Table 5.4 Hydraulic Conductivity of Shallow Aquifer

井戸番号	透水係数(cm/s)	井戸位置(ロンピブン盆地内)
1	0.0825	上流北側
2	0.106	中上流北側
3	0.0357	中流
4	0.0287	中下流北側
5	0.0578	上流南側
6	0.092	中上流南側
7	0.0174	下流南側
8	0.00819	平野地南側
10	0.0049	平野地南側
11	0.043	下流
12	0.00052	下流北側
13	0.00067	中下流南側
14	0.0011	中上流南側
15	0.0075	中上流北側

浅層帯水層の層相変化を反映して、この層の透水係数は 0.00052cm/s から 0.106cm/s まで大きく変化する。全体としては盆地の下流部より上流部で、また、南側より北側で透水係数が大きい。

難透水層（粘土層）

浅層帯水層の下には数mから 10m以上の厚さで粘土または粘質土層が分布している。層相はシルトと砂礫混じり粘土、あるいは粘土混じり砂礫やシルトである。いずれにしても、粘土分含有量が高い。

この粘質土層はロンピブン盆地においては浅層帯水層と深層帯水層をへだてる難透水層の役割を果たしている。実際、深井戸での揚水試験に際し、数メートルしか離れていない浅井戸の水位はほとんど変化しなかった。

深層帯水層（粘土混じり砂層）

難透水層の粘質土層の下位には、層厚 1m から 20 m 砂質土層が分布する。本層は基盤岩の風化した粘土混じり砂、砂または礫混じり粘土等からなる。本層は上部の粘質土層と似た層相を示すが、上部の粘質土層と異なり、砂礫が多い場合は土質がルーズで、試錐調査ではコアが回収しにくい。また、粘土分が多く含まれる場合は土質が硬く、塊状構造を呈し、亀裂が比較的発達している。

本層は基盤岩を直接覆っており、深層帯水層として、地下水の取水が可能である。今回

の試験井における揚水試験の結果をまとめると、深層帯水層の透水係数は 10^{-2}～10^{-1}cm/sec の範囲で変化し、平均して 10^{-3}のオーダーである。貯留係数は 10^{-1}～10^{-3}の範囲で変化し、平均して 10^{-2}のオーダーである。比産水率は 10～50 l/min/m であり、平均して 24.6 l/min/m である。同グループの浅層帯水層ほど透水性が良好ではないが、他グループの帯水層に劣らない透水性と貯留性を有していると言えよう。

本層は断面図(Fig 5.7 ～5.9)に示されているように、他のすべての帯水層グループと直接接している。従って、本層と各帯水層との間で地下水流が生じる、すなわち、各帯水層グループ間の水の通路としての役割も果たしている。

② グループ2（花崗岩）

調査地域の最も西側の山地を構成している花崗岩は、Ron Na－Suan Chan 地区を含むタイ南部山岳地帯の背骨を形成する深成岩である。試錐調査により採取したコアは深灰色を呈し、細粒～中粒の両雲母花崗岩である。山体を形成する花崗岩は、断層やそれに付随する亀裂帯を除くと、水文地質的には不透水基盤として扱うことができ、地下水の分水界にもなっている。

③ グループ3（石灰岩）

ロンピブン盆地の出口周辺にはグループ3の石灰岩が分布している。この石灰岩は灰色ないし暗灰色を呈し、塊状あるいは層状である。試錐調査のコアから岩層の傾斜は約 45 度であると分かった。地表調査によっても本層は約 45 度で西方向へ傾斜していることが確認されている。

石灰岩の透水性は岩層に含まれる亀裂や空洞の発達状況によって変わる。コア試料をみると調査地域の石灰岩は軽い変成作用を受けて、亀裂が比較的発達している。亀裂の程度は深さや場所により変わるが、間隔は 10～30 cm で、コア試料も短柱状で採取された。一部の亀裂には粘土等の充填も見られ、明らかに地下水の通路となっている。石灰岩帯水層グループは調査地域で最も多く利用されており、既存深井戸の約 70%が本層から取水している。

④ グループ4（オルドビス紀・カンブリア紀堆積岩）

花崗岩の東側にグループ4の堆積岩が分布している。図 2-25～27 に示す地質断面はロンピブン盆地を長軸線方向に切ったもので、盆地中央部の地層の分布を示している。盆地中央部ではグループ4は沖積層、洪積層に覆われて地表には露出していないが、図 2-22 に示されているように、Huai Hua Mueng 川の北と Huai Ron Na 川の南ではこのグループが地表に露出して、ロンピブン盆地両翼の山地を構成している。

試錐調査のコアによると、このグループは珪質砂岩や泥岩それにシルト岩等から成るが、ボーリング No.14、15 のコアは石灰岩である。花崗岩貫入時の高温高圧の影響を受け、軽

度に変成し、千枚岩になっている部分もある。このグループの砂岩は堅硬であり、亀裂が発達する部分もある。

ロンピブン行政区では深井戸の約 10%がこのグループの帯水層から取水している。

5.1.3 地下水流動状況と水質

5.1.3.1 地下水位の分布

地下水位分布及び流動状況を把握するために地下水一斉観測を実施した。結果は Fig 5.11 に示す。浅層帯水層内の地下水位はその地点の標高とほぼ対応している。Huai Hua Mueng 川と Huai Ron Na 川流域において、地形が急傾斜を示す部分では、浅層地下水の水位変化も急になっている。基盤岩と接する帯水層の周辺境界付近では動水勾配が数 10 分の 1 と大きく、盆地の中央部に向かって次第に緩やかになり、約 1/100 になる。平野地域に入ると地形が平坦となり、動水勾配も数 100 分の 1 ～約 1/1,000 と小さい。

地下水位等高線から読み取った地下水流方向は図中で青色矢印で示されている。盆地の上中流部では周辺の丘陵から地下水が盆地内に集中し、西から東へ流れている。盆地を出で、平野部に入ると全体としては東向きの流が卓越しているが、微地形や局地的な水利用などの影響を受けて流向はばらついている。

地下水の流向は動水勾配の方向によって決められるが、流速はダルシー法則に従い動水勾配と透水係数の積として決められる。そこでロンピブン盆地内の帯水層定数等をシミュレーションモデルに取り込んで解析し、流速の分布を求めた（Fig 5.12)。

盆地内上流北部では透水係数と動水勾配がともに大きいので、日流速は約数 10cm、年間で 150m を超える。それに対して平野部では動水勾配と透水係数が共に小さいので、地下水流速はわずか数 cm/day、年間で 10m 未満である。

5.1.3.2 地下水と河川水との交換

調査地域の主要河川で 9 の横断面を決め、断面に沿って合計 12 本のオーガー観測孔と 21 点の河川水位観測点を設定し、地下水位と河川水位標高を測定した。断面と観測点の位置は Fig 5.13 に示す。

調査結果は Fig 5.14～5.16 に示す。これらの図から流域毎に次のような特徴が読み取れる。

① Huai Hua Mueng 川

・上流部(断面 1 と断面 2)

南西側の山地では地下水が河川水位より高く、動水勾配の方向は山から河川へ、さらに河川からは北東方向へ向かう。河川から 50～80m北東の地点は旧河道であり、地下水位が最も低い。それから東の山方向へ地下水位が上昇し、動水勾配の方向は北東から南西へ変わる。ただし、断面 2 の河川水位調査地点では河川の両岸に赤褐

