

Bouzelboudjen M., Kiraly L., Kimmeier F., Zwahlen F. (1997). Représentation schématique des écoulements souterrains en Suisse. Profils hydrogéologiques issus de modèles mathématiques 3-D à éléments finis. Planche 8.3. de l'Atlas Hydrologique Suisse. Office Fédéral de la Topographie et Service Hydrologique et Géologique National, Berne.

<http://www.hades.unibe.ch/de/produkte/druckausgabe/boden-und-grundwasser/tafel-8-3>
http://www.hades.unibe.ch/downloads/01/content/Tafel_83.pdf

Geological and hydrogeological profiles, part 2: hydrogeology

*Bouzelboudjen M., Kiraly L., Kimmeier F., Zwahlen F.
Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel*

Introduction

Groundwater flow patterns in the subsurface of the Swiss Plateau are illustrated schematically (**fig. 1**). The main difficulty in representing graphically such patterns lies in the fact that groundwater flows in a three-dimensional space. In order to facilitate the reader's understanding, the main directions of flow are represented in vertical profiles and on maps (plane view) showing the lateral extension of some of the most important aquifers.

The system of groundwater flow

Water can be found in pores and fissures down to a depth of several thousands of metres below sea level: this water is called groundwater. Groundwater (**fig. 2**) flows from recharge areas, which are generally situated in elevated areas, towards discharge zones, which mainly correspond to the hydrographic system of lakes, streams and valleys. The average direction of groundwater flow is represented schematically by flowlines or flow fields. This direction as well as the velocity of groundwater flow is expressed in the simplest case by Darcy's law (**cf. «definitions»**).

According to theoretical studies by [9], flowlines represent the local, intermediate or regional flow systems that exist between recharge and discharge areas (**cf. fig. 3, which shows different flow systems within a theoretical, homogeneous hydrogeological basin**). One can understand intuitively that flow systems represent an ideal framework to study the thermal, chemical and isotopic properties of groundwater. Even an approximate knowledge of these properties can provide valuable information (even if it is qualitative) about the possible transport of dissolved substances in groundwater at various depths (e.g. as a result of rock- water interactions). **Figure 3** shows that the location of sources of dissolved substances with respect to local, intermediate or regional flow systems is an essential component to understand the distribution of dissolved substances within the aquifer. Moreover, it is important to notice that the hierarchic structure of flow systems results from the hierarchic structure of the hydrographic network, or, more precisely, of the discharge zones.

Direct measurements of the directions of groundwater flow at any point of the earth's crust are largely impossible. This means that flow fields need to be inferred in most cases by indirect methods, such as mathematical modelling (**cf. «definitions»**).

Geologische und hydrogeologische Profile, Teil 2: Hydrogeologie

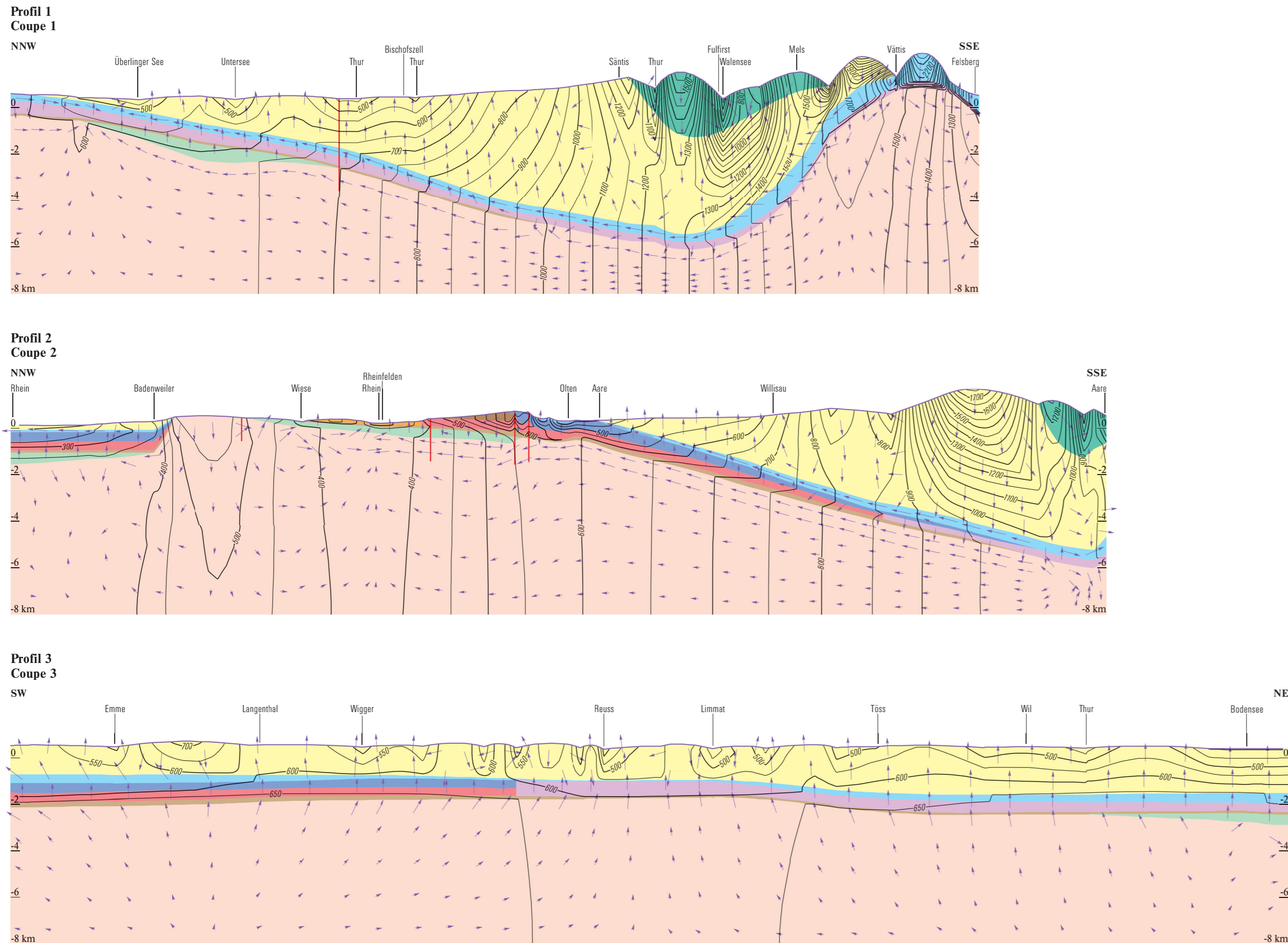
Coups géologiques et hydrogéologiques, 2ème partie: hydrogéologie

Autoren / Auteurs:
Mahmoud Bouzelboudjen, László Király, Francesco Kimmeier, François Zwahlen

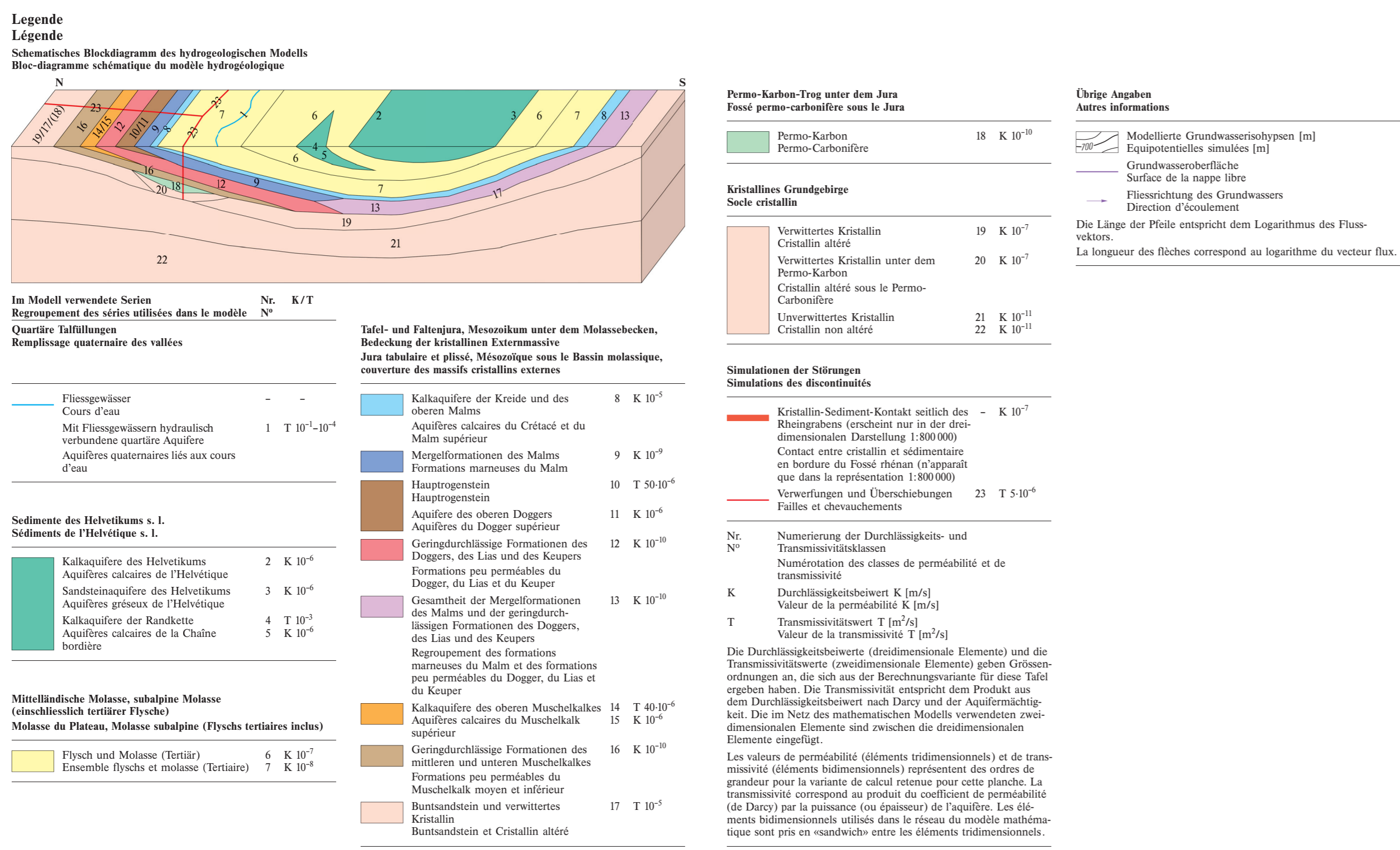
Abschluss der wissenschaftlichen Bearbeitung 1996
Elaboration scientifique achevée en 1996

Redaktion und kartographische Bearbeitung:
Géographisches Institut der Universität Bern - Hydrologie
Institut de géographie de l'Université de Berne - Hydrologie

