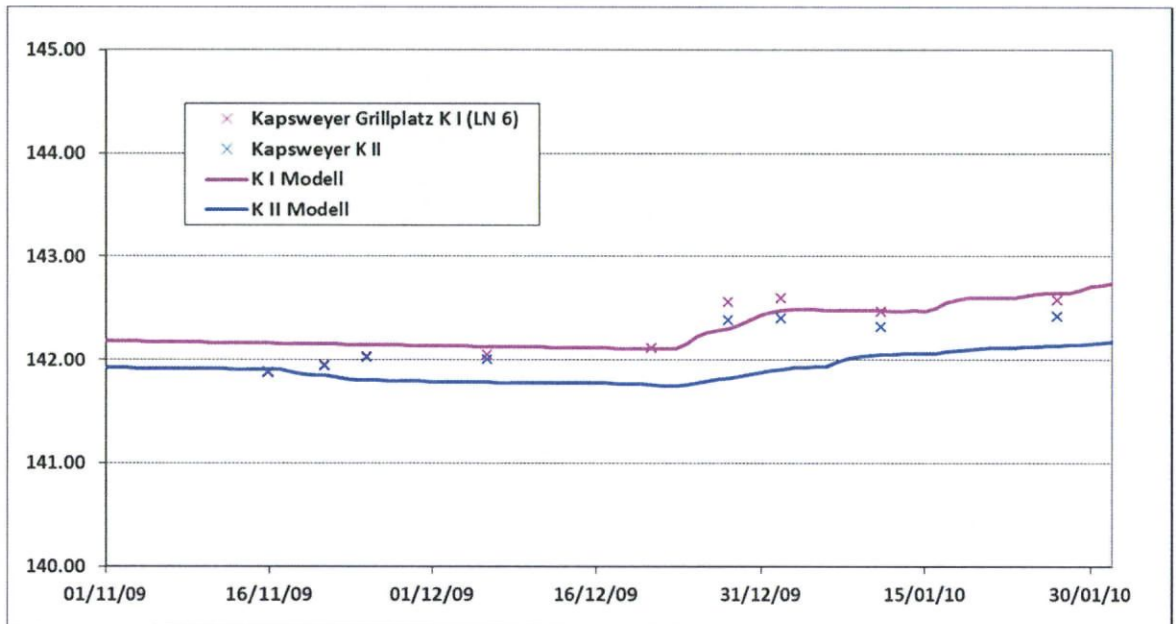


Abbildung 32: Piezometerhöhen in Kapsweyer Grillplatz, GWL I und II

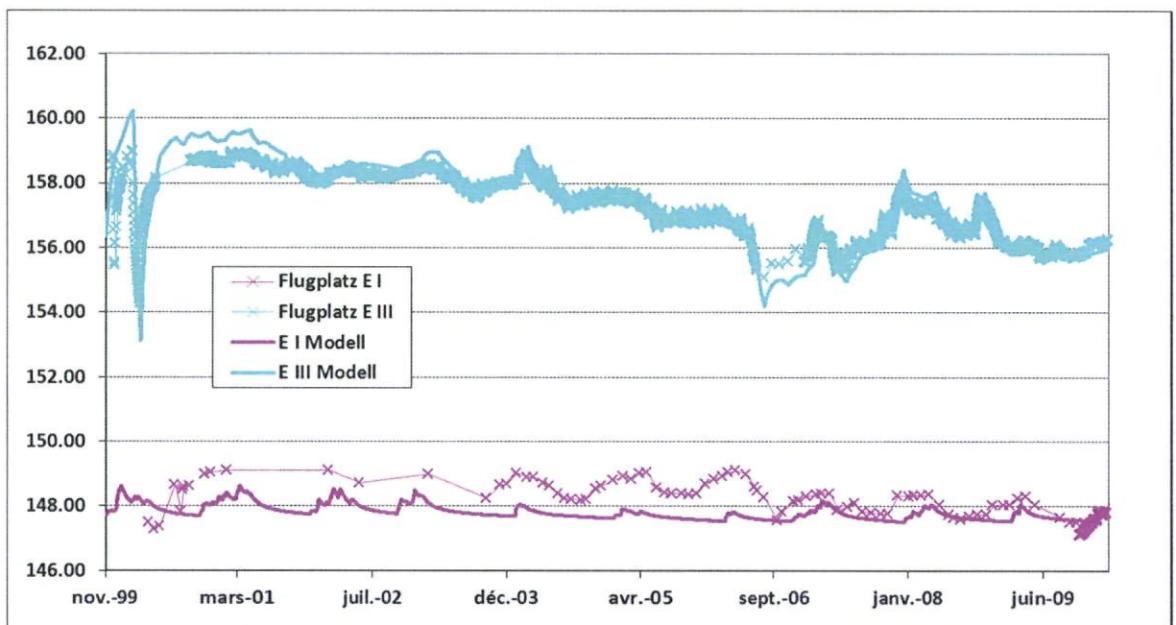


Abbildung 33: Piezometerhöhen am Flugplatz, GWL I und III (Übertreten der Lauter im GWL I)

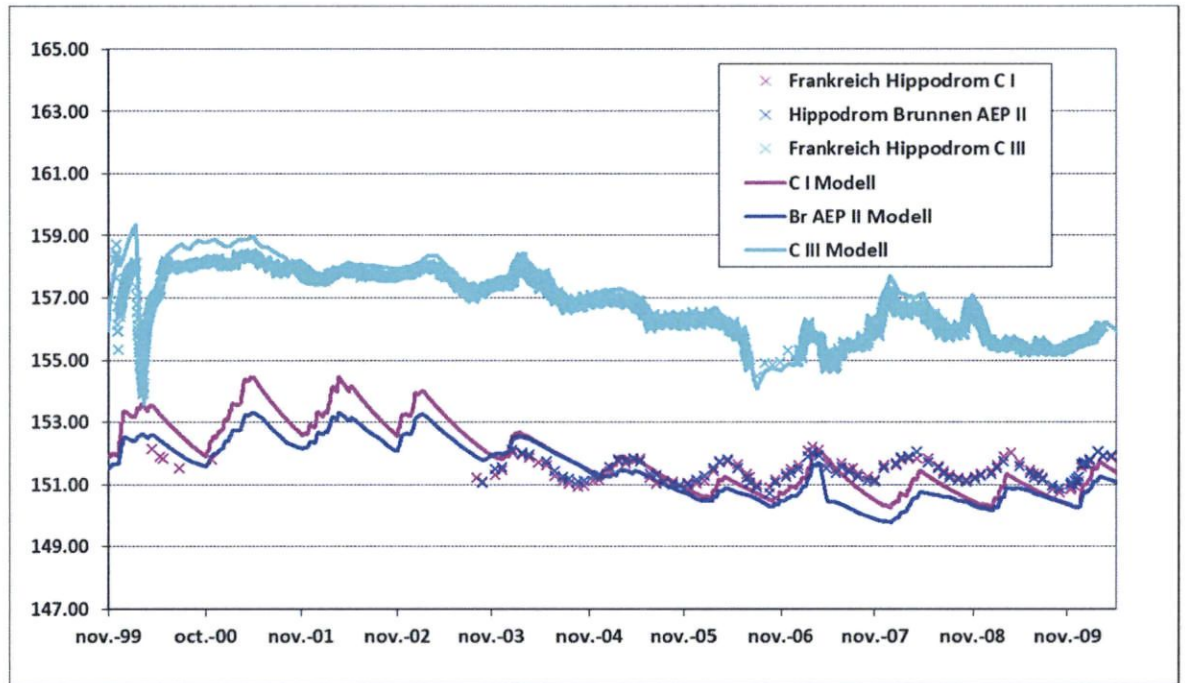


Abbildung 34: Piezometerhöhen beim Hippodrom, GWL I, II und III

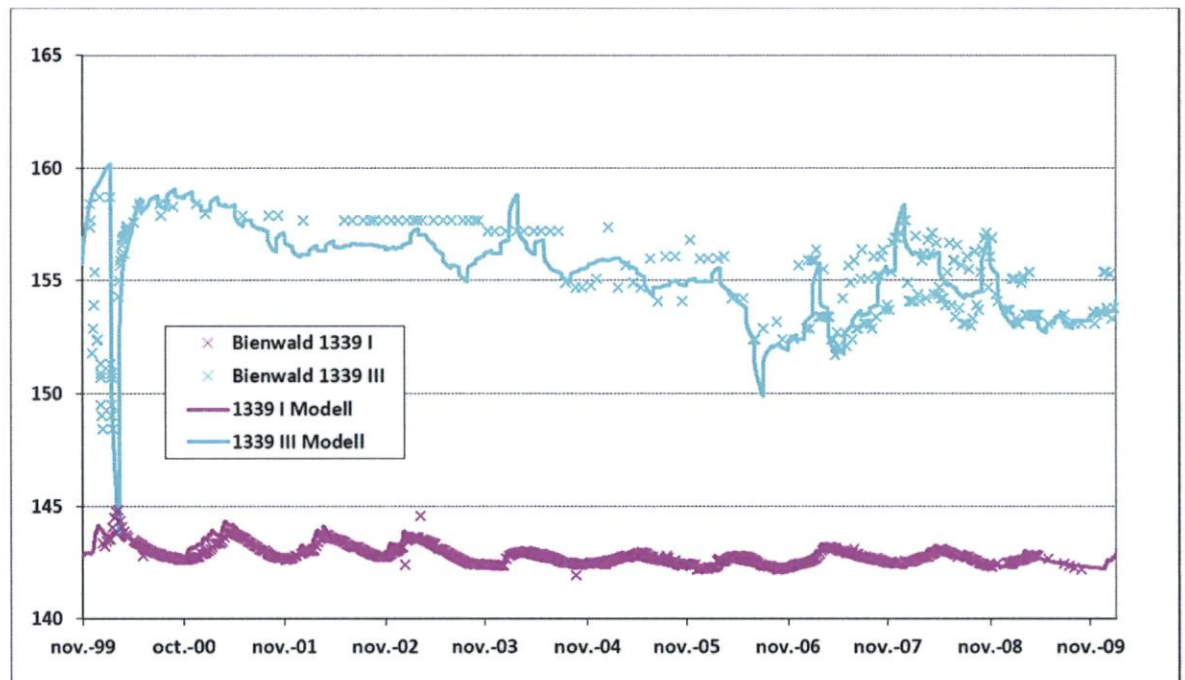


Abbildung 35: Piezometerhöhen im Bienwald 1339, GWL I und III

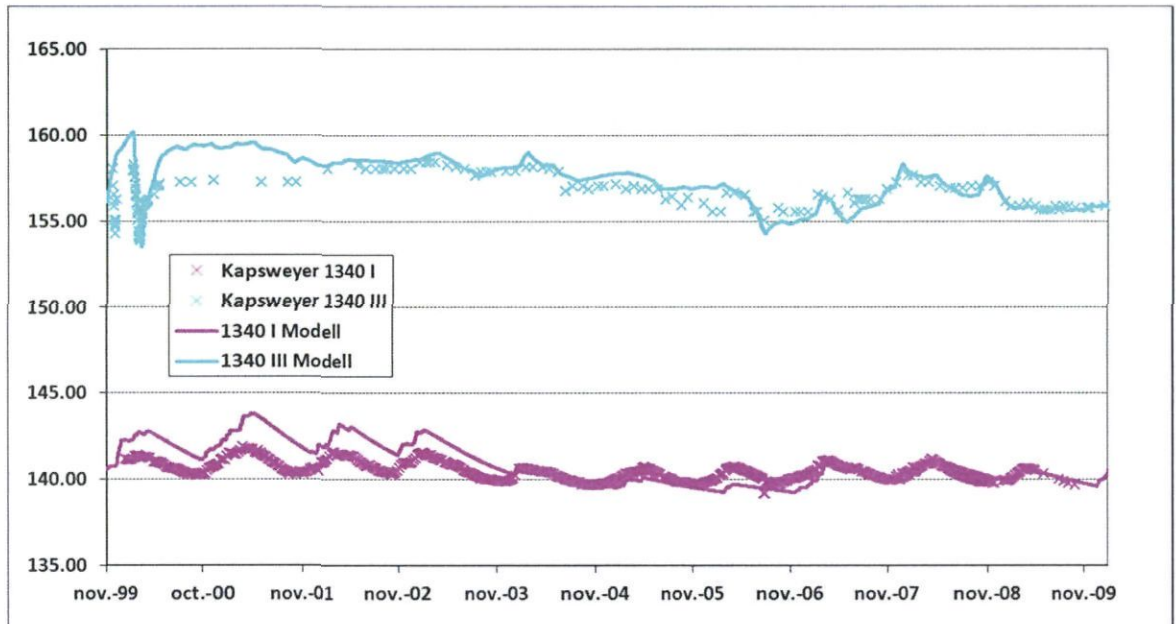


Abbildung 36: Piezometerhöhen im Bienwald 1339 GWL I und III

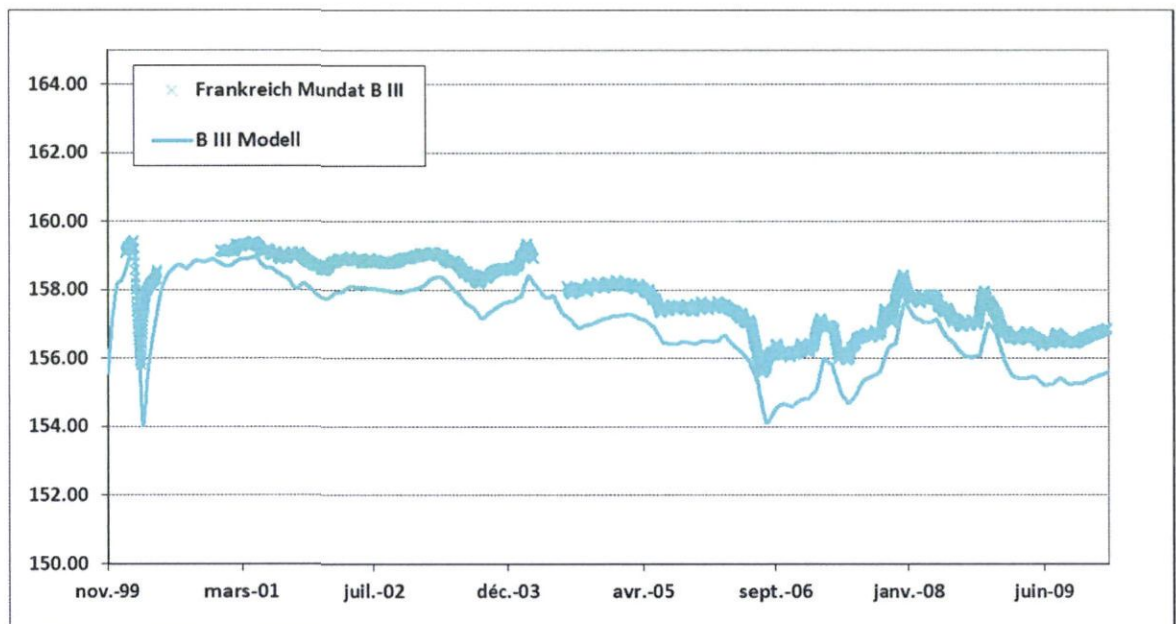


Abbildung 37: Piezometerhöhen in Mundat, GWL III

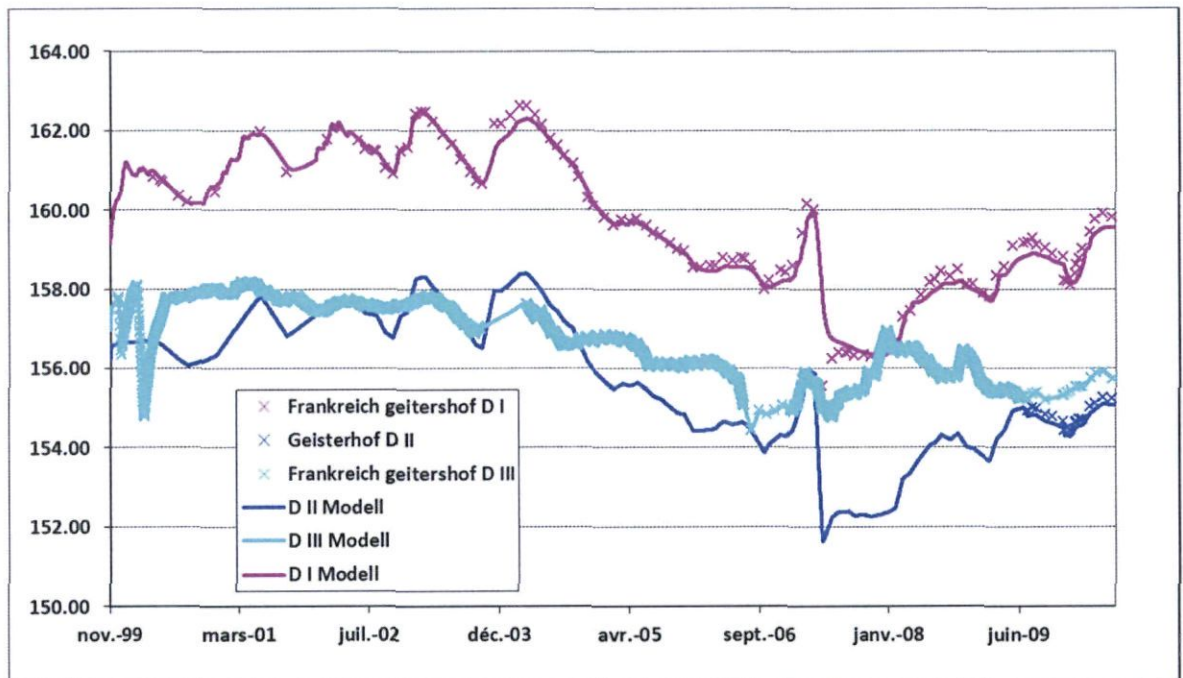


Abbildung 38: Piezometerhöhen in Geitershof, GWL I, II und III (April 2007: Entnahme zur Bewässerung)

b) Piezometerhöhen am 2. Juli 2009

Am 2. Juli 2009 wurden bei jedem Grundwasserleiter die Piezometerhöhen abgelesen. Anhand dieser Werte konnten die entsprechenden Grundwassergleichen, aus denen sich die Strömungsrichtungen und –gefälle ergeben, angezeigt werden. Der Vergleich zwischen den Ganglinien der gemessenen Piezometerhöhen und denjenigen der simulierten Piezometerhöhen ist in den Abbildungen 38 bis 40 dargestellt.

Beim oberen und mittleren Grundwasserleiter, bei denen die Strömungsgradienten höher sind, sind sie alle 5 m und beim unteren Grundwasserleiter alle 1 m dargestellt. Außerdem veranschaulicht der Graph der Abbildung 42 die Güte der Modellanpassung bei den Bezugsmessstellen durch Vergleich der berechneten mit den beobachteten Piezometerhöhen bei jedem GWL. Die Punkte müssen auf einer durch den mittleren Punkt der Koordinaten (Durchschnitt (X); Durchschnitt (Y)) führenden Geraden angeordnet sein mit einem Leitkoeffizienten nahe 1. Mit dem linearen Korrelationskoeffizienten kann die Anpassungsgüte quantifiziert werden, je näher er bei 1 liegt, desto besser ist die Anpassung.