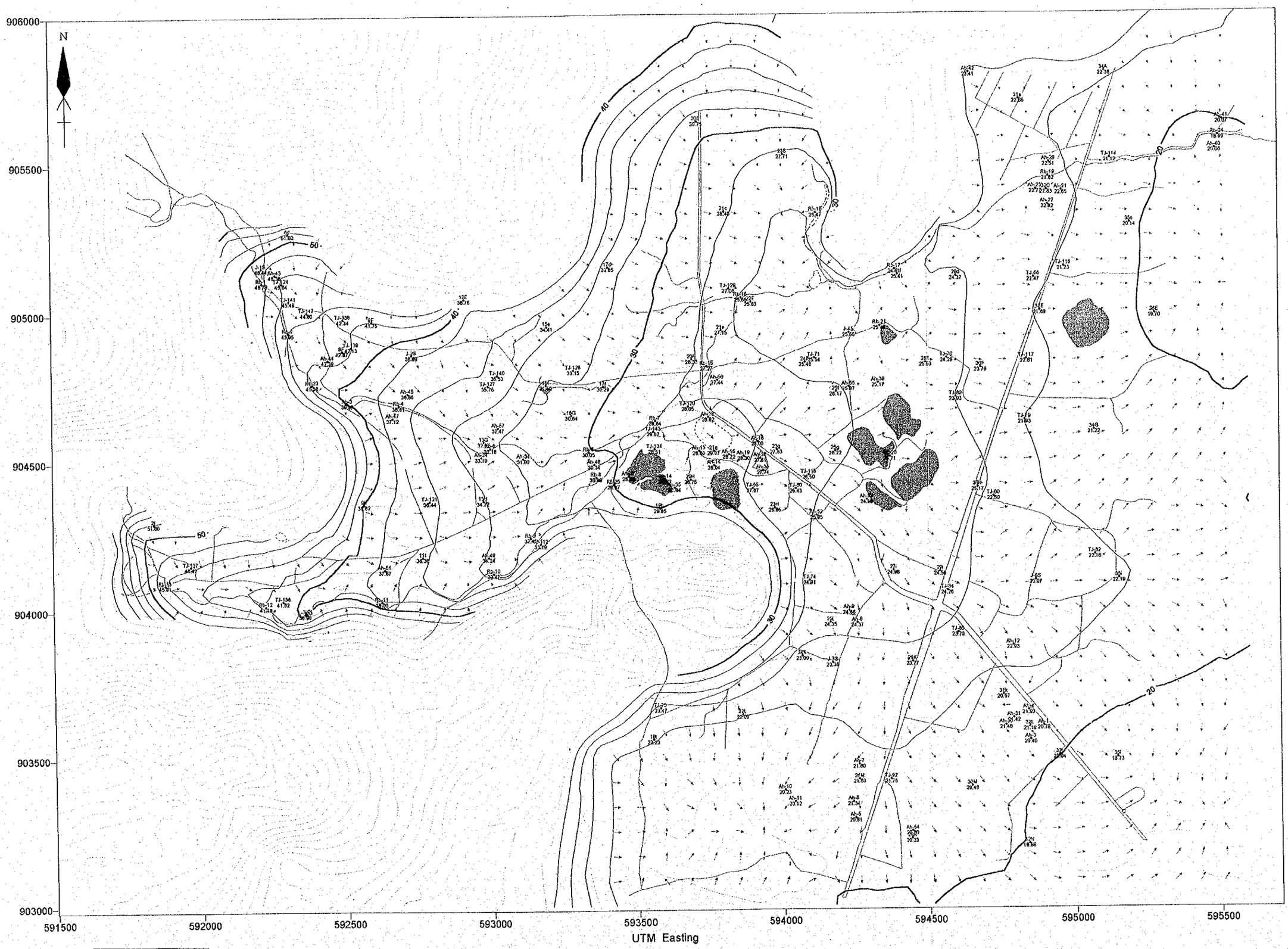

Fig 5.11 Groundwater Level Contour on 21 June 1999

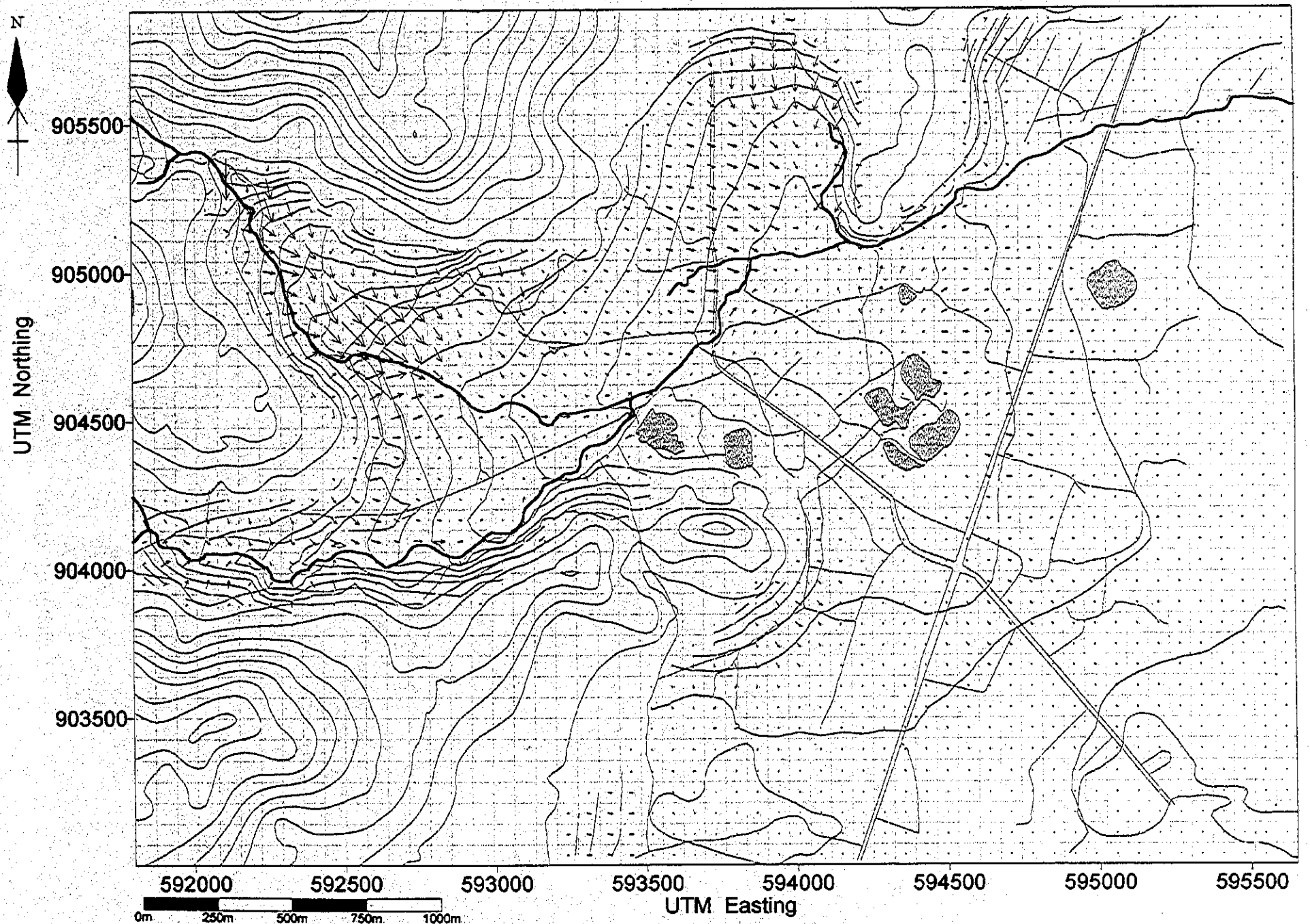

Fig 5.12 Groundwater Flow Velocity in Shallow Aquifer

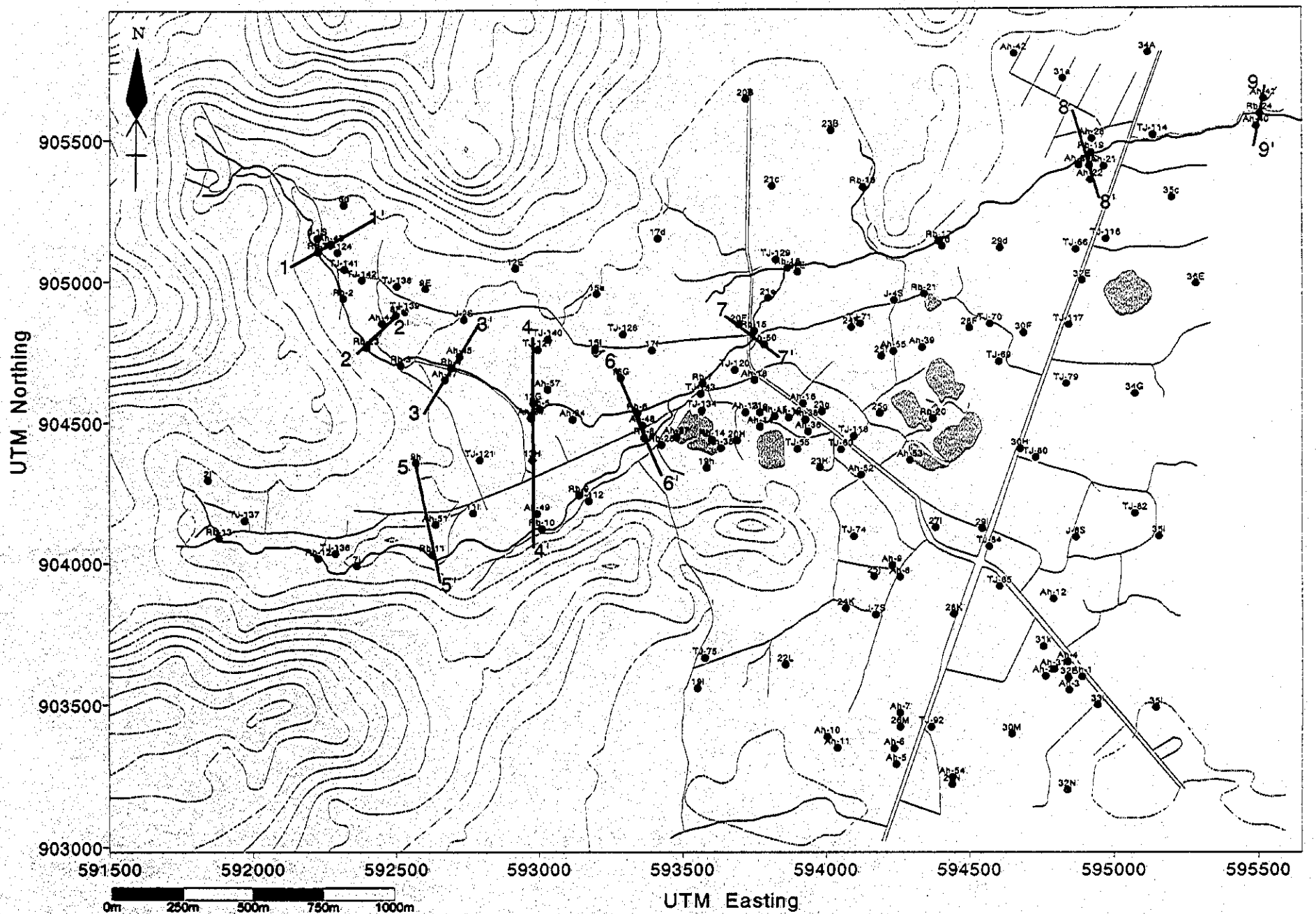

Fig 5.13 Location of Profiles along Rivers

色の鉄分の沈殿が見られ、地下水位の高い時期に河川の両岸から地下水が河川へ流出していることを示している。

・中流部と下流部(断面 3、断面 4 の北部と断面 6 の北西部)