Druck / Impression:
Bundesamt für Landestopographie, Wabern-Bern
Office fédéral de topographie, Wabern-Berne
© Landeshydrologie und -geologie, BUWAL, Bern 1997
Service hydrologique et géologique national, OFEFP, Berne 1997



Massstab der Profile 1:500 000, dreifach überhöht / Echelle des coupes 1:500 000, exagération verticale trois fois



Dreidimensionale Darstellung der simulierten Grundwasserströmung

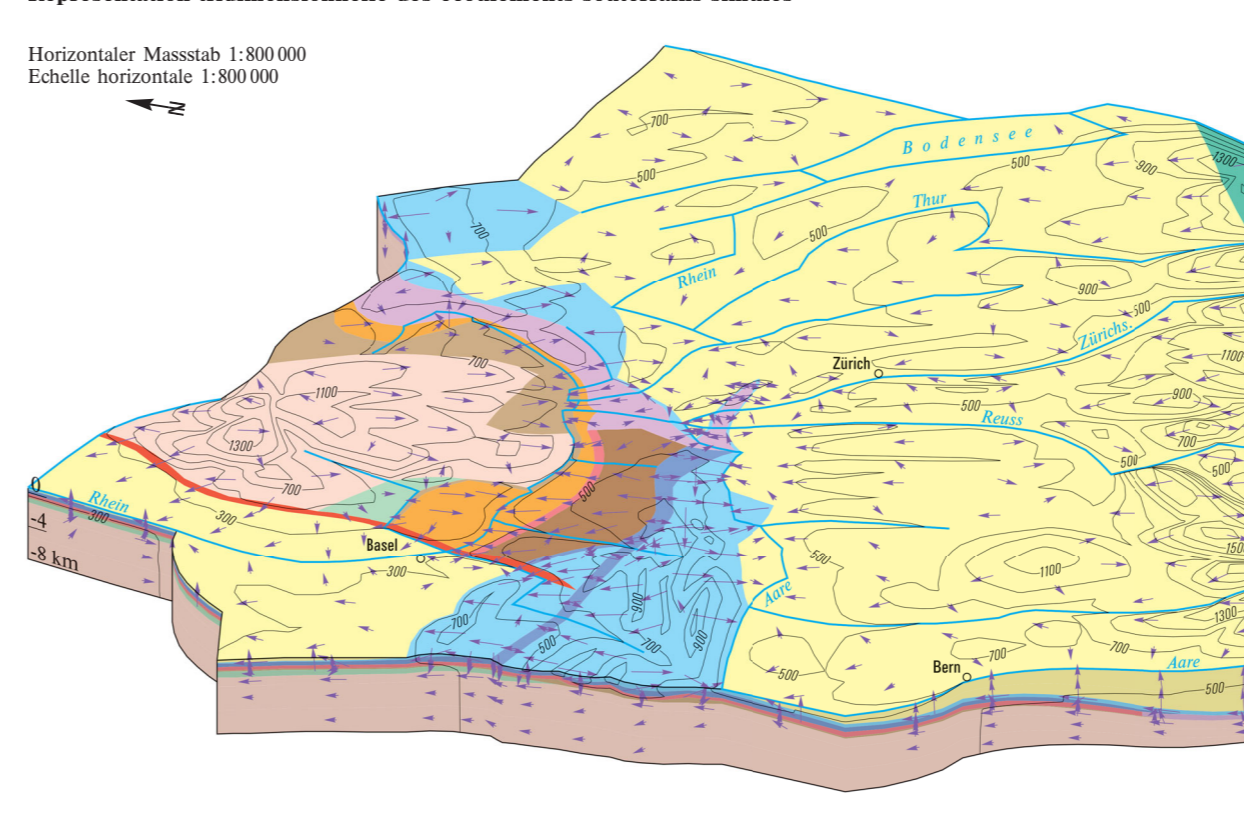
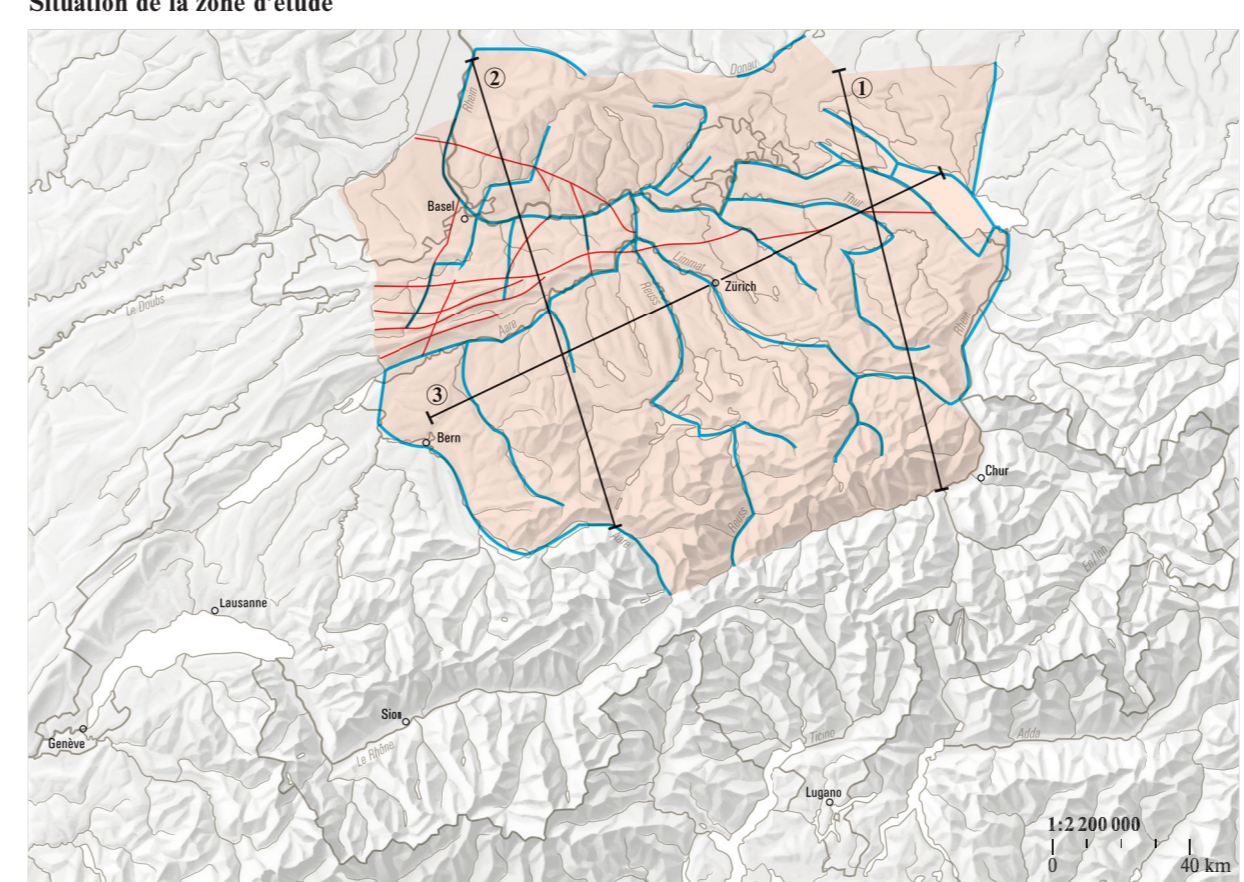
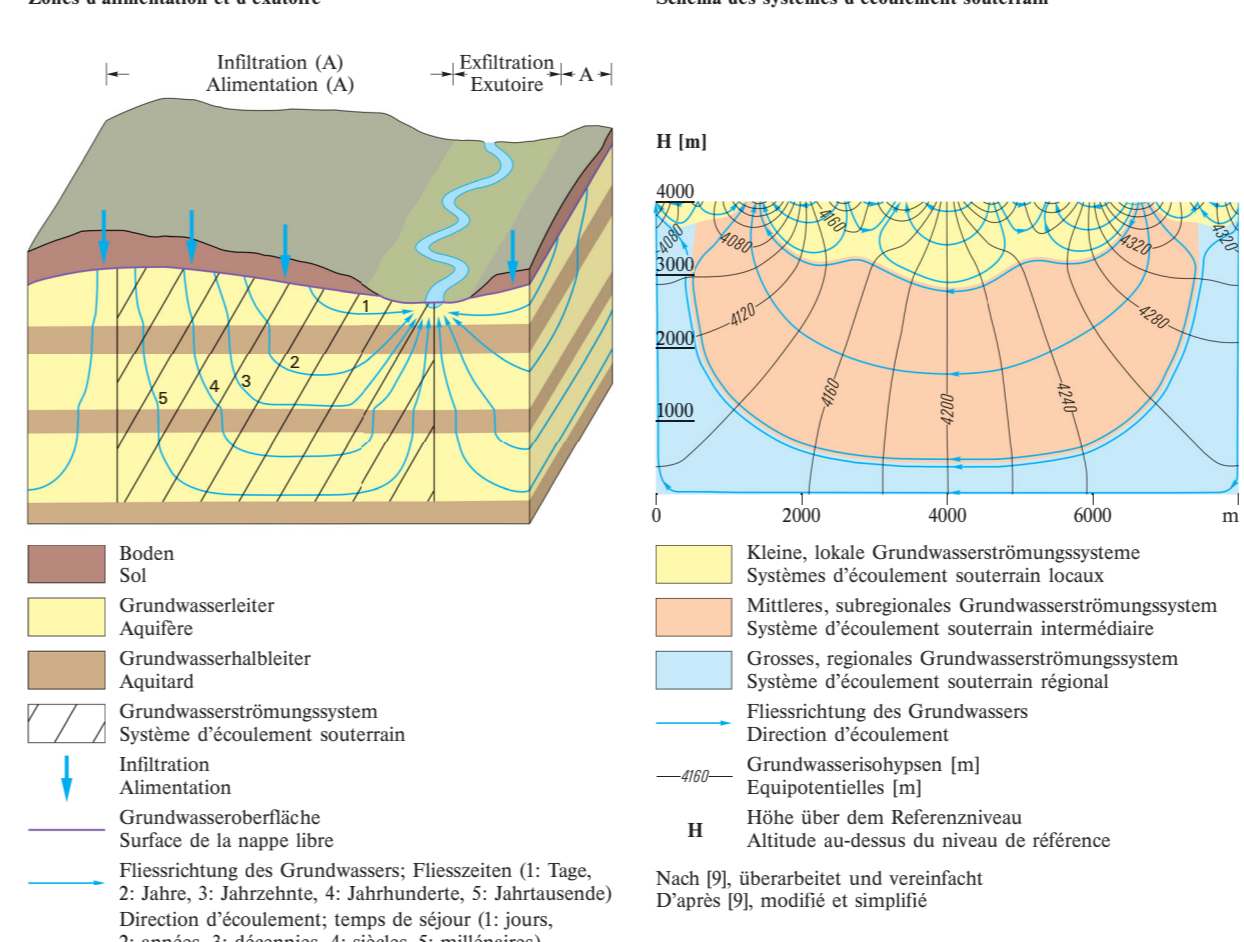


Fig. 1 Lage des Untersuchungsgebietes Situation de la zone d'étude



Definitionen

Fig. 2 Gebiete der Infiltration und der Exfiltration Zones d'alimentation et d'exutoire



Nach [7], überarbeitet D'après [7], modifié

Legende siehe Profile
Légende voir coupes

— Lage des dreidimensionalen Modells
— Situation du modèle tridimensionnel
— Fließgewässer im Modell
— Cours d'eau du modèle
— Verwerfungen und Überschiebungen im Modell
— Failles et chevauchements du modèle
— Lage der Profile
— Situation des coupes

Grundwasserisohypsen

Equipotentiell
Das Grundwasserisohypsen sind im zweidimensionalen Fall Linien und im dreidimensionalen Fall Flächen, welche Punkte mit gleichem hydraulischem Potential verbinden.