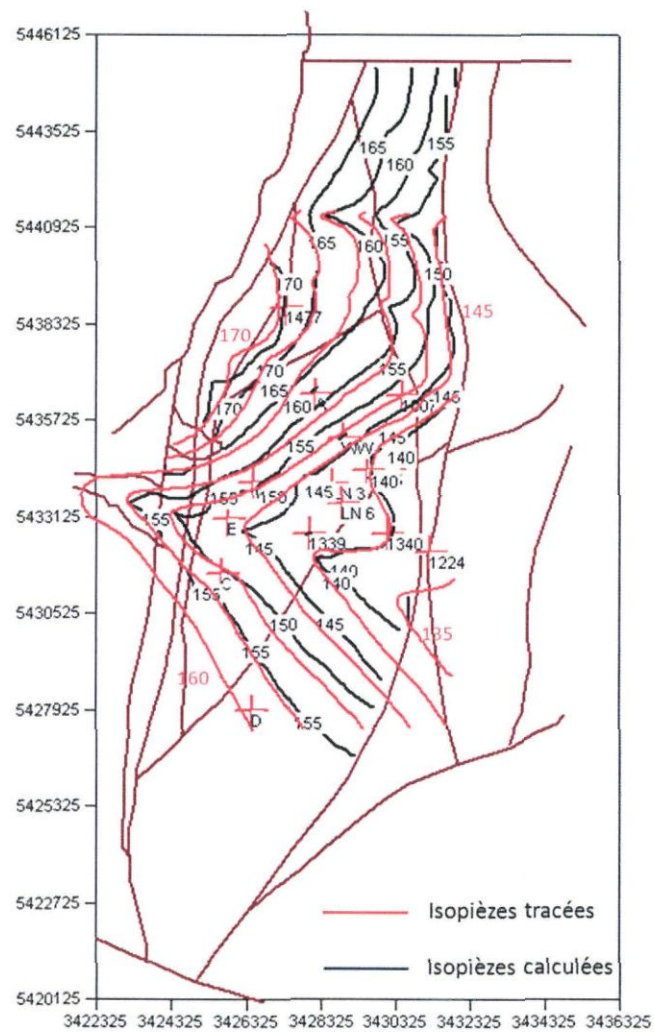


Abbildung 39: Karten der "beobachteten" und simulierten Grundwassergleichen des oberen GWL

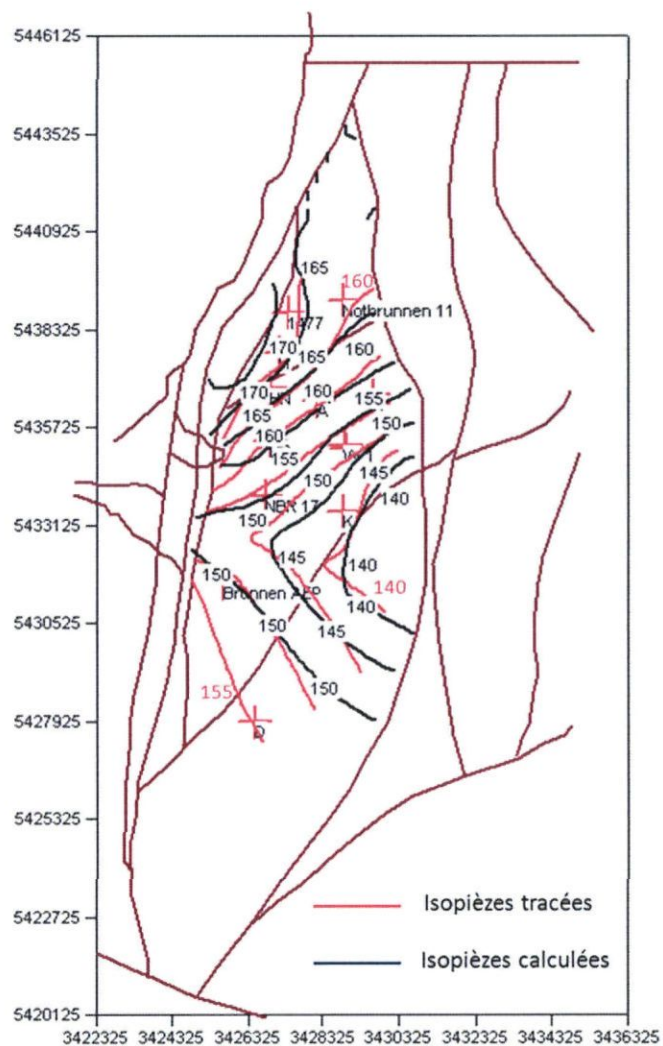


Abbildung 40: Karten der "beobachteten" und simulierten Grundwassergleichen des mittleren GWL

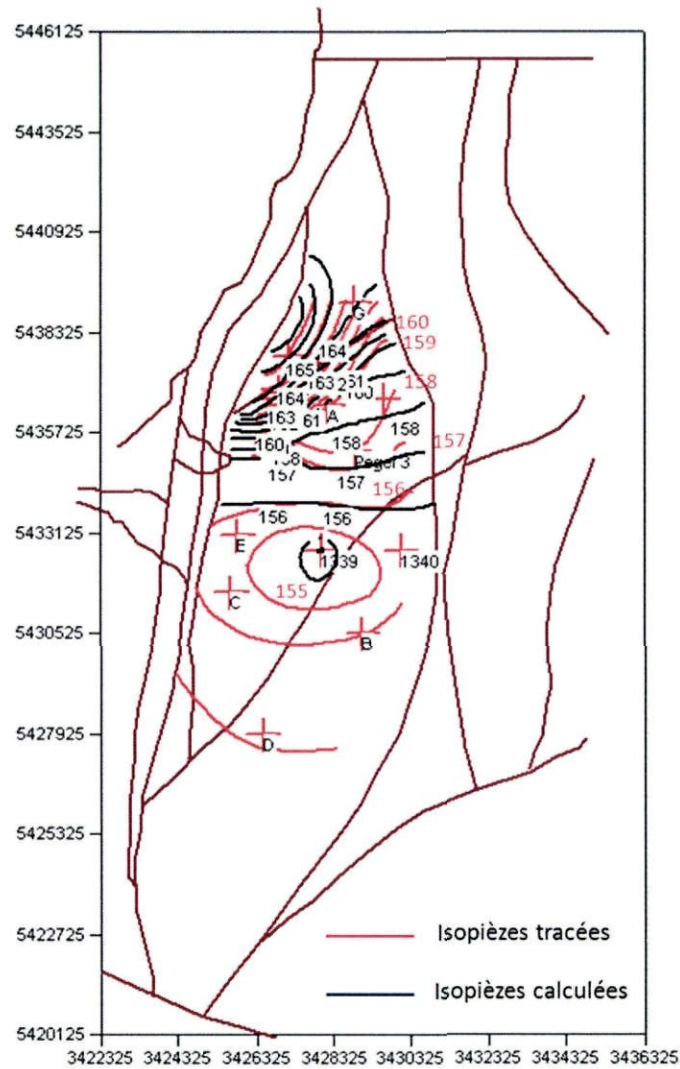


Abbildung 41: Karten der "beobachteten" und simulierten Grundwassergleichen des unteren GWL

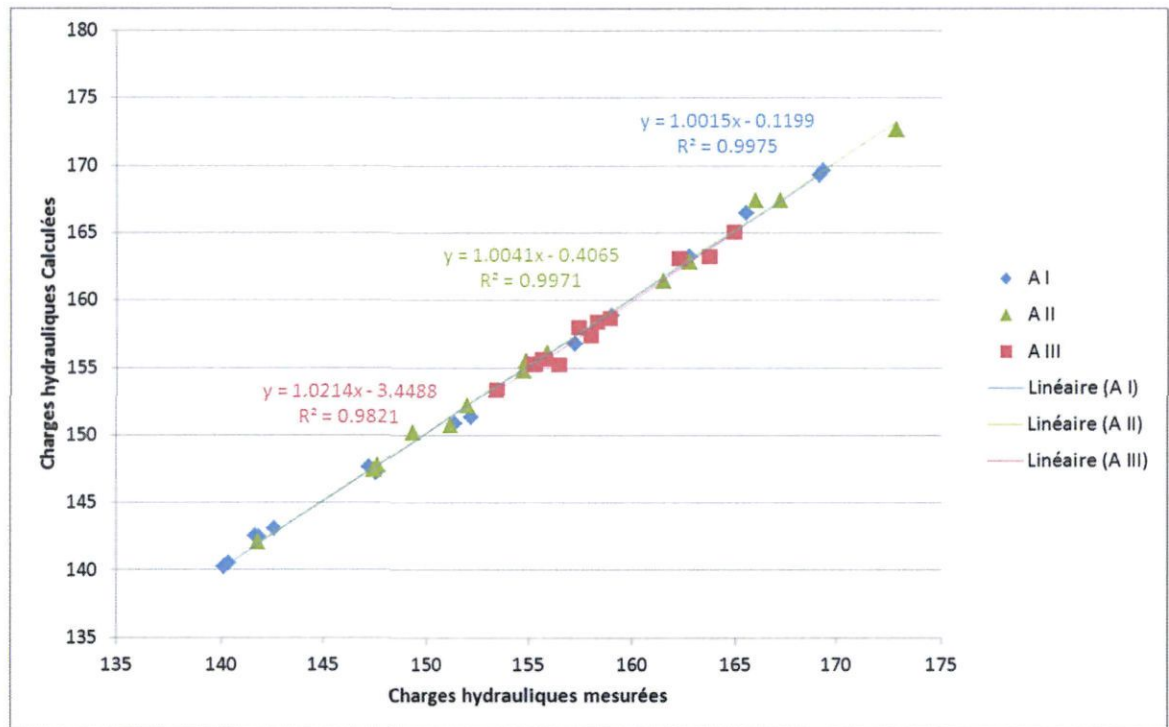


Abbildung 42: Grafische Darstellung der in Abhängigkeit der gemessenen Piezometerhöhen berechneten Piezometerhöhen (Bezugsmessung vom 2 Juli 2009)

c) Karte der Piezometerhöhenunterschiede zwischen den Aquiferen und der artesischen Schicht des unteren GWL

Zur Ermittlung der Überdruck- bzw. Unterdruckbereiche der relativen Grundwasserstände in den jeweiligen Aquiferen wurden am 2. Juli 2009 Karten der Piezometerhöhenunterschiede zwischen den Aquiferen II und I sowie III und II berechnet (cf. Abbildung 42) berechnet. Aus diesen Karten geht hervor, dass der mittlere GWL im Vergleich zum oberen GWL in drei Bereichen des Modells (Nordwesten, Süden und Osten) größtenteils unter Unterdruck steht. In diesen Bereichen ist ein vertikaler Abstrom vom GWL I in den GWL II möglich. Abgesehen von einem nordwestlichen Streifen, in dem Unterdruck herrscht, steht das Grundwasser im tiefen GWL im Verhältnis zum mittleren GWL vorwiegend unter Überdruck. Dieser Modellrand bildet das einzige potentielle Wiederergänzungsgebiet des Aquifers II. Die Abbildung 43 zeigt die artesischen Zonen des unteren GWL im Sommer 2009. Sie sind im Wesentlichen im zentralen Bereich angesiedelt.

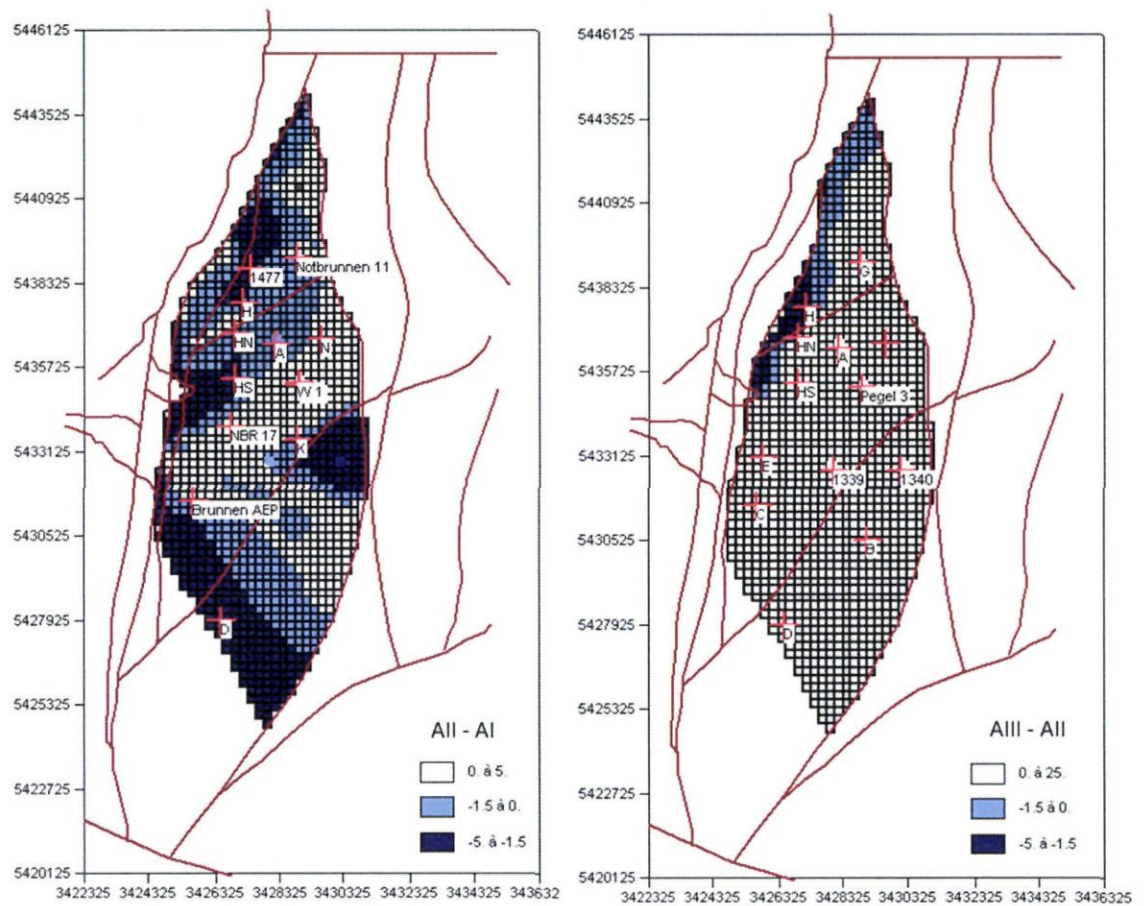


Abbildung 43: Piezometerhöhenunterschiede (m) zwischen GWL II/I und III/II

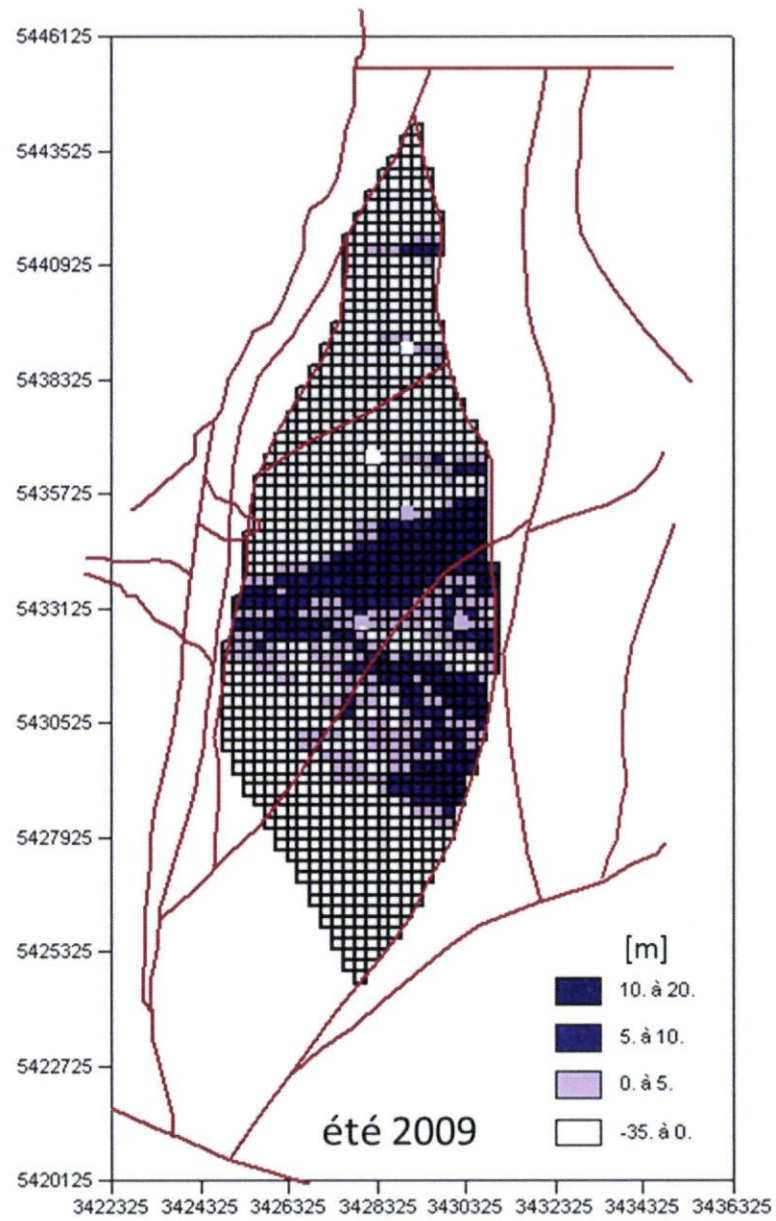


Abbildung 44: Artesische Zone des unteren GWM (violett: artesisch)

2.4. WASSERBILANZEN

Die Wasservolumenbilanzen der jeweiligen GWL mit monatlicher Auflösung wurden für die Zeit von November 1999 bis Mai 2010 (cf. Abbildung 45 bis 48) berechnet. Daraus können die Zeiträume mit Wasserüberschuss (Speicherfüllung) bzw. Wasserdefizit (Speicherentleerung) abgelesen werden. Die Komponenten der Bilanz sind folgende:

- Zuflüsse bzw. Abflüsse über die seitlichen Grenzen (Festpotential) des Modells,
- Austauschvorgänge mit der unteren und/oder oberen Aquiferschicht (Abfluss durch Leakage nach oben oder nach unten),
- Infiltration in den oberen GWL (Grundwasserneubildung aus Niederschlag),
- Über die Ufer tretende Oberflächengewässer (Flüsse)
- Entnahmen aus dem mittleren und unteren GWL
- Gespeicherte Volumen (positive Bilanz) bzw. entleerte Volumen (negative Bilanz)

Die Analyse der berechneten Wasserbilanzen zeigt eine Periode mit einer hohen Wiedergänzungsrate durch winterliches Sickerwasser in vier aufeinanderfolgenden Wintern von 1999 bis 2002. Die höchste Niederschlagsrate mit einer Infiltration von 43 mm^3 durch drei starke Regenfälle jeweils im November 2000, Januar und März 2001 wurde im Winter 2000/2001 erreicht. Der vorhergehende Winter war auch von starken Niederschlägen geprägt, mit 34 mm^3 Infiltration, wovon allein die Hälfte im Dezember 1999 gefallen ist. In den beiden folgenden Wintern (2001/2002 und 2002/2003) fielen zwischen 29 und 23 mm^3 effektiver Niederschlag. In den drei darauf folgenden Wintern (2003 à 2005) ist nur wenig effektiver Niederschlag gefallen (weniger als 5 mm^3 Sickerwasser). Die Winter 2006/2007 und 2007/2008 sind dann wieder regenreicher, jedoch ohne die vorgehenden Infiltrationsraten zu erreichen (zwischen 17 und 18 mm^3). In den Wintern 2008/2009 und 2009/2010 ist die Sickerwasserbildung dann wieder geringer (zwischen 8 und 10 mm^3). Folglich wird zwischen einer Periode mit Niederschlagsüberschuss von 1999 bis 2002 und hoher Speicherrate im oberen sowie auch unteren GWL, gefolgt von einer Trockenperiode (2003 bis 2005), und einer Periode mit mittlerer Wiedergängung von 2006 bis 2010 unterschieden.

Die Speicherfüllung (positive Bilanz) bzw. Speicherentleerung (negative Bilanz) sowie die entnommenen Volumen weisen beim unteren GWL einen ähnlichen, bei dem mittleren GWL jedoch einen unterschiedlichen zeitlichen Verlauf auf. Bei letzterem sind die Entnahmen wesentlich geringer als bei dem unteren GWL und die Infiltrationsraten gleichzeitig höher. Bei dem mittleren GWL erfolgen die Speicherentleerungen im Sommer, wenn kein Grundwasser bildender Niederschlag mehr fällt. April 2007 zeigte eine höhere Entleerungsrate, auch im oberen GWL aufgrund einer Bewässerung in dieser Zeit (vom 03.04.07 bis 03.05.07).

Der untere GWL weist im Februar 2000 im Anschluss an den Pumpversuch bei der Messstelle "Bienwald 1339" eine höhere Entleerungsrate auf. Die Zeiträume mit hohen

Entleerungsraten stimmen mit hohen Entnahmeraten in diesem GWL überein. Bemerkenswert ist auch, dass die Festpotentialgrenze (südliche Grenze) des unteren GWL hauptsächlich einen Abfluss nach außen mit sich bringt. Diese Situation kann sich vorübergehend umkehren.

Das Festpotential entlang der Grenze entspricht der Piezometerhöhe der südlichsten Messstelle (Messstelle "D") des unteren GWL. Unter natürlichen Umständen fließt das Grundwasser von Norden (Wiederergänzungszone) nach Süden-Südwesten im Untersuchungsbereich und über die Südgrenze ab. Bei hohen Entnahmen im unteren GWL (cf. Abschnitt 2.3, Tabelle 1 Pumpversuche) kommt es zu einer Absenkung des gesamten Grundwasserleiters und zwar bis zur südlichen Grenze, wo sich die Messstelle "D" befindet (cf. Abbildung 41: Karten der "beobachteten" und simulierten Grundwassergleichen des unteren GWL). Folglich nimmt der Abfluss in Richtung Süden ab und kann sich den piezometrischen Messungen zufolge vorübergehend umkehren, mit Zuströmen entlang der südlichen Grenze. Die Berechnungen des Modells zeigen, dass dieser Zufluss mit weniger als 6 % bei den maximalen Zuflüssen im Verhältnis zu denjenigen an der nördlichen Grenze nur einen geringen Beitrag leistet (außer während der 3 Pumpversuche mit Fördermengen von mehr als 70 m³/h gegen 34 m³/h im Durchschnitt).