動水勾配は両岸から河川へ向かう。

② Huai Ron Na 川

・上流部(断面 5)

河川は南の右岸にある山から地下水の補給を受けながら左岸の地下水を涵養する。河川から約 50m北にある観測孔 Ah-51 付近に地下水位の最低点が現れ、そこから地下水の流向は変わり、北から南に向かう。

・中下流部(断面 4)

地下水が両岸から河川へ流れる。

・下流部(断面 6 の南西部)

河川は右岸から地下水の補給を受けながら左岸の地下水を涵養し、この地下水は Huai Hua Mueng 川に向かって流れる。

③ Klong Nam Khun 川 (断面 7、8、9)

いずれの断面でも地下水は両岸から河川へ向かって流れる。

断面で見ると、以上のような河川と地下水の交換が認められるが、実際の地下水流動は 3 次元的なベクトル量として表されるので、動水勾配の最大方向へ流れる。実際の地下水流動方向は図 5.11、5.12 に示された矢印により知ることができる。

5.1.3.3 水質分類

水質の空間的変化を見るために、河川水、オーガー水、浅井戸水と深井戸水のヘキサダイアグラム（Hexa-diagram）の分布を Fig 5.17 に示す。

河川水の多くは菱形であるが、Huai Ton I Hong 川と Huai Hua Mueng 川の上流部分では異なる形を呈する。特に雨期の河川水はこの特徴がはっきりしている。これは Huai Ton I Hong 川両岸の選鉱廃棄物や旧堀場の影響により SO_4 と Na＋K の割合は高くなっているためと考えられる。

オーガー水と浅井戸水のヘキサダイアグラムは主として菱型であるが、いくつかは他の形も示す。その内オーガー 32L のような埋立地では人間活動の影響が強く現れたと思われる。深井戸水は他種類の試料より安定し、90%以上は菱型であり、ヘキサダイアグラムの大きさの変化も小さい。

試料の種類によってヘキサダイアグラムの大きさに差が見られ、地域的には盆地の上流から下流へ向かって大きくなる傾向が認められる。

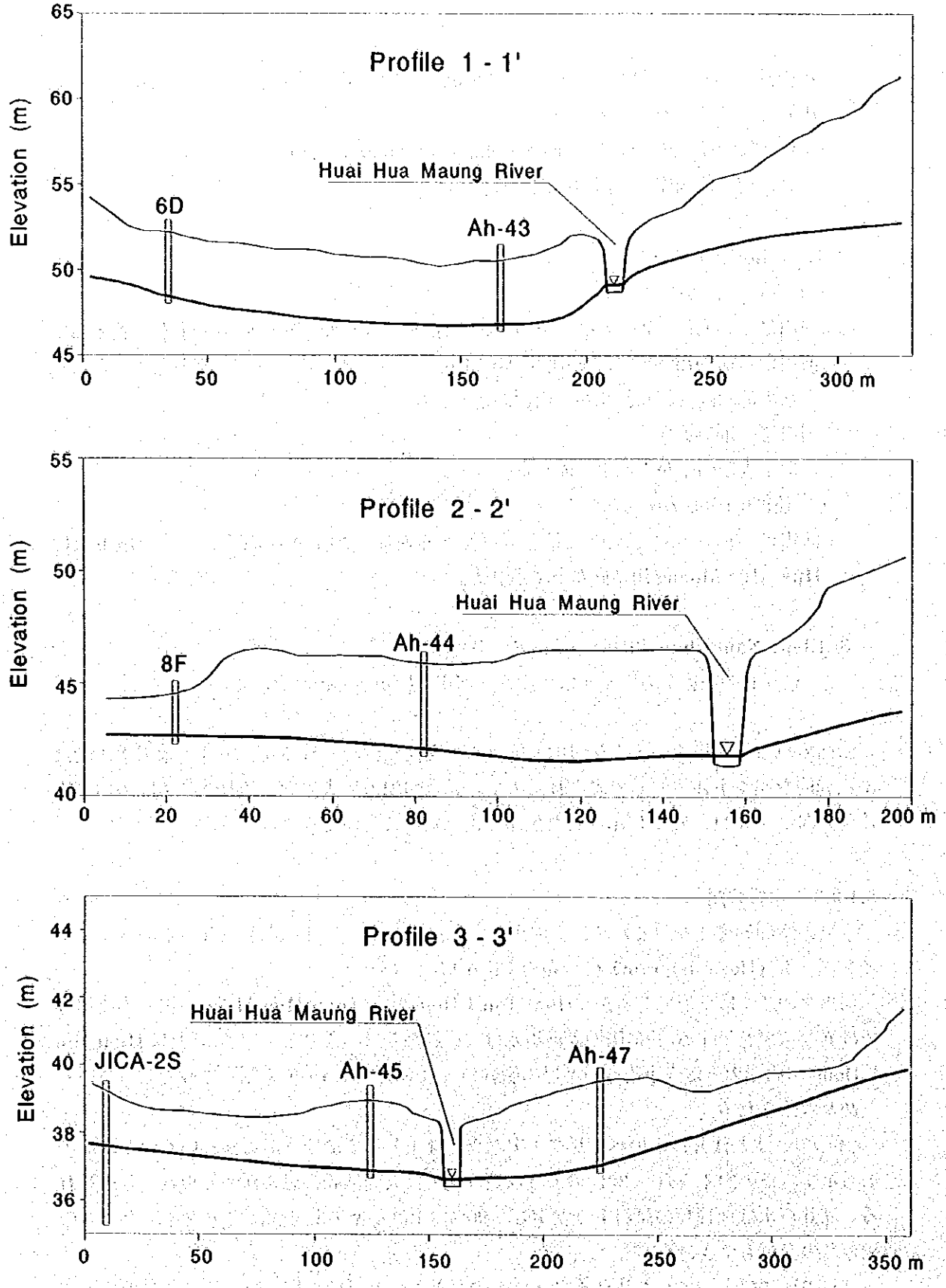

Fig 5.14 Profile 1-1' to 3-3'

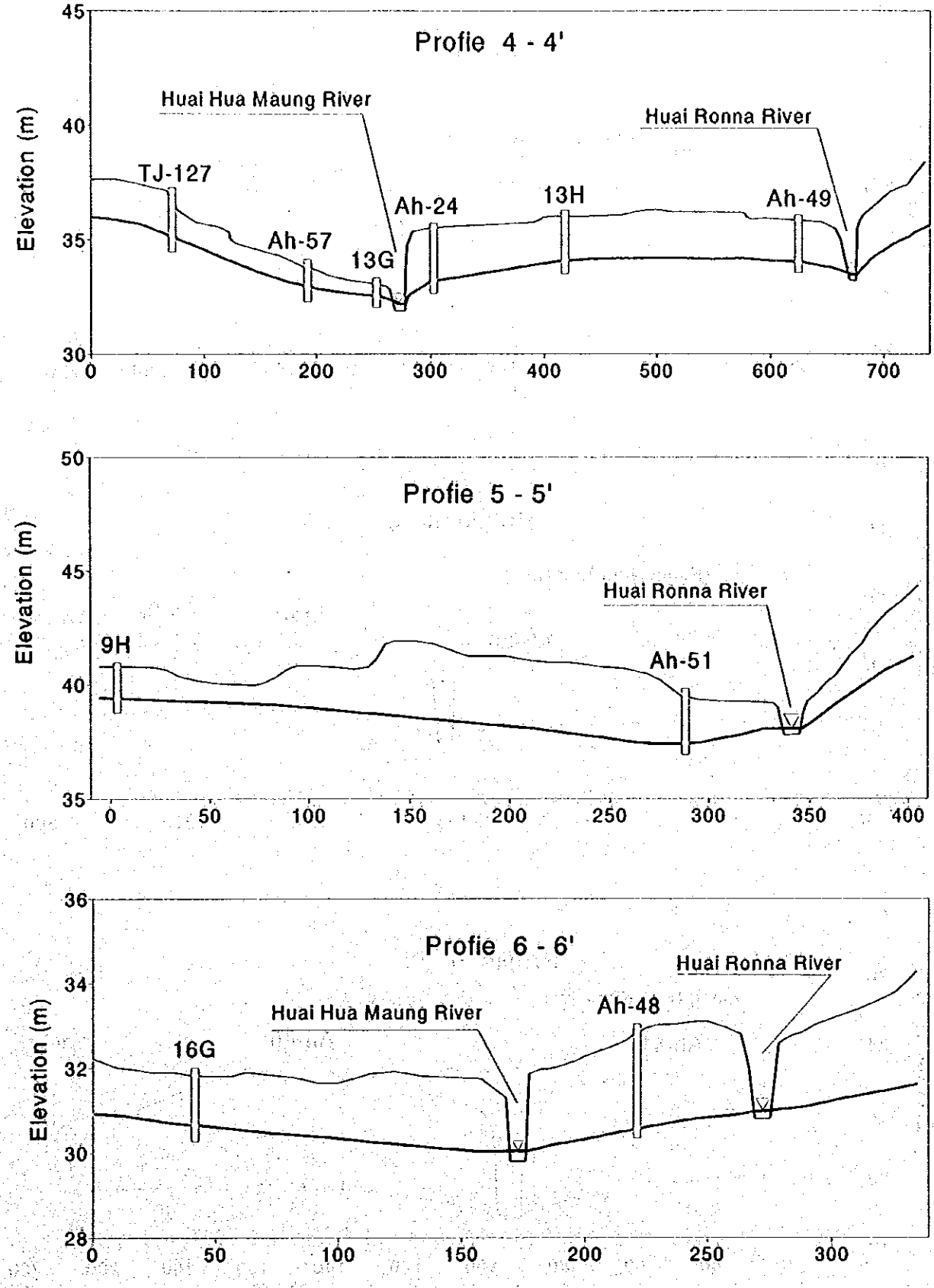

Fig 5.15 Profile 4-4' to 6-6'

