

タイ国  
ヒ素汚染地域環境改善計画調査

ファイナル・レポート

要約

平成 12 年 3 月

JICA LIBRARY



J1155584(4)

三井金属資源開発株式会社  
国際航業株式会社

鉦調資

JR

00-088







国際協力事業団

イ 王 国  
学技術環境省

タイ国  
ヒ素汚染地域環境改善計画調査

ファイナル・レポート

要 約

平成 12 年 3 月

三井金属資源開発株式会社  
国際航業株式会社



115584 (4)

## 目次

1. 調査の背景 .....	1
2. 調査目的及び調査概要 .....	2
2.1. 調査目的 .....	2
2.2. 調査分野及び調査概要 .....	2
2.2.1. 調査分野と調査団員 .....	2
2.2.2. 調査概要 .....	2
3. 汚染源の特定 .....	4
3.1. ヒ素汚染供給源 .....	4
3.2. 堆積物中の汚染源 .....	5
4. 汚染源からのヒ素溶出機構 .....	5
4.1. 溶出機構の解明方法 .....	5
4.1.1. ヒ素地化学相 .....	5
4.1.2. 物理化学条件 .....	5
4.1.3. ヒ素の形態 .....	5
4.2. 個別汚染源の溶出機構 .....	7
5. 汚染拡散機構の解明 .....	9
5.1. 地下水流動 .....	9
5.1.1. 水収支 .....	9
5.1.2. 水文地質構造 .....	9
5.1.3. 地下水流動状況 .....	10
5.2. 地下水流動・汚染拡散シミュレーション .....	10
5.2.1. ロンビブンモデル .....	10
5.2.2. ホットスポットモデルの構築 .....	12
6. 汚染対策の策定 .....	13
6.1. 汚染対策 .....	13
6.2. 汚染対策評価と監視 .....	14
6.3. 対策実施に向けての展開 .....	15

7. 代替水源	16
7.1. 給水	16
7.2 代替水源のポテンシャル	16
8. 社会経済評価	17
9. 提言	18
謝辞	

## 1. 調査の背景

タイ王国南部ナコンシタマラート県ロンピブーン地区では、古くから慢性皮膚病患者が発生していることが知られていた。1980年代後半には、その症状から慢性皮膚病の原因はヒ素中毒によるものと考えられるに至った。

1992年にはヒ素中毒による慢性皮膚病患者は1,000名を超えた。タイ政府機関や外国の研究機関は皮膚病の原因を研究し、本地域で広く行われていた鉱業活動による地下水のヒ素汚染が原因であると結論付けた。

ロンピブーン地区はバンコク南方約800kmのマレー半島にあり、錫鉱化帯の中央に位置している。本地域では、過去100年にわたり、初生の錫-タングステン-ヒ素脈状鉱床や二次的砂錫鉱床が採掘されてきた。(Fig 1)

地下水中のヒ素濃度調査の結果、本地域の井戸水中にはWHO基準( $10\mu\text{g}/\text{l}$ )の50~100倍のヒ素が検出された。過去に、井戸水中のヒ素濃度や断片的な砒素汚染の実態調査は実施されていたが、資金不足や技術的な経験不足から、詳細なヒ素の溶出源や地下水へのヒ素溶出機構は研究されていなかった。

タイ政府は応急対策として、地域住民に対し汚染地域外から飲料水を輸送したり、雨水を貯めるための水甕を配ったりしている。最近、政府は地域に小規模な簡易水道を建設した。しかしながら、地域住民は従来地下水を利用しており、飲料水に代金を支払う習慣が無く、支払能力も低いため、簡易水道はあまり利用されず、地域住民の衛生状況を画期的に改善する策とはなっていない。

汚染された地下水は、地下水流動とともに下流域へ広がり、下流域の住民を危険に晒すことになる。汚染地域を広げないためにも、汚染機構の解明と状況に応じた汚染対策の検討は急務である。

上記に鑑みタイ政府は、日本政府に本地域のヒ素汚染調査を依頼し、この依頼を受け本調査は実施された。

1998年9月から1999年8月までの間、雨期と乾期にそれぞれ現地調査を実施した。

## 2. 調査目的及び調査概要

### 2.1. 調査目的

本調査の目的は、下記の4項目である。

- ①ロンビブン地区におけるヒ素汚染源の特定
- ②ヒ素汚染メカニズムの解明
- ③周辺地域や下流域へのヒ素汚染拡散を軽減するための対策を策定する
- ④本調査実施を通じカウンターパート機関であるタイ王国 科学技術環境省 環境質促進局 環境研究研修センター (ERTC) に対し技術移転を行う。

### 2.2. 調査分野及び調査概要

#### 2.2.1. 調査分野と調査団員

調査分野と調査団員は以下の9分野11人であった。

大屋 峻	総括
南雲 義広	鉱山地質
濱 博也	地質1
中村 正司	地質2/選鉱・製錬
鎌田 烈	水文1
雷 沛豊	水文2
押川 尚子	分析
福田 宗弘	分析
石塚 善章	試錐
高多 明	土木・環境
升村 章司	社会・経済

また、現地調査は下記の通り実施した。

第1次調査	1998年9月8日 ~ 12月10日
第2次調査	1999年1月20日 ~ 3月16日
第3次調査	1999年5月17日 ~ 8月27日
第4次調査	1999年8月23日 ~ 8月28日
第5次調査	1999年12月12日 ~ 12月21日
第6次調査	2000年3月12日 ~ 3月21日

#### 2.2.2. 調査概要

1) 地域地下水のヒ素汚染源の特定・ヒ素汚染分布・ヒ素汚染機構調査として次の事項を調査した。

- ・ 本地域へのヒ素の供給源としての花崗岩中の脈状錫鉛床調査
- ・ 脈状錫鉛床の採掘に伴うずりなどヒ素含有鉛山廃棄物の挙動

- ・ 選鉱製錬に伴うヒ素の挙動及び選鉱廃棄物の所在
  - ・ 沖積層中の浅層地下水ヒ素濃度分布
  - ・ 土壌中の可溶性ヒ素の挙動
  - ・ 選鉱場の廃棄物調査
- 2) 汚染源からのヒ素溶出機構解明のため、次の事項を調査した。
- ・ 段階溶出試験によるヒ素溶出相の解明
  - ・ 地下水のヒ素汚染の関係解明のための沖積層の物理化学的条件調査
- 3) 汚染した地下水ならびに地表水の挙動調査として次の事項を実施した。
- ・ 地下水の涵養と流出
  - ・ コンピュータによる地下水流動モデル作成
- 4) ヒ素汚染の社会経済的な影響を調査するとともに、対策実施機関について調査した。
- 5) 調査結果を総合的に解析し、ヒ素汚染対策法を検討した。
- ・ 汚染土壌の除去
  - ・ 汚染水の処理
  - ・ 溶出の防止
  - ・ 代替水源調査