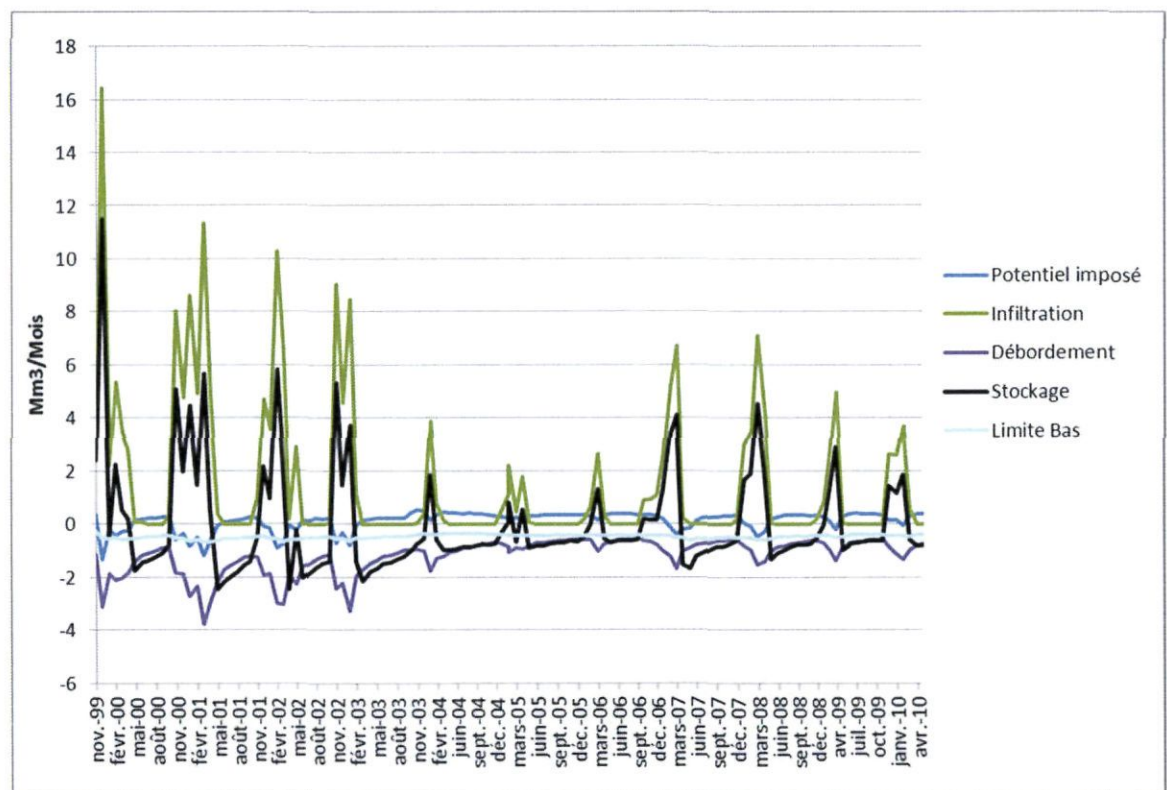


Abbildung 45: Monatsbilanzen beim oberen GWL (A I)

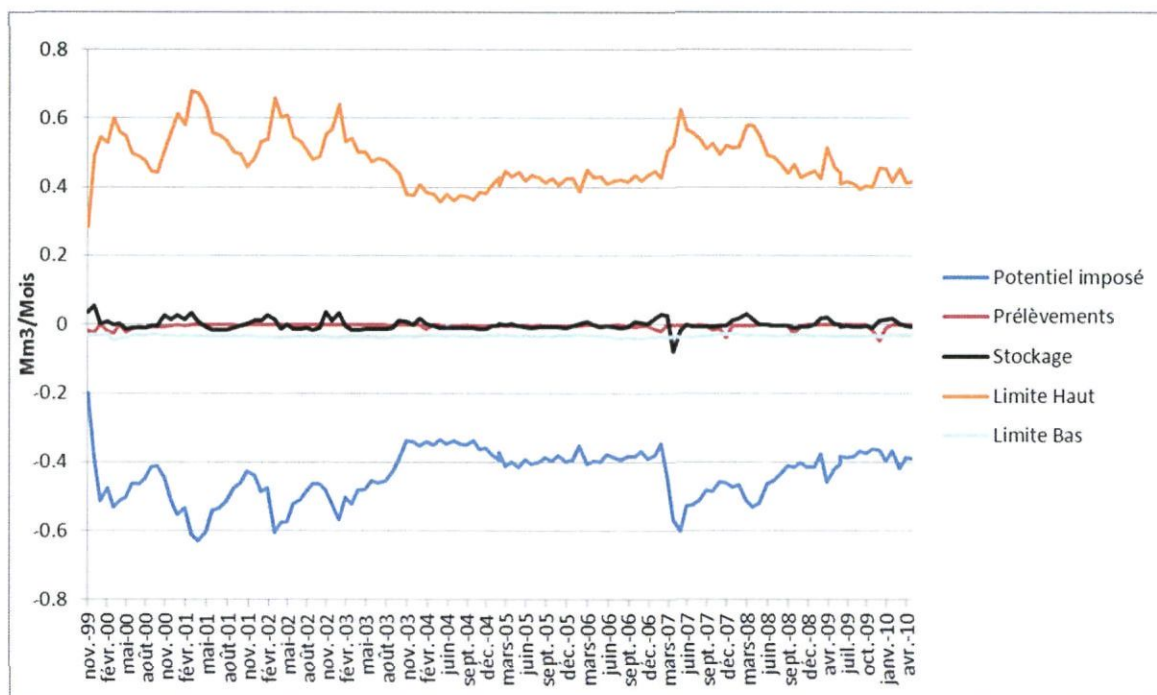


Abbildung 46: Monatsbilanz beim mittleren GWL (A II)

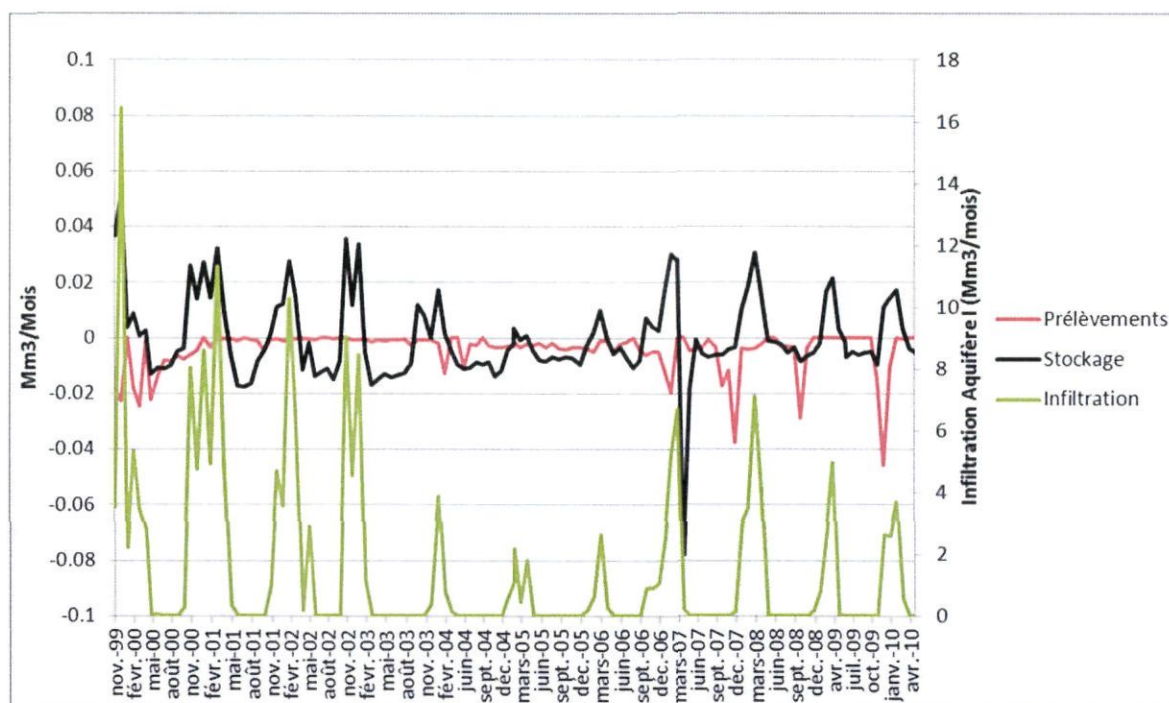


Abbildung 47: Monatliche Entnahmen und Speicherung beim mittleren GWL (A II) unter Angabe der Infiltration auf der Nebenachse

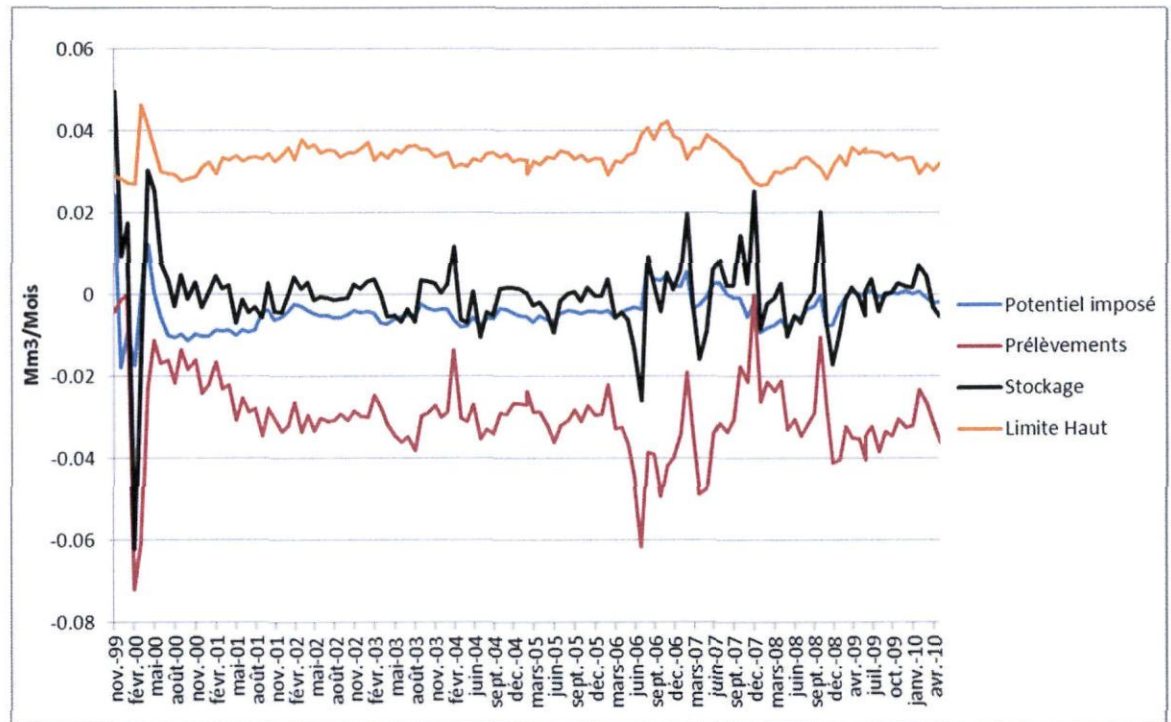


Abbildung 48: Monatsbilanzen beim unteren GWL (A III)

3. Szenarien der Grundwasserbewirtschaftung

Die länderübergreifende Arbeitsgruppe (LAG) hat drei Prognoseszenarien vorgeschlagen, mit denen der Einfluss der Entnahmen in den beiden vom Wasserwerk bewirtschafteten Aquiferen ermittelt werden soll (cf. Abbildung 49). Diese Modellrechnungen sind erforderlich, um diese Ressource besser bewirtschaften zu können, da die vorausgehende Studie (2005-2007) gezeigt hat, dass mit dem unteren GWL bei einer starken Zunahme der derzeitigen Entnahmemengen nur eine beschränkte Ressource zur Verfügung stehen würde.

Zur Lösung des Problems hat die länderübergreifende Arbeitsgruppe beschlossen, den Kenntnisstand über den mittleren Grundwasserleiter und dessen Beziehungen zum oberen und unteren Grundwasserleiter zu verbessern.

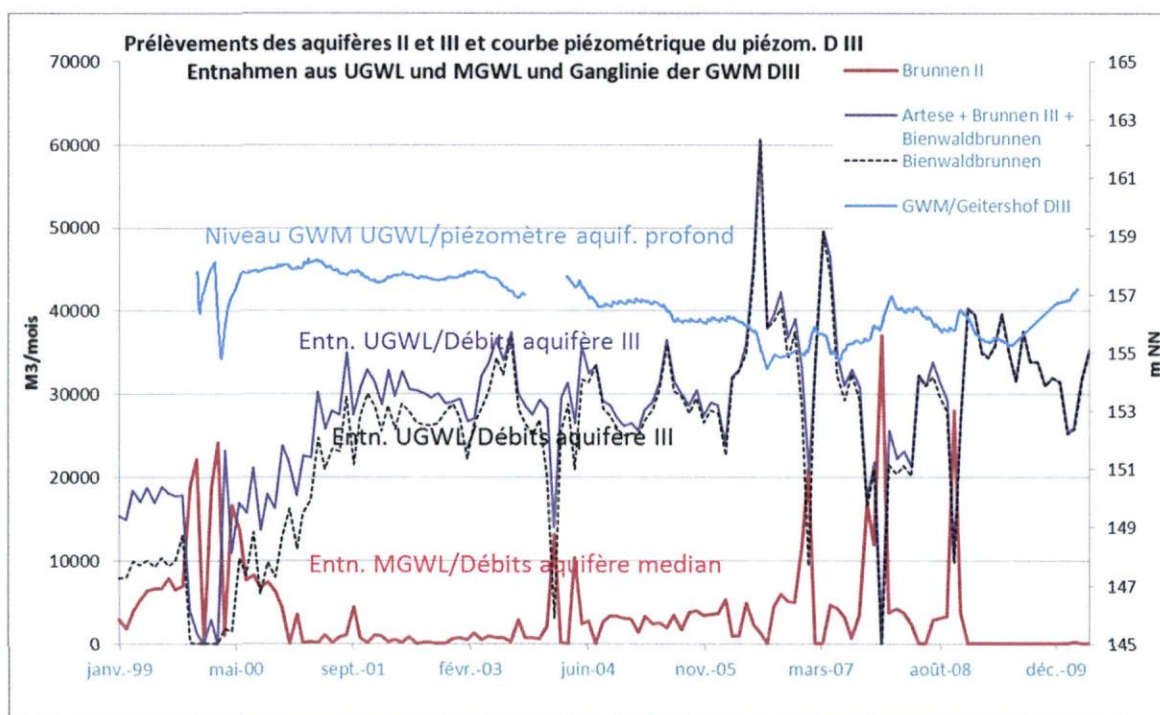


Abbildung 49: Trinkwasserentnahmen im mittleren (II) und unteren (III) FWL und Ganglinie der Messstelle D (GWL III)

DIE DREI SZENARIEN

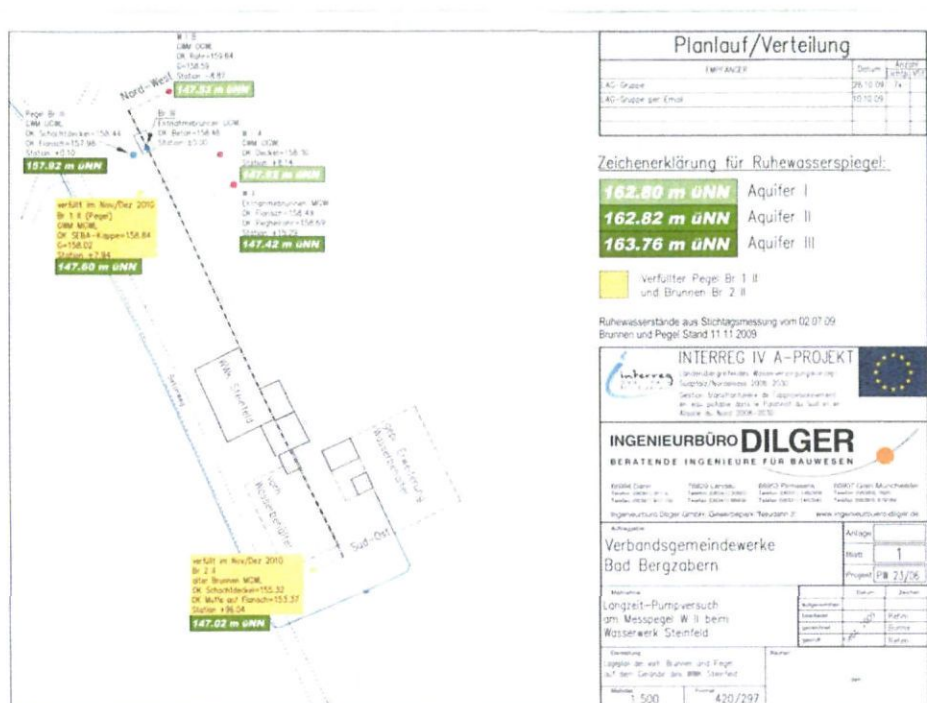


Abbildung 50: Plan de positionnement des puits et piézomètres à Steinfeld

Szenario I

Mit diesem Szenario kann eine Veränderung der Nutzungsart der Grundwasserspeicher simuliert werden, um nur den mittleren Grundwasserleiter ("MGWL" oder GWL II) zu bewirtschaften. Im Vergleich zur derzeitigen Bewirtschaftungsart besteht das Szenario I demnach darin, die Entnahmen vom unteren GWL (GWL III) auf den mittleren GWL zu verlegen, ohne dabei das Gesamtausmaß der durchschnittlichen Entnahmen zu verändern.

Die Eingangsdaten entsprechen folglich einer Unterbrechung der Entnahmen im unteren GWL und einer fiktiven Dauerentnahme von 300 000 m³/Jahr (=34 m³/h) im mittleren GWL, an dem neuen, vorübergehend angelegten Förderbrunnen WII, vorausgesetzt das Grundwasservorkommen deckt den Bedarf.

Bis jetzt wurde der mittlere GWL nur zeitweise, zusätzlich zum unteren GWL, genutzt mit Fördermengen zwischen 0 und 40 000 m³/Monat (=0 à 55 m³/h). cf. Abbildung 49).

Szenario II

Mit Szenario II werden die Auswirkungen eines hohen Wasserbedarfs wie er bei Trinkwasserverbrauchsspitzen derzeit besteht, getestet. Simuliert wird eine gemeinsame Nutzung des mittleren und tiefen GWL. Bei beiden Grundwasserleitern beträgt die Fördermenge jeweils 300 000 m³/Jahr (34.25 m³/h), was einer Förderleistung von 600 000 m³/Jahr entspricht.

Bis jetzt wurde der in erster Linie beanspruchte tiefliegende GWL mit Fördermengen zwischen 20 000 und 40 000 m³/Monat (27 bis 55 m³/h, cf. Abbildung 49) bewirtschaftet. In dem Jahr vor Beginn des Szenarios (2009/2010) wurden durchschnittlich circa 31000 m³/Monat (43 m³/h) entnommen.

Szenario III

Zweck von Szenario III ist es, die Auswirkungen einer lang anhaltenden Trockenperiode (reduzierte Grundwasserneubildung) zu simulieren, um die Folgen des Klimawechsels in Verbindung mit der bei Szenario II beschriebenen intensiven Bewirtschaftung der beiden Grundwasserleiter abschätzen zu können.

Die Simulation erfolgt auf der Basis einer zwischen 2003 und 2006 beobachteten Trockenperiode, in der 80 % des durchschnittlichen Jahresniederschlags und 76 % des durchschnittlichen, Grundwasser bildenden Niederschlags gefallen sind.

Anmerkung: das Festpotential entlang der Südwestgrenze beeinflusst den Abfluss bzw. den Zufluss zum Untersuchungsgebiet im unteren Grundwasserleiter. Bei den Szenarien II und III wurde ein Festpotential von 155.75 m definiert, die der an der Messstelle "Geitershof DIII" beobachteten Piezometerhöhe entspricht, bei einer Entnahmemenge von 34 m³/h im unteren GWL (=300000 m³/an), die derjenigen der Szenarien II und III entspricht. Als Sensitivitätsstudie wurde bei dem beobachteten Mindestgrundwasserstand von 154.82 m NN eine noch pessimistischere Berechnung zur Ermittlung des Einflusses des Festpotentials auf die simulierten Piezometerhöhen und die Wasserbilanz durchgeführt.

