



TECHNISCHER BERICHT 84-50

Simulation par Modèle Mathématique des
Ecoulements Souterrains entre les
Alpes et la Forêt Noire;

Partie A: Modèle Régional

Partie B: Modèle Local (Nord de la Suisse)

F. Kimmeier
P. Perrochet
R. Andrews
L. Kiraly

Janvier 1985

Nagra

Nationale
Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Cédra

Société coopérative
nationale
pour l'entreposage
de déchets radioactifs

Cisra

Società cooperativa
nazionale
per l'immagazzinamento
di scorie radioattive

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag der Nagra erstellt. Die Autoren haben ihre eigenen Ansichten und Schlussfolgerungen dargestellt. Diese müssen nicht unbedingt mit denjenigen der Nagra übereinstimmen.

Le présent rapport a été préparé sur demande de la Cédra. Les opinions et conclusions présentées sont celles des auteurs et ne correspondent pas nécessairement à celles de la Cédra.

This report was prepared as an account of work sponsored by Nagra. The viewpoints presented and conclusions reached are those of the author(s) and do not necessarily represent those of Nagra.

RESUME

Le but de ce rapport est de présenter le développement de deux modèles hydrogéologiques des systèmes d'écoulement des eaux souterraines dans le Cristallin du nord de la Suisse. Ces modèles sont construits à deux échelles différentes. Le modèle régional (23000 km²) rend compte de toutes les recharges et décharges du Cristallin dans les limites du modèle. Le modèle local (900 km²) tient compte d'une plus grande complexité structurale, stratigraphique et "topographique" dans une région plus restreinte incluant des zones d'étude de la CEDRA. Le modèle régional fournit les conditions hydrologiques aux limites pour le modèle local.

Toutes les étapes suivies lors de la construction et l'utilisation des deux modèles sont présentées ici. Ceci inclut la définition, en plan et verticalement, de la géométrie des principaux aquifères et aquitards. De plus, les propriétés hydrogéologiques de ces couches sont définies, soit, leur perméabilité, leur homogénéité, leur anisotropie et leur continuité. Les discontinuités (comme les failles) sont modélisées en deux ou trois dimensions. Les conditions hydrologiques imposées aux limites sont basées sur des valeurs observées de potentiels ou de débits (infiltrations/décharges), ou sur des valeurs obtenues par inférence.

Les modèles conceptuels développés sont testés avec le programme FEM301 (Kiraly, 1985). Les résultats de ces tests consistent en potentiels calculés à chaque noeud où le débit est imposé, et en valeurs de décharges ou recharges à chaque noeud où le potentiel est imposé. Ces résultats sont utilisés pour déterminer les systèmes d'écoulement souterrains dans le Cristallin. De plus, ils sont comparés aux potentiels et décharges observés, dans le but de valider les modèles conceptuels. Des gradients hydrauliques représentatifs, calculés dans des zones potentielles d'intérêt de la CEDRA, sont présentés ici. Des études de sensibilité des modèles ont été effectuées, en faisant varier des paramètres et des conditions aux limites incertains, afin d'étudier les réponses de ces derniers en ce qui concerne les systèmes d'écoulement.

Les modèles régional et local présentés dans cette étude reflètent l'état actuel de nos connaissances sur les eaux souterraines dans le Cristallin du nord de la Suisse. Cependant, comme des données supplémentaires sont en train d'être collectées et interprétées (en particulier des données hydrochimiques, isotopiques, thermales et hydrogéologiques), cette étude doit être considérée comme une étude préliminaire. Bien que ces modèles doivent subir des révisions dans le futur, les modèles présentés nous ont permis de définir l'impact de certaines incertitudes sur les systèmes d'écoulement et gradients hydrauliques simulés.

RIASSUNTO

Lo scopo di questa relazione è di presentare lo svolgimento di due modelli idrogeologici dei sistemi di scorrimento delle acque sotterranee nel Cristallino del nord della Svizzera. Questi modelli sono costruiti a due scale differenti. Il modello regionale (23000 km²) rende conto di tutte le ricariche e di tutti i deflussi del Cristallino nei limiti del modello. Il modello locale (900 km²) tiene conto di una più grande complessità strutturale, stratigrafica e "topografica" in una regione più ristretta contenente certe zone di studio della CISRA. Il modello regionale fornisce le condizioni idrologiche al contorno per il modello locale.