### 3. 汚染源の特定

#### 3.1. ヒ素汚染供給源

ロンビブン行政区におけるヒ素汚染の負荷量を検討すると、ヒ素の元々の供給源である錫の一次鉱床（山錫鉱床）からのヒ素は、汚染の負荷量に若干の寄与はあったにしても、これが調査地域の主たるヒ素負荷要因になったということは断言できないことが判明した。（Fig 2）

一方、調査地域内に残っている選鉱場跡では、錫粗精鉱からの脱ヒ素工程として、ばい焼工程が存在していたと考えられ、ヒ素の硫化物（Aresopyrite, FeAsS）や酸化物（亜ヒ酸、As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）等を含む廃棄物が生成していたことが推定された。現在、これらの選鉱廃棄物は、旧選鉱場跡の内部及び周辺堆積場に残っていると判断されるが、その量は推定発生量に比べ少なく、その他はロンビブン行政区内に廃棄されてきたと推定される。

#### 3.2. 堆積物中の汚染源

調査地域の中で大きく分けて5地区にヒ素汚染地域が有ることが判明し、これらヒ素汚染地区とヒ素中毒患者発生分布とに相関関係が有ることが判った。（Fig 3,4）

ヒ素汚染地域は以下の通りである。

##### 1) 山元選鉱場周辺及びその下流(Fig 5)

選鉱廃棄物及び鉱山廃石などが、洪水などで下流に広がり地下水汚染を生じた。

##### 2) 町中選鉱場周辺 (Fig 6)

選鉱場の西側にあるドレッシング池に選鉱廃棄物を投棄したこと及び、選鉱場周辺に選鉱廃棄物を小規模に投棄したことにより地下水汚染を生じた。

##### 3) 32C 地点付近 (Fig.7,8)

ヒ素を吸着しやすいラテライト質土壌の上に、約 1m 粘土を盛土したため、ラテライト質土壌が還元性となり、吸着していたヒ素を地下水中に放出した。

##### 4) 32L 地点付近

約 2m 盛土されているが、その盛土が選鉱廃棄物などヒ素汚染をしたものであった可能性が高い。さらに、ラテライト質土壌の上に盛土し、生活排水も流れているため、還元性環境によるラテライト質土壌からのヒ素溶出も考えられる。

##### 5) 新旧廃棄物堆積場

上記のほかに、新及び旧廃棄物堆積場付近にもヒ素汚染がある。これらは、有機物堆積物による還元性環境下の土壌からのヒ素溶出と、選考廃棄物などの堆積も考えられる。

## 4. 汚染源からのヒ素溶出機構

### 4.1. 溶出機構の解明方法

#### 4.1.1. ヒ素地化学相

地層中にヒ素が濃集する場合、人工的な精錬廃棄物などを別にすると、その形態は硫ヒ鉄鉱のような硫化物としてか、あるいは鉄、マンガンの酸化物/水酸化物に取り込まれた形である場合が多い。通常の土壤溶出試験では、精錬廃棄物などに含まれる亜ヒ酸は溶出するが、上記の硫化物や鉄、マンガン酸化物/水酸化物中のヒ素は容易には水中に溶出しない。すなわち単なる土壤溶出試験のみでは汚染源を特定できない恐れがあり、また特定できた場合でも、その溶出機構などを解明することは困難である。この観点から本調査では、土壤の段階抽出試験を行い、ヒ素の地化学相を解明して汚染源特定、汚染機構解明に資することとした。本調査では段階抽出は次の5段階で行った。(Fig 9)

Step 1: 水溶性相

Step 2: イオン交換相

Step 3: 吸着・有機物相

Step 4: 硫化物相

Step 5: 鉄、マンガン酸化物相

#### 4.1.2. 物理化学条件

酸化鉄および水酸化鉄からのヒ素溶出は酸化還元電位が支配している。鉄(II)イオンは水中にヒ素と共存した場合、酸化雰囲気中ではヒ素と共沈し、水酸化鉄を生成する。また水酸化鉄および酸化鉄は酸化雰囲気中ではヒ素を極めて良く吸着する。しかしながら、これらの鉄と共沈して生成した水酸化物中のヒ素、および酸化鉄などの表層に吸着されたヒ素は雰囲気育が還元的になると溶存鉄と共に環境中に放出される。一方、硫化物からのヒ素溶出は硫ヒ鉄鉱などが比較的安定であることから、通常的环境中では高濃度のヒ素溶出をする恐れは小さいものと思われる。(Fig 10.11)

#### 4.1.3. ヒ素の形態

ヒ素はその化学形態によって、毒性の異なる元素である。水中の無機態ヒ素と水生生物中の有機態ヒ素ではその毒性が数百倍から数千倍の差がある。また同じ水中の無機態ヒ素でも三価のAs(III)と五価のAs(V)では毒性に数倍の差があり、As(III)のほうが毒性が強い。また土壤、地下水中の挙動もその形態により大きく異なる。すなわちAs(III)は電氣的に殆ど中性に近く、吸着され難いのに対して、As(V)は正の電荷を帯びており、吸着され易い。したがって、ヒ素汚染の調査には、形態分析が重要である。(Fig 10)

Table 1 As(III) and As(V) distribution

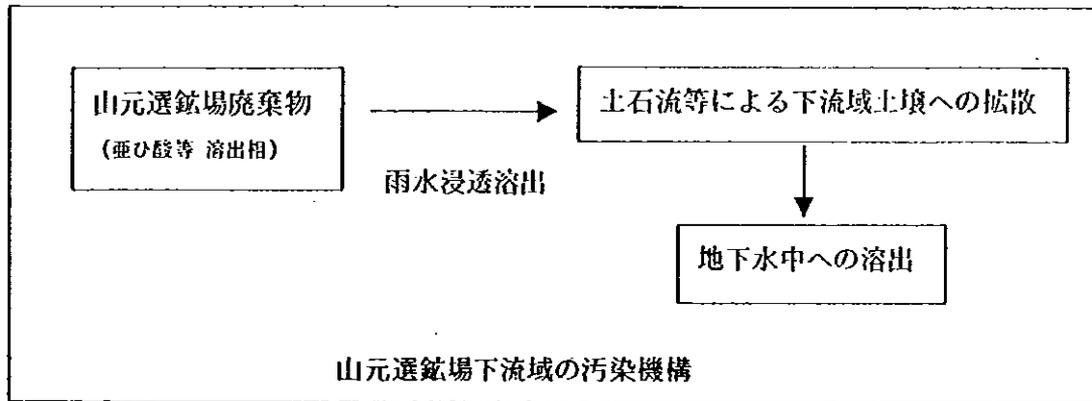
	As(III) mg/l	As(V) mg/l	As(V)/As(III)	ORP(mV)
河川水 n(試料数)=34	0.035	0.125	3.578	340
オーガー水(新) 99年掘削直後測定 n=29	1.706	0.043	0.025	176
オーガー水(旧) 98年掘削一年後測定 n=23	1.005	0.060	0.060	261
井戸水 n=22	0.125	0.344	2.746	325