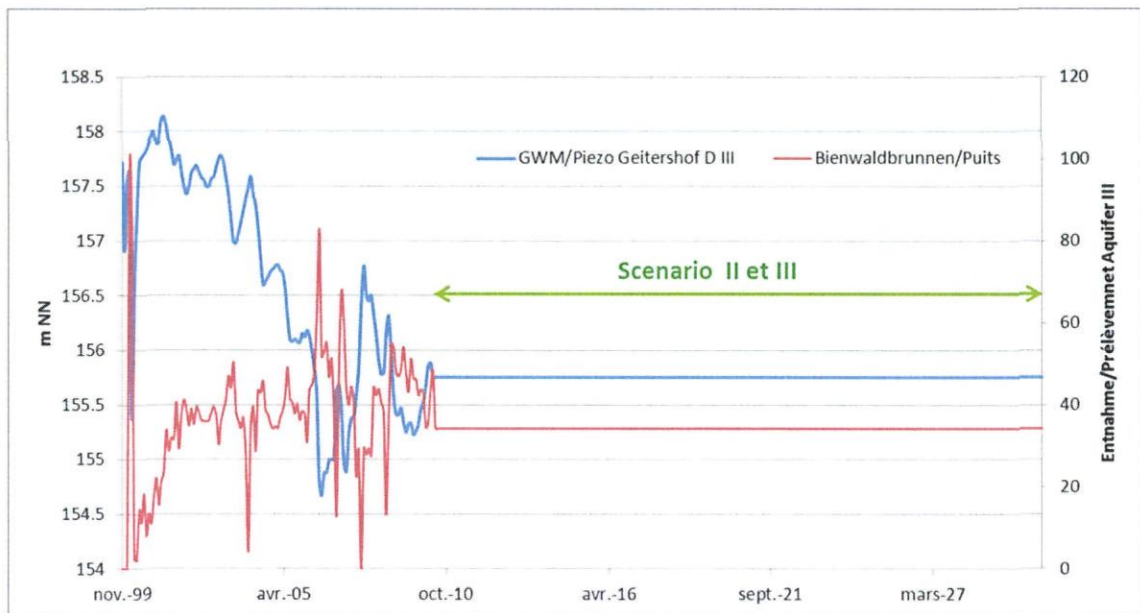


Abbildung 51: Entnahmen aus dem Brunnen Bienwald (rote Kurve, m³/h) und Festpotential bei den Szenarien II und III (blaue Kurve)

3.1. NIEDERSCHLAG UND EVAPOTRANSPIRATION ANGEWENDET AUF DIE SZENARIEN

Die Abbildung 52 zeigt die monatlichen Durchschnittswerte der Niederschläge und der Evapotranspiration in den letzten 10 Jahren (1999 à 2009). Diese Werte wurden den Szenarien I und II zugrunde gelegt. Die Berechnung der Infiltration bei dem hydrodynamischen Modell basiert auf einer hydroklimatischen Bilanzierung (cf. Abschnitt 2.3).

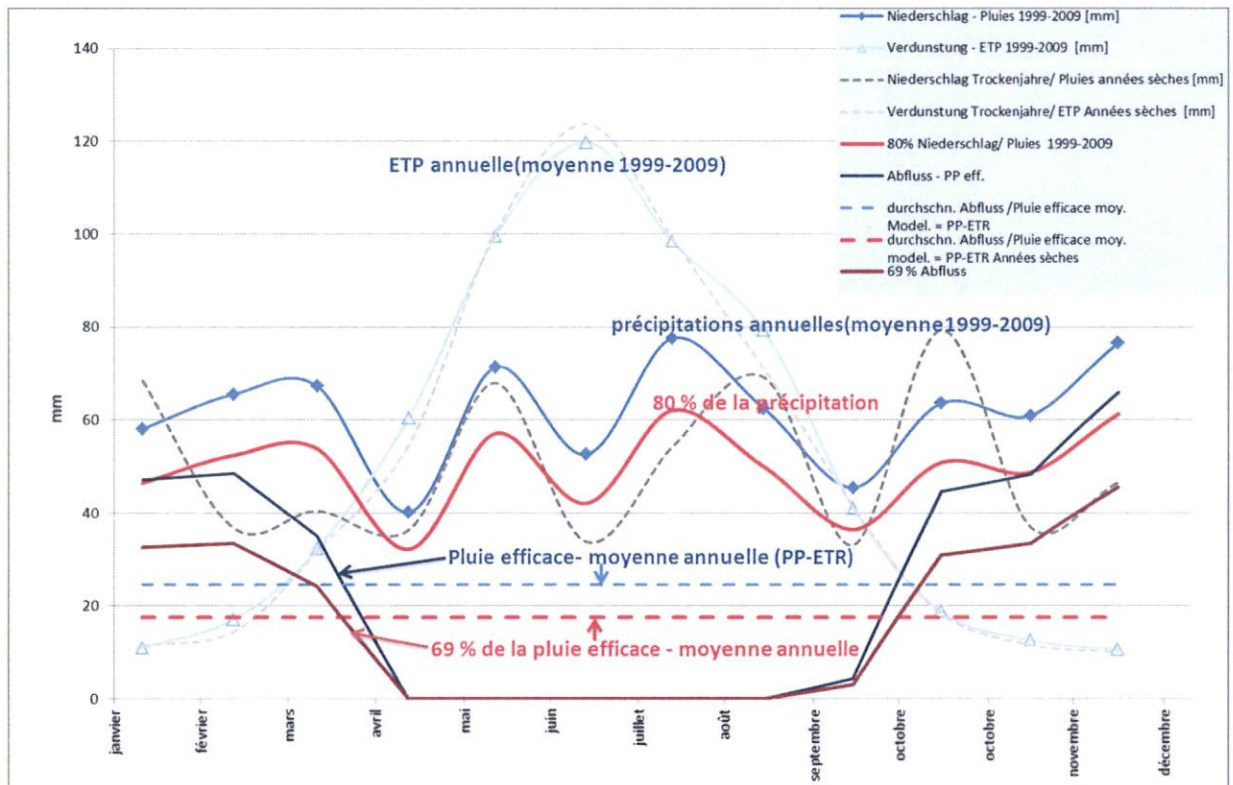


Abbildung 52 : Monatliche Durchschnittswerte der Niederschläge und der Evapotranspiration sowie des vom Modell simulierten Abflusses

Szenario III simuliert einen um 20 % reduzierten Niederschlag. Die drei Jahre 2003 bis 2006 gelten im Untersuchungsgebiet als Trockenperiode, mit geringen winterlichen Niederschlägen. Trotz einiger Monate mit starken Niederschlägen (Januar und Oktober) liegen die Abflussraten 31 % unter dem Durchschnitt.

Um die starken punktuellen Niederschläge während der Trockenperiode nicht überzubewerten, wurden 80 % des durchschnittlichen Niederschlags angewandt. Die Abflussraten erreichen dann 69 % des Durchschnitts. Diese Werte werden zur Anwendung bei Szenario III als repräsentativer angesehen (cf. Abbildung 52).

Die Abbildung 53 veranschaulicht die Ergebnisse der hydroklimatischen Bilanzierung bei den durchschnittlichen Niederschlägen und den Regenfällen während einer Trockenperiode (2003 bis 2006), was einem Durchschnittsniederschlag von 80 % entspricht. Die durchschnittliche Zusickerung zum Grundwasser nimmt stark ab, sie sinkt von 126 mm/Jahr auf 34 mm/Jahr ab (mit einer maximalen Grundwasserneubildung von 11 mm im April). Der Rückgang der Niederschläge um 20 % zieht eine noch viel stärker verringerte Zusickerung zum Grundwasser von $(126 - 34) / 126 = 73\%$ nach sich.

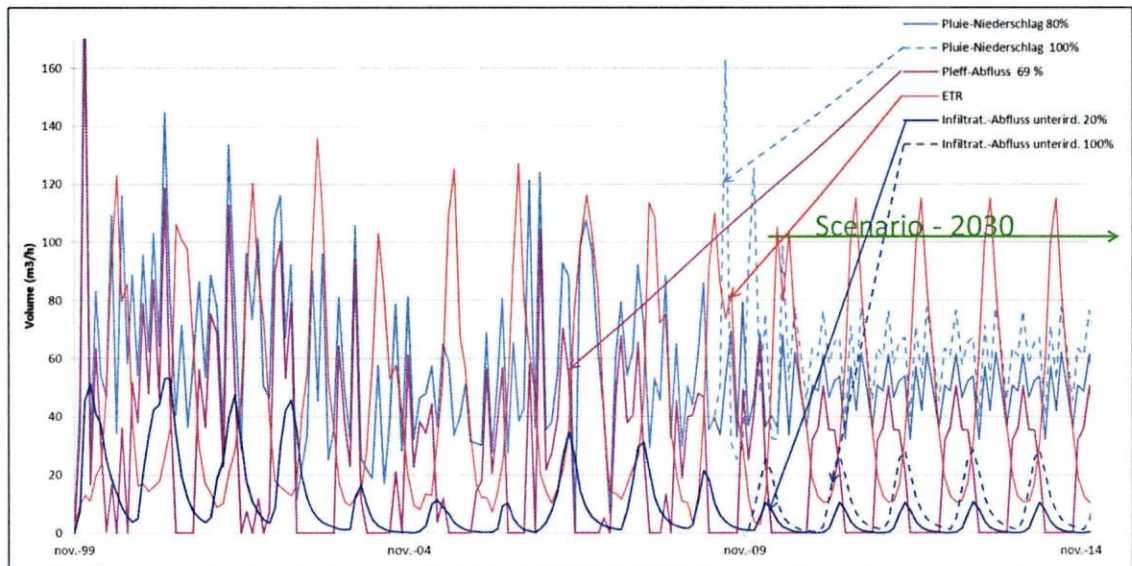


Abbildung 53: Hydroklimatische Bilanz, gemessen (1999-2009) und simuliert (2009-2030)

3.2. ERGEBNISSE DER DREI SZENARIEN

3.2.1. Schema der globalen Bilanz

Die globale Bilanz bei dem gesamten Untersuchungsgebiet mit dem Beispiel von Dezember 2030 (Ende der Simulation von Szenario II) lässt erkennen, dass nennenswerte Austauschvorgänge zwischen den einzelnen Aquiferstockwerken stattfinden:

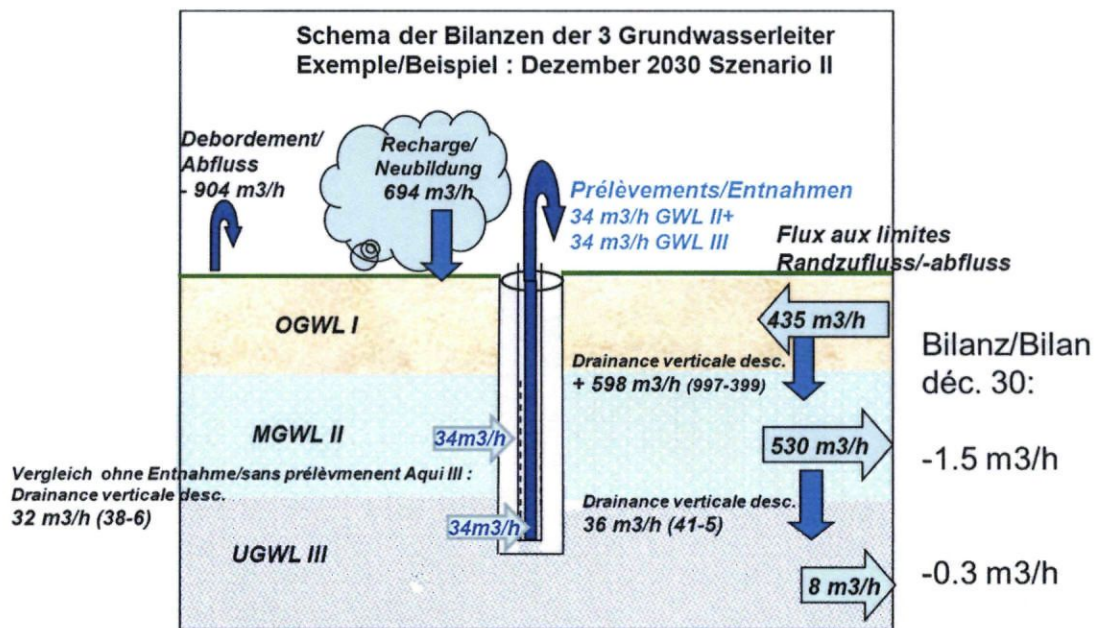


Abbildung 54: Wasserbilanz und Austauschvorgänge zwischen den einzelnen GWL. Beispiel des Monats Dezember 2030 (Szenario II)

Oberer Grundwasserleiter, OGWL I

Der seitliche Zufluss zum Untersuchungsgebiet aus Nordwesten ist durch eine Festpotentialgrenze simuliert, mit einer Fördermenge von 435 m³/h.

Die Wiederergänzung des oberen Grundwasserleiters (OGWL I) durch Infiltration beträgt im Untersuchungsgebiet 694 m³/h.

Von der Summe der beiden Zuflüsse zum oberen GWL fließen 904 m³/h wieder ab und 598 m³/h durchqueren die halbdurchlässige Schicht in Richtung MGWL. Im Dezember ist die Bilanz beim oberen Grundwasserleiter folglich negativ.

Mittlerer Grundwasserleiter, MGWL II

Dieser Grundwasserleiter ist teilweise gespannt. Angesichts dieses besonderen Umstandes ist sein Grundwasserspiegel höher als derjenige des oberen Grundwasserleiters. Die gespannten Bereiche sind durch einen Leakage-Effekt des mittleren Grundwasserleiters gekennzeichnet ($399 \text{ m}^3/\text{h}$). Die Differenz zwischen der Infiltrationsmenge vom oberen Grundwasserleiter in den mittleren Grundwasserleiter ($997 \text{ m}^3/\text{h}$) und der Drainage in Richtung unterer Grundwasserleiter beträgt demnach $598 \text{ m}^3/\text{h}$.

$530 \text{ m}^3/\text{h}$ fließen über die östliche Modellgrenze ab; $34 \text{ m}^3/\text{h}$ werden aus dem Brunnen Steinfeld (Entnahmefrucht WII) entnommen, und $36 \text{ m}^3/\text{h}$ durchqueren die untere halbdurchlässige Schicht in Richtung UGWL.

Unterer Grundwasserleiter (UGWL III)

Die Summe der unterirdischen Zu- und Abflüsse, gleich $36 \text{ m}^3/\text{h}$, entspricht der Differenz zwischen der Drainage nach unten ($41 \text{ m}^3/\text{h}$) und der Drainage nach oben ($5 \text{ m}^3/\text{h}$) in dem erfassten Bereich und insbesondere im artesischen Bereich des Bienwalds.

$8 \text{ m}^3/\text{h}$ fließen über die südwestliche, von einem Festpotential definierte Grenze aus dem Untersuchungsbereich ab. $34 \text{ m}^3/\text{h}$ werden aus dem Entnahmefrucht Bienwald (Brunnen 1339) entnommen.

Die Bilanz für Dezember 2030 ist praktisch ausgeglichen (sehr leicht negativ – $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ bei dem MGWL und $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ bei dem UGWL, diese Mengen sind jedoch ohne weitere Bedeutung, da sie einer geringfügigen Konvergenzabweichung des Modells entsprechen).

3.3. ERGEBNISSE VON SZENARIO I : PIEZOMETERHÖHEN

3.3.1. Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf die drei Grundwasserleiter in der Nähe des Entnahmebrunnens

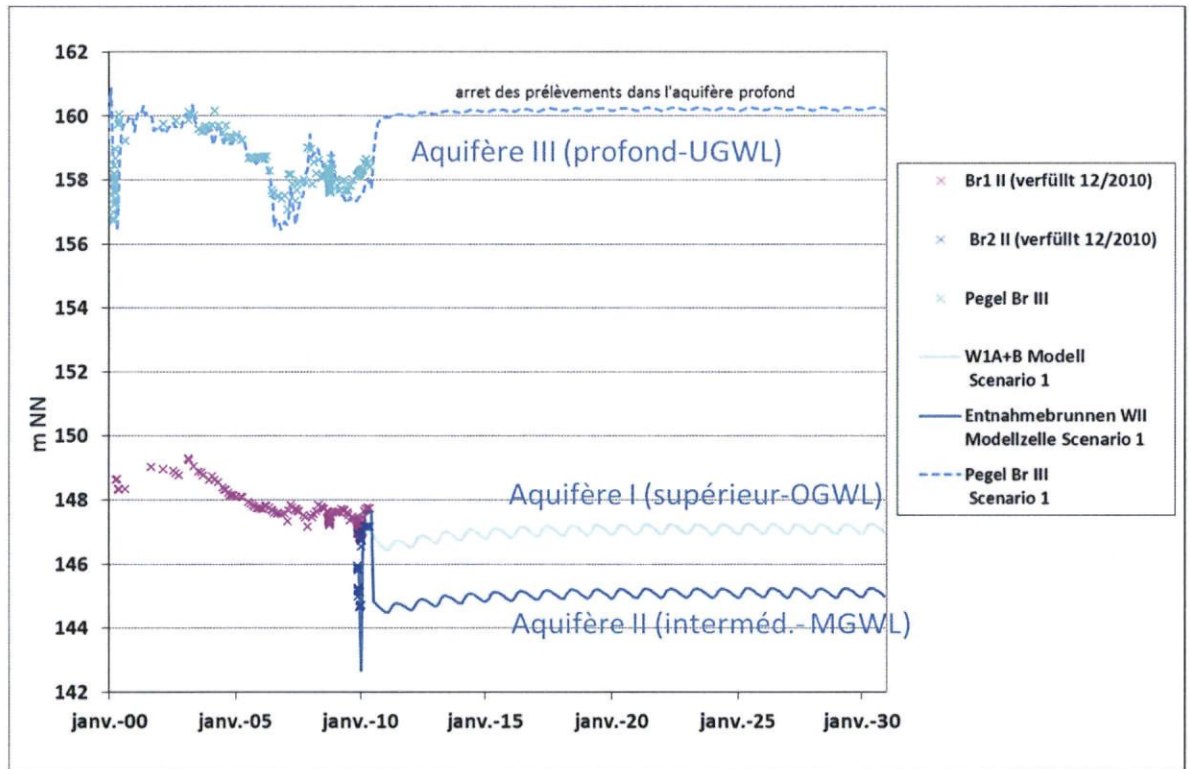


Abbildung 55 : Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf die drei GWL in Steinfeld Steinfeld (in unmittelbarer Nähe des Entnahmebrunnens). Übersetzung: verfüllt: abandonné; Entnahmebrunnen: puits d'exploitation, Modellzelle: maille du modèle)

Die Abbildung 55 zeigt die drei Grundwassermessstellen in der Nähe des Entnahmebrunnens, die am stärksten auf die Entnahmen reagieren: es zeigt sich, dass die Grundwasserleiter nach circa zehn Jahren Nutzung mit 300 000m³/Jahr im mittleren GWL einen neuen Gleichgewichtszustand erreichen. Das Grundwasservorkommen reicht folglich aus, um den erforderlichen Bedarf zu decken.

Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf die drei Grundwasserleiter in der Nähe des Entnahmebrunnens:

- Unterer Grundwasserleiter: ohne Entnahmen im Aquifer III (UGWL) steigt der Grundwasserspiegel innerhalb von 6 Monaten wieder auf 160.2 m NN (NN=Normalnull, bezieht sich auf das deutsche Meeresniveau) an.
- Die neuen Piezometer WIA+B (GWL I) reagieren auf Entnahmen im Brunnen WII direkt mit circa zwölf Zentimetern Absenkung (von 147,0 m auf 146,88 m), um einen jahreszeitlich variablen Gleichgewichtszustand zwischen 146.4 m NN und 146.8 m NN zu erreichen (zwischen 0.3 und 0.5 m Absenkung);
- Das für die Zelle des Brunnens WII (25X25 m) berechnete Modell zeigt eine starke Absenkung im Zentrum des Absenkungstrichters. Zieht man die jahreszeitlichen Schwankungen ab, wird die maximale Absenkung innerhalb eines Zeitschrittes (1 Monat) erreicht, dann steigt die Piezometerhöhe wieder leicht auf 144.5 m NN an (durchschnittliche Piezometerhöhe in der Modellzelle, höher als diejenige des Brunnens).