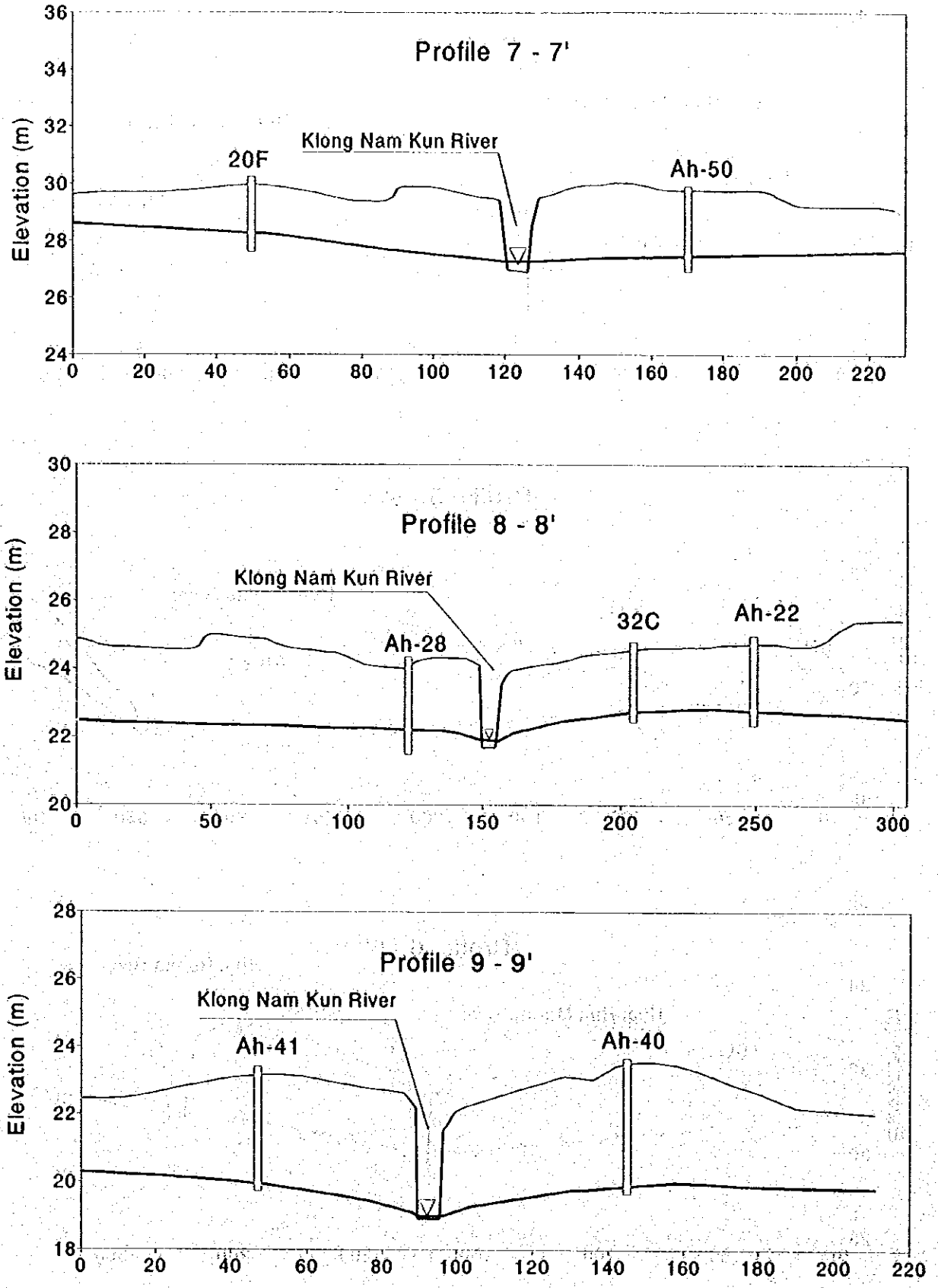

Fig 5.16 Profile 7-7' to 9-9'

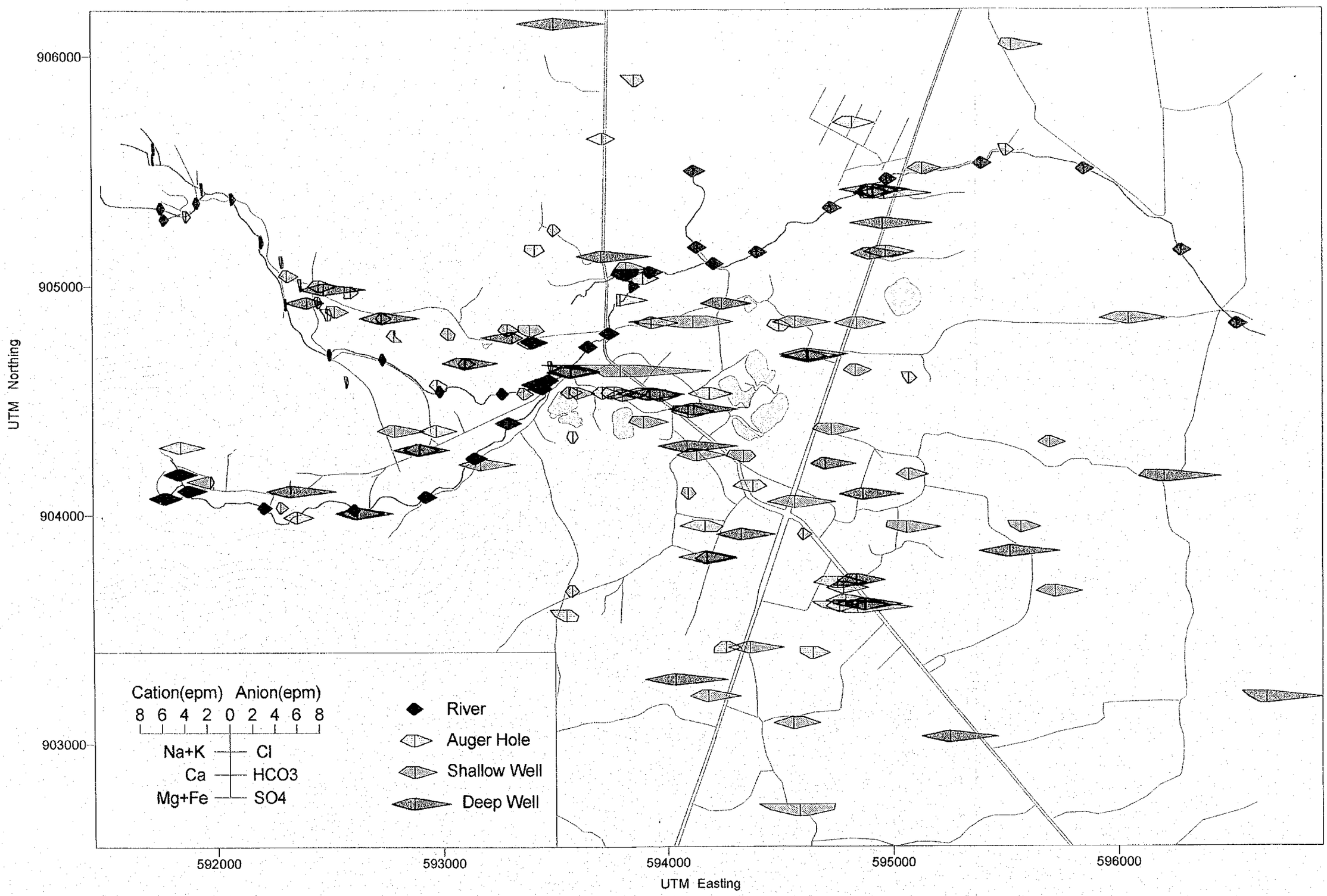

Fig 5.17 Hexa-diagram of River Water and Groundwater (1998-1999)

浅井戸水中のヒ素分析の結果は Fig 5.18 に示す。汚染された浅井戸は主に Haui Hua Mueng 川流域、Klong Nam Khun 川上流域及び高速道路沿い特に 403 号線から西の部分に分布している。局所的な差異はあるもののオーガー調査による結果とほぼ一致している。深層帯水層内のヒ素分布は Fig 5.19 に示す。Huai Hua Mueng 川流域とロンビブン郡中心部にタイ国飲料水基準を超えるヒ素濃度が検出されている。Fig 5.18 と比べて見ると、深層地下水の汚染域と浅層地下水の汚染域とは一致しており、両者の間に密接な関連があることを示唆している。