Questo rapporto presenta tutte le tappe seguite durante la costruzione e l'utilizzazione dei due modelli. Ciò include la definizione, in piano e verticalmente, della geometria dei principali acquiferi ed aquitards. Inoltre, sono esposte le proprietà idrogeologiche di questi strati, e cioè la permeabilità, l'omogeneità, l'anisotropia e la continuità. Le discontinuità (p.e. le faglie) sono modellizzate in due o tre dimensioni. Le condizioni idrologiche imposte al contorno sono fondate su valori osservati ad inferiti di potenziali o di flussi (infiltrazioni/deflussi).

I modelli concettuali sviluppati sono sperimentati con il programma FEM301 (Kiraly, 1985). I risultati di questi esperimenti consistono in potenziali calcolati in ogni nodo a flusso imposto ed in valori di deflusso o ricarica in ogni nodo a potenziale imposto. Questi risultati sono utilizzati per determinare i sistemi di scorrimento sotterranei nel Cristallino. Inoltre, per convalidare i modelli concettuali, i risultati sono confrontati ai potenziali ed ai deflussi osservati. In questo rapporto sono esposti anche dei gradienti idraulici rappresentativi calcolati in zone di potenziale interesse della CISRA. Allo scopo di studiare le risposte dei modelli per quanto riguarda i sistemi di scorrimento, sono state effettuate delle analisi di sensibilità facendo variare parametri e condizioni al contorno incerti.

I modelli regionale e locale presentati in questa relazione riflettono lo stato attuale delle nostre cognizioni sulle acque sotterranee nel Cristallino del nord della Svizzera. Tuttavia, siccome si stanno raccogliendo ed interpretando dati supplementari (specialmente dati idrochimici, isotopici, termali ed idrogeologici), questo studio deve essere considerato come uno studio preliminare. Benchè i modelli presentati debbano subire delle revisioni nel futuro, essi ci hanno permesso di precisare l'impatto di alcune incertezze sui sistemi di scorrimento e gradienti idraulici simulati.

ABSTRACT

The purpose of this report is to present the development of two hydrogeologic models of the groundwater flow regime in the crystalline of northern Switzerland. These models are constructed at two scales. The regional model (23,000 km²) accounts for all recharge to and discharge from the crystalline within the model boundaries. The local model (900 km²) allows for greater structural, stratigraphic and topographic complexity in a more restricted area including some of the areas of interest to CEDRA. The regional model provides the hydrologic boundary conditions for the local model.

All steps followed in constructing and testing the models are presented. This includes defining the areal and vertical geometry of the principal aquifers and aquitards. In addition, the hydrogeologic properties of these layers are defined; including their permeability, homogeneity, anisotropy and continuity. Discontinuities (e.g. faults) are modeled as discrete features. Hydrologic boundary conditions are specified based on observed or inferred potentiometric or flow (infiltration/exfiltration) data.

The developed conceptual models are tested with program FEM 301 (Kiralý, 1985). The results of this application consist of heads at every nodal point and recharge/discharge rates at every constant head node. These results are utilized to define the general groundwater flow regimes in the crystalline. In addition, the results are compared to observed heads and discharges in an attempt to validate the conceptual models. Representative hydraulic gradients at potential areas of interest to CEDRA are presented. Sensitivity analyses have been conducted to define the groundwater flow systems response to uncertain parameters and boundary conditions.

The regional and local models presented reflect the current state of knowledge on groundwater flow in the crystalline of northern Switzerland. However, as additional data are being collected and interpreted (esp. hydrochemical, isotopic, thermal, and hydrogeologic), this study must be treated as preliminary. While these models may undergo future revisions, the modeling presented assists in defining the impact of some uncertainties on the simulated flow regime and hydraulic gradient.

ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Bericht geht es darum, die Entwicklung zweier hydrogeologischer Modelle unterschiedlicher Grössenordnung darzustellen, mit denen die Grundwasserfliessverhältnisse im Kristallin der Nordschweiz erfasst werden: Das regionale Modell (23'000 km²) behandelt alle Zu- und Abflüsse des Kristallins innerhalb der Modellgrenzen und liefert zugleich die hydrologischen Randbedingungen für das lokale Modell. Das lokale Modell (900 km²) erlaubt eine stratigraphisch und topographisch sehr viel komplexere Darstellung innerhalb eines kleineren Rahmens; dieser umfasst auch einige der für die Nagra relevanten Gebiete.