Potential hydraulique
Das hydraulische Potential in einem beliebigen Punkt «A» des Aquifers ist definiert als die Summe der Positionshöhe des Punktes «A» über einem Referenzniveau und der in diesem Punkt gemessenen Druckhöhe. Das hydraulische Potential ist nicht gleich dem Druck des Grundwassers im Punkt «A».

Hydraulischer Gradient
Der hydraulische Gradient ist ein Vektor, der an jedem Punkt des Aquifers senkrecht zu den Grundwasserisohypsen steht.

Flussvektor (Filtergeschwindigkeit)
Der Flussvektor ist das Produkt des hydraulischen Gradienten und der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters (Darcy-Gesetz).

Prinzip der «Finite-Elemente-Methode»

Principe des modèles mathématiques à «éléments finis»
Das Modellgebiet wird in sogenannte «finite Elemente» mit einfachen geometrischen Formen aufgeteilt (siehe Schema).

Das Modellgebiet wird in sogenannte «finite Elemente» mit einfachen geometrischen Formen aufgeteilt (siehe Schema). Die Form der Elemente ist durch die Position der auf den Elementseiten liegenden Knotenpunkte definiert. Jedem Element wird ein Durchlässigkeits- und ein Speicherkoeffizientwert zugeordnet.

Sans subdiviser la région d'écoulement en «éléments finis», de géométrie relativement simple (voir schéma), chaque élément étant défini par la position d'un certain nombre de «nœuds» (points sur les arêtes). En attribuant à chaque élément une perméabilité et un coefficient d'emmagasinement, et en intégrant l'équation différentielle sur chaque élément, on obtient autant d'équations linéaires qu'il y a de nœuds dans le modèle (généralement entre 1000 et 200 000). En résolvant le système d'équations [4], on calcule, pour chaque nœud, soit le potentiel hydraulique (là où le potentiel est imposé), soit le débit entrant ou sortant (là où le potentiel est imposé). Les valeurs de potentiel ou de débit imposées sont appelées «conditions aux limites». Sans l'imposition des conditions aux limites, il est impossible de simuler les écoulements souterrains.

**Geologische und hydrogeologische Profile,
Teil 2: Hydrogeologie**

**Coupes géologiques et hydrogéologiques,
2^{ème} partie: hydrogéologie**

**Profili geologici e idrogeologici,
parte 2: idrogeologia**

**Geological and Hydrogeological Profiles,
Part 2: Hydrogeology**

Autoren / Auteurs / Autori / Authors:
**Mahmoud Bouzelhoudjen, László Király,
 Francesco Kimmeier, François Zwahlen**
 Zentrum für Hydrogeologie, Geologisches Institut
 der Universität Neuenburg, Neuenburg
 Centre d'hydrogéologie, Institut de géologie
 de l'Université de Neuchâtel, Neuchâtel



Fig. 4
Simulierte hydraulische Potentiale an der Oberfläche des Malm
Potentiels hydrauliques simulés à la limite supérieure du Malm

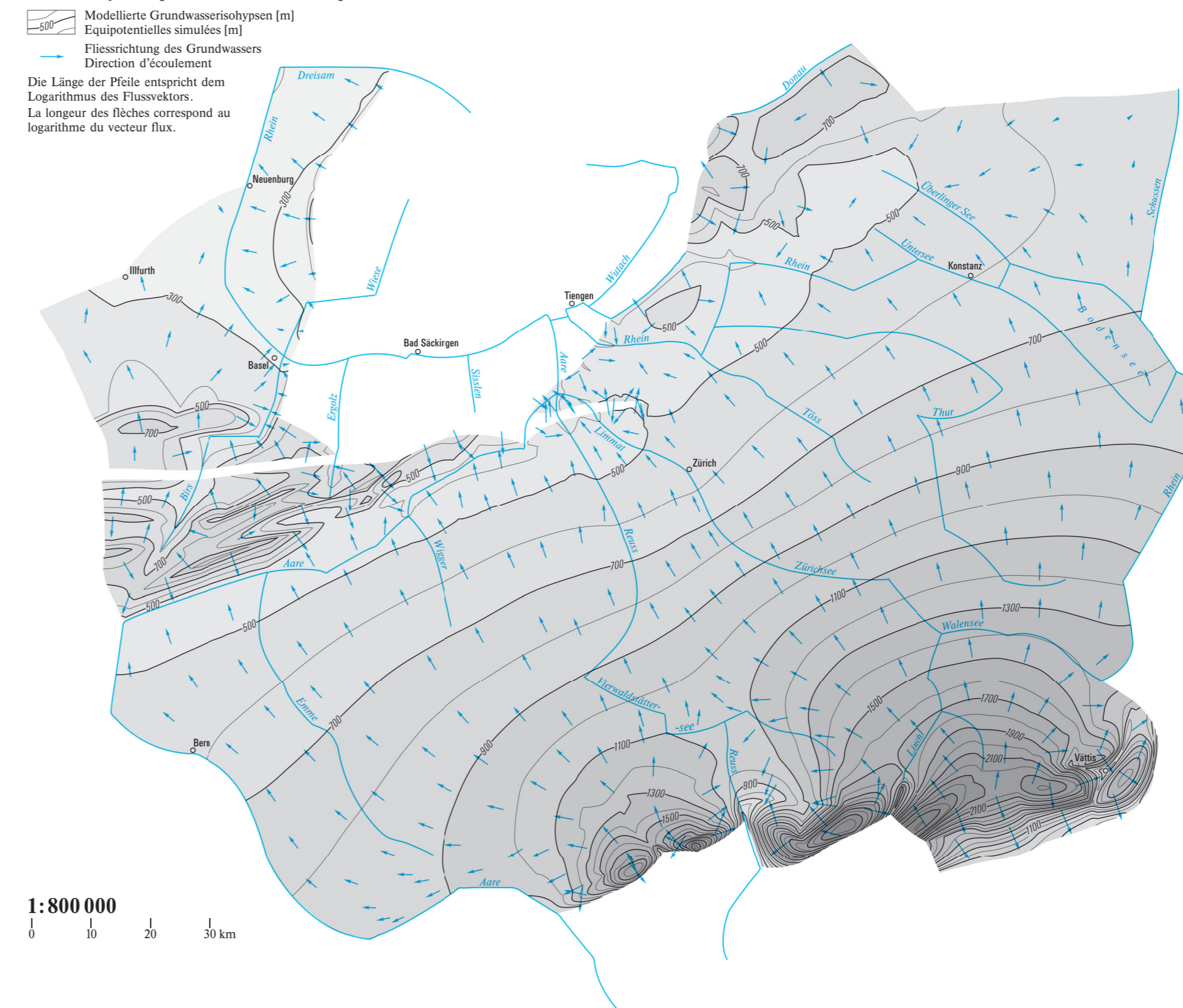
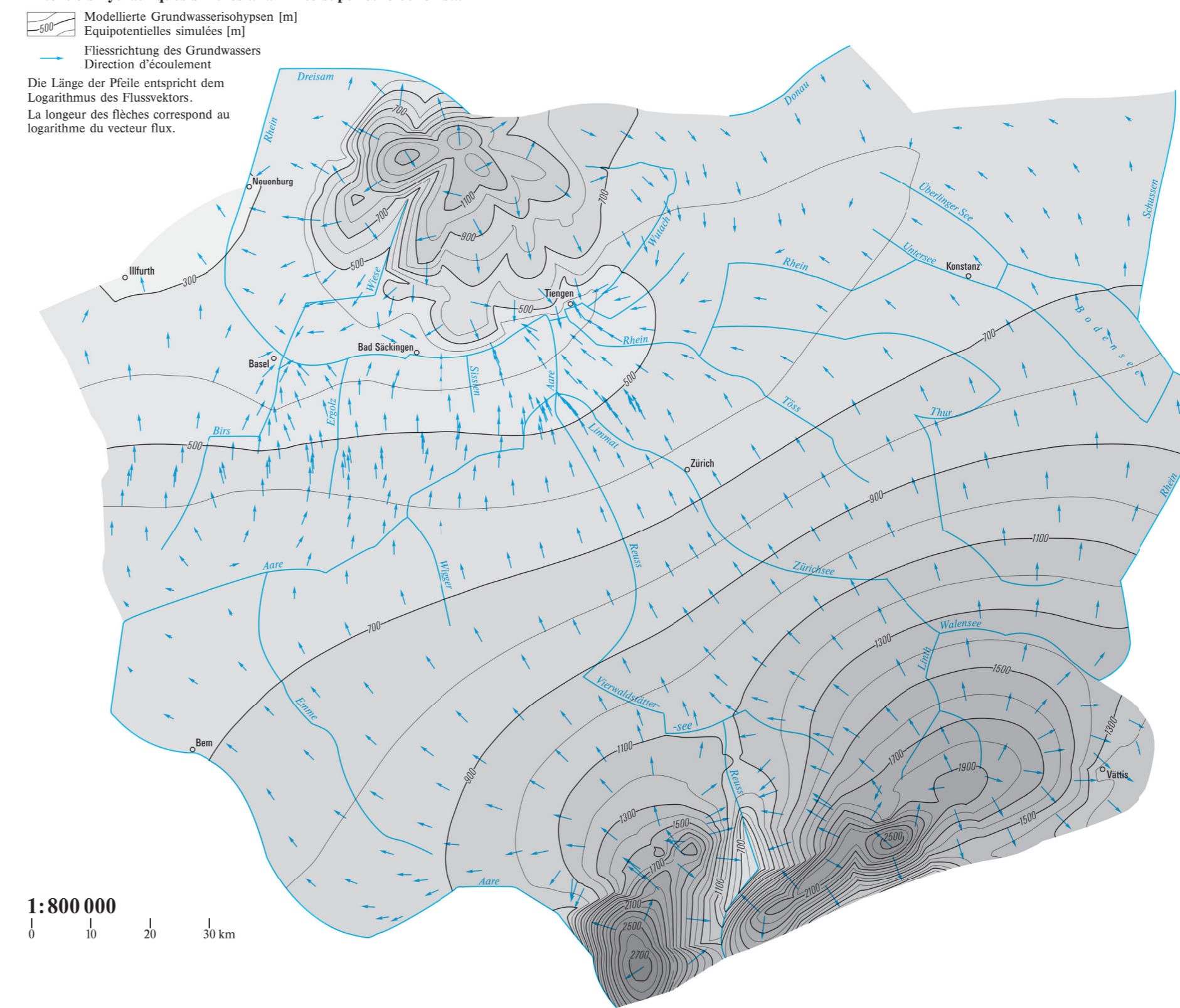


Fig. 5
Simulierte hydraulische Potentiale an der Oberfläche des Kristallins
Potentiels hydrauliques simulés à la limite supérieure du Cristallin



Der Malmaquifer ist ein zentrales Element des tiefen Grundwasserströmungssystems. Die Infiltrationsgebiete liegen im Süden (Aufschlussgebiet, siehe dreidimensionale Darstellung 1:800 000), der Grundwasserfluss ist nach Norden in Richtung der regionalen Vorfluter ausgerichtet (Raum Konstanz in Figur 4 und Bereich der Aare in Profil 2).