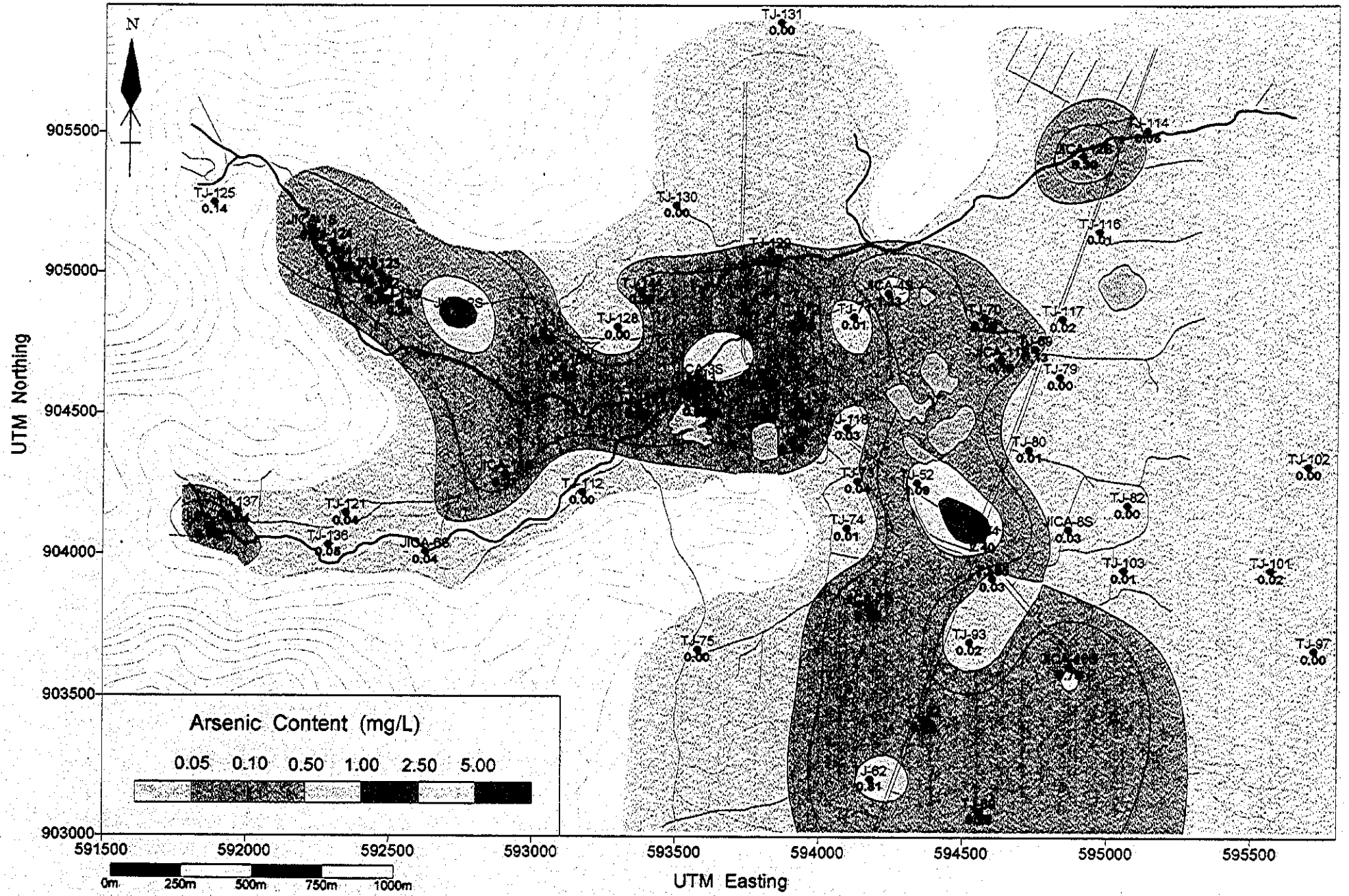

Fig 5.18 Arsenic Content in Shalow Well Water

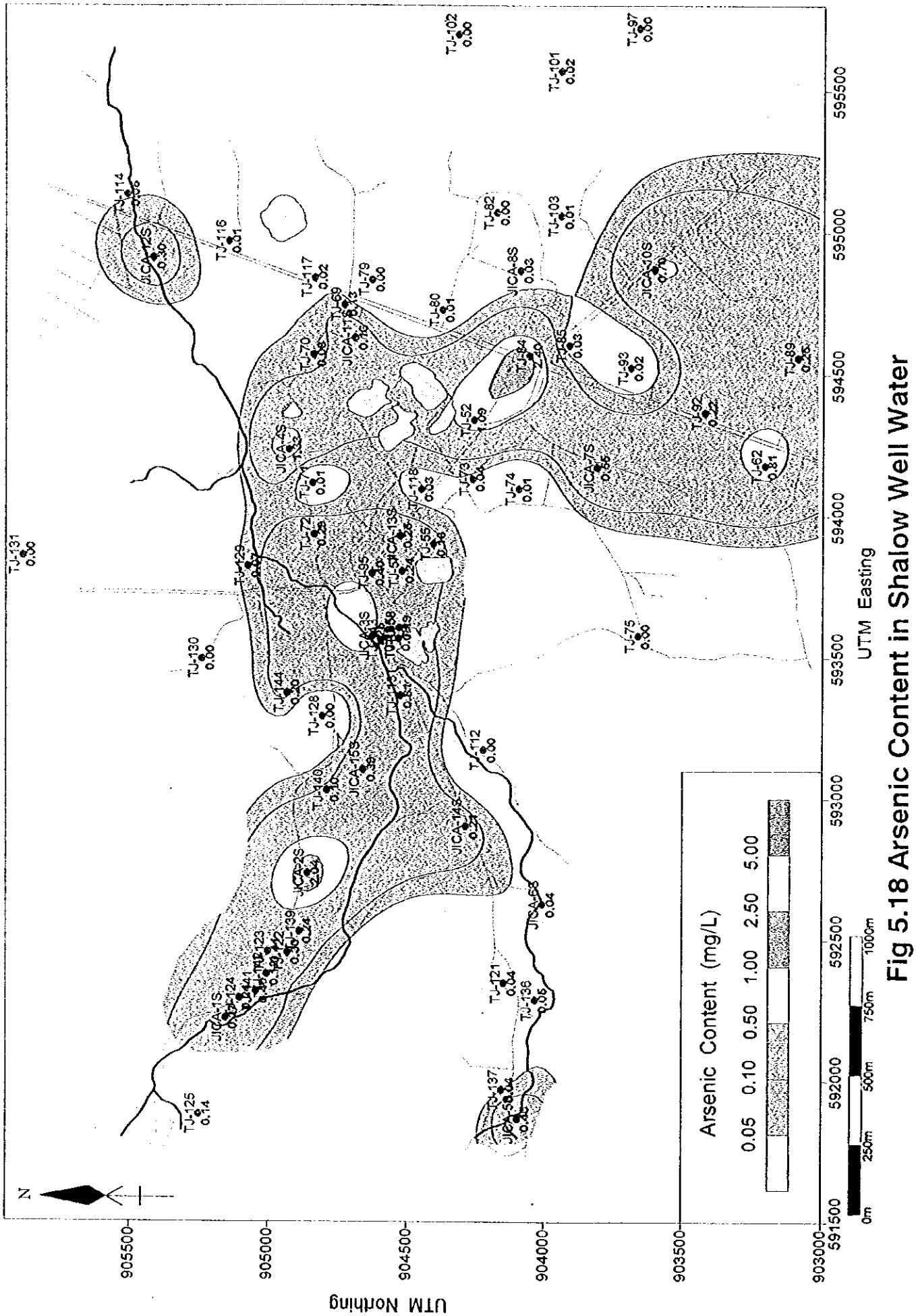

Fig 5.18 Arsenic Content in Shalow Well Water

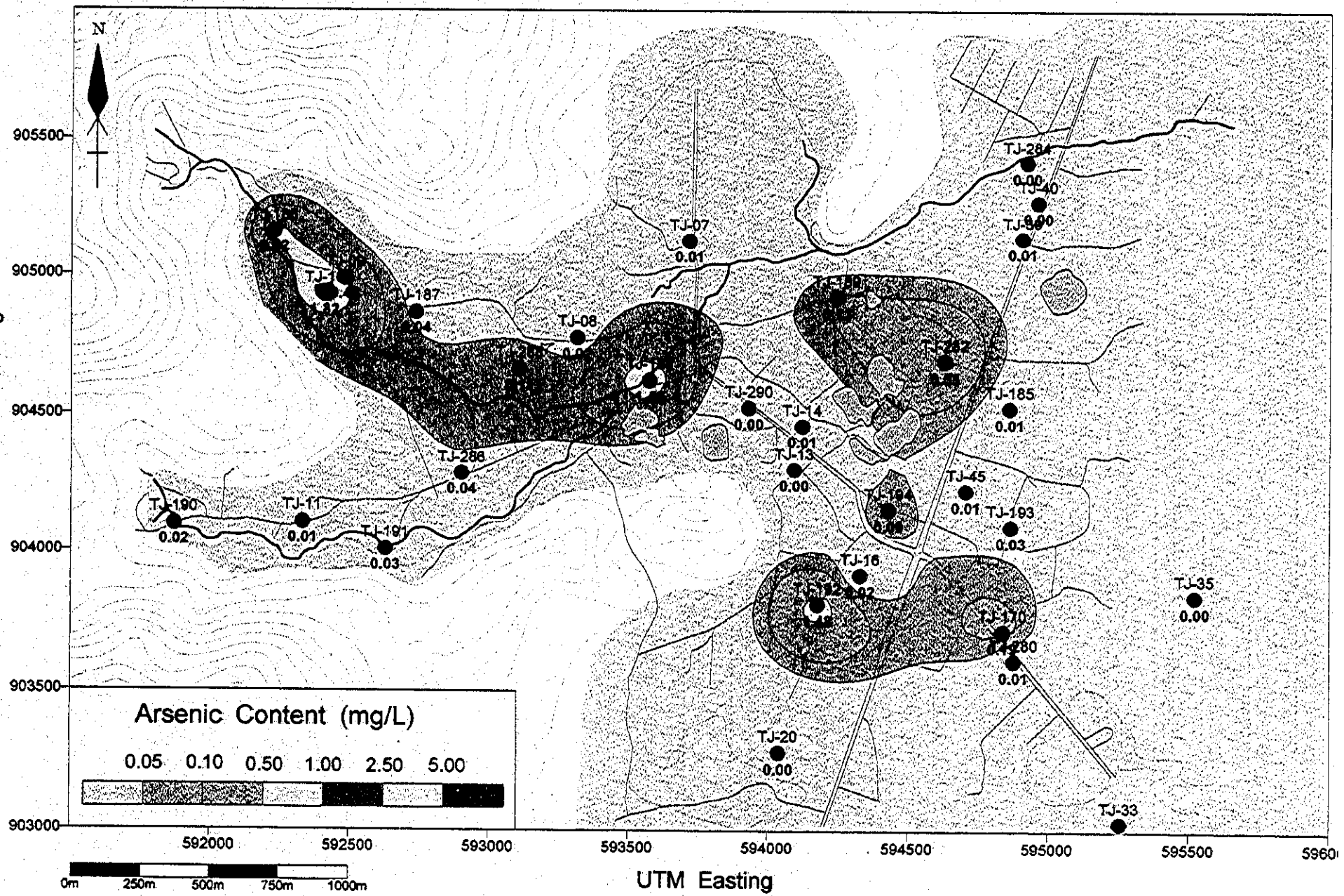

Fig 5.19 Arsenic Content in Deep Well Water

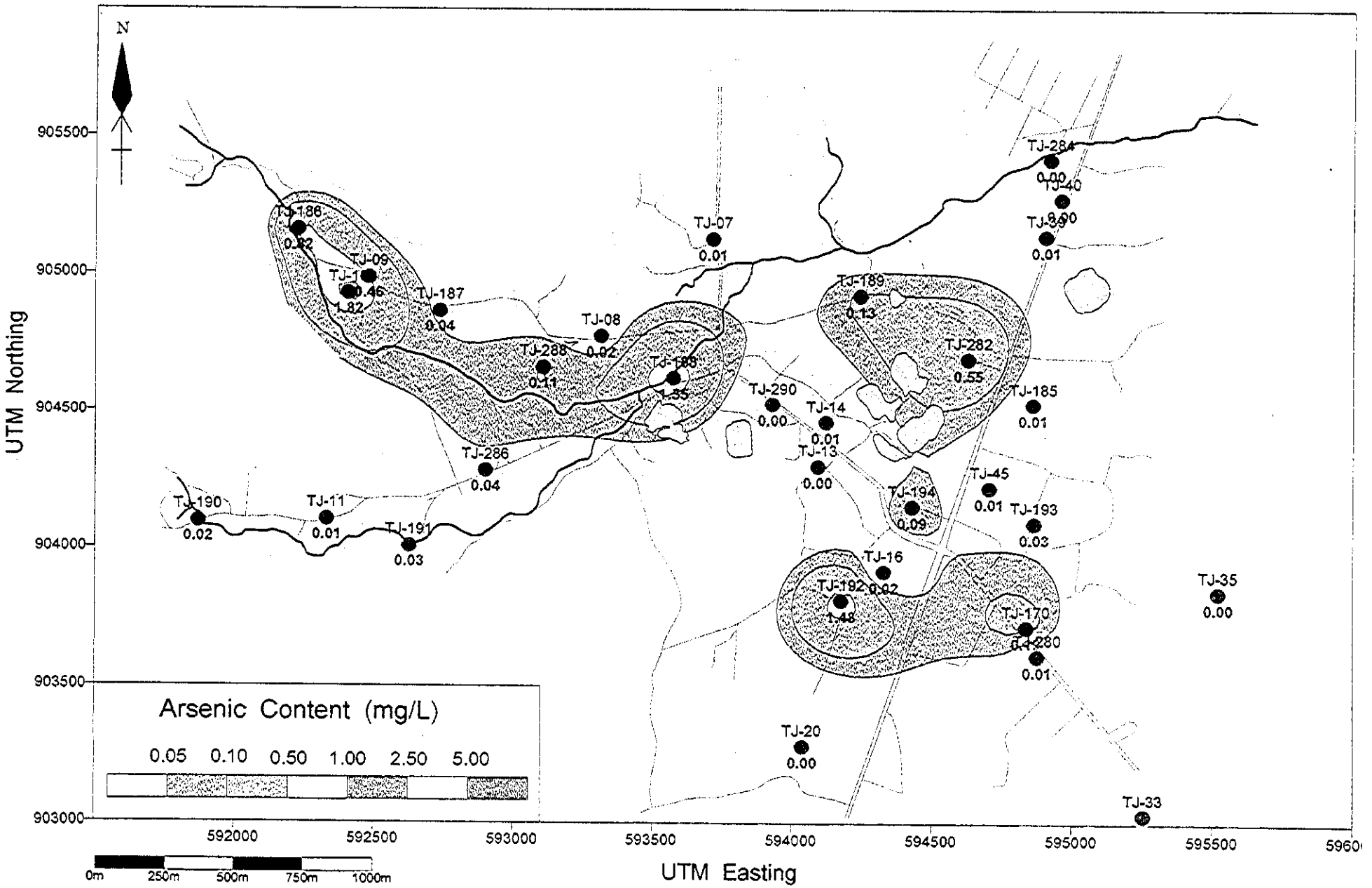

Fig 5.19 Arsenic Content in Deep Well Water

5.2 地下水流動・汚染拡散シミュレーション

5.2.1 解析手法

地下水中のヒ素移動を解析するために、数値モデルを構築し、シミュレーションを行った。モデルとして米国地質調査所が開発した MODFLOW を使用した。

解析の手順は次の通りである。

① 地形・地質調査、地下水調査、井戸台帳調査等の結果から水文地質学的情報を集約し、水理地質単元分析や地下水流動解析を行い、調査地域全体を対象とする水理地質モデル － ロンビブンモデルを構築する。

② 水理地質モデルを用いて地下水の流動状態を再現する。