3.3.2. Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf die Grundwasserleiter des Untersuchungsgebietes

Auswirkung von Szenario I auf den oberen Grundwasserleiter (GWL I)

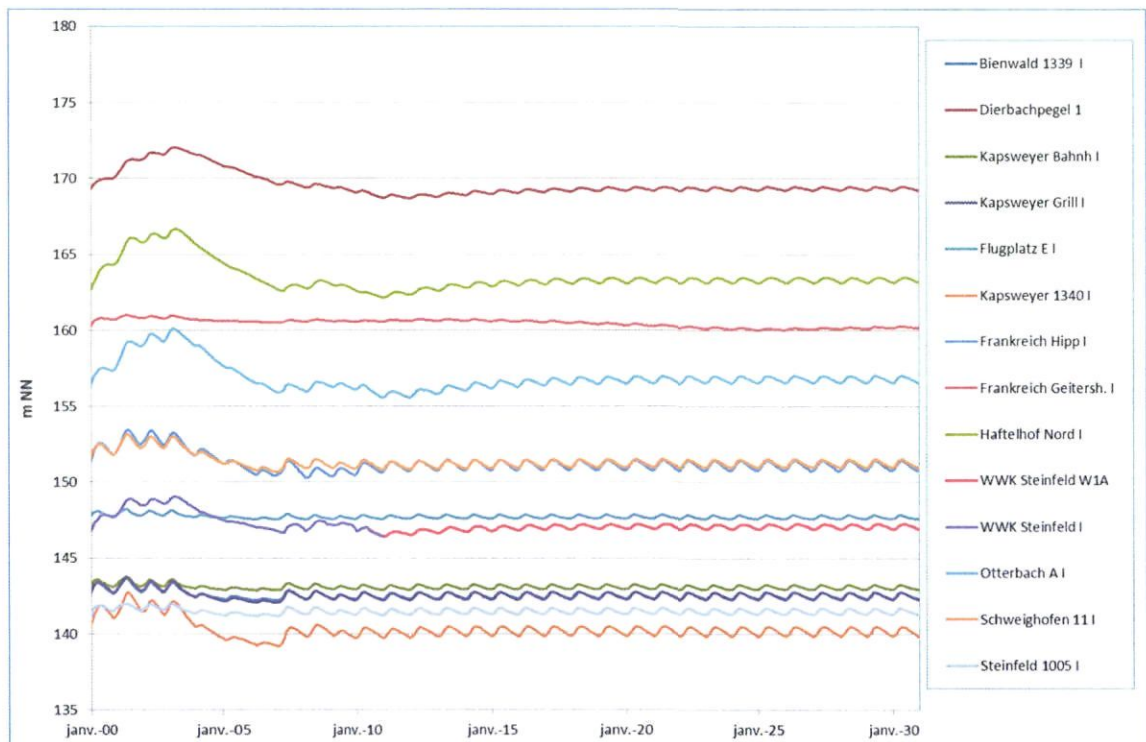


Abbildung 56: Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf den oberen GWL (GWL I)

Die Entnahmen im mittleren GWL wirken sich nur in begrenztem Maße auf den oberen GWL aus (Abbildung 56). Dieser Einfluss wird insbesondere bei einem Vergleich mit dem Szenario ohne jegliche Entnahme sichtbar (cf. Kapitel Szenario Ia, Abbildung 59).

Bei einem Großteil der Piezometer steigt der Grundwasserspiegel bei durchschnittlich leicht erhöhten Infiltrationswerten im Vergleich zu den Vorjahren (2008 und 2009, cf. Abbildung 54) ab Juni 2010 leicht an.

Auswirkung von Szenario I auf den mittleren Grundwasserleiter (GWL II) im Untersuchungsgebiet (Abbildung 56)

Der Verlauf der Grundwasserganglinien bei dem mittleren Grundwasserleiter weist zwischen den Messstellen dieses GWL vergleichbare saisonbedingte Schwankungen aus.

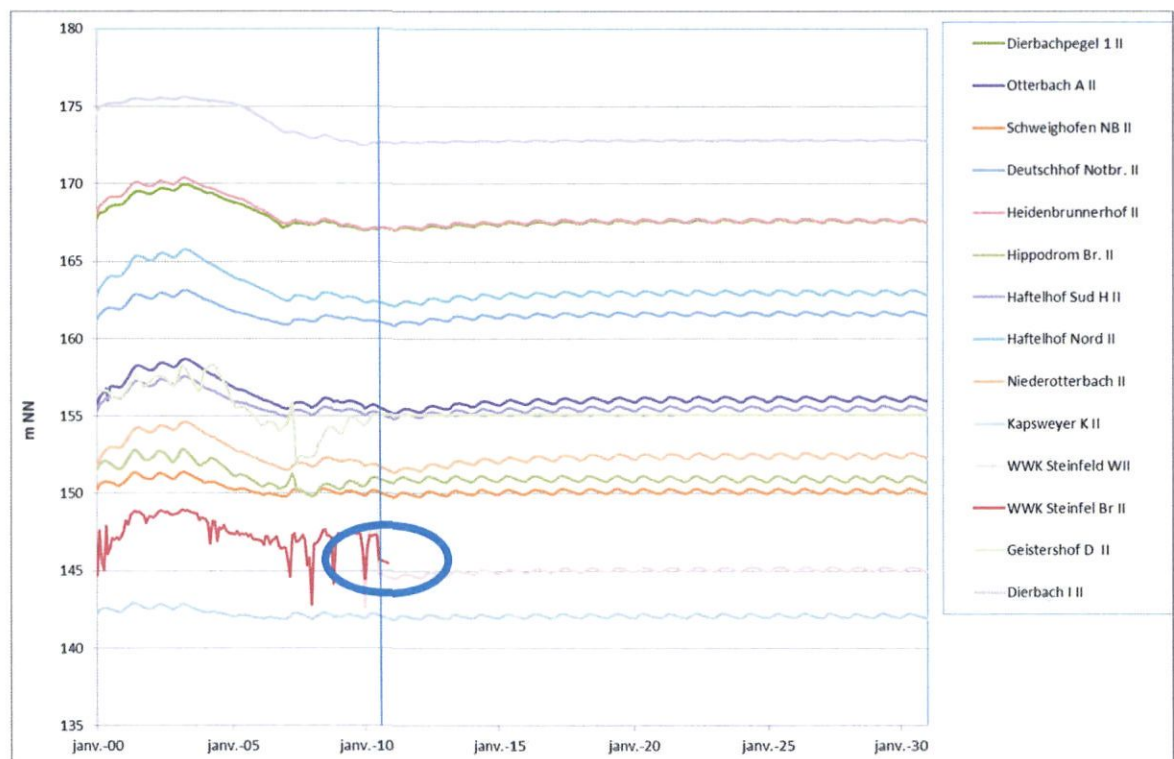


Abbildung 57: Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf den mittleren GWL

Bei einer Entnahmesimulation von 300 000 m³/Jahr im mittleren Grundwasserleiter ab Juni 2010 (senkrechte Linie in Abbildung 57) sinkt die Piezometerhöhe bei dem Bohrbrunnen WWK Steinfeld WII und der Messstelle Steinfeld BrII direkt um 2 bis 3 m. Diese direkte und starke Absenkung wird bei den anderen Piezometern dieses Aquifers nicht beobachtet: die Piezometerhöhe bei diesen Messstellen sinkt über einige Monate, um dann über eine Zeitspanne von 4 bis 5 Jahren wieder anzusteigen, bevor sie sich auf einer Höhe, die derjenigen von 2005 entspricht stabilisiert. Wie beim

oberen GWL steht auch hier die Ganglinie in Zusammenhang mit den durchschnittlichen Infiltrationswerten, die etwas höher sind als bei den vorausgegangenen Jahren (2008 und 2009, cf. Abbildung 52).

Alle Piezometer werden von einer saisonbedingten Absenkung beeinflusst.

Auswirkung von Szenario I auf den unteren Grundwasserleiter (GWL III) des Untersuchungsgebietes (Abbildung 58)

Erfolgen die Entnahmen ausschließlich im mittleren Grundwasserleiter, der Gegenstand von Szenario I ist, steigt die Piezometerhöhe bei allen Messstellen des unteren Grundwasserleiters innerhalb von 4 bis 5 Monaten wieder an; sie stabilisiert sich dann nach fünf Jahren auf einer Höhe, die mit derjenigen vom Frühjahr 2004 vergleichbar ist.

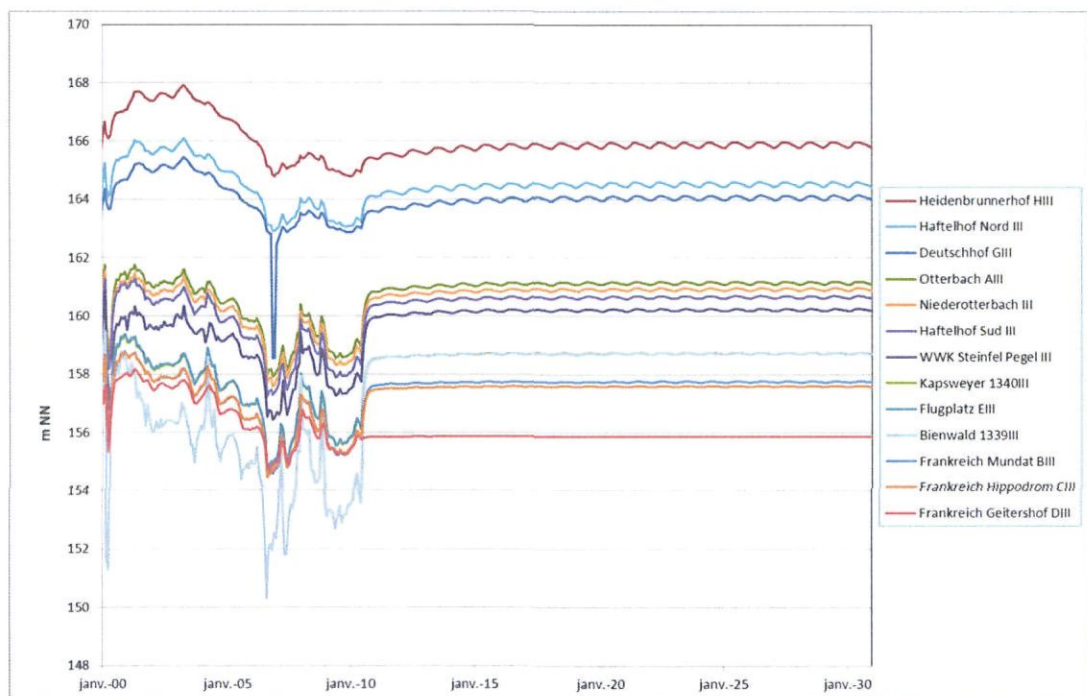


Abbildung 58: Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf den unteren GWL im gesamten Untersuchungsgebiet

Die Ganglinie des unteren Grundwasserleiters weist bei den im Norden in der Nähe des Wiederergänzungsbereiches befindlichen Piezometern eine saisonbedingte Variabilität auf. Im zentralen Bereich nimmt die Variabilität dann ab bis sie im Süden dann gleich Null ist (Messstelle Geitershof DIII), was auf die Festpotentiale entlang der Südgrenze zurückzuführen ist.

Auswirkung von Szenario I auf den oberen Grundwasserleiter: Vergleich mit einer Situation ohne Entnahmen (Szenario Ia)

Der obere Grundwasserleiter nimmt eine besondere Stellung ein. Er erstreckt sich über die gesamte geografische Raumeinheit des Bienwaldes und ist mit dessen Ökosystem verbunden. Deshalb muss sichergestellt werden, dass eine Bewirtschaftung des mittleren Grundwasserleiters keine signifikante und großräumige Absenkung seines natürlichen Grundwasserspiegels nach sich zieht. Auf lokalerer Ebene sollte im Zusammenhang mit dem nächstgelegenen Fassungsbereich geprüft werden, ob ein vertikaler Transfer zum mittleren Grundwasserleiter stattfindet.

Das ist genau der Zweck von Szenario I a, bei dem die Auswirkungen einer völligen Einstellung der Entnahmen simuliert werden. Mit dem Vergleich der simulierten Piezometerhöhen bei den Szenarien I und 1 a (ohne jegliche Bewirtschaftung und bei ausschließlicher Bewirtschaftung des mittleren GWL) können die Verbindungen zwischen dem oberen und dem mittleren Aquifer quantifiziert werden.

Der Vergleich wird auch zwischen dem mittleren und tiefen Aquifer durchgeführt, um ggf. vorliegende Infiltrations- und Leakagevorgänge zu ermitteln.

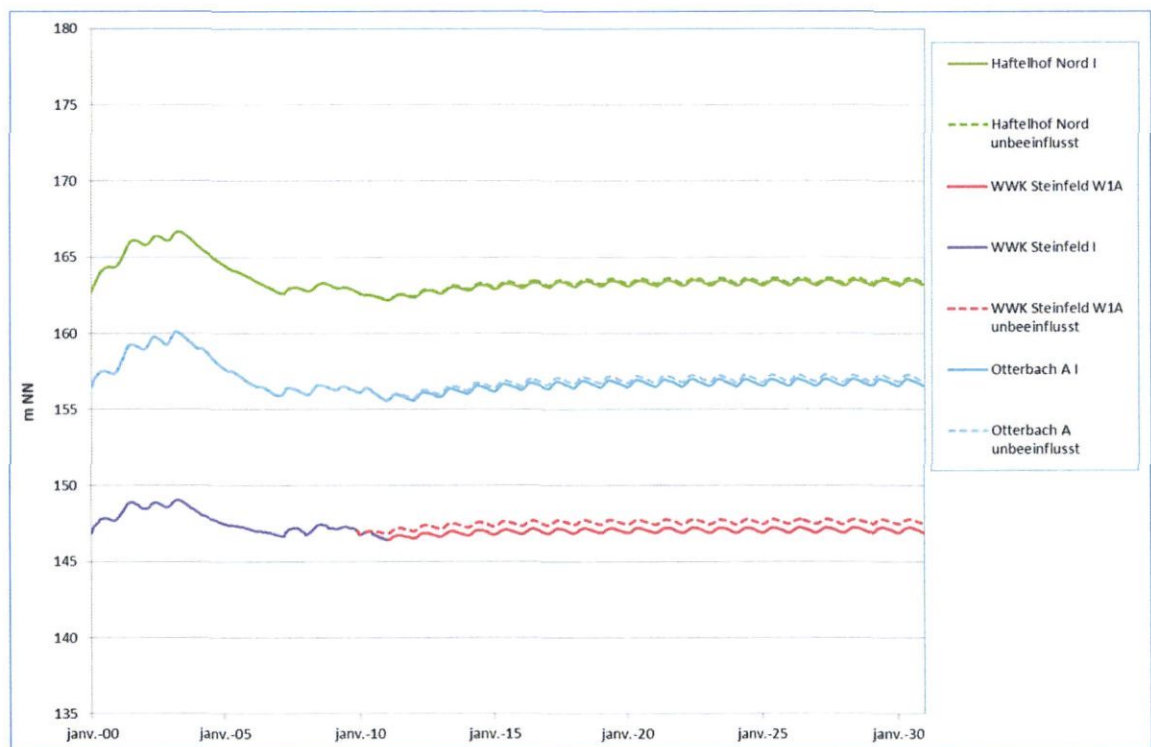


Abbildung 59: Auswirkung der Entnahmen von Szenario I auf den oberen Grundwasserleiter (GWL I). Die gestrichelten Kurven entsprechen dem Szenario ohne Entnahmen Ia

Dabei wird Folgendes beobachtet:

- einige Zentimeter Absenkung bei den Messstellen Haftelhof und Otterbach A. Die Absenkung liegt weit unter den saisonbedingten Schwankungen;
- in unmittelbarer Nähe des Wasserwerks Steinfeld spricht der neue GWM W1A mit ~ 60 cm auf die Entnahmen an;
- die 8 weiteren Piezometer des **oberen Grundwasserleiters** reagieren nicht auf die Entnahmen im mittleren Aquifer.

Der Einfluss der Entnahmen im GWL II auf den GWL III ist gering, mit einer etwas höheren Drainage vom GWL III zum GWL II, wobei die Piezometerhöhe des tiefen Aquifers 2 bis 4 cm unter derjenigen eines insgesamt nicht beeinflussten Speichers liegt.

3.4. ERGEBNISSE VON SZENARIO I: HYDROLOGISCHE BILANZ DER 3 GRUNDWASSERLEITER

Die folgenden Abbildungen weisen unterschiedliche Komponenten auf:

1. Zufluss durch Infiltration und Wiederergänzung;
2. Abfluss durch Entnahme aus den Brunnen des betreffenden Grundwasserleiters;
3. Abfluss durch Überlauf, Leakage des oberen GWL;
4. Austausch mit der unteren Grenze (unterlagernde Grundwasserschichten), diese Infiltrations- oder Drainagemenge kann je nach Differenz zwischen den Grundwasseroberflächen zeitlich variieren;
5. monatliche und jährliche Speichermenge, die einem geglätteten Durchschnittswert der letzten zwölf Monate entspricht (was ein besseres Verständnis der Mehrjahresentwicklung ermöglicht).

3.4.1. Bilanz des oberen Grundwasserleiters

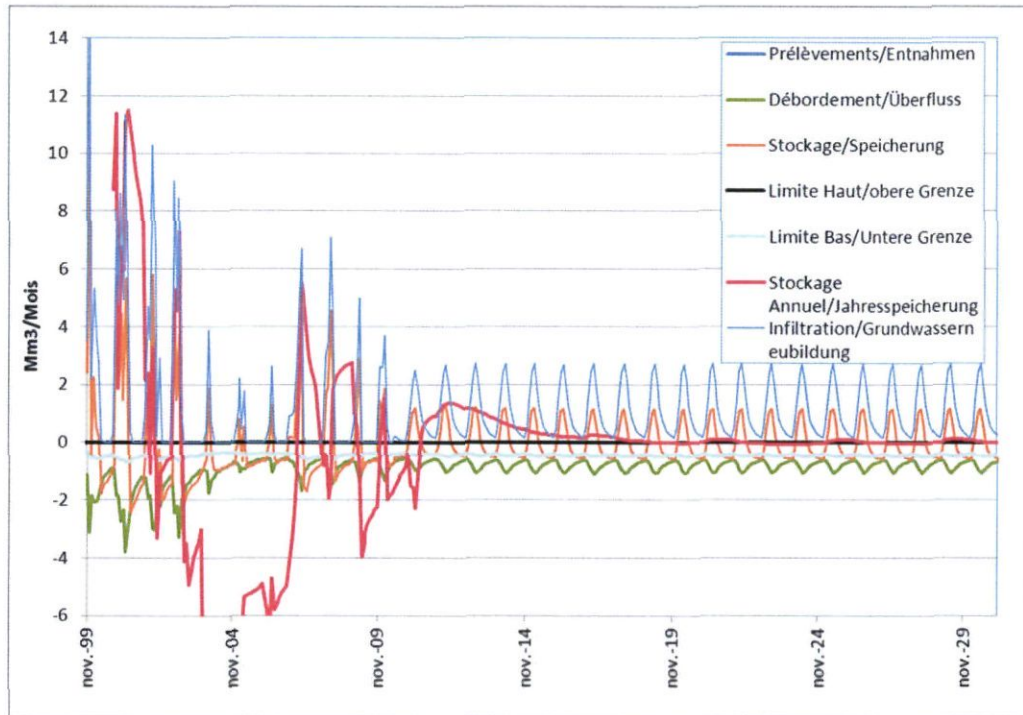


Abbildung 60: Komponenten der Wasserbilanz bei dem oberen GWL von 1999 bis 2030 (Szenario I und II)

Die Szenarien I und II weisen bei dem oberen Grundwasserleiter die gleichen Ergebnisse aus. Die Bilanz für den Zeitraum 1999 - 2009 ist stark von meteorologischen Schwankungen beeinflusst: eine Periode mit starken Niederschlägen und Infiltrationen bis 2002 ist von einem hohen Abfluss in Richtung oberirdische Gewässer (Abfluss in die Lauter) gekennzeichnet. Gleichzeitig weist dieser Zeitraum eine hohe Neubildungsrate und eine positive jährliche Speicherbilanz im oberen Grundwasserleiter aus.

Die Trockenperiode 2003-2006 dagegen weist eine niedrige Neubildungsrate und eine negative jährliche Speicherbilanz aus.

Ab 2007 wechseln die Aufspeicherungs- und Entleerungsperioden einander regelmäßig ab. Die beiden Szenarien angewandten durchschnittlichen Neubildungsraten erreichen nach einigen Jahren einen Gleichgewichtszustand, der bis 2030 beibehalten bleibt.