第三次現地調査で採取測定した地下水・河川水のヒ素形態の平均値分布を上表にまとめる。この表から河川水については As(V)が卓越しており、概ね 80%が As(V)である。また井戸水については概ね 70%が As(V)である。一方オーガー水(新)については、98%が As(III)である。

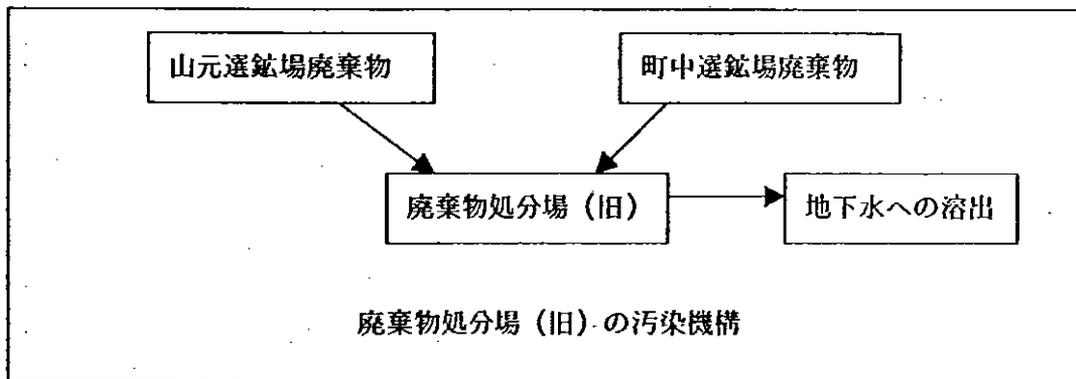
#### 4.2. 個別汚染源の溶出機構

本調査域では、ヒ素汚染機構は場所により異なることが明らかになった。個別汚染源の溶出機構を模式的にまとめると次のようである。

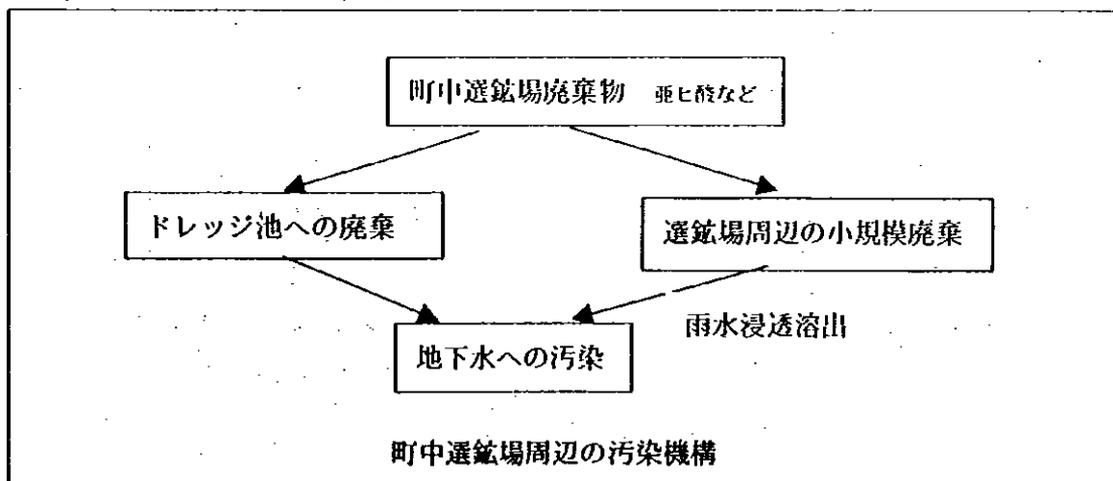
##### 1) 山元選鉱場



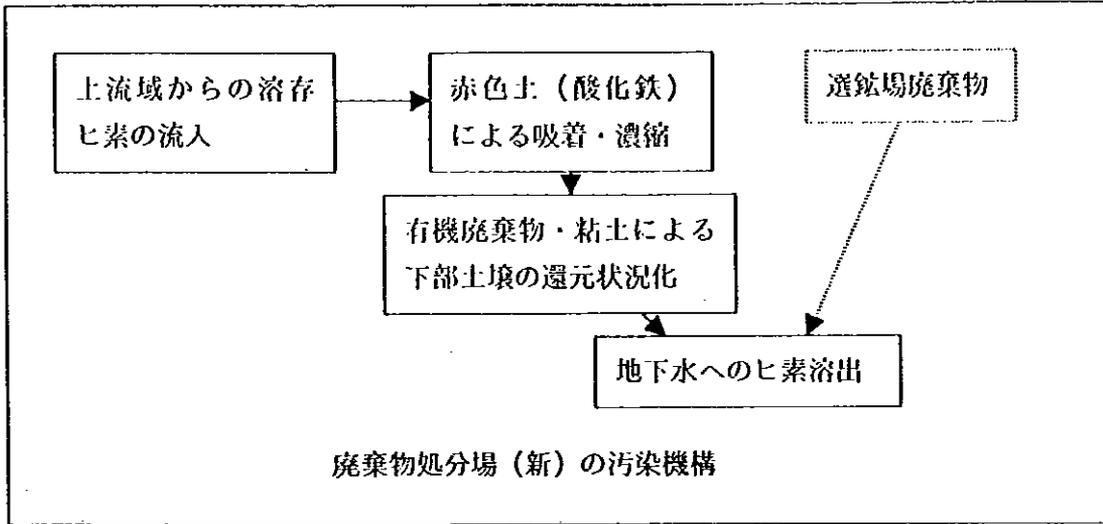
##### 2) 廃棄物処分場 (旧)