Alle Schritte beim Aufbau und der jeweiligen Ueberprüfung der Modelle werden dokumentiert. Hierzu gehört die Definition des flächenhaften und räumlichen Aufbaus der Hauptaquifere und -aquitarden wie auch die der hydrogeologischen Eigenschaften dieser Schichten einschliesslich ihrer räumlichen Ausdehnung, Permeabilität, Homogenität oder Anisotropie; Diskontinuitäten (z.B. Störungen) werden dabei als diskrete Merkmale modelliert. Die hydrologischen Rahmenbedingungen werden über einer Basis von beobachteten oder abgeleiteten potentiometrischen bzw. Infiltrations-/Exfiltrationsdaten definiert.

Die entwickelten Modellvorstellungen werden mit Hilfe des Programms FEM 301 überprüft (Kiraly, 1984). Dabei ergeben sich für jeden Knoten Potentiale sowie für alle Knoten mit konstant gehaltenen Potentialen zugehörige Zu- und Abflussraten. Diese Ergebnisse gehen dann in die Definition der allgemeinen Grundwasserfliessverhältnisse im Kristallin ein und werden ausserdem mit den beobachteten Potentialen und Abflüssen verglichen, um das generierte Modell an den Daten zu überprüfen. Dargestellt werden ferner die repräsentativen hydraulischen Gradienten in den Untersuchungsgebieten der Nagra wie auch die Sensitivitätsanalysen, die durchgeführt wurden, um die Reaktion der Grundwasserfliesssysteme auf grössenordnungsmässig noch nicht genügend bekannte Parameter und Rahmenbedingungen zu erfassen.

Beide hier vorgestellten Modelle, das regionale wie das lokale, beruhen auf dem gegenwärtigen Stand des Wissens über den Grundwasserfluss im Kristallin der Nordschweiz. Dennoch muss dieser Bericht als vorläufig betrachtet werden sowie neue Daten gesammelt und ausgewertet werden - insbesondere im hydrochemischen, Isotopen-, thermalen und hydrogeologischen Bereich. Wenn aber diese Modelle in Zukunft auch präzisiert werden, so stecken sie doch jetzt schon das mögliche Ausmass jener Wirkungen ab, die bislang noch ungenau erfasste Faktoren auf die simulierten Fliessverhältnisse und hydraulischen Gradienten haben können.

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
RESUME	I
RIASSUNTO	II
ABSTRACT	III
ZUSAMMENFASSUNG	IV
TABLE DES MATIERES	V
LISTE DES ANNEXES	IX
1. INTRODUCTION GENERAL	1
1.1 Objectifs	1
1.2 Démarche	2
1.3 Etat actuel des modèles	5
1.4 Etudes antérieures	6
1.5 Hypothèses faites dans les modèles présentés	7
1.6 Structure du rapport	9
<u>PARTIE A</u>	
2. INTRODUCTION - MODELE REGIONAL	11
2.1 Déroulement des travaux	11
2.2 Buts du modèle	12
2.3 Justification d'un modèle tridimensionnel	12
2.3.1 Modèle bidimensionnel plan	12
2.3.2 Modèle bidimensionnel en coupe	13
2.3.3 Modèle tridimensionnel	13
2.3.4 Conclusions	14
3. DEVELOPPEMENT DU MODELE CONCEPTUEL REGIONAL	15
3.1 Conceptualisation et élaboration de la géométrie	15
3.1.1 Choix des limites du modèle	16
3.1.2 Regroupement des séries géologiques	21
3.1.3 Conceptualisation du réseau	22