3.4.2. Bilanz des mittleren Grundwasserleiters

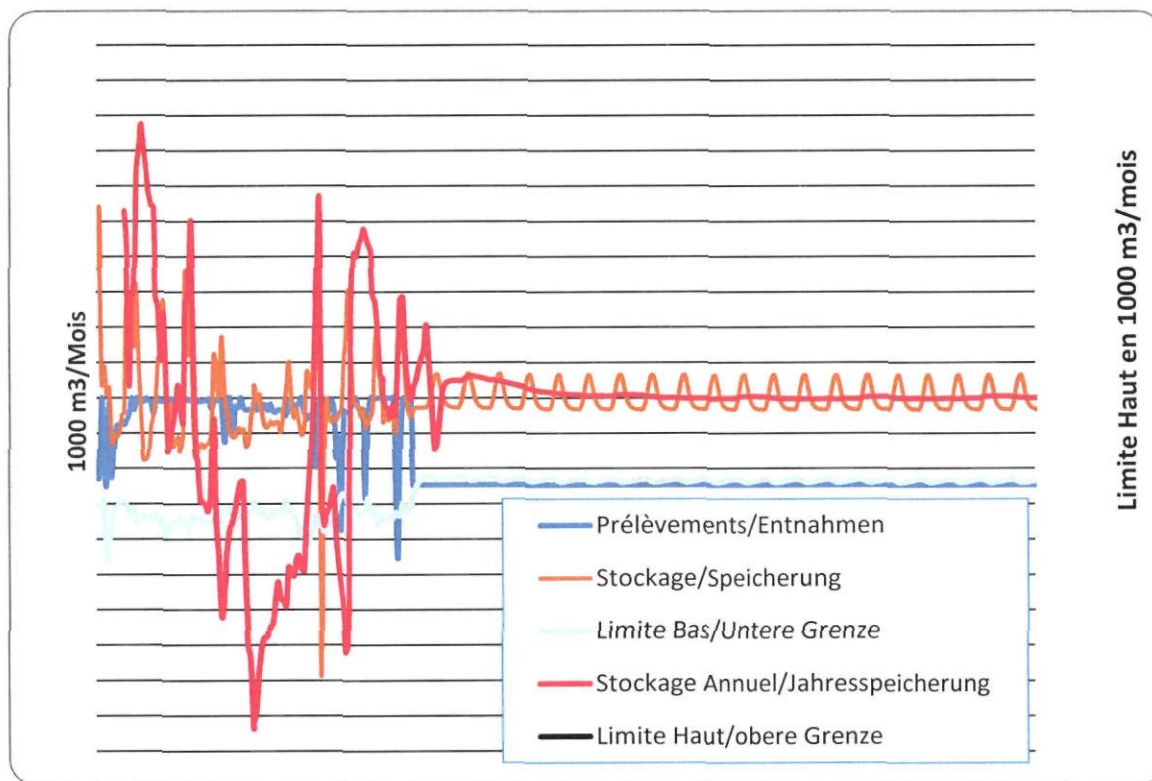


Abbildung 61: Komponenten der Wasserbilanz bei dem mittleren GWL von 1999 bis 2030 (Szenario I)

Die Grundwasserbilanz bei dem mittleren Aquifer weist eine Periode mit starken Regenfällen bis 2002 und eine Trockenperiode bis 2006 und eine Drainage nach unten vom oberen Grundwasserleiter aus (schwarze Kurve, die Werte entsprechen der Nebenachse rechts). Zu Beginn des Simulationszeitraums ist die Bilanz positiv mit einer hohen Speicherrate im mittleren Grundwasserleiter (rote Kurve). Darauf folgt eine negative Bilanz in den 3 Jahren Trockenheit. Auch das darauf folgende Jahr (2007) weist beim mittleren Grundwasserleiter eine negative Bilanz aus, die auf starke Entnahmen in diesem Aquifer zurückzuführen ist.

In der Zeit von 2009 bis 2030, in der 34 m³/Jahr entnommen wurden, erreicht die Bilanz nach und nach wieder einen Gleichgewichtszustand mit einer Speicherung gleich Null, Austauschvorgängen mit den Grenzen (Festpotential) und den Entnahmen.

3.4.3. Bilanz des unteren Grundwasserleiters

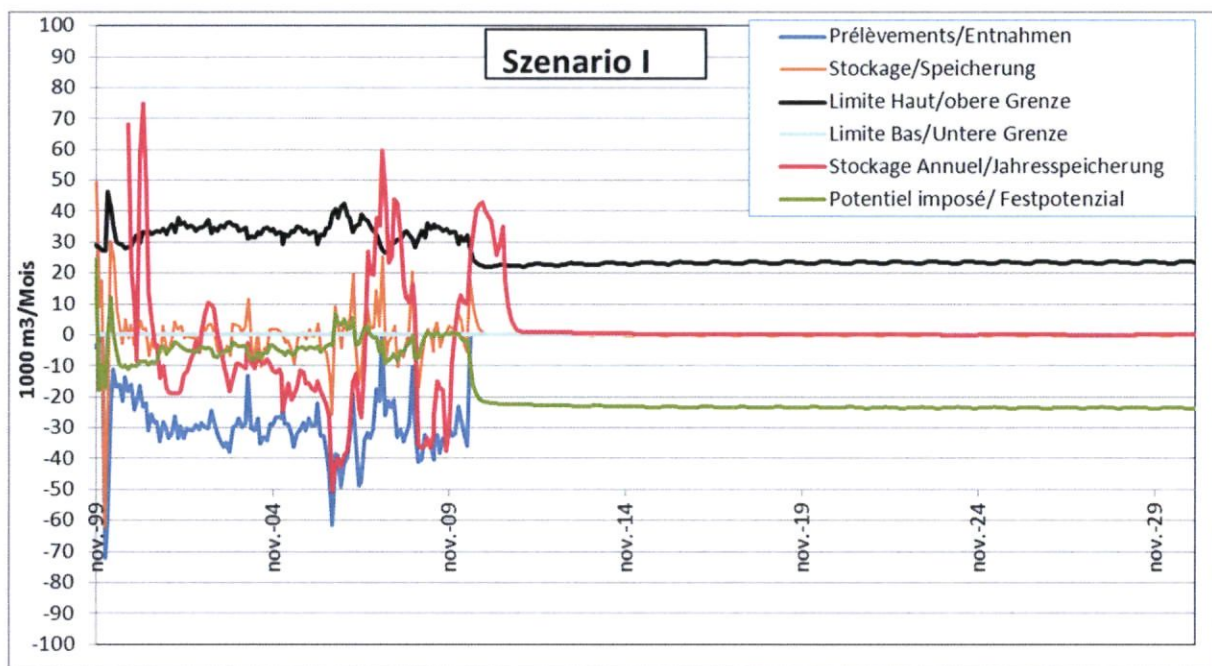


Abbildung 62: Komponenten der Wasserbilanz bei dem unteren GWL, von 1999 bis 2030 (Szenario I)

Die Trockenperioden und die Perioden mit starken Regenfällen wirken sich nur in begrenztem Maße auf den unteren Grundwasserleiter aus. Die vom mittleren GWL kommende Drainagemenge (schwarze Kurve) ist direkt durch der Differenz zwischen der Grundwasseroberfläche des mittleren und des oberen Aquifers bedingt.

In Zeiten mit hohen Entnahmemengen nimmt der von oben kommende Strom zu, während die Drainage nach unten abnimmt. Das Modell berechnet für das Szenario I, bei dem keine Entnahmen im unteren GWL stattfinden, eine Drainage nach oben von 23 000 m³/Monat.

Mit der Entnahme von 24 600 m³/Monat (=34 m³/h) im unteren GWL von Szenario I steigt die Drainage auf 30 000 m³/Monat an. Parallel dazu ist der Abfluss über die südwestliche Grenze geringer (aufgrund eines Festpotentials).

3.5. ERGEBNISSE VON SZENARIO II: PIEZOMETERHÖHEN

Das Szenario II sieht die gemeinsame Nutzung des mittleren und des unteren GWL vor; zwei Handlungsoptionen werden simuliert. Die Entnahme bei dem mittleren GWL erfolgt wie bei Szenario I über den Brunnen "WWK Steinfeld II". Zur Nutzung des unteren GWL kommen zwei Entnahmebrunnen in Frage. Die Simulation hat folglich

dazu geführt, dass zwei Unterszenarien getestet werden (Abbildung 63), wobei der Entnahmebrunnen des mittleren GWL der gleiche bleibt:

- Brunnen in Steinfeld: "Entnahmebrunnen UGWM BrIII": Szenario IISt
- Brunnen in Bienwald : "Entnahmebrunnen Bienwald": Szenario IIBi

3.5.1. Auswirkung der Entnahmen von Szenario III auf die drei GWL in der Nähe des Entnahmebrunnens

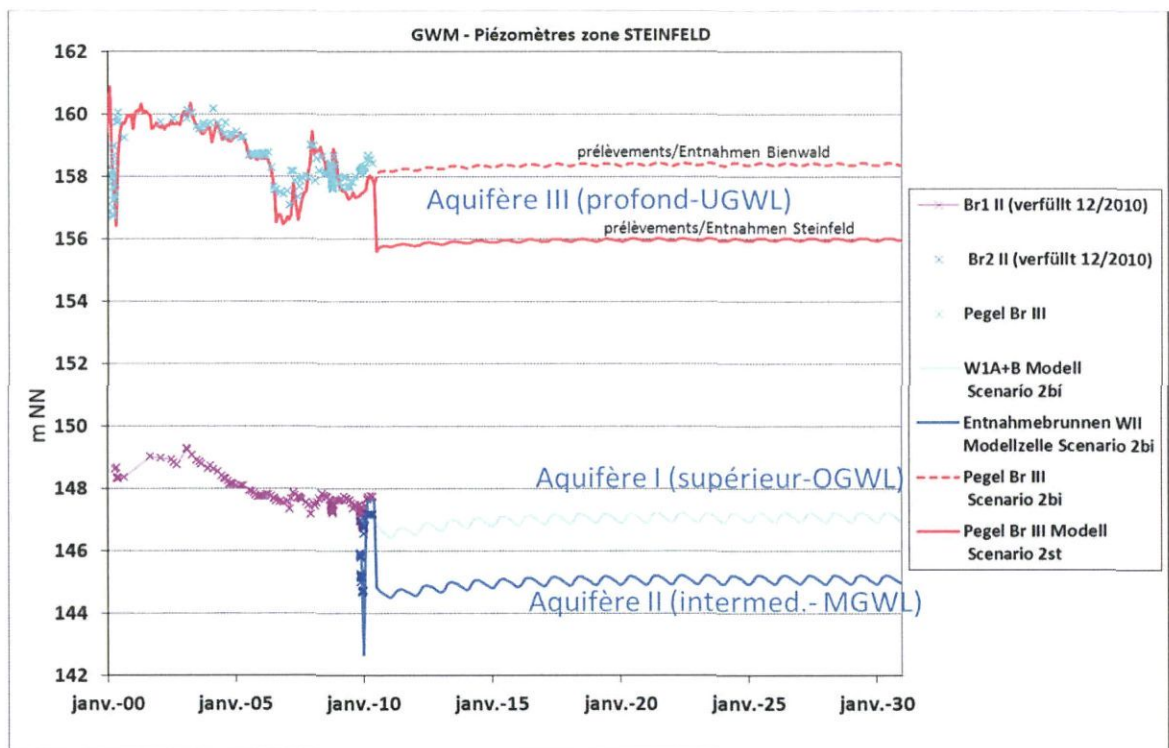


Abbildung 63: Auswirkung der Entnahmen von Szenario II auf die drei GWL von Steinfeld (-2030)

Ein piezometrischer Gleichgewichtszustand ist nach circa zehn Jahren erreicht, mit einer Entnahmemenge von 300 000m³/Jahr jeweils im mittleren und unteren GWL. Das Grundwassersystem erlaubt es demnach, eine Gesamtfördermenge von 600 000 m³/Jahr bereit zu stellen.

Auswirkung von Szenario III auf die Entnahmebrunnen und Messstellen Steinfeld (Abbildung 63):

- bei einer Entnahme im unteren GWL in Steinfeld, Br III (Szenario II St) sinkt der Grundwasserstand des unteren GWL im 1. Zeitschritt (1 Monat) auf 155.8

- m NN ab und erreicht nach einem leichten Anstieg auf 156 m NN in den 5 darauf folgenden Jahren einen Gleichgewichtszustand;
- bei einer Entnahme im unteren GWL im Bienwald, 5 km südlich vom Entnahmebrunnen Steinfeld (Szenario II Bi) steigt der Grundwasserspiegel des unteren GWL leicht an und erreicht bei 158.2 m NN einen Gleichgewichtszustand;
- die Messstellen des oberen Grundwasserleiters WIA und B (GWL I) in Steinfeld reagieren mit dem gleichen Kurvenverlauf wie bei Szenario I. Die Ganglinien zeigen die gleiche Entwicklung wie bei Szenario I mit einer zusätzlichen Absenkung von 3 cm (geringer Druckausgleich zwischen dem unteren und dem mittleren GWL durch Leakage). Dieser Grundwasserleiter reagiert unabhängig vom Entnahmebrunnen, ob Bienwald (Szenario IIbi) oder Steinfeld (Szenario IISt);
- wie bei Szenario I wird für die Modellzelle des Entnahmebrunnens WII eine hohe, dem Zentrum des Absenkungstrichters entsprechende Absenkungsrate berechnet. Zieht man die saisonbedingten Schwankungen ab, wird die maximale Absenkung innerhalb eines Zeitschrittes (1 Monat) im Laufe der fünf Jahre bei 144.5 m NN erreicht (wie bei Szenario I).

Auswirkung von Szenario II auf die Messstellen im Bienwald (Abbildung 64)

Bis zum Beginn des Szenarios wurde der Bienwald-Brunnen mit einer Fördermenge von durchschnittlich 43 m³/Jahr bewirtschaftet. Bei einer Entnahme von 34.25 m³/h (300 000 m³/Jahr) im Gebiet Bienwald steigt der Grundwasserstand im unteren GWL wieder an und stabilisiert sich innerhalb von einigen Monaten bei 155 m NN. Der obere Grundwasserleiter erreicht seinen Gleichgewichtszustand bei 142.7 m NN.

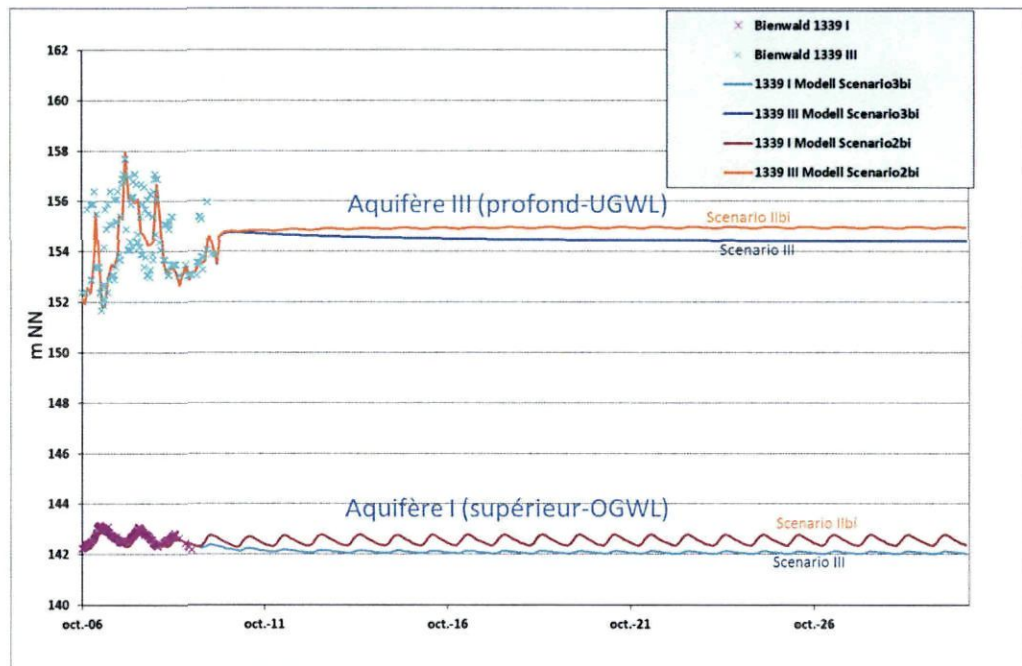


Abbildung 64: Auswirkung der Entnahmen von Szenario II und III auf die GWL im Bienwald

3.5.2. Auswirkung der Entnahmen von Szenario II auf den unteren GWL im Untersuchungsgebiet

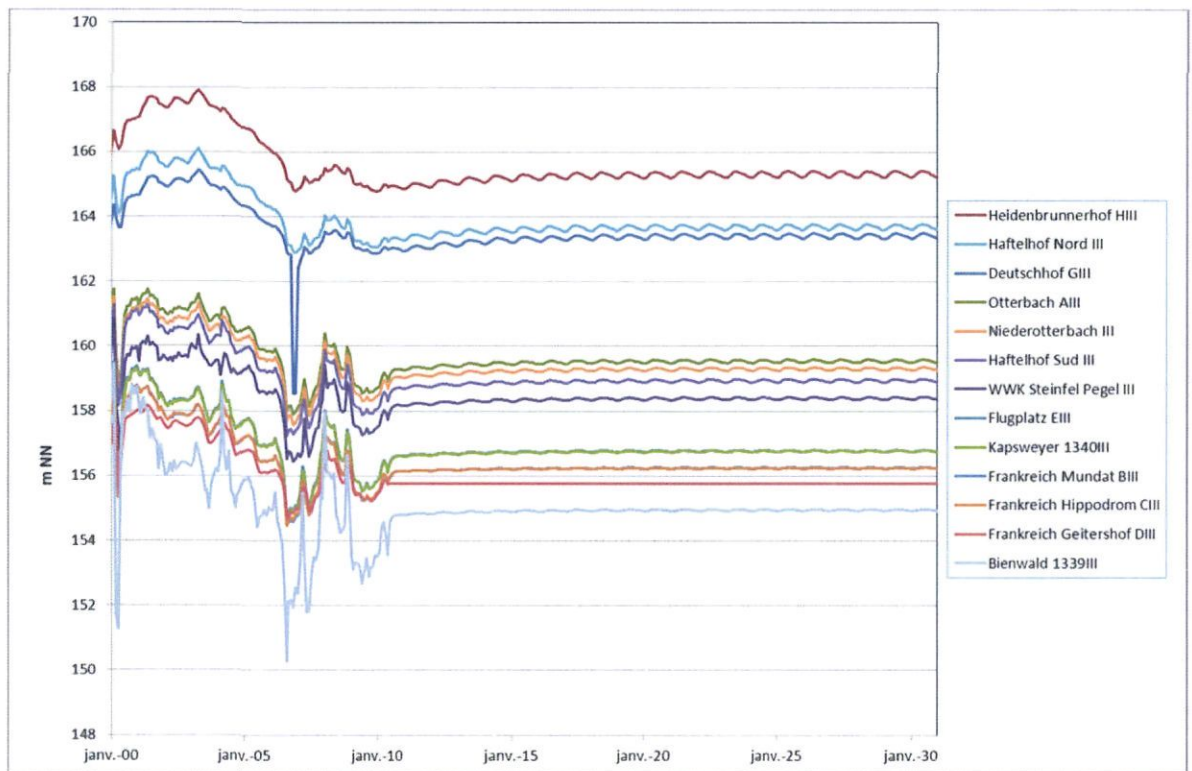


Abbildung 65: Auswirkung der Entnahmen von Szenario IIb1 auf den unteren GWL (GWL III)

Bei einer Entnahme von 300 000 m³/Jahr im unteren Grundwasserleiter steigt die Piezometerhöhe innerhalb weniger Monate bei allen Messstellen an und stabilisiert sich innerhalb von 5 Jahren bei einem Grundwasserstand, der mit demjenigen von Ende vergleichbar ist. In der Modellzelle des Entnahmebrunnens "Bienwald 1339III" stabilisiert sich die Piezometerhöhe 4 m unterhalb der Höhe ohne Entnahmen im unteren Aquifer; bei den benachbarten Piezometern beträgt die Absenkung 2 m.

Der Einfluss der Entnahme ist bei allen Messstellen, bis hin zur nördlichsten, bei der die Absenkung circa 0.6 m beträgt, spürbar.

Es ist möglich, im unteren Grundwasserleiter dauerhaft ein Jahresvolumen von 300.000 m³/Jahr zu entnehmen. Bei Verbrauchsspitzen kann die Fördermenge vorübergehend erhöht werden, da sich der Grundwasserstand in dem stark gespannten Aquifer sehr schnell regeneriert.

3.6. ERGEBNISSE VON SZENARIO II: HYDROLOGISCHE BILANZ DES UNTEREN GRUNDWASSERLEITERS

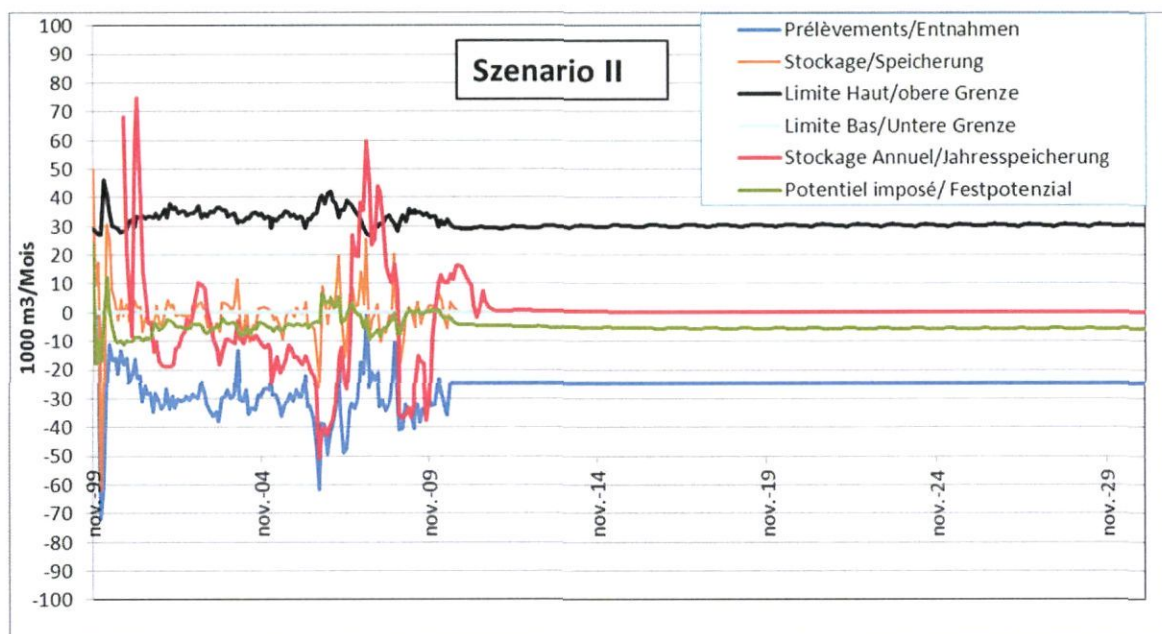


Abbildung 66: Komponenten der Wasserbilanz bei dem unteren GWL von 1999 bis 2030 (Szenario II)

Die Trockenperioden und die Perioden mit starken Regenfällen wirken sich nur in begrenztem Maße auf den unteren Grundwasserleiter aus. Die vom mittleren GWL kommende Drainagemenge (schwarze Kurve) ist direkt von der Differenz zwischen der Grundwasseroberfläche des mittleren und des oberen Aquifers abhängig.