L'aquifère du Malm joue un rôle important dans la circulation profonde des eaux souterraines du bassin. Les zones d'alimentation sont situées au sud (zone d'affleurement dans la représentation tridimensionnelle 1:800 000) et les eaux souterraines s'écoulent vers les exutoires régionaux situés au nord (région de Constance sur la figure 4 et région de l'Aar dans la coupe 2).

Die Infiltrationsgebiete des verwitterten Kristallins liegen im Aar- und im Schwarzwaldmassiv (siehe dreidimensionale Darstellung 1:800 000). Die diese Horizonte überlagernden Schichten sind sehr geringdurchlässig; daher ist eine Infiltration ausserhalb der beiden Massive ausgeschlossen. Demzufolge findet Exfiltration nur in den Flüssen statt, in denen das Kristallin aufgeschlossen ist (Profil 1). Im Alpengebiet kann Grundwasser vor allem im oberen Aaretal, in den Tälern der Reuss, des Rheins, der Linth sowie im «Fenster von Vättis» exfiltrieren. Im Schwarzwald liegen die Exfiltrationsgebiete in den Tälern der Wiesse und der Dreisam sowie des Rheins zwischen Bad Säckingen und Tengen. Aus Profil 2 geht hervor, dass das Grundwasser vom Süden her den Jura unterströmt und ins Rheintal exfiltriert. Der Vorfluter bildet die Grenze zwischen zwei regionalen Grundwasserströmungssystemen im Norden und Süden. Im Nordwesten fliessen die Kristallin-Grundwässer aus dem modellierten Gebiet ab (Region Neuenburg am Rhein / Illfurth). Unter der Molasseüberdeckung verläuft die Grundwasserströmung im Kristallin bis zur Juraauptüberschiebung nahezu horizontal. Je weiter man sich der Grundwasserscheide zwischen Süd und Nord nähert, umso bedeutender wird die vertikale Komponente der Grundwasserströmung im unverwitterten Kristallin (Profil 2, nördlich von Olten). Im Bereich des Rheintales drainiert die verwitterte Kristallinoberfläche die anderen, geringer verwitterten Kristallinhorizonte (Profil 2, Region Rheinfelden). Profil 2 verdeutlicht den Charakter des Rheintales als regionales Exfiltrationsgebiet.

Les zones de recharge de la partie supérieure altérée du Cristallin se trouvent dans le massif de l'Aar et dans celui de la Forêt Noire (voir représentation tridimensionnelle 1:800 000). Comme les formations qui surmontent la partie supérieure du Cristallin sont très peu perméables, l'alimentation de cette série géologique ne peut se faire en dehors des deux régions citées. Par conséquent, la décharge s'effectue en surface dans les points bas où affleure le Cristallin, c'est-à-dire dans les vallées (coupe 1). Dans les Alpes, cette décharge est possible principalement dans le cours supérieur de l'Aar, de la Reuss, du Rhin, de la Linth, ainsi qu'à la «fenêtre de Vättis». Dans la Forêt Noire, la décharge s'effectue dans les vallées de la Wiesse, de la Dreisam et du Rhin, entre Bad Säckingen et Tengen. La coupe 2 montre que les eaux provenant du sud passent sous le Jura et se déversent dans la vallée du Rhin. Cette zone d'exutoire constitue une limite de séparation des systèmes d'écoulement souterrain régionaux provenant du sud et du nord. Dans la partie nord-ouest, les eaux souterraines du Cristallin quittent la région modélisée (secteur Neuenburg am Rhein / Illfurth). Sous le bassin molassique, les lignes d'écoulement dans le Cristallin sont pratiquement parallèles jusqu'au chevauchement principal du Jura. Au fur et à mesure que l'on approche de la limite de partage des eaux entre le sud et le nord, les flux verticaux dans la partie non altérée du Cristallin deviennent importants (coupe 2, au nord de Olten). Dans la région proche de l'exutoire de la vallée du Rhin, la partie supérieure altérée du Cristallin draine les autres parties du Cristallin peu altéré (coupe 2, région de Rheinfelden). La coupe 2 met en évidence le rôle de la vallée du Rhin comme zone d'exutoire régional.

Groundwater flow in large heterogeneous basins

Large hydrogeological basins are constituted of several superimposed aquifers, separated by geological formations of relatively low permeabilities. The delimitation of the different flow systems is far more difficult to realise for a heterogeneous system than for a homogeneous case as represented in **figure 3**; however, flux vectors provide valuable indications about groundwater flow paths and hydraulic exchanges between the different geological formations. Hydraulic relationships between two superimposed aquifers can vary locally: an aquifer can «feed» the underlying one at some point and conversely elsewhere. These relationships, which constitute in fact the flow field, will be determined by the structure of the basin as defined by the spatial distribution of the rock permeabilities [3], and by the boundary conditions, as defined by the locations of the recharge and discharge areas. Theoretical two-dimensional cases allow for an easier understanding of flow systems and their usefulness in the case of hydrogeological studies [1], but it would be even more important to obtain a wider knowledge about three-dimensional flow patterns in real aquifers and find out how to reconstruct and represent them in real systems.

Groundwater flow between the Aar and the Black Forest massifs

The hydrogeological profiles presented here illustrate in a schematic way groundwater flow in the subsurface of the Swiss Plateau, between the massifs of the Aar and the Black Forest. Such profiles illustrate three-dimensional flow fields inside a large volume of terrain and represent but one of the numerous solutions (**cf. legend, table 1 of map 8.2**) of the mathematical modelling realised in an earlier study [5].

The representation of flow fields is quite easy for theoretical two-dimensional cases, because flow vectors do not have a component perpendicular to the plane of representation. This is not the case for real systems of large dimensions, because it is practically impossible to find a plane of representation that would not be oblique to the vectors of flux, at some point or other. Furthermore, aquifers whose thicknesses are small relative to their lateral extent, for example a few metres compared to several hundred kilometres, are particularly difficult to represent either as block diagrams or as vertical profiles. We have therefore decided to present the results by projecting the vectors of flux onto straight vertical profiles, or onto maps corresponding to the lateral extension of some particularly important aquifers. This requires more attention from the reader, because a component of flow perpendicular to the plane of representation is associated to each vector. Transferring the real system to a hydrogeological model requires several simplifications of the geometry of the principal geological formations and the hydrogeological boundary conditions chosen to set the limits of the model.

The regional model used as the base for the hydrogeological profiles presented here is limited by the Aar Massif in the south and the Black Forest in the north; the Lake Constance represents the eastern boundary and the Aare river is used as the western limit. The lateral

boundaries chosen for the model correspond to the limits of the regional flow systems which can reach considerable depths (the Rhine, Rhône and Aare valleys). The initial goal of this model was to study deep flow systems within the crystalline basement of the northern part of Switzerland [5,6,8,10]. The upper boundary of the model represents the surface of the unconfined water table. It has been estimated by means of hydrogeological and topographical maps (three-dimensional representation). Hydrogeological conditions at the boundaries are based upon observed values of hydraulic potentials or flow rates (infiltration, exfiltration), or upon estimations. Such conditions represent in each case the hypotheses that have been introduced into the model. Subsequently, the coherence of these data will have to be verified by an analysis of the modelling results. The schematic block diagram (cf. legend) shows the simplified geological data and the three-dimensional reconstruction of the geometry of the formations as they were modelled.

Computations have been performed for a steady state flow regime, which means that the boundary conditions do not vary with time. The program FEM301 [4] has been used to compute the field of hydraulic potentials and flow rates in the modelled area. Modelling results are then compared to available measurements. It is interesting to notice that it was possible, to a certain extent, to verify the modelling results by deep drillings. Most particularly, measurements of the hydraulic potentials at various depths in these boreholes have revealed upwellings close to the regional discharge areas [2]. On the basis of modelling results, it was possible to illustrate schematically the deep flow systems of the most important aquifers between the Aar Massif and the Black Forest. An approximate but plausible representation of the groundwater circulation in deep aquifers was obtained thanks to the model. We are able to distinguish between the hydraulic relationships of two superimposed aquifers in various regions (cf. profiles), as demonstrated for theoretical cases (cf. fig. 2,3).

The three-dimensional representation shows the outcrop zones of the different geological formations as well as the situation of recharge areas, which are characterised by high potentials, and discharge zones, which are characterised by low potentials in valleys represented by the hydrographic network.

Profile 3, which is approximately perpendicular to the other profiles, shows the local groundwater flow systems. Such systems constitute the main discharge zones in the bottoms of valleys and provide the predominant vertical fluxes in those regions.

Groundwater flow systems in the crystalline basement, the Muschelkalk and the Malm aquifers

Both as an illustration and example of groundwater circulation, three major Swiss aquifers are described: the crystalline basement, the Muschelkalk and the Malm. Flow conditions in the crystalline basement (fig. 5) and Malm (fig. 4) aquifers are illustrated by means of two maps and a brief text, while those of the Muschelkalk aquifer are discussed in the following paragraph.

The recharge and discharge zones of the Muschelkalk aquifer correspond to outcrop zones, which are the Alps in the south and the tabular Jura in the north, according to the three-dimensional representation. Because it is impossible to illustrate the results as profiles at this scale, we confine ourselves to making the following comment: In the Alps, groundwater from the Muschelkalk flows into the high valleys of the Aare, the Reuss and the Rhine rivers, as well as into the region of Vättis. In the north, groundwater discharges into the Rhine valley between Basel and Bad Säkingen, then into the Wutach valley. Between both areas, the upper part of the Muschelkalk aquifer is drained by downcutting valleys, such as the Sisslen, the Aare and the Rhine valleys.