③ 汚染源調査の結果等、ヒ素汚染関連の情報を入力し、地下水水質解析のための移流・分散モデルを構築する。

④ 汚染現況調査の結果を用いて水質モデルに必要なパラメーターを同定する。

⑤ 汚染源の特徴に応じて、同定されたパラメータを用いてホットスポットモデルを構築する。

⑥ ホットスポットモデルとロンビブンモデルを用いてヒ素汚染の将来予測と対策案の評価を行う（この部分については汚染対策と合わせて次章で述べる）。

なお、汚染物質の挙動解析に用いるモデルは「MODOFLOW」で計算された流速成分をそのまま適用できるように「MODFLOW」にリンクしている「MT3D」を用いることとした。

5.2.2 ロンビブンモデル

(1) グリッドとパッケージ

Fig 5.20 はロンビブンモデルの構成と定濃度セル（汚染源）の設定を示す。

モデルは調査地域全体を対象とし、UTM 座標で Easting：591800～595650、Northing：903010～905880 の範囲をカバーしている。セルは 1 辺が 70m の正方形とし、計算領域は 55 列×41 行である。

断面図 Fig 5.7～5.9 に示されているようにロンビブン地下水盆の水理地質構造は縦方向で 4 層に区分されているので、ロンビブンモデルも 4 層（Layer）に分け、各 Layer と水文地質単元との対応は次の通りである。