In Zeiten mit hohen Entnahmemengen nimmt der von oben kommende Strom zu, während die Drainage nach unten abnimmt. Mit der Entnahme von $24600 \text{ m}^3/\text{Monat}$ ($\approx 34 \text{ m}^3/\text{h}$) im unteren GWL von Szenario I steigt die Drainage auf $30\,000 \text{ m}^3/\text{Monat}$ an. Parallel dazu ist der Abfluss über die südwestliche Grenze geringer (aufgrund eines Festpotentials).

Mit diesen Entnahmen und Zuflüssen von oben und aus Südwesten ist die Wasserbilanz des Grundwasserleiters ausgeglichen (Jahresspeicherung = 0).

Anmerkung: ein Teil des Grundwassers des unteren GWL kommt von der südwestlichen Grenze und fließt in Richtung Entnahmehauptbrunnen Bienwald. Der derzeitige Kenntnistand über die Ausdehnung und die Rahmenbedingungen im Südwesten des untersuchten Gebietes erlaubt es nicht, die genaue Herkunft und den Austritt des südlichen Grundwassers zu bestimmen. Die Fließrichtung kann sich im südlichen Teil des Modells unweit seiner Grenze umkehren. Das hydrodynamische

Modell wurde deshalb vereinfacht und reicht nur bis zur südlichsten Messstelle. Die Piezometerhöhe entspricht dem Festpotential der Grenze.

3.7. ERGEBNIS VON SZENARIO III: PIEZOMETERHÖHEN

Das Szenario III simuliert wie Szenario II und mit den gleichen Entnahmemengen die Entwicklung der Grundwasserleiter im Hinblick auf eine Grundwasserneubildung während einer Trockenperiode. Als Bezugsperiode wurde 2003-2006 gewählt, in der weniger als 30 % des durchschnittlichen, Grundwasser bildenden Niederschlags gefallen sind.

3.7.1. Auswirkung der Entnahmen von Szenario III auf die drei Grundwasserleiter in der Nähe der Entnahmebrunnen

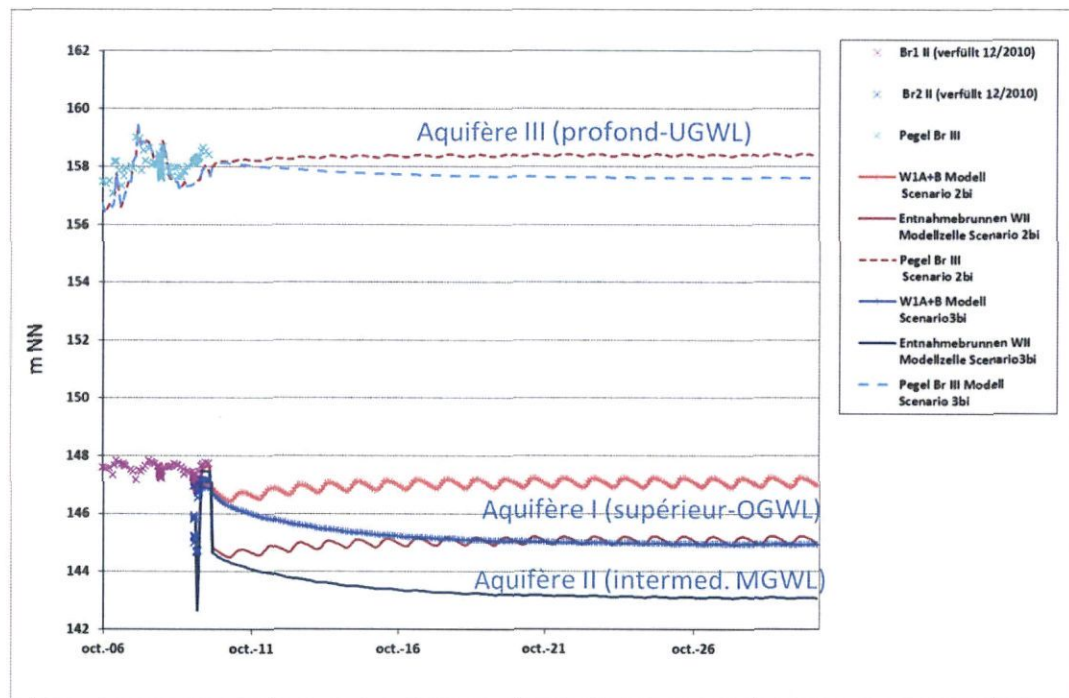


Abbildung 67: Auswirkung der Entnahmen und der reduzierten Sickerwasserbildung von Szenario III (blaue Kurven) auf die drei GWL im Vergleich zu Szenario II

Bei um 30 % reduzierter Sickerwasserbildung sinkt die Piezometerhöhe des mittleren Grundwasserstockwerks während eines Zeitraums von circa 10 Jahren bevor sie sich 2 m unter dem derzeitigen Niveau stabilisiert. Die bei Szenario II deutlich sichtbaren saisonbedingten Schwankungen sind kaum mehr zu erkennen, vermutlich auf Grund der geringeren Infiltrationen.

Bei dem UGWL ist eine Absenkung von 0,8 m im Verhältnis zu Szenario II zu erkennen; auch er erreicht einen Gleichgewichtszustand nach 10 Jahren.

Bei diesem Szenario sinken die Piezometerhöhen während eines Zeitraums von circa zehn Jahren ab, mit anschließender Stabilisierung. Durch die reduzierte Infiltration erhöht sich die globale Absenkung.

Auswirkung von Szenario III auf die Messstellen im Bienwald (Abbildung 67, blaue Kurven)

Der Grundwasserstand im unteren Grundwasserleiter sinkt auf Grund der Entnahmen von 300 000 m³/a und der reduzierten Sickerwasserbildung ab und erreicht nach 8 Jahren bei 154.5 m NN einen Gleichgewichtszustand.

Der obere Grundwasserleiter reagiert auf die reduzierte Infiltrationsrate mit einer Absenkung von 0.5 m und der Grundwasserstand stabilisiert sich innerhalb von 5 Jahren.

3.7.2. Auswirkung von Szenario III auf den unteren Grundwasserleiter im Untersuchungsgebiet

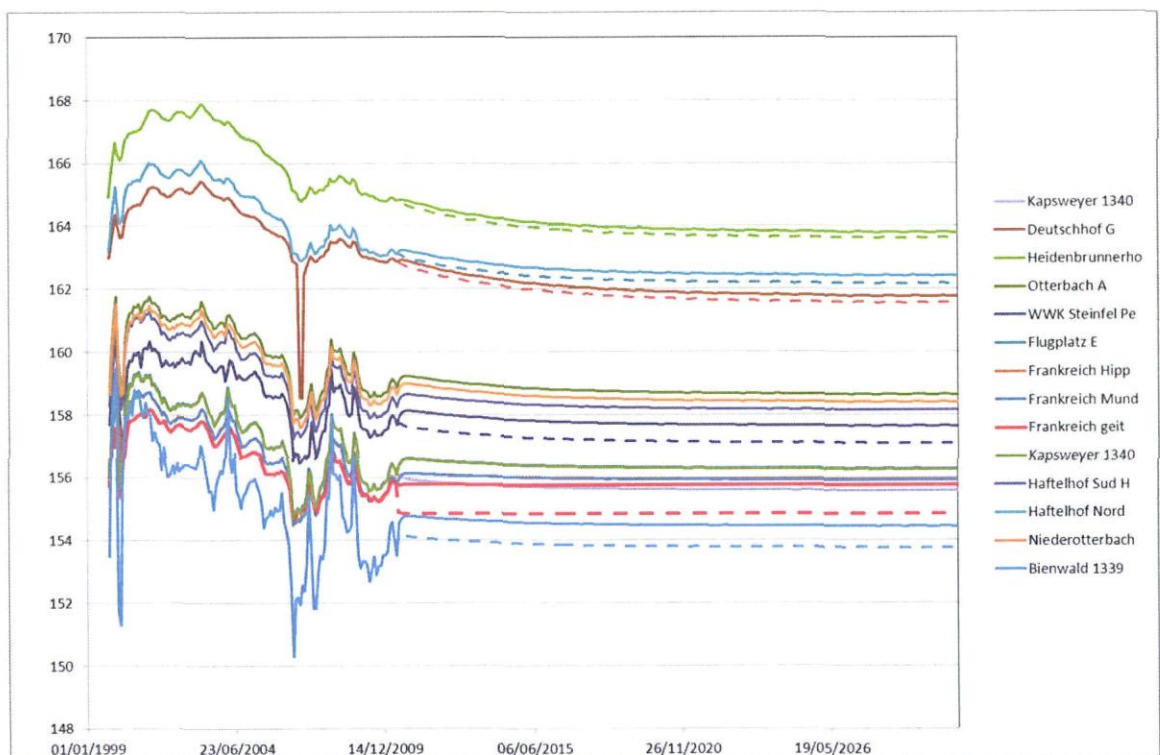


Abbildung 68: Auswirkung der Entnahmen von Szenario III auf den tiefen Grundwasserleiter (GWL III) des Untersuchungsgebietes (-2030), mit zwei Festpotentialgrenzen (unterbrochene Linie: vorgegebener Mindestgrundwasserstand)

Bei einer zusätzlichen Entnahme von 300 000 m³/Jahr im unteren Grundwasserleiter und 20 % weniger Niederschlag als im Durchschnitt stabilisiert sich der Grundwasserspiegel auf einem Niveau, das circa 1 m tiefer liegt als zu Beginn des Szenarios im Juni 2009.

Eine **zweite Simulation** wurde bei um 1 m abgesenkten Festpotentialen an der SW Grenze durchgeführt. Das Festpotential von 154.8 m entspricht dem niedrigsten Niveau, das bei der Messstelle "Frankreich Geitershof, D" beobachtet wurde, gegenüber der bei Szenario III angewandten Piezometerhöhe von 155.8 m, die bei einer Entnahme von 300 000 m³/h beobachtet wurde. Das allgemeine Niveau ist demnach niedriger als 1 m im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes, während das Niveau im Norden circa 20 cm niedriger ist.

3.8. ERGEBNISSE VON SZENARIO III: HYDROLOGISCHE BILANZ DES UNTEREN GRUNDWASSERLEITERS

Bei gleichen Entnahmen wie in Szenario II (34 m³/h jeweils im mittleren und unteren GWL) zeigt das Szenario III die Auswirkungen einer reduzierten Sickerwasserbildung auf den unteren Grundwasserleiter auf.

Der Gleichgewichtszustand ist nach circa zehn Jahren so gut wie erreicht:

- der Abfluss aus dem mittleren Grundwasserleiter durch Drainage nach unten nimmt um 30 000 bis 26 000 m³/Monat ab;
- der Abfluss aus dem System in Richtung Süden nimmt um 5 600 bis 1 500 m³/Monat ab. Damit hat die Bilanz praktisch ihr Gleichgewicht erreicht: die jährliche Aufspeicherung strebt einem Wert = 0 zu (2030: 0.03 m³/Jahr).

Mit einer Bilanzierung anhand eines Festpotentials, das einem beobachteten Mindestgrundwasserstand (154,8 m gegenüber 155.8 m) entlang der SW Grenze entspricht, kann die Sensitivität dieses Parameters beurteilt werden:

Im Verhältnis zu den Zuflüssen durch Drainage nach unten von 26 000 m³/Monat stellen die 1 500 m³ Abflüsse im Monat aus dem System 6 % dar. Mit einem "unteren" Festpotential steigt der Abfluss auf 3 500 m³/Monat an, was 14 % der Zuflüsse entspricht. Eine insgesamt niedrigere Piezometerhöhe beeinflusst die Drainage vom mittleren Grundwasserleiter nach unten: die Förderrate erhöht sich und bringt die Bilanz ins Gleichgewicht.

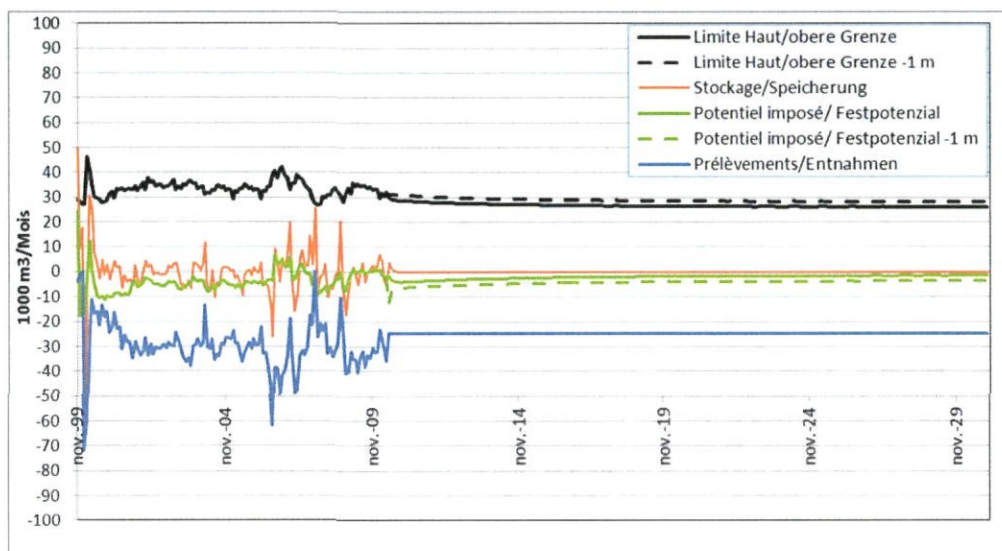


Abbildung 69: Komponenten der Wasserbilanz bei dem unteren GWL von 1999 bis 2030 (Szenario III), mit den beiden Festpotentialgrenzen: 155.75 m NN (durchgehende Linien) und 154.8 mNN (unterbrochene Linien)

Anmerkung: Die Sensitivität des Modells im Verhältnis zu dem Festpotential an der SW Grenze ist gering, auch wenn man das "pessimistische" Szenario einer während 3 Jahren beobachteten und auf einen Zeitraum von 30 Jahren übertragenen Trockenperiode und ein unteres Niveau bei der Festpotentialgrenze im Süden des Modells in Betracht zieht.

3.9. ARTESE UND PIEZOMETERHÖHENUNTERSCHIED

Die Karten der Abbildungen 70 und 71 zeigen den Piezometerhöhenunterschied bei Szenario III:

- des oberen und unteren Grundwasserleiters;
- des oberen und mittleren Grundwasserleiters.

Durch diesen Unterschied bleibt der untere Grundwasserleiter unter einem höheren Druck als die beiden darüberliegenden Grundwasserleiter, wodurch ein Abstrom von oben nach unten vermieden wird.

Die Karten zeigen einen Unterschied zwischen den beiden oberen Aquiferen und zwischen dem unteren und oberen Aquifer anhand des Beispiels von Szenario III. Der Grundwasserstand im Grundwasserleiter⁴ nimmt stärker ab als im mittleren Grundwasserleiter. Die Differenz zwischen dem unteren und dem mittleren Aquifer wird auf Grund einer starken Absenkung des letzteren größer.

⁴ NdT : de quel aquifère s'agit-il ? Hier ist nicht angegeben um welchen Grundwasserleiter es sich handelt

Der größte Teil des artesischen Bereiches bleibt bei den drei Szenarien erhalten. Geringe Unterschiede werden im Bereich Bienwald verzeichnet; sie sind auf die Absenkung des Grundwassers in der Nähe des Entnahmebrunnens zurückzuführen.

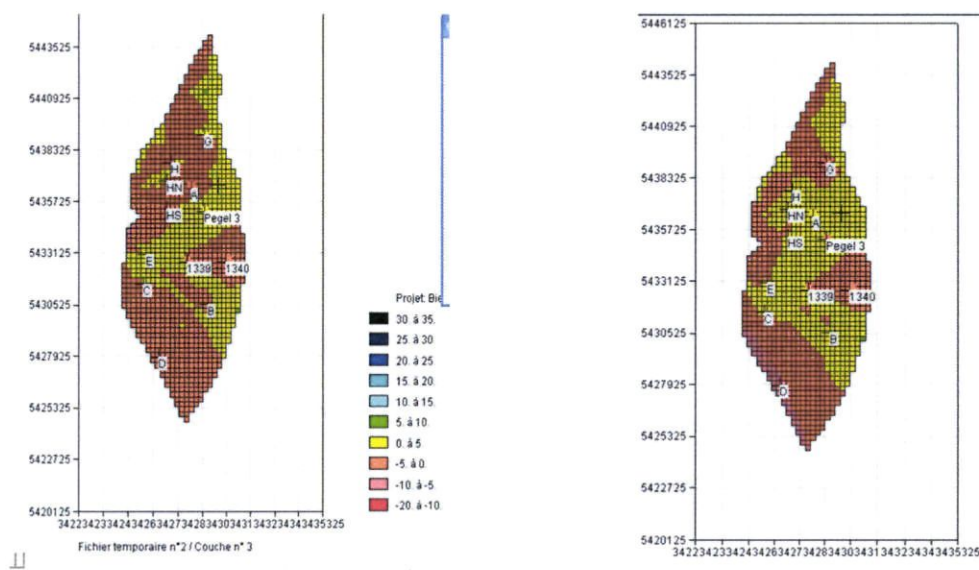


Abbildung 70: Differenz MGWL – OGWL 2000 (links) und 2030 (rechts) (gelbe Werte: mittlerer oberer GWL bis mittlerer GWL)

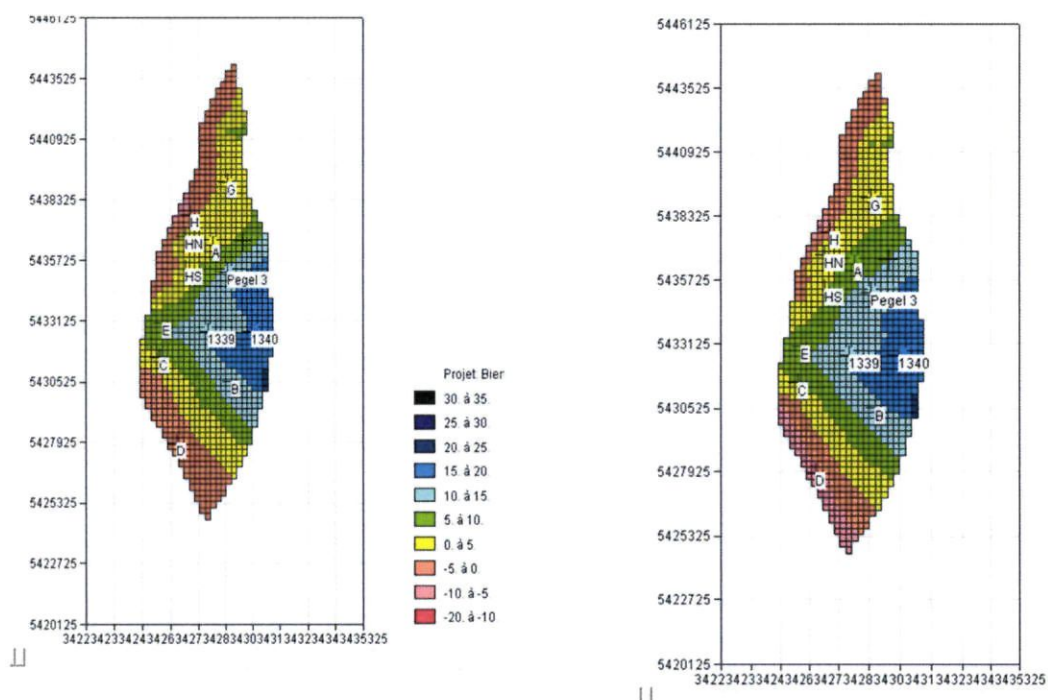
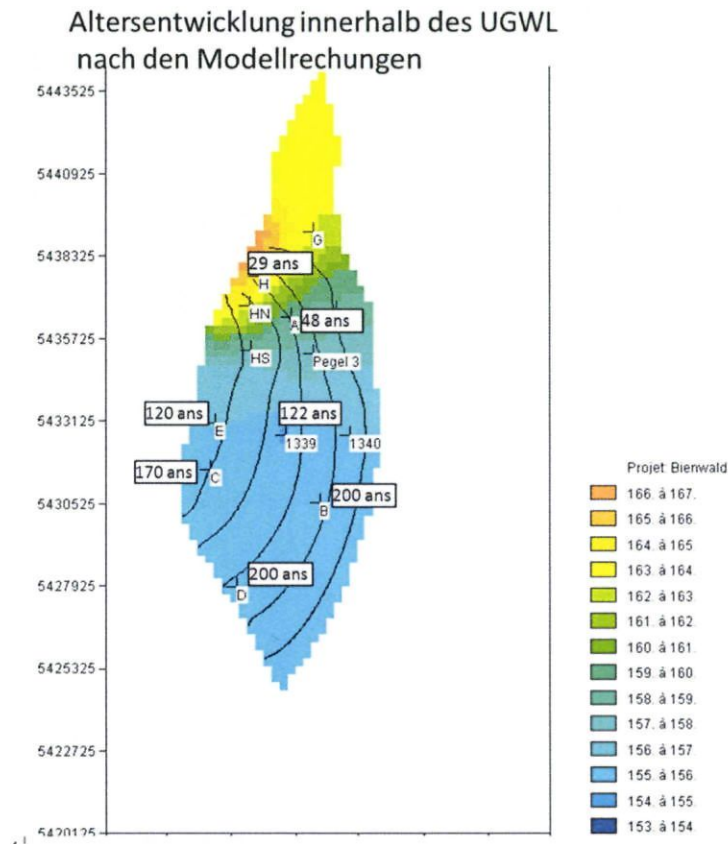


Abbildung 71: Differenz UGWL - OGWL 2000 (links) und 2030 (rechts). Leakage-Effekt nach unten in den orangefarbenen Bereichen.