Acknowledgements

The realisation of the present work, which is based on results of preceding studies carried out for Nagra (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste), was commissioned by the Swiss National Hydrological and Geological Survey, FOEFL.

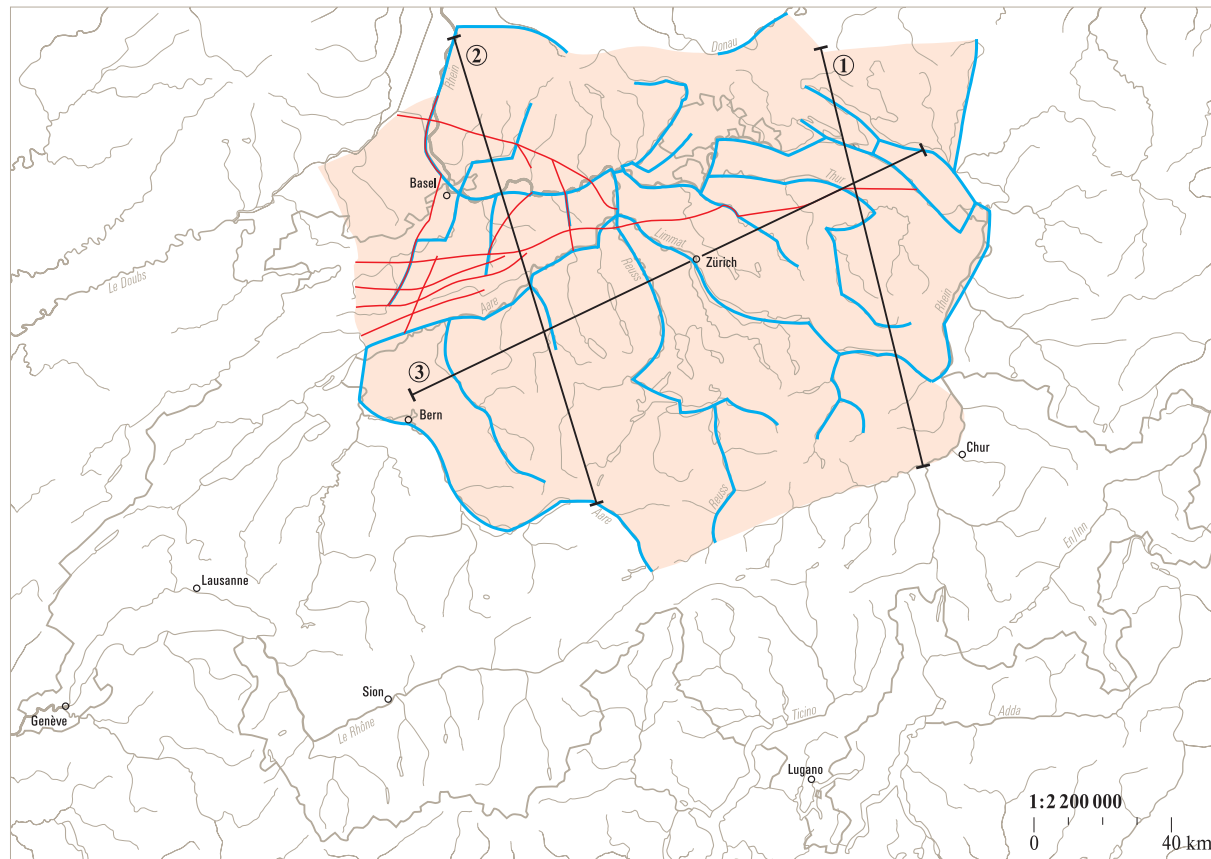
Bibliografia / References





- [1] **Bouzelboudjen, M. (1993):** Cartographie hydrogéologique et systèmes d'écoulement souterrain. Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel – Service hydrologique et géologique national. Rapport inédit, Berne.
- [2] **Hufschmied, P., Frieg, B. (1989):** Observation of hydraulic heads in the Nagra boreholes in Northern Switzerland. Nagra Bulletin, Special Edition 39-49, Baden.
- [3] **Király, L. (1970):** L'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de la perméabilité sur les systèmes d'écoulement. In: Bulletin der Vereinigung schweizerischer Petroleumgeologen und -ingenieure, 37/91:50–57, Zürich.
- [4] **Király, L. (1985):** FEM301 – A three-dimensional model for groundwater flow simulation. Nagra Technischer Bericht NTB 84-49, Baden.
- [5] **Kimmeier, F. et al. (1985):** Simulation par modèle mathématique des écoulements souterrains entre les Alpes et la Forêt Noire; Partie A: Modèle régional, Partie B: Modèle local (Nord de la Suisse). Nagra Technischer Bericht NTB 84-50, Baden.
- [6] **Nagra (1988):** Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988. Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. Nagra Technischer Bericht NTB 88-25, Baden.
- [7] **Skinner, B.J., Porter, S.C. (1991):** The dynamic earth: an introduction to physical geology. Second edition, New York.
- [8] **Thury, M. et al. (1994):** Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland. Synthesis of Regional Investigations 1981–1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Program. Nagra Technischer Bericht NTB 93-01, Baden.

[9] Tóth, J. (1995): Hydraulic continuity in large sedimentary basins. In: Hydrogeology Journal Volume 3, Nr. 4/1995:4–16, Hannover.

[10] Voborny, O. et al. (1992): Analysis of regional groundwater flow in crystalline rocks of Northern Switzerland: Results of a numerical model using an equivalent porous medium. Nagra Interner Bericht, Baden.

Fig. 1
Lage des Untersuchungsgebietes
Situation de la zone d'étude

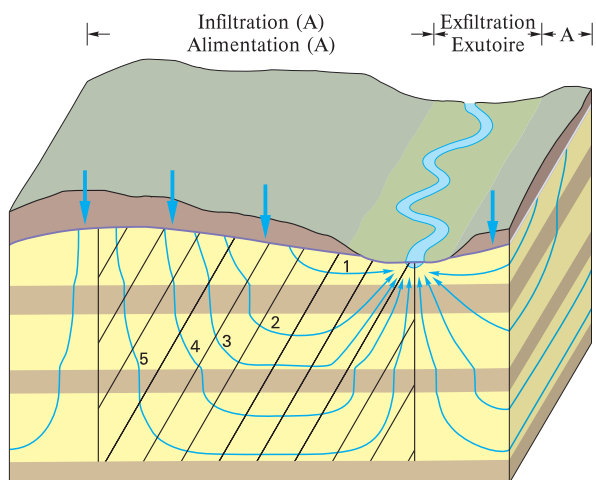


-  Lage des dreidimensionalen Modells
Situation du modèle tridimensionnel
-  Fließgewässer im Modell
Cours d'eau du modèle
-  Verwerfungen und Überschiebungen im Modell
Failles et chevauchements du modèle
-  Lage der Profile
Situation des coupes

Definitionen

Définitions

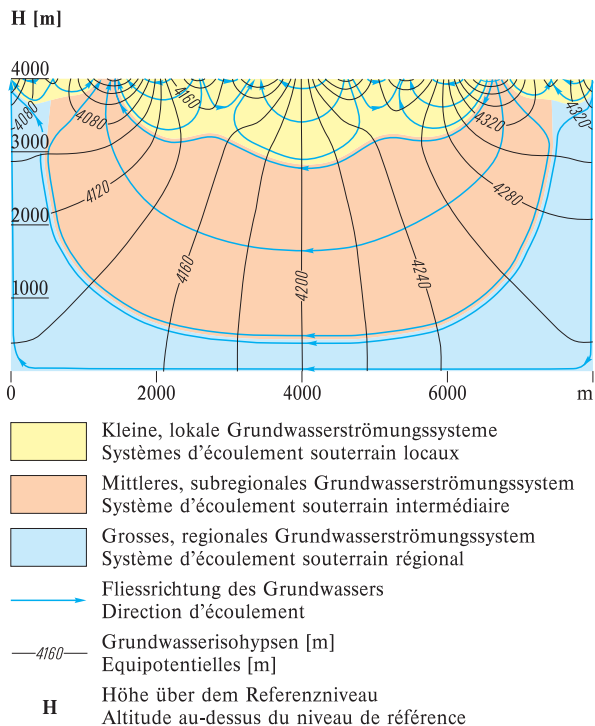
Fig. 2
Gebiete der Infiltration und der Exfiltration
Zones d'alimentation et d'exutoire



- Boden Sol
- Grundwasserleiter Aquifère
- Grundwasserhalbleiter Aquitard
- Grundwasserströmungssystem Système d'écoulement souterrain
- Infiltration Alimentation
- Grundwasseroberfläche Surface de la nappe libre
- Fliessrichtung des Grundwassers; Fliesszeiten (1: Tage, 2: Jahre, 3: Jahrzehnte, 4: Jahrhunderte, 5: Jahrtausende)
Direction d'écoulement; temps de séjour (1: jours, 2: années, 3: décennies, 4: siècles, 5: millénaires)

Nach [7], überarbeitet
D'après [7], modifié

Fig. 3
Schematische Grundwasserströmungssysteme
Schéma des systèmes d'écoulement souterrain



- Kleine, lokale Grundwasserströmungssysteme Systèmes d'écoulement souterrain locaux
- Mittleres, subregionales Grundwasserströmungssystem Système d'écoulement souterrain intermédiaire
- Grosses, regionales Grundwasserströmungssystem Système d'écoulement souterrain régional
- Fliessrichtung des Grundwassers Direction d'écoulement
- Grundwasserisohypsen [m] Equipotentielles [m]
- H** Höhe über dem Referenzniveau Altitude au-dessus du niveau de référence

Nach [9], überarbeitet und vereinfacht
D'après [9], modifié et simplifié

Grundwasserisohypsen Equipotentielles

Grundwasserisohypsen sind im zweidimensionalen Fall Linien und im dreidimensionalen Fall Flächen, welche Punkte mit gleichem hydraulischem Potential verbinden.

Les équipotentiels sont des lignes (cas bidimensionnel) ou des surfaces (cas tridimensionnel) reliant les points de même potentiel hydraulique.

Hydraulisches Potential Potentiel hydraulique

Das hydraulische Potential in einem beliebigen Punkt «A» des Aquifers ist definiert als die Summe der Positionshöhe des Punktes «A» über einem Referenzniveau und der im selben Punkt gemessenen Druckhöhe. Das hydraulische Potential ist nicht gleich dem Druck des Grundwassers im Punkt «A».

Défini en un point quelconque «A» de l'aquifère, le potentiel hydraulique est la somme de l'altitude de ce point au-dessus d'un niveau de référence et de la hauteur d'eau correspondant à la pression de l'eau souterraine en ce même point. Le potentiel hydraulique n'est pas égal à la pression de l'eau souterraine au point «A».