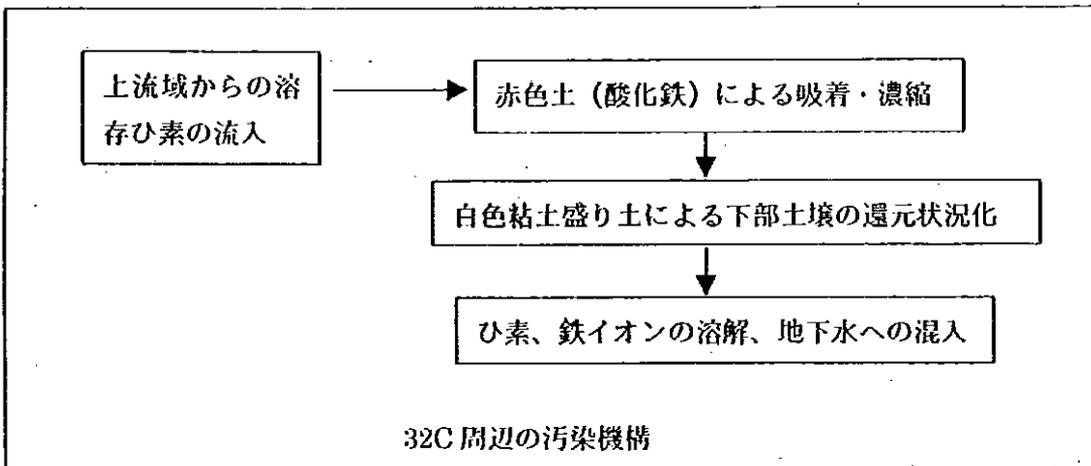
##### 3) 町中選鉱場とドレッジ池



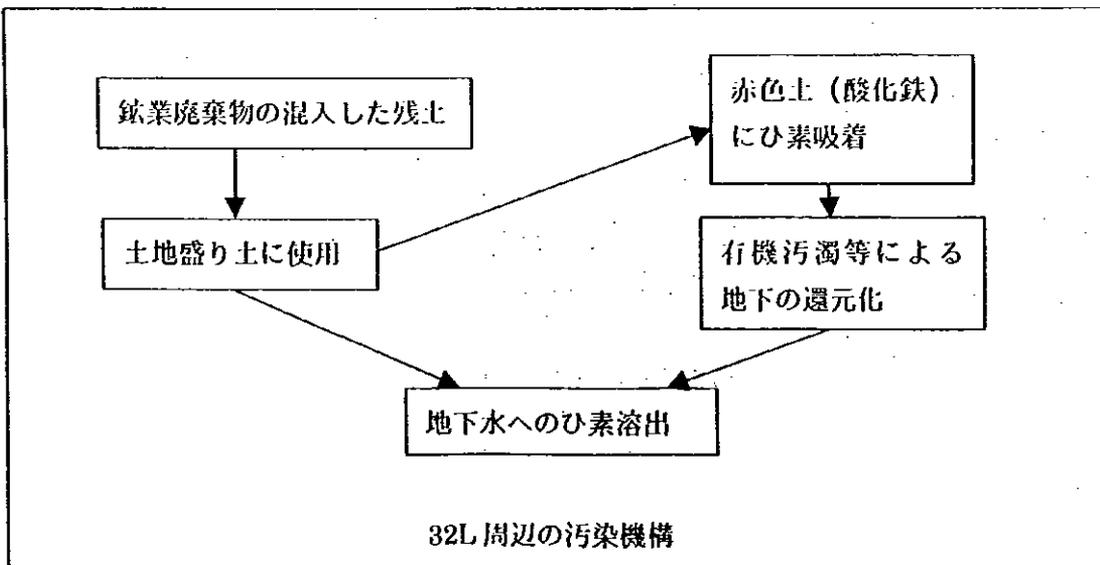
4) 廃棄物処分場（新）



5) 32C 周辺



6) 32L 周辺



## 5. 汚染拡散機構

### 5.1. 地下水流動

#### 5.1.1 水収支

気象観測で収集した雨量観測結果と水文解析モデルを用いて調査地域内の水文解析を行った。

Table 2 Summary of Hydrological Analysis Using the Tank Model

	降雨量(mm)		蒸発散量(mm)		地表流出 (mm)	地下水涵養	
	調査年	平年	調査年	平年		量(mm)	率(%)
10月(10日から)	366	125	33	40	121	212	58
11月	181	502	44	49	123	14	8
12月	92	243	44	49	70	-22	-24
1月	100	50	45	52	51	4	4
2月	302	45	46	51	197	59	20
3月	173	87	60	64	69	44	25
4月	169	129	55	70	71	43	25
5月	118	110	56	71	52	10	8
6月(23日まで)	58	59	39	53	29	-10	-17
総計	1,559	1,350	422	499	783	354	23

#### 5.1.2. 水文地質構造

調査地域の水文地質は、井戸台帳の地層記録や、今回実施した試錐調査の結果から、Table 3に示すように、4つの水文地質単元に区分できる。(Fig 12.13)

Table 3 Summary of Aquifer Group

水文地質单元	地質時代	地層及び岩相区分	帯水層区分
グループ1 沖積層・洪積層	沖積世	砂礫層	浅層帯水層
		粘土層	難透水層
	洪積世	粘土混じり砂層	深層帯水層
グループ2 基盤岩(花崗岩)	トリアス紀	両雲母花崗岩 風化帯	帯水層
		両雲母花崗岩 新鮮部	難透水層 (構造帯を除く)
グループ3 基盤岩(石灰岩)	オルドビス紀	石灰岩 亀裂・空洞部	帯水層
		石灰岩 堅硬部	難透水層
グループ4 基盤岩(砂質泥岩)	オルドビス紀	頁岩・シルト岩 亀裂部と石灰岩	帯水層
	カンブリア紀	頁岩・シルト岩 堅硬部	難透水層

### 5.1.3. 地下水流動状況.

Fig 14 に浅層地下水位を示す。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。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。盆地を出て、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ばらしている。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。(Fig 14)

## 5.2. 地下水流動・汚染拡散シミュレーション

### 5.2.1. ロンピンモデル

調査地域の広域的な地下水流動解析、ヒ素汚染の現況の再現のために、ロンピン シミュレーションモデルを構築した。ロンピ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、ロンピンモデルも 4 層 (Layer) に分けた。各 Layer と水文地質单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