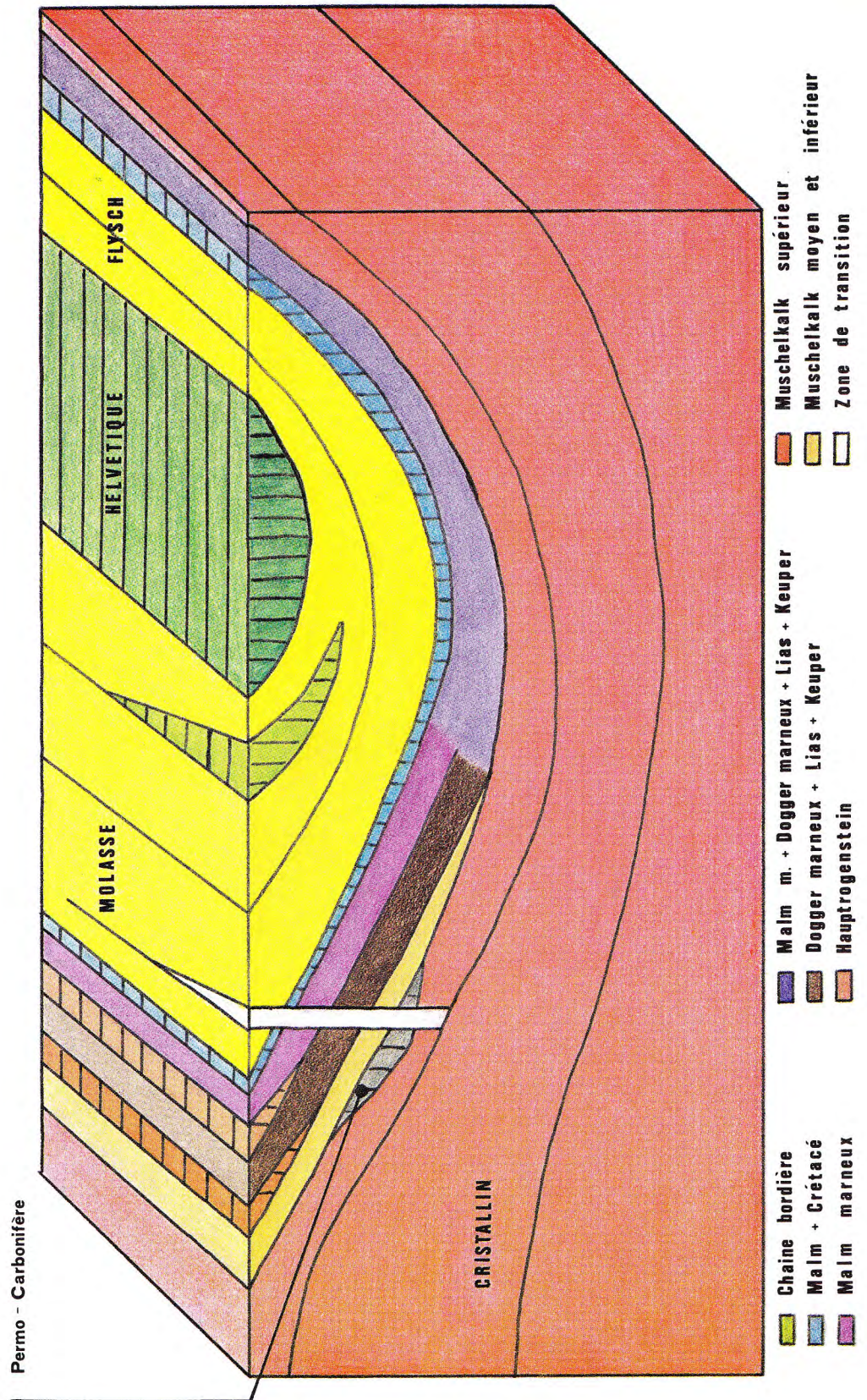
3.1.4	Description de la géométrie de chaque niveau du modèle régional	26
3.1.5	Statistique du modèle	29
3.2	Permeability Distribution	29
3.2.1	Permeability data	30
3.2.2	Rock mass homogeneity	32
3.2.3	Average Permeability	35
3.2.4	Rock mass anisotropy	38
3.3	Boundary Conditions	40
3.3.1	Lateral boundaries	40
3.3.2	Surficial boundary conditions	41
4.	PRESENTATION DES RESULTATS	44
4.1	Introduction	44
4.2	Présentation générale des variantes	45
4.2.1	But de chaque variante	45
4.2.2	Perméabilités et transmissivités imposées	48
4.2.3	Conditions aux limites imposées pour chaque variante	49
4.3	Descriptions des résultats	51
4.3.1	Points communs à toutes les variantes	52
4.3.2	Effets dûs aux changements de perméabilité des aquitards	55
4.3.3	Effets dûs aux changements de perméabilité de l'Helvétique calcaire	59
4.3.4	Effets dûs aux changements de perméabilité des failles bidimensionnelles et tridimensionnelles	60
4.3.5	Effets dûs à la présence d'un barrage dans les Alpes	62
4.3.6	Effets dûs aux changements des conditions aux limites latérales	63
4.3.7	Effets dûs aux changements des conditions à la limite supérieure	64
4.3.8	Effets dûs à la présence d'un barrage sous le Permo-Carbonifère	66
4.3.9	Effets dûs au changement de géométrie dans la région de Tiengen	67
4.3.10	Effets dûs à l'anisotropie de la perméabilité dans le Cristallin supérieur et moyen	68