3.10. STRÖMUNGSWEGE UND GRUNDWASSERALTER



Die Strömungswege (Abbildung 72) und das Schema des Grundwasseralters (Abbildung 73) belegen, dass die Strömungsrichtung vom Wiederergänzungsgebiet im Nordwesten nach Süden und anschließend weiter in Richtung Südwesten verläuft mit einem Abfluss aus dem Untersuchungsgebiet über die südwestliche Modellgrenze. Das schematisierte Profil zeigt wie das Grundwasser aus dem Wiederergänzungsgebiet kommend mehrere Zehnermeter des oberen Grundwasserleiters durchfließt bevor es den unteren Grundwasserleiter erreicht. Das Grundwasser braucht je nach Porosität und Permeabilität mehrere Dekaden oder mehrere hundert Jahre, um 30 Meter zurück zu legen.

Bei der Studie "Geochemische und isotopenchemische Charakterisierung der Grundwässer des Pliozäns von Wissembourg/Bad Bergzabern 1999 – 2010" (W. Kloppmann, 2011) wurden die aus den Beobachtungsbrunnen G (in der Nähe von H) und A entnommenen Grundwässer analysiert. Sie enthalten CFC und SF₆, was beweist, dass junge, aus Infiltrationen von vor weniger als 60 Jahren stammende Grundwässer vorliegen:

Ein Teil des Grundwassers des unteren Grundwasserleiters infiltriert auch durch den mittleren Grundwasserleiter im Norden des Untersuchungsgebietes, wo das durchschnittliche Niveau auf einen höheren Grundwasserstand als bei dem unteren Grundwasserleiter hinweist. Die Modellberechnungen zeigen am Niveau der Messstelle H eine Verweildauer von 70 Jahren an, die der Infiltrationsdauer von der Oberfläche bis zum unteren Grundwasserleiter entspricht.

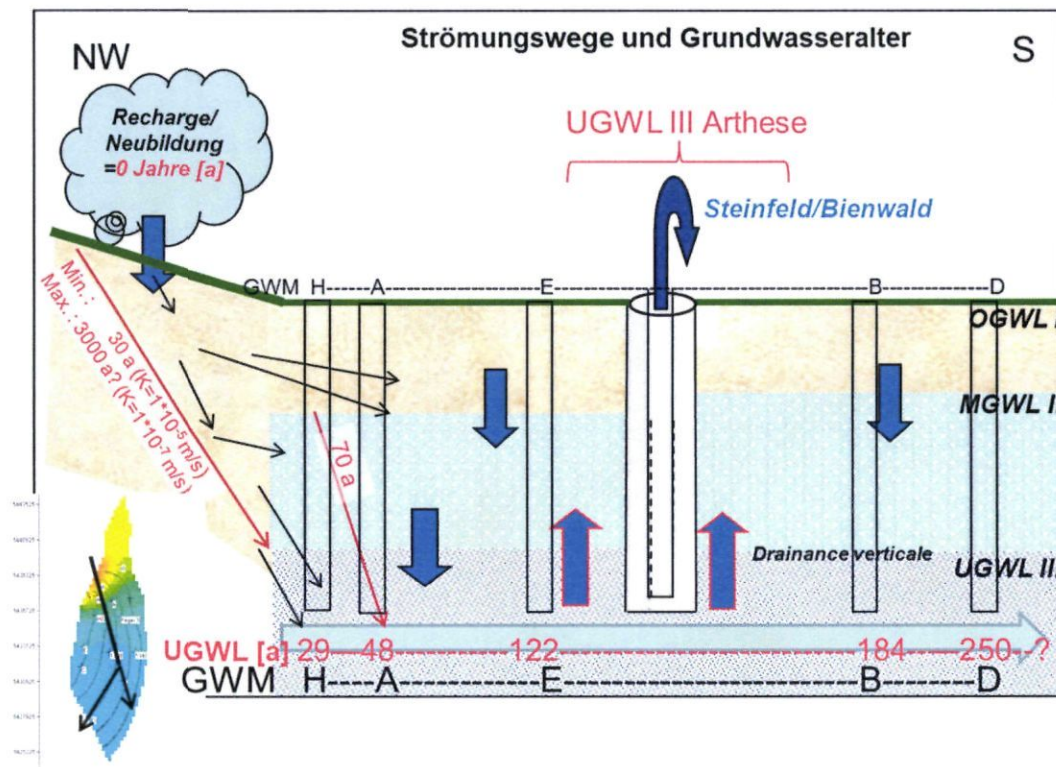


Abbildung 73: Schematisches Profil der Perkolations- und Verweilzeiten im unteren GWL (Zeit in Jahren)

Nachdem das Grundwasser den unteren Grundwasserleiter erreicht hat, fließt es den Modellberechnungen entsprechend mit einer höheren Geschwindigkeit. Die relativen Alter im Innern des tiefen Grundwasserleiters sind in der Skala unten im Schema angegeben: das Alter nimmt in südlicher und dann in südwestlicher Fließrichtung zu. Dem Modell zufolge liegen die Alter bei den am weitesten stromabwärts gelegenen Piezometern bei circa 200 Jahren. An der SW Grenze des Modells entlang werden Grundwasseralter von 300 Jahren erreicht.

Die Entnahmen im unteren Grundwasserleiter bewirken eine stärkere Drainage vom mittleren zum tiefen Grundwasserleiter; folglich gelangen jüngere Grundwässer in den unteren Grundwasserleiter. Gleichzeitig kehrt sich der Zufluss vom Süden um, sodass Wasser von der südwestlichen Grenze des Untersuchungsgebietes, von wo eher ältere Wässer kommen, zufließt.

Die Datierung der Grundwässer mit der C14-Methode, auch Radiokohlenstoffdatierung genannt, bestätigt das relative Alter, das von Norden nach Süden zunimmt. Doch sind die auf diese Weise berechneten Alter 10 bis 20 Mal höher als diejenigen, die mit dem Grundwassermodell berechnet wurden. Diese Datierungen werden im Bericht von W. Kloppmann (2011) behandelt.

Dies kann durch die komplexe Struktur der Aquifergeometrie bedingt sein, die im Grundwassermodell stark vereinfacht ist: in dieser (komplexen mehrschichtigen) "Blätterteig"-Struktur können Grundwässer in gering durchlässigen Bereichen länger gespannt bleiben, später dann freigesetzt werden und weiter fließen. Das durchschnittliche Grundwasseralter ist demnach höher als das der unterirdischen Wässer, die in den durchlässigeren Schichten fließen.

Das ausgehend von den Absenkungen durch Entnahmen kalibrierte Grundwassermodell zeigt die schnellsten Wege.

Anhand der unbeeinflussten Ganglinien kann mit Sicherheit gesagt werden, dass die Grundwässer unter natürlichen Umständen sehr langsam fließen und sich die Geschwindigkeit durch die zunehmenden Entnahmen seit 12 Jahren beschleunigt. Demzufolge werden diese Wässer vermutlich immer jünger. Die Studie von W. Kloppmann (2011) belegt im Übrigen eine Verjüngung der Grundwässer anhand eines Vergleichs der C14-Aktivitäten zwischen 1999 und 2010.

Die Sensitivitätsanalyse des Grundwassermodells nach den Eingangsvariablen, die von Radja Mouloudi im Rahmen seiner Dissertation "**Temps de résidence des eaux souterraines sub-récents : comparaison entre les méthodes de datation par traceurs et la modélisation hydrodynamique des transferts**" (Verweilzeit der sub-rezenten Grundwässer: Vergleich der Datierungsmethoden mit Tracer und hydrodynamischer Modellierung der Transferzeiten) durchgeführt hat, zeigt auf, dass die vom Modell berechneten Grundwasseralter bei wechselnder Porosität, Durchlässigkeit oder Wiederergänzung nur gering variieren.

In der Tabelle sind der Altersergebnisse nach diesen Eingangsvarianten angegeben:

Piézomètres	H	A	1339	B	D	C	E
Porosité 20%	30	52	142	250	250	190	138
Porosité 40%	40	60	152	260	262	210	144
K/10	55	78	163	270	280	190	160
K*10	15	28	102	170	180	150	90
Recharge +20%	60	88	155	240	250	190	130
Recharge -20%	20	38	90	120	140	90	70
Recharge 127 mm/an	40	68	140	240	240	190	170
Recharge 50 mm/an	60	100	180	320	340	230	200
K/10 + Recharge - 15%	70	108	205	360	370	220	200

Tabelle 1: Überblick über die im Anschluss an die Sensitivitätsanalyse ermittelten Alter beim unteren GWL

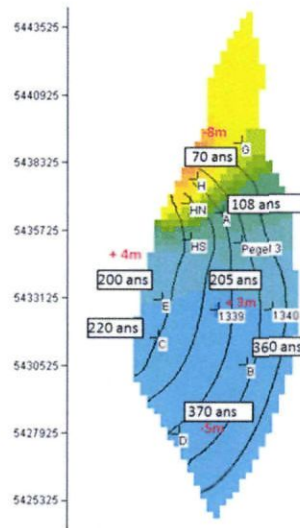


Abbildung 74: Altersverteilung im unteren GWL bei einer durch zehn geteilten Durchlässigkeit und einer um 15 % reduzierten Wiedergängung

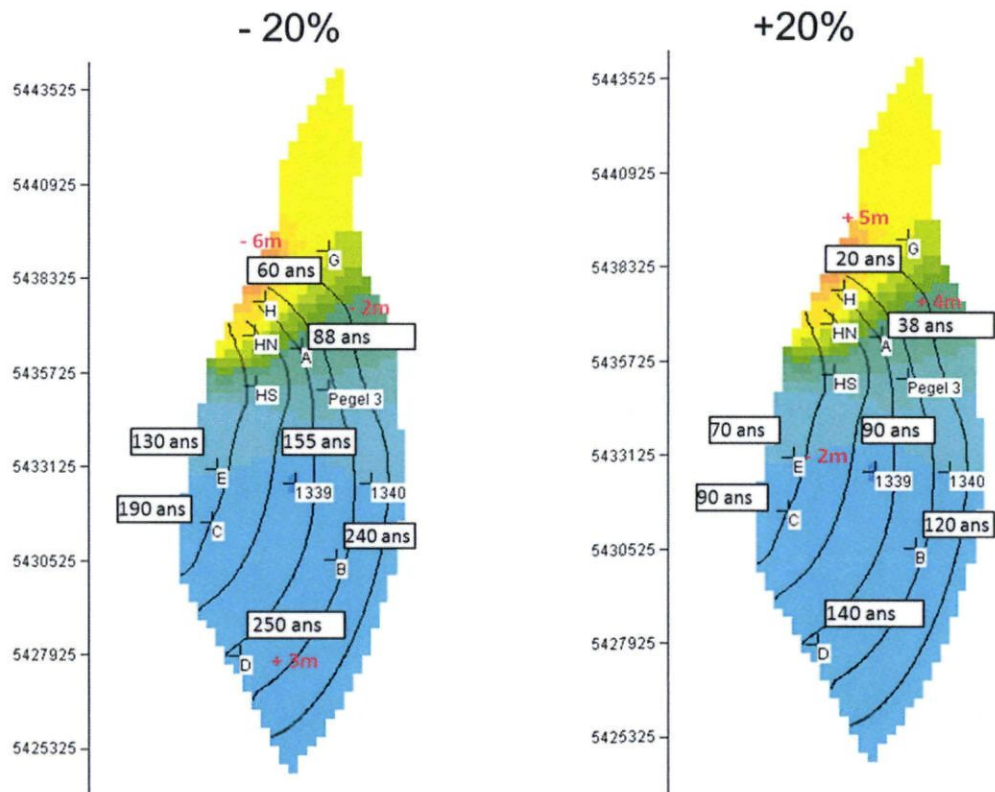


Abbildung 75: Altersverteilung im unteren GWL bei einer Wiedergängung von $\pm 20\%$

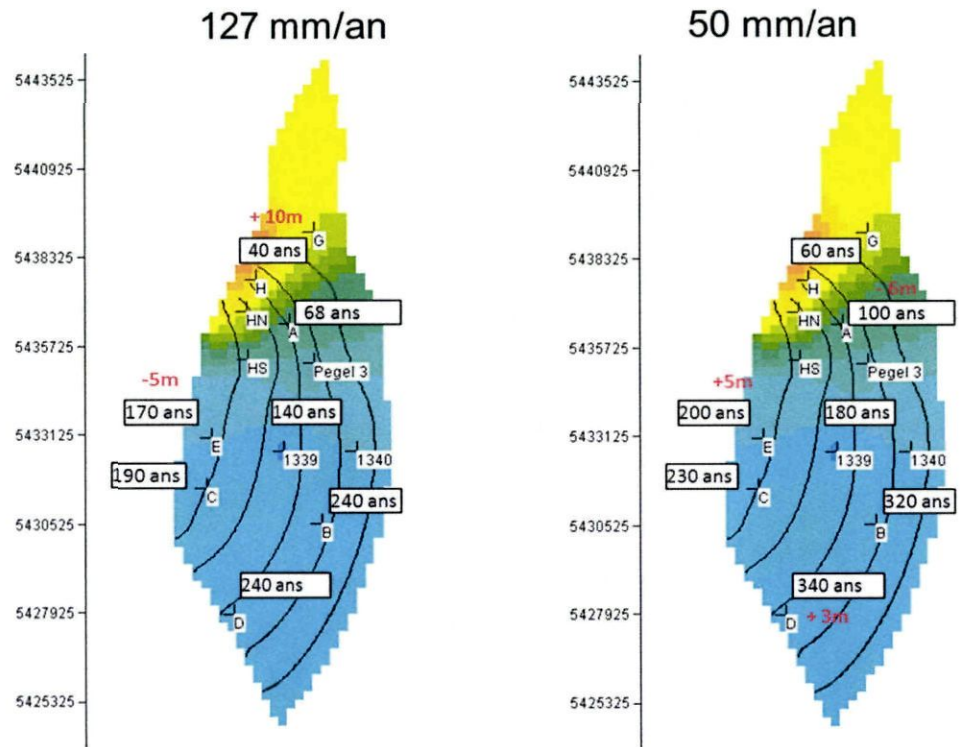


Abbildung 76: Altersverteilung im unteren GWL bei einer Wiederergänzung von 120 und 50 mm/Jahr

4. Schlussfolgerungen und Perspektiven

Die Simulationen des hydrodynamischen Modells mit Berechnung der 3 Szenarien erlauben folgende Schlussfolgerungen:

Im mittleren Grundwasserleiter MGWL können 300.000 m³/Jahr nachhaltig entnommen werden, ohne dass sich dies signifikant auf den oberen Grundwasserleiter OGWL auswirkt.

Verbrauchsspitzen in der Sommerzeit können durch parallele Entnahmen im mittleren Grundwasserleiter MGWL und im unteren Grundwasserleiter UGWL abgedeckt werden können, jedoch würde eine Bewirtschaftung über eine längere Zeit starke Absenkungen nach sich ziehen.

Es ist möglich, im unteren Grundwasserleiter UGWL dauerhaft ein Jahresvolumen von 300.000 m³/Jahr zu entnehmen. Bei Verbrauchsspitzen kann die Fördermenge vorübergehend erhöht werden, da sich der Grundwasserstand in dem stark gespannten Aquifer sehr schnell regeneriert. Dieser Zufluss kommt aus dem stromaufwärts gelegenen Bereich des unteren GWL und vom mittleren GWL.

Das hohe Alter des tiefen Grundwassers beweist, dass es im unteren wie auch im mittleren Grundwasserleiter gut geschützt ist.

Auf eine langzeitige Beobachtung der Grundwasserstände kann jedoch nicht verzichtet werden, auch wenn Grundwasservorräte vorhanden sind (Monitoring-Programm).

Diese Grundwasserleiter bilden einen Speicher, aus dem zweifellos größere Mengen entnommen werden können. Zur Bestätigung und Präzisierung dieser Aussage müssen die Grundwasserstände und Fördermengen jedoch fortlaufend überwacht werden (Pumpversuche bei den Entnahmebrunnen).

Es sollte ferner sichergestellt werden, dass eine Bewirtschaftung des mittleren Grundwasserleiters keine signifikante und großräumige Absenkung seines natürlichen Grundwasserspiegels nach sich zieht. Auf lokalerer Ebene sollte im Zusammenhang mit dem nächstgelegenen Fassungsbecken geprüft werden, ob ein vertikaler Transfer zum mittleren Grundwasserleiter stattfindet.

Der Altersberechnung zufolge kann das Grundwasser des unteren Grundwasserleiters je nach den gewählten Kenngrößen zwischen 200 und 400 Jahre alt werden. Die Sensitivitätsstudie des hydrodynamischen Modells zeigt je nach den Eingangsvariablen auf, dass das mit dem Modell berechnete Grundwasseralter bei unterschiedlicher Porosität, Durchlässigkeit und Neubildung nur geringen Schwankungen unterliegt.

Der derzeitige Kenntnistand über die Ausdehnung und die Rahmenbedingungen im Südwesten des untersuchten Gebietes erlaubt es nicht, den genauen Ursprung des südlichen Grundwassers und dessen Auslass zu bestimmen. Das hydrodynamische

Modell wurde deshalb vereinfacht und reicht nur bis zur südlichsten Messstelle. Die Piezometerhöhe entspricht dem Festpotential.

Die Sensitivität des Modells im Verhältnis zu dem an der südwestlichen Grenze vorgegebenen Grundwasserstand ist gering, auch wenn man das "pessimistische" Szenario einer während 3 Jahren beobachteten und auf einen Zeitraum von 30 Jahren übertragenen Trockenperiode und ein unteres Niveau bei der Festpotentialgrenze im Süden des Modells in Betracht zieht.

5. Bibliografie

Kloppmann W. (2000) – INTERREG II. Caractérisation géochimique et isotopique des eaux du Pliocène de Wissembourg/Bad Bergzabern. Geochemische und isotopenchemische Charakterisierung der Grundwässer des Pliozäns von Wissembourg/Bad Bergzabern. Rap. BRGM RP -50432-FR, 68 p., 11 Abbildungen.

Schomburgk.S., Amraoui.N., Elsass.P., Kloppmann.W. (2001) INTERREG II. Modélisation de la nappe profonde du Pliocène de Wissembourg/Bad Bergzabern. Modellierung des tieferen Aquifers des Pliozäns von Wissembourg/Bad Bergzabern. Rapport BRGM/RP-50724-FR.

Schomburgk.S., Hamm.V (2008) Modélisation de la nappe profonde du Pliocène de Wissembourg/Bad Bergzabern. Modellierung des tieferen Aquifers des Pliozäns von Wissembourg/Bad Bergzabern. Phase 2 : 2007. Rapport final - Endbericht. Rapport BRGM/RP-56610-FR.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Alsace
15, rue du Tanin,
BP 70177 - Lingolsheim
67834 – Tanneries Cedex - France
Tél. : 03 88 77 48 90 – Fax 03.88.76.12.26