Layer1：グループ 1 内の浅層帯水層

Layer2：グループ 1 内の不透水層

Layer3：グループ 1 内の深層帯水層

Layer4：グループ 3 と 4 を統合した基盤岩帯水層

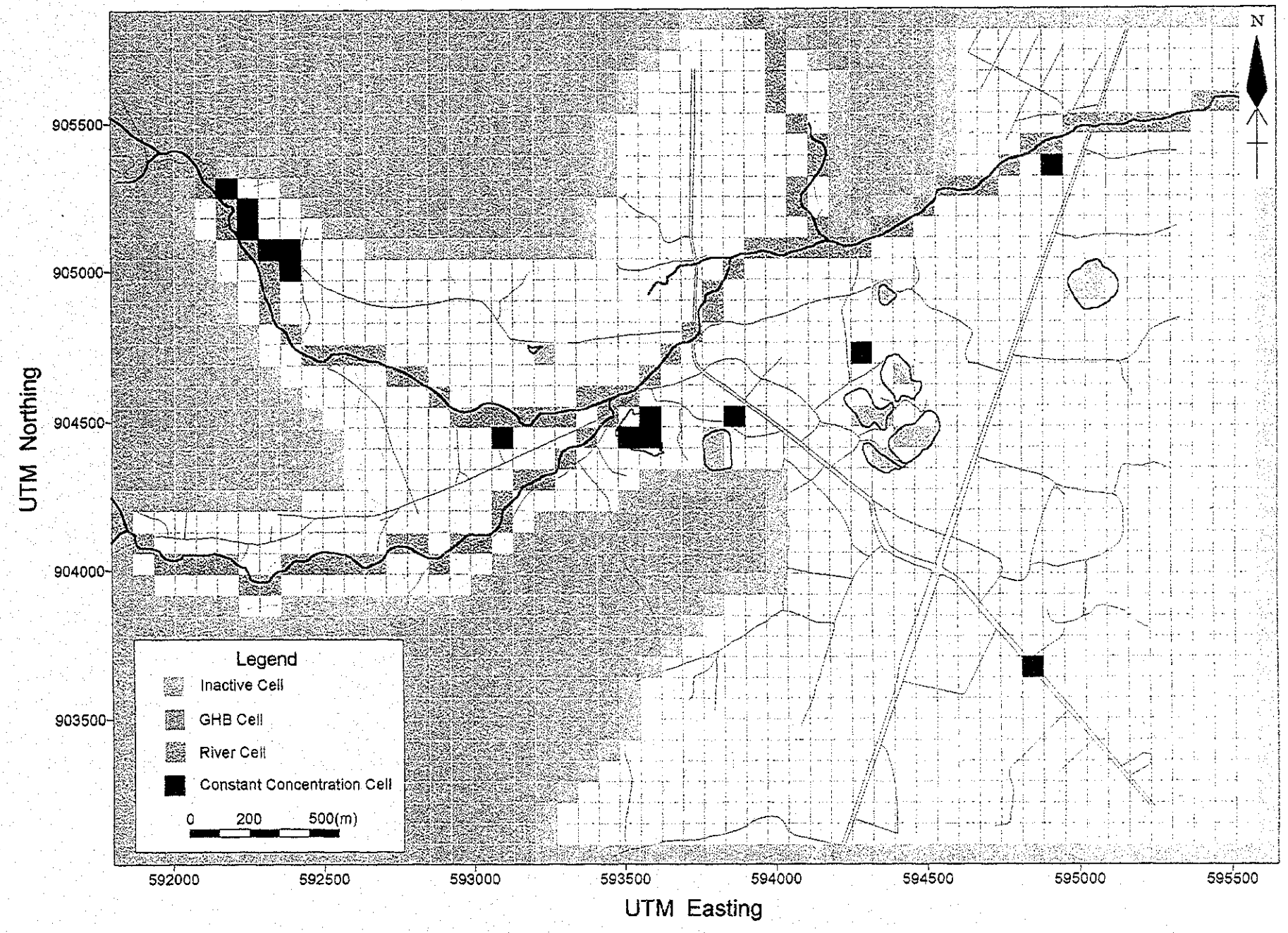

Fig 5.20 Composition of the Ron Phibun Model

山地域では浅層帯水層が分布していないので、不透水境界とした。盆地内を流れる河川はストリーム（Stream）パッケージで、池はGHB（General Head Boundary）パッケージでシミュレートした。その他、涵養（Recharge）と蒸発散（Evapotranspiration）のパッケージも取り入れた。

(2)　帯水層定数

各層の透水係数はとしては本調査試験井で実施した揚水試験の結果からTable 5.5に示す値を設定した。ただし、第2層の粘土層に関する試験データはないので、第1層の浅層帯水層と第3層の深層帯水層の透水係数を平均してから10^{-3}を乗じて設定した。

Table 5.5 Aquifer Parameters for Ron Phibun Model

層別	タイプ	層厚	水平透水係数	鉛直透水係数	貯留係数
1	不圧	7	5×10^{-4}～1×10^{-1}	5×10^{-5}～1×10^{-2}	---
2	被圧	5-15	1×10^{-7}～2×10^{-5}	1×10^{-8}～2×10^{-6}	1×10^{-5}
3	被圧	3-8	3×10^{-4}～2×10^{-2}	3×10^{-5}～2×10^{-3}	5×10^{-3}～1×10^{-1}
4	被圧	15	3×10^{-3}～4×10^{-2}	3×10^{-4}～4×10^{-3}	3×10^{-4}～2×10^{-1}

注：透水係数の単位はcm/s

(3)　諸条件

①　降雨

定常流計算では地下水涵養量の平均値2.5mm/day（年間912mm）を与え、非定常流計算では水文解析用タンクモデルで算出した降雨による地下水涵養量を与えた。なお、7月～9月分の雨量は地域雨量の平均値を用いた。

②　蒸発散

調査地域では蒸発散量の実測値はない。一方、蒸発散以外に水利用による地下消費のあることが井戸台帳調査と地下水一斉観測で確認された。その水利用に使われる井戸は調査地域に高い密度で分布しているので、井戸パッケージでシミュレートするのは実際には不可能である。そこで、井戸の利用量を蒸発散量に加えたものを計算上の蒸発散量として与えることにした。

③　シミュレーション期間

定常流計算ではシミュレーション期間の設定は必要ない。非定常流計算では第1次地下水一斉観測を実施した1998年9月を開始時間とし、10日間の計算周期（Period）で1年間計算した。

④　初期水位

定常流計算では初期水位を第1層の底面より高く設定し、ドライセルが発生しないよう

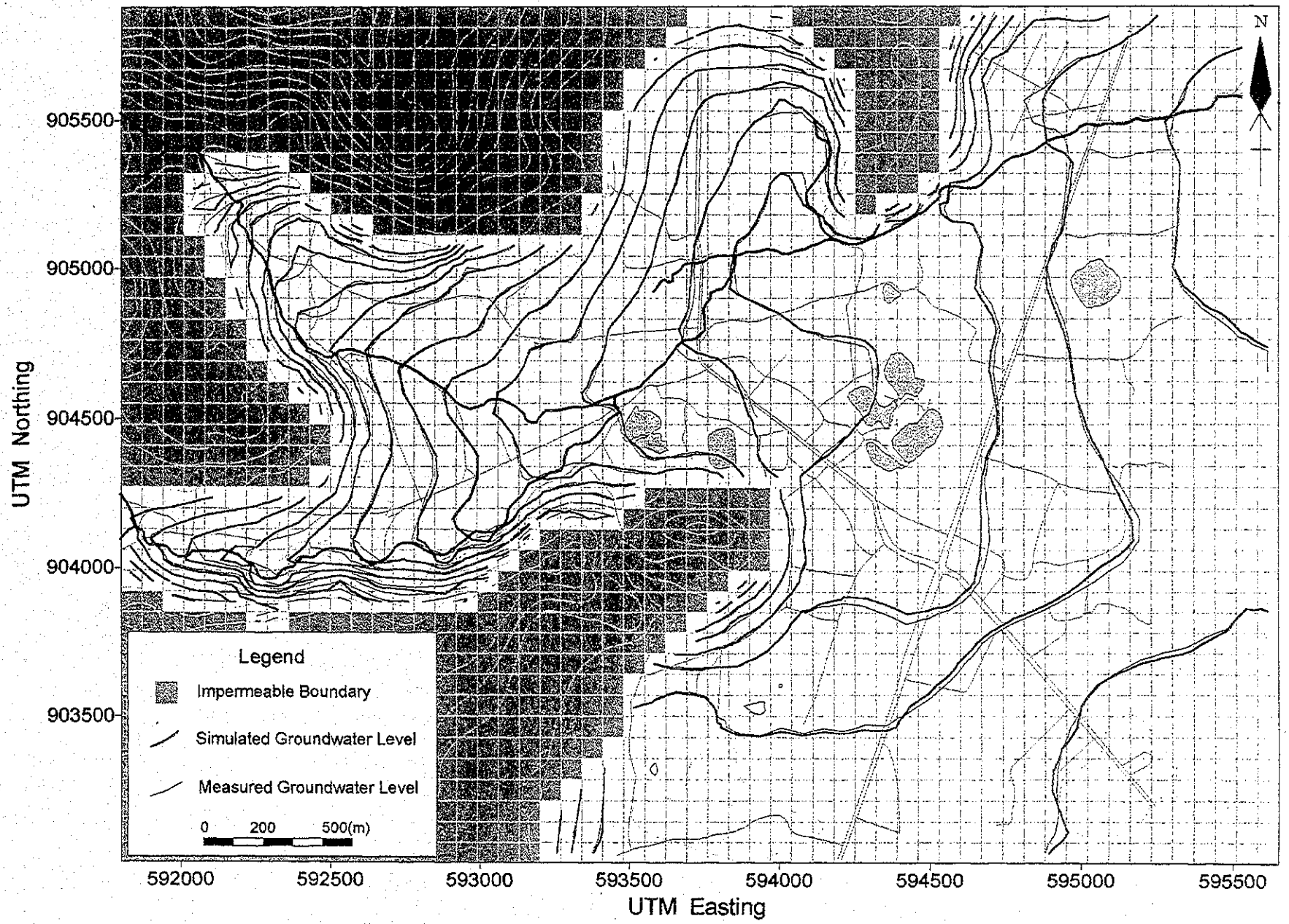

Fig 5.21 Simulated Groundwater Level

に留意した。非定常流計算では計算開始時の地下水位測定結果を初期水位とした。

(4)　水理モデルの計算結果

Fig 5.21 に定常流計算で求めた浅層帯水層の地下水位分布を示す。実測水位と比較すると、調査地域内の水位分布はほぼ再現できたと言える。

定常流により求められた浅層帯水層の水収支を Table 5.6 に示す。

Table 5.6 Water Balance of Shallow Aquifer

項目	m^3/day	m^3/year	mm/day
降雨による涵養	19100	6971500	2.5
河川から流入	120	43800	0.02
蒸発散(井戸利用含み)	−17160	−6263400	−2.25
河川へ流出	−1810	−660650	−0.24
下方浸透	−60	−21900	−0.01
流域外への流出(入)	−190	−69350	−0.02

注：下方浸透は浅層帯水層と下位粘土層間の流出入量の合計値としての正味下方浸透量。

調査地域内の水位変化を検証するために実施した非定常流計算の結果は Fig 5.22 に示した。定常流計算の結果と同様、調査地域の水位変化状況をほぼ再現できたと言える。

5.2.3　汚染拡散モデル

(1)　汚染源セル

汚染源調査で確認された汚染源位置に 7 ヶ所、計 14 個のセル (Cell) を定濃度 (Constant Concentration) セルとした(Fig 5.20 を参照)。これらの場所は上流から下流へ土石流により運ばれた山元選鉱場の廃棄物で汚染された Huai Hua Mueng 川の上流左岸、同河川下流右岸の廃棄物処分場 (旧)、町中のドレッジ池、町中選鉱場、廃棄物処分場 (新)、地点 32C と 32L である。