4.4	Validation des résultats	69
4.4.1	Introduction	69
4.4.2	Moyens actuels de validation des résultats	77
4.4.3	Variantes à potentiels imposés	79
4.4.4	Variantes à infiltrations efficaces imposées	81
4.4.5	Comparaison des potentiels mesurés dans les forages et des potentiels calculés par le modèle	82
4.5	Gradient vectors	89
4.5.1	Introduction	90
4.5.2	Effect of aquitard permeability	91
4.5.3	Effect of surface boundary condition	92
4.5.4	Effect of crystalline permeability	93
4.5.5	Effect of anisotropic permeability in the crystalline	95
4.5.6	Other effects	96
4.5.7	Summary of simulated regional gradients	98
5.	CONCLUSIONS - MODELE REGIONAL	101
5.1	Recommandations et propositions pour travaux futurs	104
 <u>PARTIE B</u>		
6.	INTRODUCTION - MODELE LOCAL	107
7.	DEVELOPPEMENT DU MODELE CONCEPTUEL LOCAL	109
7.1	Géométrie	109
7.1.1	Situation de la région à modéliser	109
7.1.2	Discretisation de la région	109
7.1.2.1	Réseau de surface	110
7.1.2.2	Réseau tridimensionnel	112
7.2	Paramètres hydrodynamiques	114
7.3	Conditions aux limites	115

8.	DESCRIPTION DES RESULTATS	117
8.1	Introduction	117
8.2	Différenciation des variantes	117
8.3	Ecoulements généraux	121
8.3.1	Effets des perméabilités dans les couches peu perméables (aquitards)	122
8.3.2	Effets des conditions de surface	123
8.3.3	Effets des conditions aux limites latérales	125
8.3.4	Effets de la perméabilité dans le Cristallin moyen et le Cristallin inférieur	128
8.3.5	Effets des failles bi- et tridimensionnelles	130
8.3.6	Effets de l'anisotropie dans le Cristallin supérieur et le Cristallin moyen	132
8.4	Validation	133
8.4.1	Effets des perméabilités dans les couches peu perméables	135
8.4.2	Effets des conditions de surface	136
8.4.3	Effets des conditions aux limites latérales	137
8.4.4	Effets des perméabilités du Cristallin moyen et du Cristallin inférieur	140
8.4.5	Effets des failles bi- et tridimensionnelles	141
8.4.6	Effets de l'anisotropie dans le Cristallin supérieur et le Cristallin moyen	142
8.5	Gradient Vectors and Flow Path	143
8.5.1	Introduction	144
8.5.2	Effect of aquitard permeability	144
8.5.3	Effect of surface boundary condition	146
8.5.4	Effect of lateral boundary condition	147
8.5.5	Effect of permeability distribution in the crystalline	149
8.5.6	Effect of major faults	153
8.5.7	Effects of crystalline anisotropy	154
8.5.8	Summary of simulated local model gradients	156
8.5.9	Example flow paths	159
9.	CONCLUSIONS - MODELE LOCAL	161
10.	CONCLUSIONS GENERALES	164
	BIBLIOGRAPHIE	166