### 1) 帯水層定数

Table 4 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	$5 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3}$	---
2	被圧	5-15	$1 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$
3	被圧	3-8	$3 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-1}$
4	被圧	15	$3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-1} \sim 4 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^{-1}$

注：透水係数の単位は cm/s

### 2) 水理モデルの計算結果

定常流により求められた浅層帯水層の水収支を Table 5 に示す。

Table 5 Water Balance of Shallow Aquifer

項目	m <sup>3</sup> /day	m <sup>3</sup> /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。

### 3) 汚染拡散モデル

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。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。シミュレーション期間は、町中の選鉱場は歴史が長いので、50 年間とし、その他は 30 年とした。

シミュレーションは移流だけの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。Fig 15 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。(Fig 15)

### 5.2.2. ホットスポットモデル

個別汚染源対策の評価を行うために、ドレヅ池（町中選鉱場を含めて）、サイト 32C と 32I 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ピブンモデルと同じである。分散係数等の地化学パラメーターはロンピ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。

## 6. 汚染対策の策定

### 6.1. 汚染対策

調査地域の汚染環境改善と住民の福祉のために、次の事について緊急性及び可能性を検討し対策基本計画を作成する必要がある。

- ・ ヒ素汚染された地下水を利用している住民に対し、安全な飲料水・生活用水を供給する。
- ・ ヒ素汚染地域から住民を移転させる。
- ・ ヒ素汚染土壌を除去すると共に汚染地下水を浄化し、地下水のヒ素汚染を改善する。
- ・ 地下水中のヒ素濃度の変化を監視する。
- ・ ヒ素中毒患者の治療・健康管理を支援する。

対策基本計画によって、ヒ素汚染土壌の除去が必要と判断された場合、本調査結果を基に、地下水のヒ素汚染地域の汚染を軽減し、新たなヒ素汚染を発生させないためには次のことが重要である。

#### 1) ヒ素汚染土壌の除去

汚染地域の土壌を除去し、汚染土壌を管理型処分場に保管する。さらに水処理施設を設置し、汚染水を浄化し放流する。

Table 6 Summary of Contaminant Source Removal

汚染源 No.	Location	Size (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Depth (m)	Volume (m <sup>3</sup> )
1	山元選鉱場周辺と下流域				
	Huai Hua Mueng 上流部	300 × 40	12,000	2	24,000
	Huai Hua Mueng 中流部	170 × 130	22,100	1.5	33,150
2	廃棄物処分場(旧)	100 × 100	10,000	2	20,000
3	町中ドレッジ池底質	100 × 150	15,000	1	15,000
4	町中選鉱場及び周辺	50 × 50	2,500	2	5,000
5	廃棄物処分場(新)	100 × 150	15,000	1.5	22,500
5	3 2 C サイト	100 × 50	5,000	1	5,000
6	3 2 L サイト	20 × 200	4,000	2	8,000
	汚染土壌除去量計		81,600		132,650

これら汚染土壌の掘削並びに管理型堆積場での保管が必要な地域の内、その周囲の利用状況、人口密度、規模を考慮し、対策の必要性の最も高いものは次の通りと考える。

- 町中ドレッジ池
- 町中選鉱場及び周辺

### c. 廃棄物処分場

#### 2) 新規の汚染地域発生の回避

平地部にあるラテライト質土壤に粘土などを盛土したり、湿地化したり、有機物を堆積させたりすることにより還元状態を発生させ無いう、土地利用方法に充分注意する。

#### 3) 汚染水の浄化(Fig 16)

汚染地下水と管理型堆積場からの汚染水を処理するために、水処理場を建設する。水処理場で汚染水を生活用水として利用可能な程度に浄化する。

#### 4) 地下水の監視

上記対策の効果並びに新たな汚染発生の監視のために、定期的に地下水の質を調査する。

#### 5) 地元住民の啓蒙

地表付近の土壤が還元状態に置かれることと地下水のひ素濃度の間に密接な関係があることが判明したので、地元住民に対し、表土を還元状態にしないよう啓蒙する。

## 6.2. 汚染対策の評価と監視

3箇所ホットスポットモデルを活用して汚染対策による将来予測をおこなった。

### 1) ドレヅジ池モデル(Fig 17~19)

地下水が停滞しているために、すでに汚染された地下水を取り除かないと、30年経っても完全回復することは期待できない。従って、汚染源を取り除く対策を実施すると同時にすでに汚染された地下水をも取り除く必要がある。

### 2) 32Cモデル

オーガーサイト 32C 周辺の透水係数は浅層帯水層内最小であり、動水勾配も小さいので地下水の流速は極めて遅い。従って、50年後でも汚染域は汚染源から100m以内の範囲にとどまる。池周辺と同様、汚染された地下水を取り除かないと、20年後でも自然浄化による水質回復は期待できない。

### 3) 32Lモデル

オーガー32L周辺の汚染源は面積が小さいのに、拡大速度大きく、50年後には約200m先まで到達する。やはり汚染源を取り除くだけでなく、すでに汚染された地下水をも取り除く必要がある。

汚染監視のため、数本の本格的な監視井で常時、水質の監視を行う体制が望ましい。監視位置としては、以下の5箇所が必要である。

- ・ 山元選鉱場付近からの広域汚染処理が十分であったかをチェックする意味で、この付近の地下水流が村に到達する点が第1に挙げられる。
- ・ 町中選鉱場の付近は住民居住区の密度の高い地域であるので、ここを代表した汚染回復の指標として適当な位置を選定すべきであろう。

- ・ 国道を横切って下流の地区に拡散していく直前での監視位置を設定しておかねばならない。
- ・ 2つのゴミ捨て場の浸出水の監視であるが、ここでは対象をヒ素だけでなく、近代的な水質管理の環境項目とすることが望ましい。

### 6.3. 対策実施に向けての展開

本提言を受けての対策実施はタイ国政府が主体となるべきものであるが、現時点では今後の展開として次の可能性が考えられる。何れの場合も、本調査を基に詳細な予備調査を実施する必要がある。

- ・ ナコンシタマラート県が主体となり、科学技術環境省内に設置された環境基金を活用し対策を実施する。
- ・ 工業省鉍物資源局（DMR）が事業主体となり、鉍業廃棄物対策の一環として対策を実施する。

## 7. 代替水源

### 7.1. 給水

ロンピブン行政区には地方水道公社 (PWA) が管理する水道と保健省 (MOH) が管理する水道の 2 系統がある。また深井戸による給水、溪流からの取水も一部で行われている。