定濃度セルには 1mg/l のヒ素濃度を与え、それ以外のセルをアクティブ (Active) セルにして 0.005mg/l の初期濃度を与えた。

(2)　シミュレーション期間

シミュレーションを行う場合、一般にはある時点での観測結果を初期値とし、観測期間の長さに基づきシミュレーション期間を設定し、その期間内の計算対象の変化と実測結果とを照合することによりモデルを検証する。しかし、調査地域では長期にわたるヒ素観測資料が乏しいので、モデルの検証は本調査で確認されたヒ素の現況分布状態を利用するほかない。そこで汚染源が形成されてから現在に至る期間を設定することが必要となる。Huai

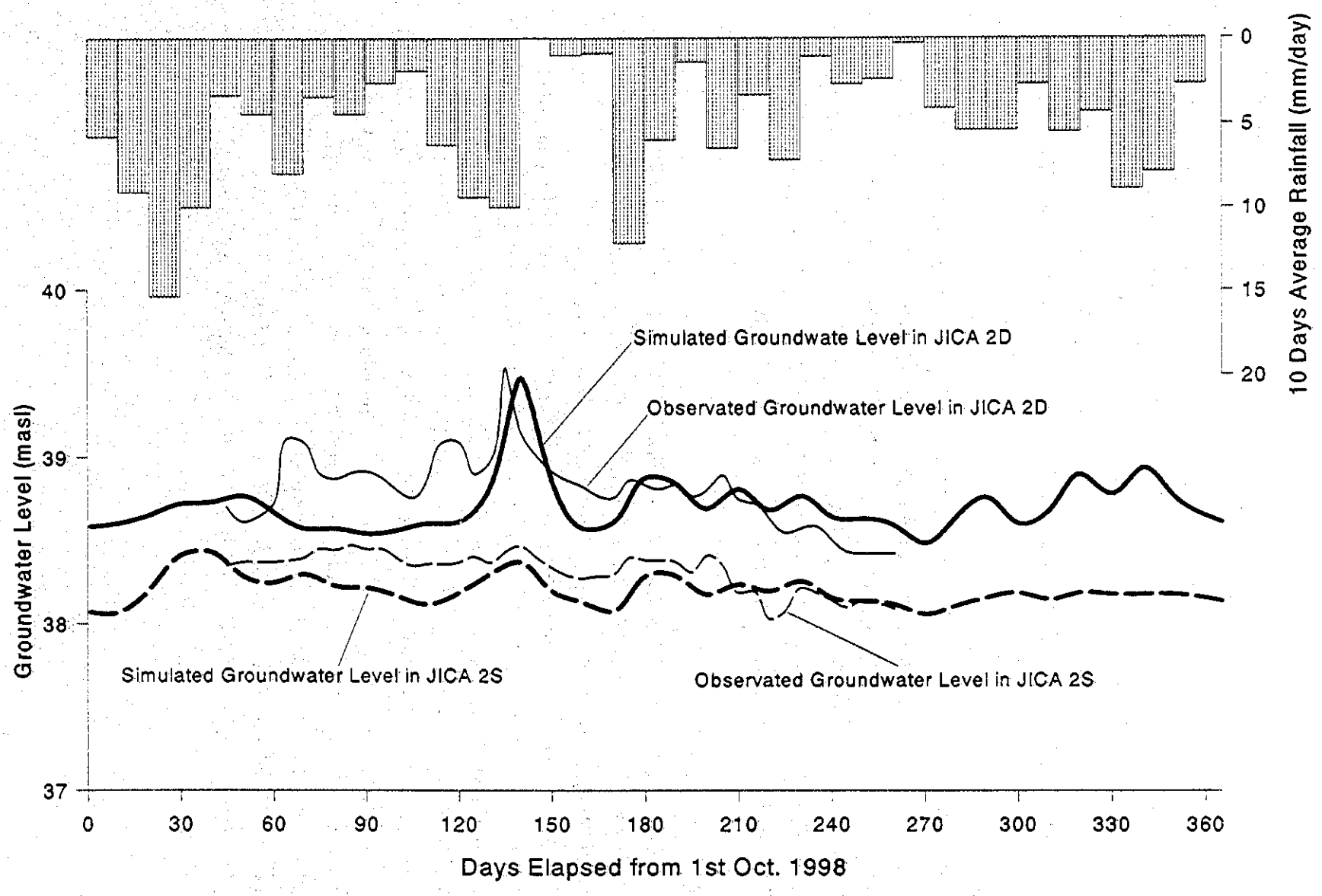

Fig 5.22 Simulated Groundwater Level at Obsrvation Well

Hua Mueng の上流左岸の汚染源には昔から河川によって運ばれたヒ素物質が含まれていないと断言できないが、既存資料と現地聞き取り調査で明らかにされたように 1970 年代に大洪水に伴い山元選鉱場から多量の廃棄物が土石流と一緒に流下し河道も変わったという事実に基づいて、シミュレーション期間を 30 年とした。調査地域の東側にある埋め立て地の形成時期もはっきりしないが、それは高速道路に沿うことから、高速道路の建設完了後、特にタイ国の高度経済成長期の土地開発によるものと推測し、30 年間とした。廃棄物処分場の歴史に関しては不明であるが、埋め立て地の形成時期を推定したと同じ理由により、30 年間とした。昔の選鉱場の跡と町中の精煉場は歴史が長いので、50 年間とした。

(3) シミュレーションタイプ

汚染拡散シミュレーションプログラム MT3D は地下水と共に移動する物質について、その主なプロセスである移流／分散／吸着を単独または組み合わせて計算する機能を持っている。そこで、分散も吸着も考慮せず、ヒ素の移動が地下水の流れと全く同様であると考える場合、すなわち移流だけでヒ素移動状態をシミュレートするケースを基本ケースとし、次に分散の影響を取り込んで移流／分散計算するケースをケース 2 とした。さらに吸着の影響をも加え、移流／分散／吸着計算するケースをケース 3 とした。

(4) パラメーター

移流／分散計算では、帯水層（厳密にいえば帯水層とシミュレーション対象物質）の地化学パラメーターとして縦方向分散能係数α_Lと横方向分散能係数α_Tの設定が必要である。既存の水理地質の研究成果によると、縦方向の分散能係数は広域的なシミュレーションモデルから求められたもので 10～110m、カラム実験で求められたもので 0.01～1cm、中間的な現地トレーサ実験によるもので 0.01～15m と測定のスケールによって大きく異なり、スケール依存性が認められる。横方向分散能係数は縦方向分散能係数の 0.1～0.3 の範囲にある場合が多い。従来の研究結果を元にして、試行錯誤法でパラメーターを選定した。

分散能係数以外に吸着に関連するパラメーターが要求される。土壌中のヒ素吸着は平衡型であるが、非線型である。フォロイントリッヒ（Freundlich）等温吸着線で As(V)の吸着特性を表す時に、分配係数 K_f が pH、リンと鉄の濃度等の条件によって 0.8～31 の間に変化し、平均 13 である。同定数 A は 0.18～0.93 の間に変化し、平均 0.512 である。この結果を受けて試行錯誤で現況が再現できるまでパラメーターを修正した。

以上の方法で設定した各計算ケースのパラメーターを Table 5.7 にまとめた。

Table 5.7 Parameters for Contaminant Transport Model

ケース No.	α_L	α_r	K_f	A
1	--	--	--	--
2	30	3	--	--
3	30	3	1.3	0.051

(5)　結果

ホットスポットモデルを除いて、文章と図に記しているシミュレーション期間は池と町中精煉場以外の 5 ヶ所のシミュレーション期間であり、ドレッジング池と町中選鉱場はそれより 20 年長い。

①　ケース 1

Fig 5.23 はケース 1 の 30 年目の結果を示す。

②　ケース 2

Fig 5.24 はケース 2 の計算結果を示す。

分散の影響を取り込んでから汚染範囲はケース 1 と比べて拡大し、実測したヒ素分布の図 5.23 と対照すれば、現況浅層帯水層でのヒ素汚染が帯状に分布する特徴がより良く現れている。従って、調査地域での地下水中のヒ素移動のシミュレーションには分散の影響を考慮しなければならない。

③　ケース 3

Fig 5.25 にケース 3 の計算結果を示す。各汚染源から汚染が拡大してきたプロセスが示されているだけでなく、30 年目の結果は他のケースと比較して最も現況と調和していると考えられる。

5.2.4　ホットスポットモデルの構築

現況再現はあくまでもモデルを検証するための手法であり、モデルを構築する目的は汚染発展の予測と対策事業の評価にある。

特に本調査で提案する対策事業は個別汚染源を対象とするものであるので、一つ一つの汚染源の分布特徴をできるだけ精密にモデルに取り込むことが望ましい。ロンビブンモデルは、調査地域の地下水流動解析と広域的な現況再現に適用され、パラメーターの調整には十分な役割を果たしたが、地域全体をさらに細かく分割してより小さなグリッドにすることはモデル設定に関連する基礎データも欠けているし、計算時間もずっと長くなるので、得策ではない。一方、個別汚染源に対しては、綿密なオーガー調査や地形調査等が実施されたし、個別汚染源を対象とするなら、モデルのセル数を増やす必要もないので、実施可能な範囲でシミュレーションの精度を上げることができると考えられる。

そこで、ドレッジ池（町中選鉱場を含めて）、サイト 32C と 32L の 3 ヶ所の汚染源を中心にして、ホットスポットモデルを構築した。

3 つのホット・スポットモデルはいずれも 4 層で構成し、1 辺が 25m の正方形セルを 40 列×32 行設定した。各層の帯水層定数はロンビブンモデルと同じである。分散能係数等の地化学パラメーターはロンビブンモデルのケース 3 で決められたパラメーターを与えている。Fig 5.26 はホット・スポットモデルとロンビブンモデルとの位置関係を示す。モデルの評価は汚染対策と合わせて次の章で述べる。