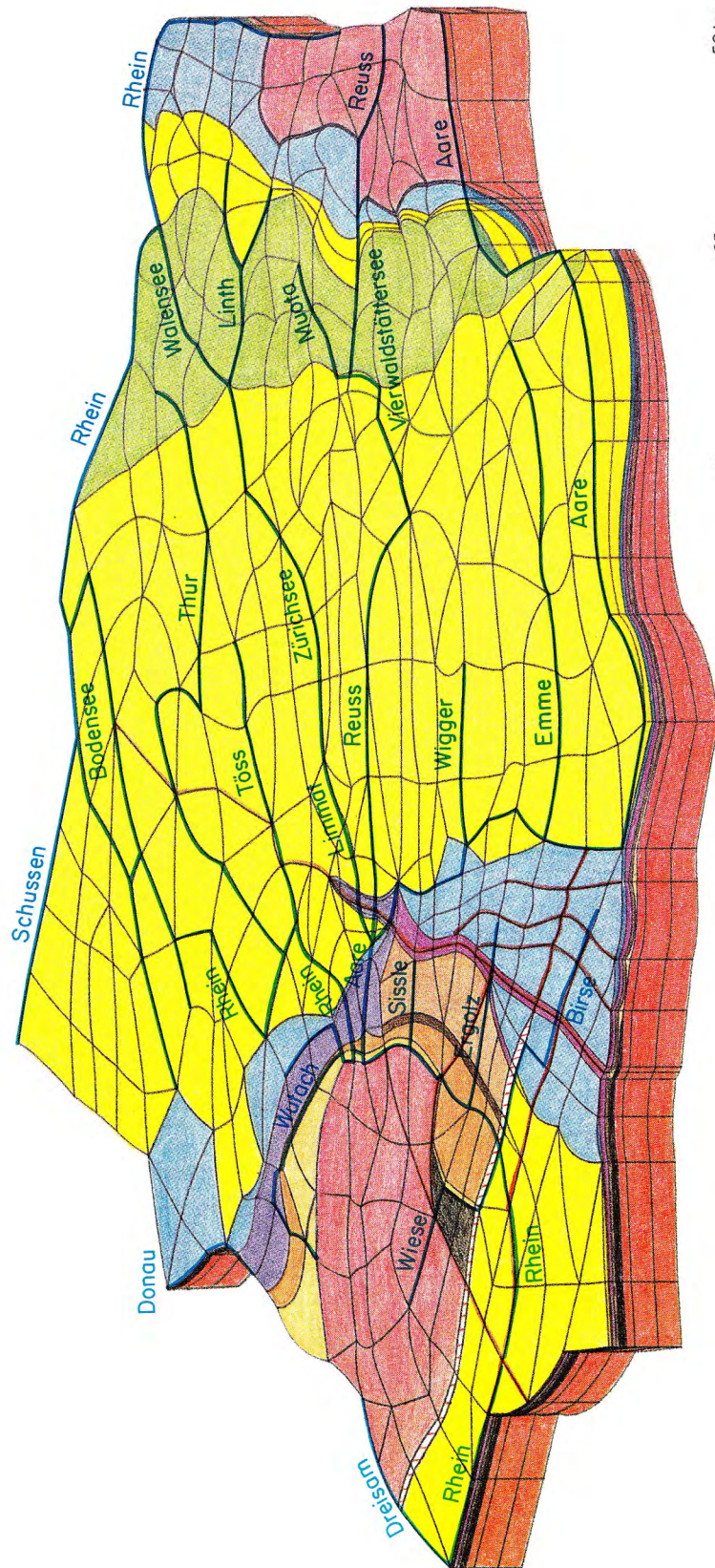
LISTE DES ANNEXES

Annexe I	Liste des variantes
Annexe II	Documents utilisés pour les modèles régional et local
Annexe III	Figures et liste des figures
Annexe IV	Tableaux et liste des tableaux



Nagra Cédra Cisra **NTB 84-50**

BLOC DIAGRAMME MONTRANT LE GROUPEMENT DES SÉRIES GÉOLOGIQUES



légende cf. annexe 3-7

Nagra Cédra Cibra		NTB 84-50
RÉSEAU TRIDIMENSIONNEL DE SURFACE AVEC VALLÉES PRINCIPALES ET TRACÉ DES FAILLES		
VIS.:	DAT.: 21.12.84	ANNEXE 3-12