PWA 水道の給水区域は Village 2,12,13,15 及び 7 で、給水戸数は 1,056 戸である。水質基準全項目を年 1 回の定期検査でチェックしている。また月 1 回の簡易検査を行い水質をモニターしている。現在のヒ素濃度は 0.002 mg/l でタイ国の飲料水基準を下回っている。MOH 水道は給水範囲は Village 2,12,15 及び 1,3,9,16 で、配水本管は国道を横切り Village9 へ向かう路線が 5km、南の Village12 へ向かう路線が 3km 敷設されているが、水源水量が少なく給水範囲がひろいこと、一部住民は果樹園の灌漑用水などにもともと無料で河川水を利用していたこと、水料金を払うことに関するコンセンサスの欠如、盗水の横行などのため、現在までのところ MOH 水道施設は運転されていない。(Fig 20)

### 7.2. 代替水源のポテンシャル

ロンピブン周辺の利用中及び計画中の 5 ヶ所の水源地对象として、水源調査を実施した。調査項目は流入河川の流量と水質である。

Location	流量 m <sup>3</sup> /s
No.3 Dam	0.3
Huai Mut Dam	0.009
Sai-ngoh	0.594
Silaluk	0.413
Bangyuan	0.193

水質については、ほとんどの項目はタイ国水質基準を満たしたが、水源地 1 すなわち現在では最も多く利用されている水源地 No.3 Dam のヒ素濃度は 0.41mg/l であり、代替水源対策の観点からは、水源地 1 から、Sai-ngoh と Silaluk の水源地への転換を加速すること望ましい。

## 8. 社会経済評価

本調査により、汚染対策として、汚染土壌の除去方法および汚染地下水の浄化方法を提案した。前者は、汚染凝集地点における汚染土壌を取り除き、それを管理型の処分場に堆積する方法であり、後者は、汚染水の浄化方法として、酸化、凝集、ろ過法を提案し、浄化目標としては、生活用水（洗濯、入浴など）、農業用水および工業用水を考慮した。

保健省の調査では、ロンビブン郡内で、約 4,300 人が慢性ヒ素中毒患者である可能性があるものと推測されているが、ソクラー大学の調査でも、1987 年に判明したヒ素中毒患者の大部分の患者は依然として慢性的なヒ素中毒に悩まされており、ヒ素中毒患者としてまだ認定されていない人たちも含めて、4,000 人以上の人々が本調査で提案された対策の実施によって直接便益を得るであろうと予測される。

従って、このような対策事業を実現するためのより詳細な調査の実施が必要である。

## 9. 提言

ロンピブン行政区では、長期にわたる錫鉱業活動に伴う地下水ヒ素汚染により、1000人を超えるヒ素中毒患者の発生が記録されている。現在、新たなヒ素汚染源となるような鉱業活動は行われていない。しかしながら本調査によると、過去の鉱業活動に伴うと思われるヒ素に汚染された地下水の分布する地区が多く有り、過去に蓄積された土壌中の汚染源からのヒ素の流出が続いていることが判明した。場所によっては、汚染された地下水中のヒ素濃度は飲料水中に許容されるヒ素量の数百倍にも達している。

本地域は、比較的降雨量が多く、雨期に地下水は涵養され下流域へと流出している。地下水流動に伴い、ヒ素に汚染された地下水は下流域へと拡散する危険を伴っている。

調査地域の汚染環境改善と住民の福祉のために、次の事項について緊急性及び可能性を検討し対策基本計画を作成する必要がある。

- ・ ヒ素汚染された地下水を利用している住民に対し、安全な飲料水・生活用水を供給する。
- ・ ヒ素汚染地域から住民を移転させる。
- ・ ヒ素汚染土壌を除去すると共に汚染地下水を浄化し、地下水のヒ素汚染を改善する。
- ・ 地下水中のヒ素濃度の変化を監視する。
- ・ ヒ素中毒患者の治療・健康管理を支援する。

対策基本計画によって、ヒ素汚染土壌の除去が必要と判断された場合、本調査結果を基に、地下水のヒ素汚染地域の汚染を軽減し、新たなヒ素汚染を発生させないためには次のことが重要である。

### 1) ヒ素汚染土壌の除去

汚染地域の土壌を除去し、汚染土壌を管理型処分場に保管する。さらに水処理施設を設置し、汚染水を浄化し放流する。

これら汚染土壌の掘削並びに管理型堆積場での保管が必要な地域の内、その周囲の利用状況、人口密度、規模を考慮し、対策の必要性の最も高いものは次の通りと考える。

- a. 町中ドレッジ池
- b. 町中選鉱場及び周辺
- c. 廃棄物処分場

### 2) 新規の汚染地域発生の回避

平地部にあるラテライト質土壌に粘土などを盛土したり、湿地化したり、有機物を堆積させたりすることにより還元状態を発生させ無いうよう、土地利用方法に充分注意する。

### 3) 汚染水の浄化

汚染地下水と管理型堆積場からの汚染水を処理するために、水処理場を建設する。水処理場で汚染水を生活用水として利用可能な程度に浄化する。

#### 4) 地下水の監視

上記対策の効果並びに新たな汚染発生の監視のために、定期的に地下水の質を調査する。

#### 5) 地元住民の啓蒙

地表付近の土壌が還元状態に置かれることと地下水のひ素濃度の上に密接な関係があることが判明したので、地元住民に対し、表土を還元状態にしないよう啓蒙する。

対策基本計画で汚染土壌の除去が必要とされた場合、次の事項を考慮した詳細な実行可能性調査を実施する。

##### a. 汚染土壌の除去

- 汚染地域範囲の詳細調査
- 汚染地域の土地所有者調査
- 汚染土壌除去後の埋立て用土壌調査
- 管理型廃棄物処分場用地調査
- 管理型廃棄物処分場設計
- 処分場建設並びに土壌除去費用の積算
- 実施計画