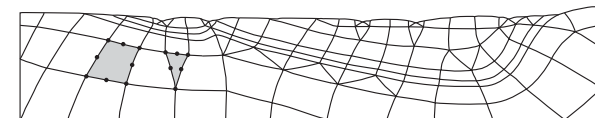
Hydraulischer Gradient Gradient hydraulique

Der hydraulische Gradient ist ein Vektor, der an jedem Punkt des Aquifers senkrecht zu den Grundwasserisohypsen steht. Le gradient hydraulique est un vecteur qui est perpendiculaire aux équipotentiels en tout point de l'aquifère.

Flussvektor (Filtergeschwindigkeit) Vecteur flux (vecteur vitesse de filtration)

Der Flussvektor ist das Produkt des hydraulischen Gradienten und der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters (Darcy-Gesetz). Le vecteur flux est le produit du gradient hydraulique par la perméabilité ou la conductivité hydraulique de l'aquifère (loi de Darcy).

Prinzip der «Finite-Elemente-Methode» Principe des modèles mathématiques à «éléments finis»

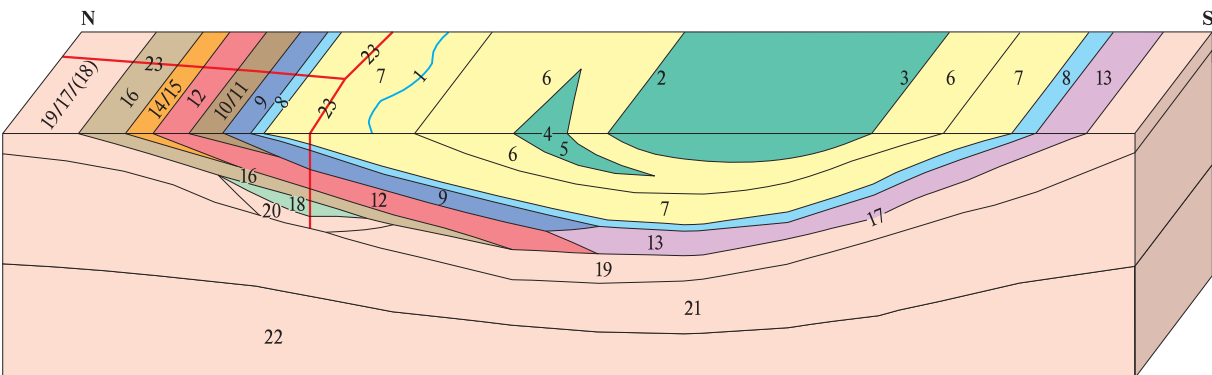


Das Modellgebiet wird in sogenannte «finite Elemente» mit einfachen geometrischen Formen aufgeteilt (siehe Schema). Die Form der Elemente ist durch die Position der auf den Elementseiten liegenden Knotenpunkte definiert. Jedem Element wird ein Durchlässigkeits- und ein Speicherkoeffizientwert zugeteilt. Integriert man die die Grundwasserströmung beschreibende Differentialgleichung in jedem Element, so ergibt sich daraus eine Anzahl linearer Gleichungen, welche der Zahl der Knotenpunkte im Modell entspricht (gewöhnlich zwischen 1000 und 200 000). Die Lösung des Gleichungssystems [4] liefert für jeden Knotenpunkt entweder das hydraulische Potential (bei Angabe der Infiltrations- oder Entnahmemengen) oder die Zu- und Abflüsse (bei Angabe der Potentiale). Potentiale, Infiltrations- und Entnahmemengen sowie Nullflussgrenzen werden als «Randbedingungen» bezeichnet. Ohne Randbedingungen kann man die Grundwasserströmung nicht simulieren.

On subdivise la région d'écoulement en «éléments finis», de géométrie relativement simple (voir schéma), chaque élément étant défini par la position d'un certain nombre de «noeuds» (points sur les arêtes). En attribuant à chaque élément une perméabilité et un coefficient d'emmagasinement, et en intégrant l'équation différentielle sur chaque élément, on obtient autant d'équations linéaires qu'il y a de noeuds dans le modèle (généralement entre 1000 et 200 000). En résolvant le système d'équations [4], on calcule, pour chaque noeud, soit le potentiel hydraulique (là où le débit est imposé), soit le débit entrant ou sortant (là où le potentiel est imposé). Les valeurs de potentiel ou de débit imposées sont appelées «conditions aux limites». Sans l'imposition des conditions aux limites, il est impossible de simuler les écoulements souterrains.



Legende

Schematisches Blockdiagramm des hydrogeologischen Modells
 Bloc-diagramme schématique du modèle hydrogéologique







Im Modell verwendete Serien	Nr.	K/T
Regroupement des séries utilisées dans le modèle	N°	

Quartäre Talfüllungen
 Remplissage quaternaire des vallées



	Fliessgewässer Cours d'eau	-	-
	Mit Fliessgewässern hydraulisch verbundene quartäre Aquifere Aquifères quaternaires liés aux cours d'eau	1	T 10^{-1} - 10^{-4}

Sedimente des Helvetikums s. I.
 Sédiments de l'Helvétique s. I.











	Kalkaquifere des Helvetikums Aquifères calcaires de l'Helvétique	2	K 10^{-6}
	Sandsteinaquifere des Helvetikums Aquifères gréseux de l'Helvétique	3	K 10^{-6}
	Kalkaquifere der Randkette Aquifères calcaires de la Chaîne bordière	4	T 10^{-3}
		5	K 10^{-6}

Mittelländische Molasse, subalpine Molasse
 (einschliesslich tertiärer Flysche)


Molasse du Plateau, Molasse subalpine (Flyschs tertiaires inclus)

	Flysch und Molasse (Tertiär)	6	K 10^{-7}
	Ensemble flyschs et molasse (Tertiaire)	7	K 10^{-8}





Tafel- und Faltenjura, Mesozoikum unter dem Molassebecken,
 Bedeckung der kristallinen Externmassive
Jura tabulaire et plissé, Mésozoïque sous le Bassin molassique,
 couverture des massifs cristallins externes

	Kalkaquifere der Kreide und des oberen Malm Aquifères calcaires du Crétacé et du Malm supérieur	8	K 10^{-5}
	Mergelformationen des Malm Formations marneuses du Malm	9	K 10^{-9}
	Hauptrogenstein Hauptrogenstein	10	T $50 \cdot 10^{-6}$
	Aquifere des oberen Doggers Aquifères du Dogger supérieur	11	K 10^{-6}
	Geringdurchlässige Formationen des Doggers, des Lias und des Keupers Formations peu perméables du Dogger, du Lias et du Keuper	12	K 10^{-10}
	Gesamtheit der Mergelformationen des Malm und der geringdurchlässigen Formationen des Doggers, des Lias und des Keupers Regroupement des formations marneuses du Malm et des formations peu perméables du Dogger, du Lias et du Keuper	13	K 10^{-10}
	Kalkaquifere des oberen Muschelkalkes Aquifères calcaires du Muschelkalk supérieur	14	T $40 \cdot 10^{-6}$
		15	K 10^{-6}
	Geringdurchlässige Formationen des mittleren und unteren Muschelkalkes Formations peu perméables du Muschelkalk moyen et inférieur	16	K 10^{-10}
	Buntsandstein und verwittertes Kristallin Buntsandstein et Cristallin altéré	17	T 10^{-5}



Permo-Karbon-Trog unter dem Jura
Fossé permo-carbonifère sous le Jura

	Permo-Karbon Permo-Carbonifère	18	K 10^{-10}
---	-----------------------------------	----	--------------

Kristallines Grundgebirge
Socle cristallin

	Verwittertes Kristallin Cristallin altéré	19	K 10^{-7}
	Verwittertes Kristallin unter dem Permo-Karbon Cristallin altéré sous le Permo-Carbonifère	20	K 10^{-7}
	Unverwittertes Kristallin Cristallin non altéré	21	K 10^{-11}
		22	K 10^{-11}

Simulationen der Störungen
Simulations des discontinuités




	Kristallin-Sediment-Kontakt seitlich des Rheingrabens (erscheint nur in der dreidimensionalen Darstellung 1:800 000) Contact entre cristallin et sédimentaire en bordure du Fossé rhénan (n'apparaît que dans la représentation 1:800 000)	-	K 10^{-7}
	Verwerfungen und Überschiebungen Failles et chevauchements	23	T $5 \cdot 10^{-6}$

Nr. N°	Numerierung der Durchlässigkeits- und Transmissivitätsklassen Numérotation des classes de perméabilité et de transmissivité
K	Durchlässigkeitsbeiwert K [m/s] Valeur de la perméabilité K [m/s]
T	Transmissivitätswert T [m ² /s] Valeur de la transmissivité T [m ² /s]

Die Durchlässigkeitsbeiwerte (dreidimensionale Elemente) und die Transmissivitätswerte (zweidimensionale Elemente) geben Grössenordnungen an, die sich aus der Berechnungsvariante für diese Tafel ergeben haben. Die Transmissivität entspricht dem Produkt aus dem Durchlässigkeitsbeiwert nach Darcy und der Aquifermächtigkeit. Die im Netz des mathematischen Modells verwendeten zweidimensionalen Elemente sind zwischen die dreidimensionalen Elemente eingefügt.

Les valeurs de perméabilité (éléments tridimensionnels) et de transmissivité (éléments bidimensionnels) représentent des ordres de grandeur pour la variante de calcul retenue pour cette planche. La transmissivité correspond au produit du coefficient de perméabilité (de Darcy) par la puissance (ou épaisseur) de l'aquifère. Les éléments bidimensionnels utilisés dans le réseau du modèle mathématique sont pris en «sandwich» entre les éléments tridimensionnels.