##### b. 汚染水処理場建設

- 処理方法の選定
- 処理場建設費用の積算
- 実施計画



## 謝 辞

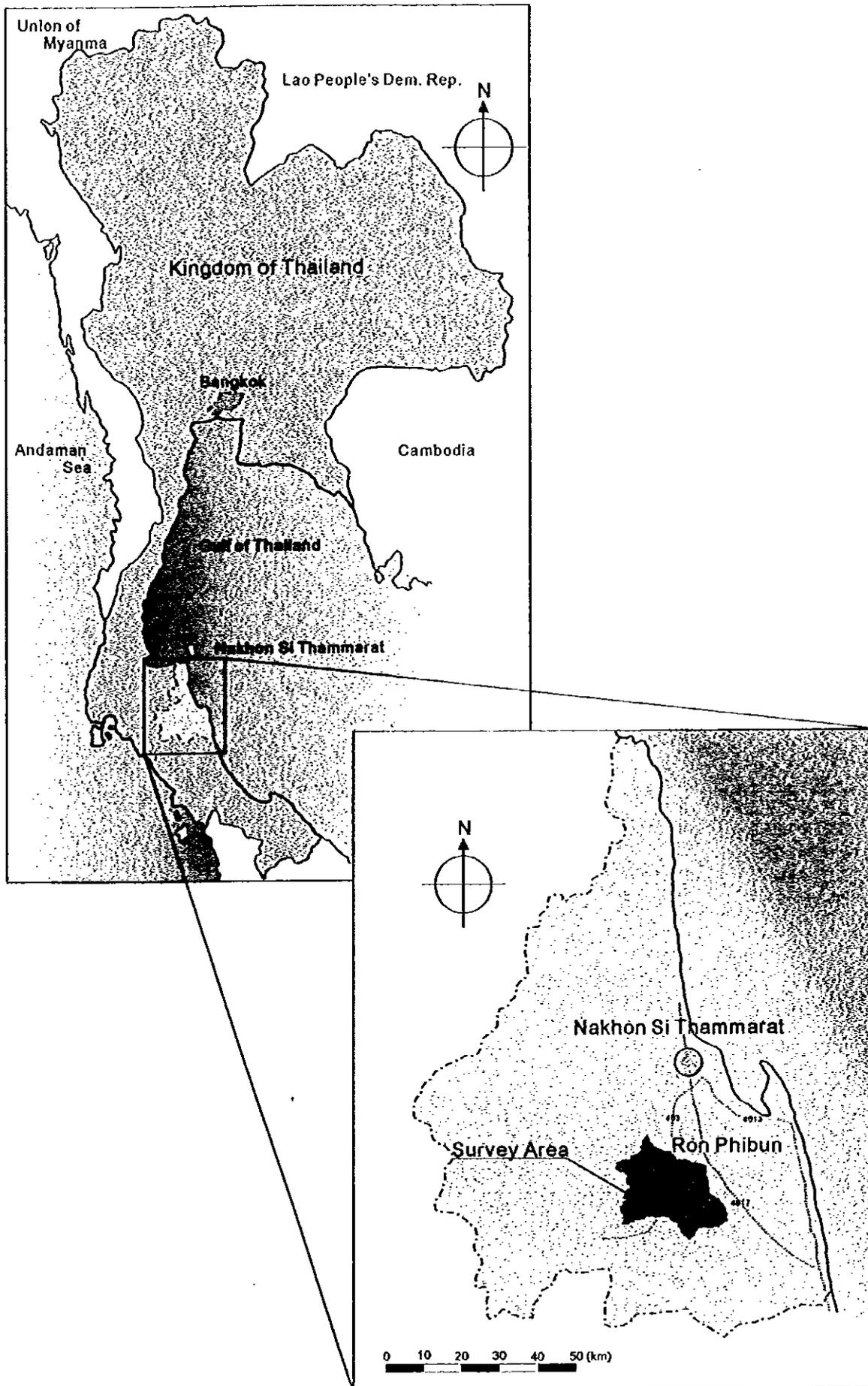
本調査報告書は、調査地域であるナコンシタマラート県ロンピブン行政区のヒ素汚染源の特定並びにヒ素溶出機構の解明、将来の汚染の進展予測及び可能な対策案について、日本国政府及び国際協力事業団の意見等をも反映した。さらに、バンコク及びナコンシタマラートにおいて適宜開催された本調査に関するカウンターパートとの協議をとおして、カウンターパートたるタイ王国科学技術環境省環境質改善局環境研究研修センター（ERTC）、工業省鉱物資源局（DMR）、ナコンシタマラート県庁の各官の意見も反映させている。

本調査により、汚染源の特定、ヒ素溶出機構を明らかにし、対策のグランドデザインを提示することができた。今後、タイ側で本調査結果も含め、汚染源対策から代替水源開発、健康被害改善までにわたる総合的な改善計画の検討がなされることになったが、調査団としては、汚染源対策の緊急性、重要性、便益に鑑み、汚染源対策のフィージビリティ調査及び対策工事の実施を強く推奨するものである。

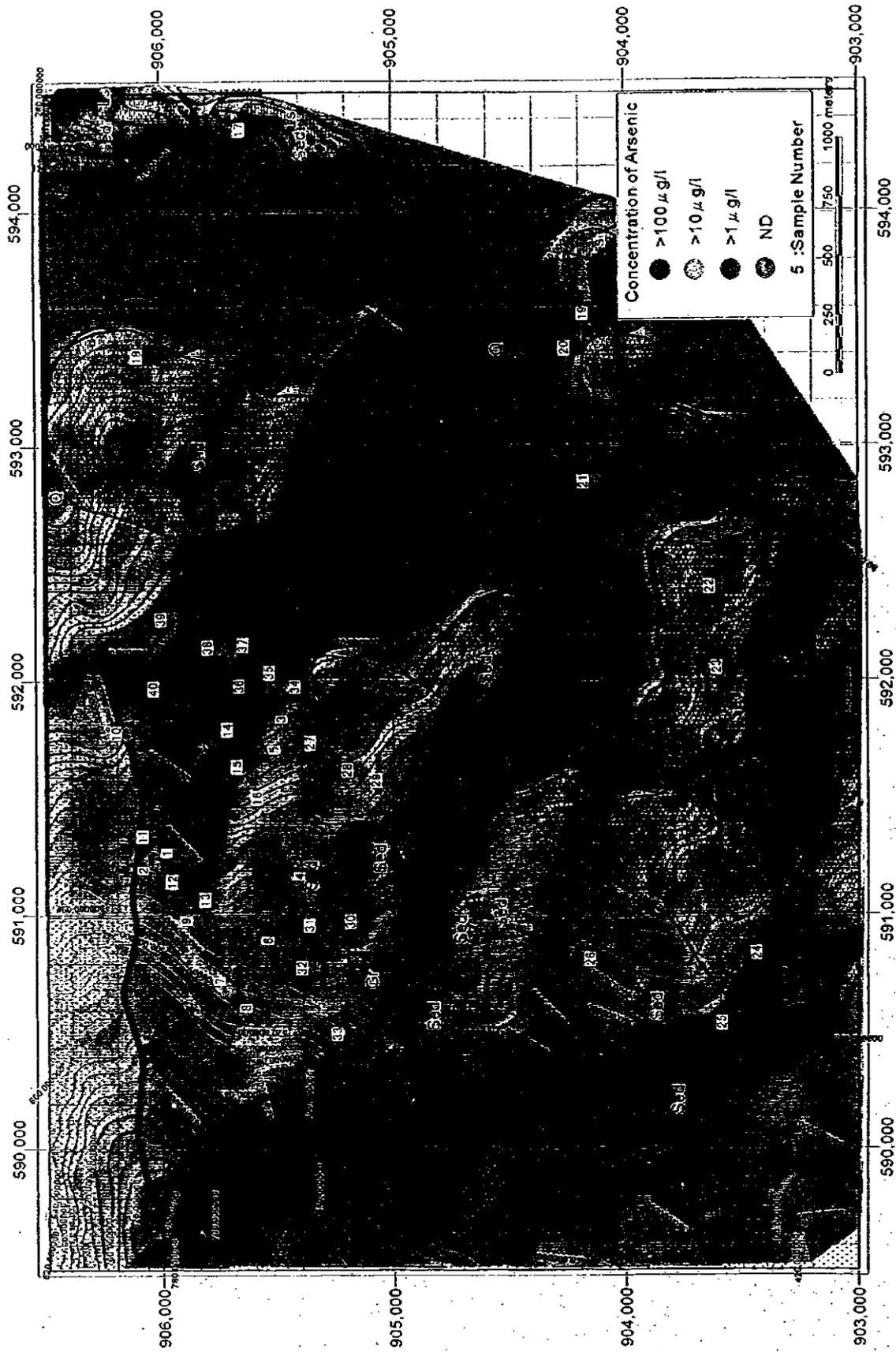
最後に、19ヶ月間に渡り本調査に緊密な協力、暖かい助言、援助を頂いたタイ王国 科学技術環境省 環境質改善局 環境研究研修センター（ERTC）、工業省鉱物資源局（DMR）、ナコンシタマラート県庁、ロンピブン郡庁及び調査地のロンピブン行政区の方々に調査団員一同から感謝をするものである。