Übrige Angaben
Autres informations

	Modellierte Grundwasserisohypsen [m] Equipotentiels simulés [m]
	Grundwasseroberfläche Surface de la nappe libre
	Fliessrichtung des Grundwassers Direction d'écoulement

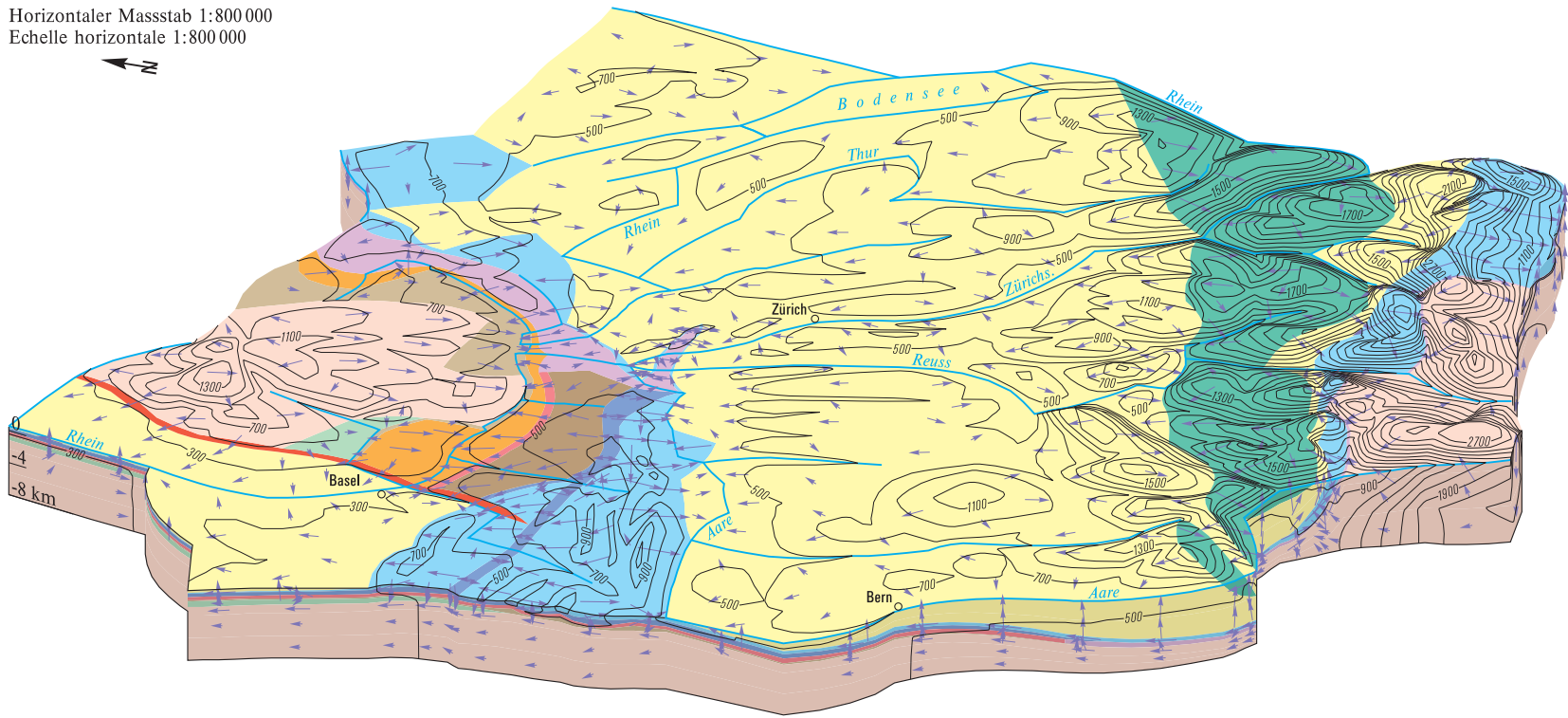
Die Länge der Pfeile entspricht dem Logarithmus des Flussvektors.
 La longueur des flèches correspond au logarithme du vecteur flux.

Dreidimensionale Darstellung der simulierten Grundwasserströmung

Représentation tridimensionnelle des écoulements souterrains simulés

Horizontaler Massstab 1:800 000

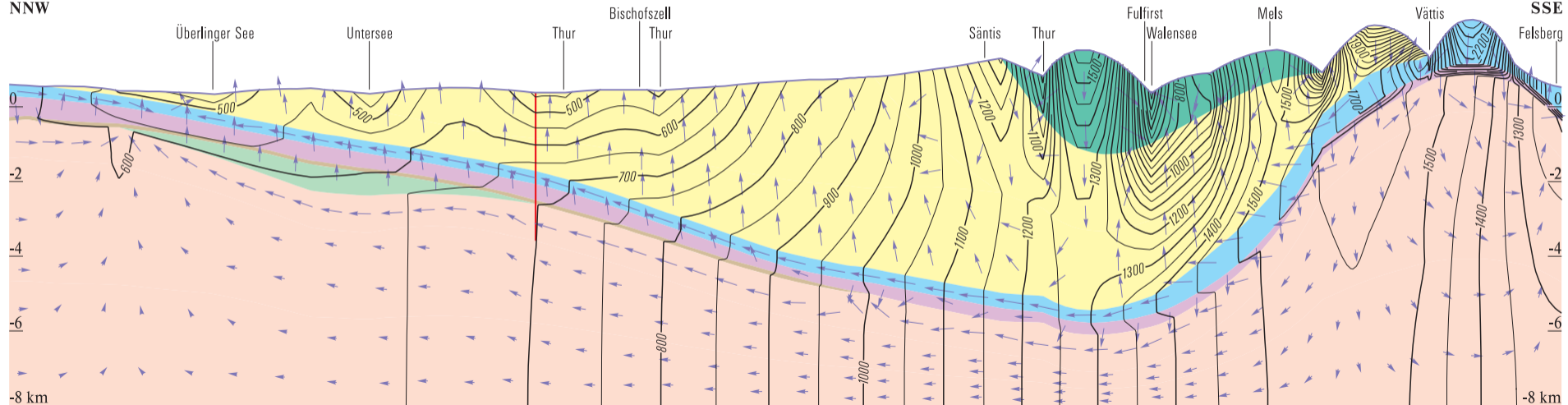
Echelle horizontale 1:800 000



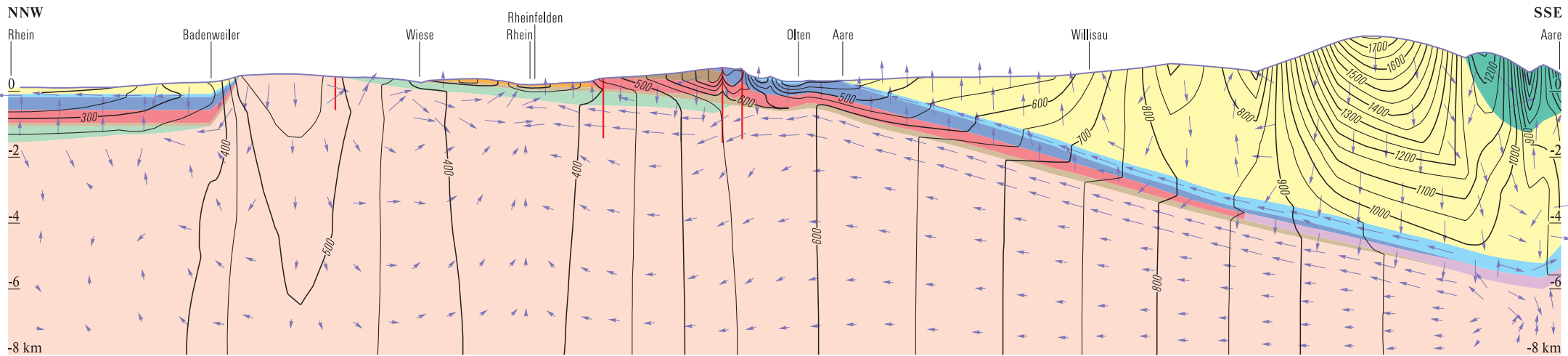
Profil 1 Coupe 1

NNW

SSE



Profil 2 Coupe 2

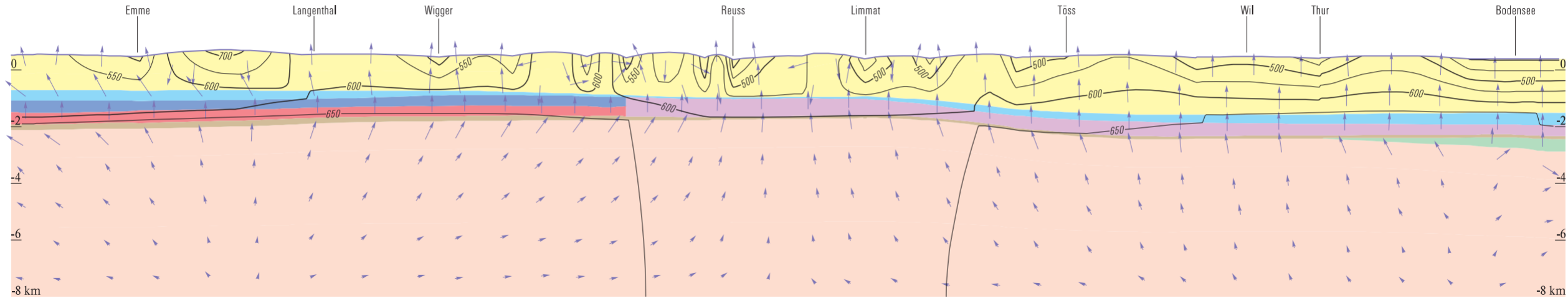


Profil 3

Coupe 3

SW


NE



Masstab der Profile 1:500 000, dreifach überhöht / Echelle des coupes 1:500 000, exagération verticale trois fois

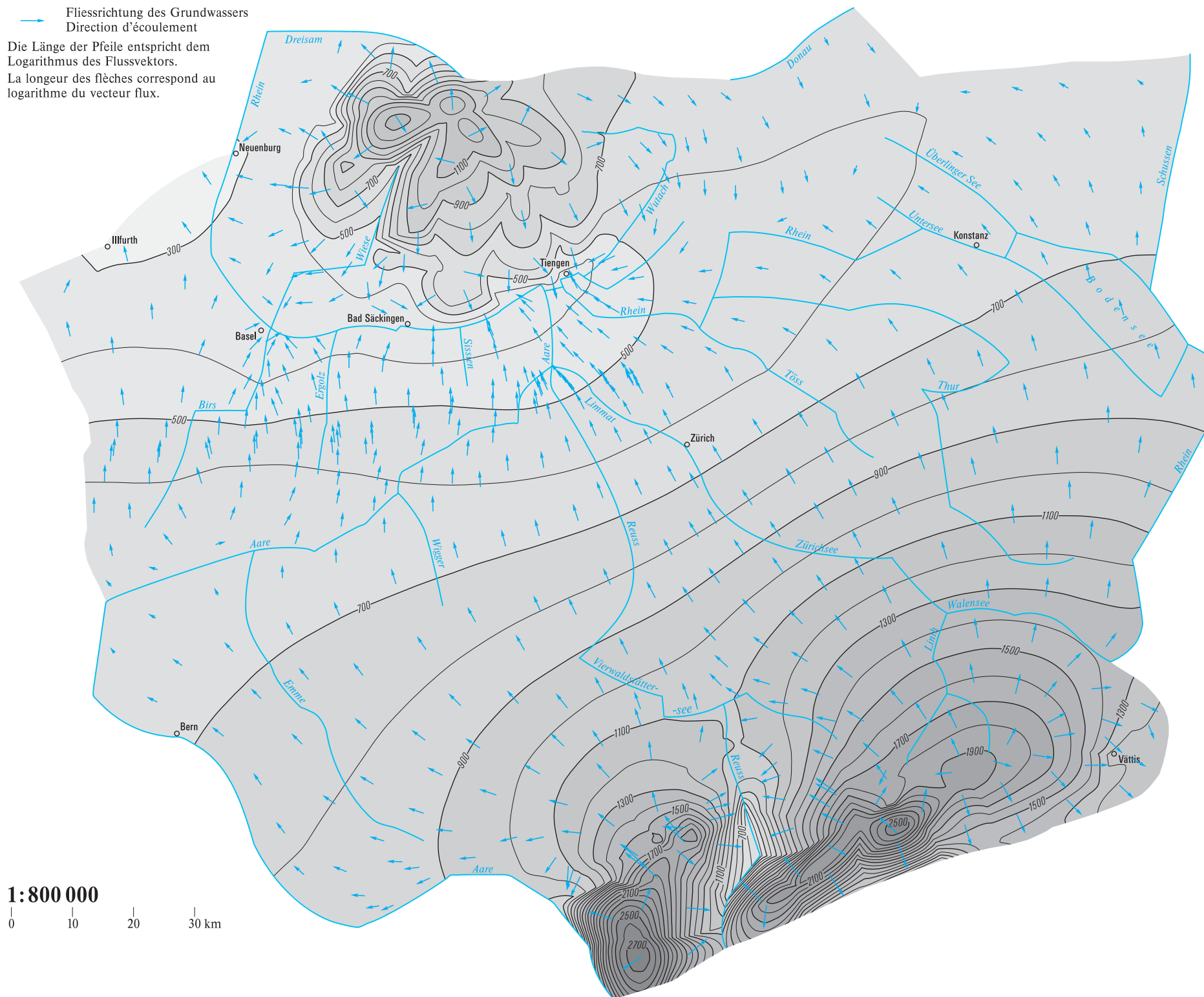
Fig. 5

Simulierte hydraulische Potentiale an der Oberfläche des Kristallins Potentiels hydrauliques simulés à la limite supérieure du Cristallin

- 
 Modellierte Grundwasserisohypsen [m]
 Equipotentielles simulées [m]
 Fließrichtung des Grundwassers
 Direction d'écoulement

Die Länge der Pfeile entspricht dem Logarithmus des Flussvektors.

La longueur des flèches correspond au logarithme du vecteur flux.





Die Infiltrationsgebiete des verwitterten Kristallins liegen im Aar- und im Schwarzwaldmassiv (siehe dreidimensionale Darstellung 1:800 000). Die diese Horizonte überlagernden Schichten sind sehr geringdurchlässig; daher ist eine Infiltration ausserhalb der beiden Massive ausgeschlossen. Demzufolge findet Exfiltration nur in den Fällen statt, in denen das Kristallin aufgeschlossen ist (Profil 1). Im Alpengebiet kann Grundwasser vor allem im oberen Aaretal, in den Tälern der Reuss, des Rheins, der Linth sowie im «Fenster von Vättis» exfiltrieren. Im Schwarzwald liegen die Exfiltrationsgebiete in den Tälern der Wiese und der Dreisam sowie des Rheins zwischen Bad Säckingen und Tiengen. Aus Profil 2 geht hervor, dass das Grundwasser vom Süden her den Jura unterströmt und ins Rheintal exfiltriert. Der Vorfluter bildet die Grenze zwischen zwei regionalen Grundwasserströmungssystemen im Norden und Süden. Im Nordwesten fliessen die Kristallin-Grundwässer aus dem modellierten Gebiet ab (Region Neuenburg am Rhein / Illfurth). Unter der Molasseüberdeckung verläuft die Grundwasserströmung im Kristallin bis zur Jurahauptüberschiebung nahezu horizontal. Je weiter man sich der Grundwasserscheide zwischen Süd und Nord nähert, umso bedeutender wird die vertikale Komponente der Grundwasserströmung im unverwitterten Kristallin (Profil 2, nördlich von Olten). Im Bereich des Rheintales drainiert die verwitterte Kristallinoberfläche die anderen, geringer verwitterten Kristallinhorizonte (Profil 2, Region Rheinfelden). Profil 2 verdeutlicht den Charakter des Rheintales als regionales Exfiltrationsgebiet.

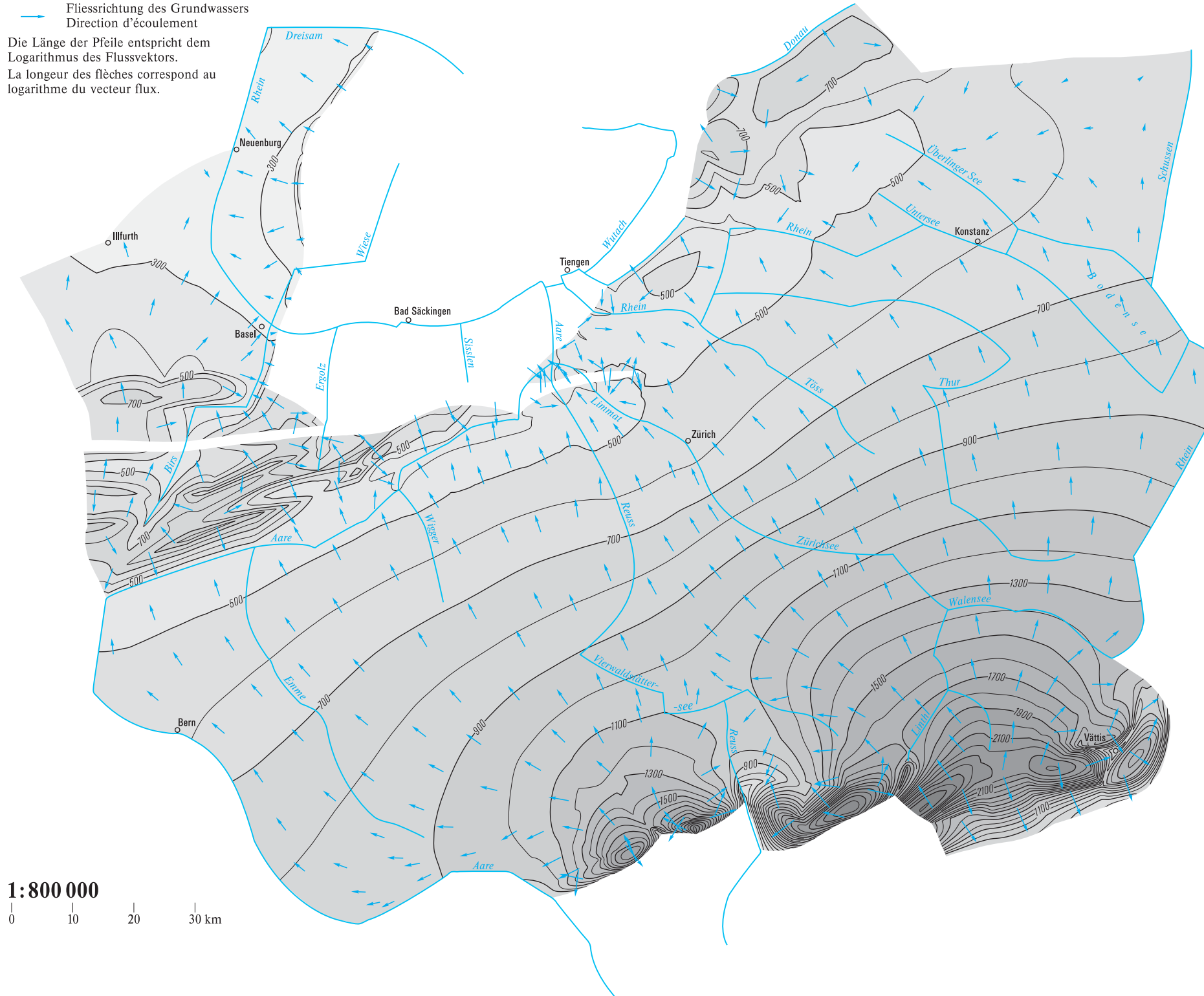
Les zones de recharge de la partie supérieure altérée du Cristallin se trouvent dans le massif de l'Aar et dans celui de la Forêt Noire (voir représentation tridimensionnelle 1:800 000). Comme les formations qui surmontent la partie supérieure du Cristallin sont très peu perméables, l'alimentation de cette série géologique ne peut se faire en dehors des deux régions citées. Par conséquent, la décharge s'effectue en surface dans les points bas où affleure le Cristallin, c'est-à-dire dans les vallées (coupe 1). Dans les Alpes, cette décharge est possible principalement dans le cours supérieur de l'Aar, de la Reuss, du Rhin, de la Linth, ainsi qu'à la «fenêtre de Vättis». Dans la Forêt Noire, la décharge s'effectue dans les vallées de la Wiese, de la Dreisam et du Rhin, entre Bad Säckingen et Tiengen. La coupe 2 montre que les eaux provenant du sud passent sous le Jura et se déversent dans la vallée du Rhin. Cette zone d'exutoire constitue une limite de séparation des systèmes d'écoulement souterrain régionaux provenant du sud et du nord. Dans la partie nord-ouest, les eaux souterraines du Cristallin quittent la région modélisée (secteur Neuenburg am Rhein / Illfurth). Sous le bassin molassique, les lignes d'écoulement dans le Cristallin sont pratiquement parallèles jusqu'au chevauchement principal du Jura. Au fur et à mesure que l'on approche de la limite de partage des eaux entre le sud et le nord, les flux verticaux dans la partie non altérée du Cristallin deviennent importants (coupe 2, au nord de Olten). Dans la région proche de l'exutoire de la vallée du Rhin, la partie supérieure altérée du Cristallin draine les autres parties du Cristallin peu altéré (coupe 2, région de Rheinfelden). La coupe 2 met en évidence le rôle de la vallée du Rhin comme zone d'exutoire régional.

Fig. 4

Simulierte hydraulische Potentiale an der Oberfläche des Malm
Potentiels hydrauliques simulés à la limite supérieure du Malm

-  Modellierte Grundwasserisohypsen [m]
Equipotentiels simulés [m]
-  Fließrichtung des Grundwassers
Direction d'écoulement

Die Länge der Pfeile entspricht dem Logarithmus des Flussvektors.
 La longueur des flèches correspond au logarithme du vecteur flux.



Der Malmaquifer ist ein zentrales Element des tiefen Grundwasserströmungssystems. Die Infiltrationsgebiete liegen im Süden (Aufschlussgebiet, siehe dreidimensionale Darstellung 1:800 000), der Grundwasserfluss ist nach Norden in Richtung der regionalen Vorfluter ausgerichtet (Raum Konstanz in Figur 4 und Bereich der Aare in Profil 2).

L'aquifère du Malm joue un rôle important dans la circulation profonde des eaux souterraines du bassin. Les zones d'alimentation sont situées au sud (zone d'affleurement dans la représentation tridimensionnelle 1:800 000) et les eaux souterraines s'écoulent vers les exutoires régionaux situés au nord (région de Constance sur la figure 4 et région de l'Aar dans la coupe 2).