なお、本報告書の作成に当たり、国際協力事業団 鉱工業開発調査部 資源開発調査課、外務省、通商産業省の関係各位及び本調査の国内支援委員会の各委員からご指導を頂いた。本報告書はひとえにこれら関係者ご一同のご指導の賜であることを付け加える。





**Fig 1 Location of the Survey Area**



**Fig 2 Location of Soil Samples at Primary Mining Area**

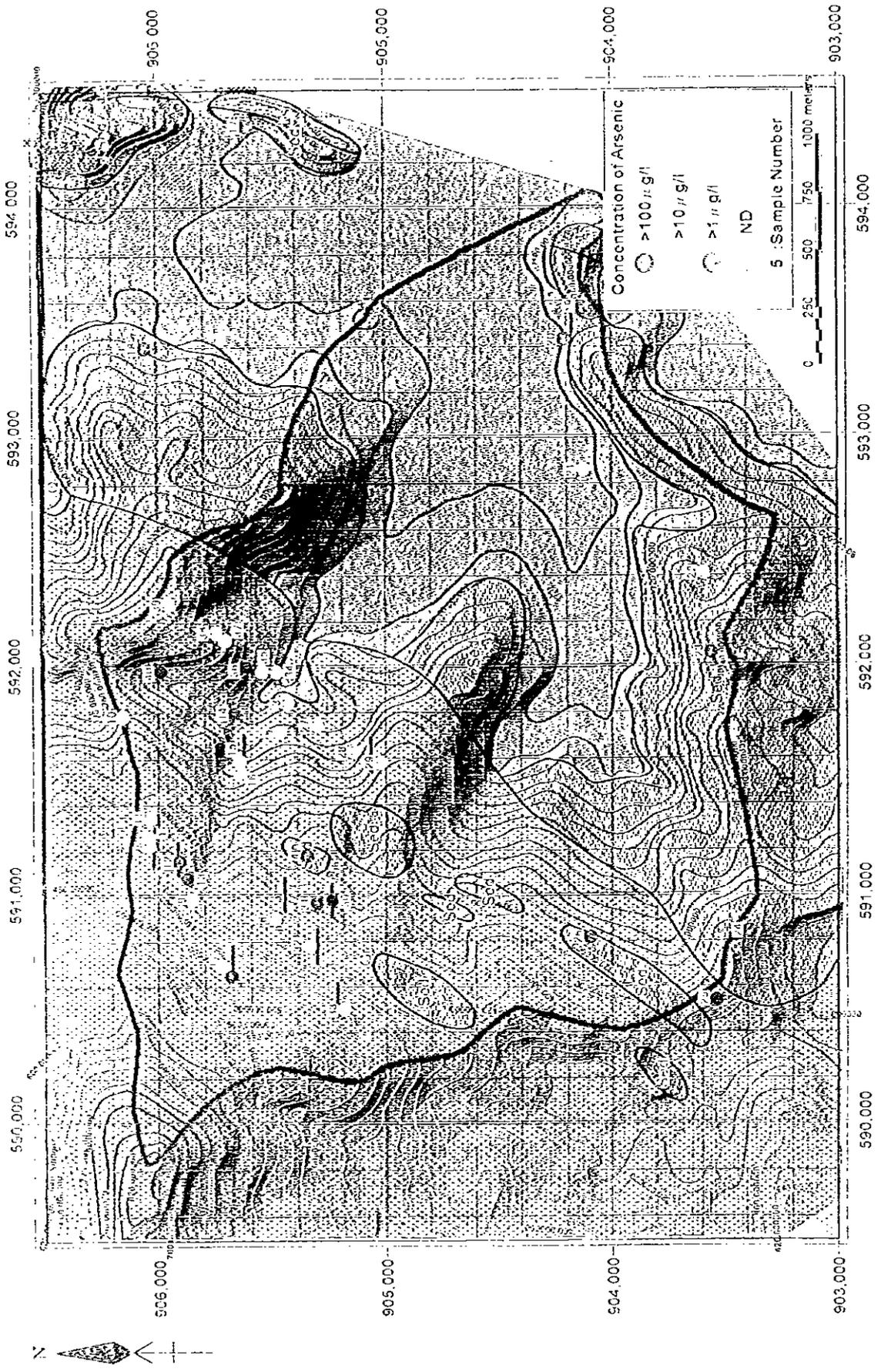


Fig 2 Location of Soil Samples at Primary Mining Area

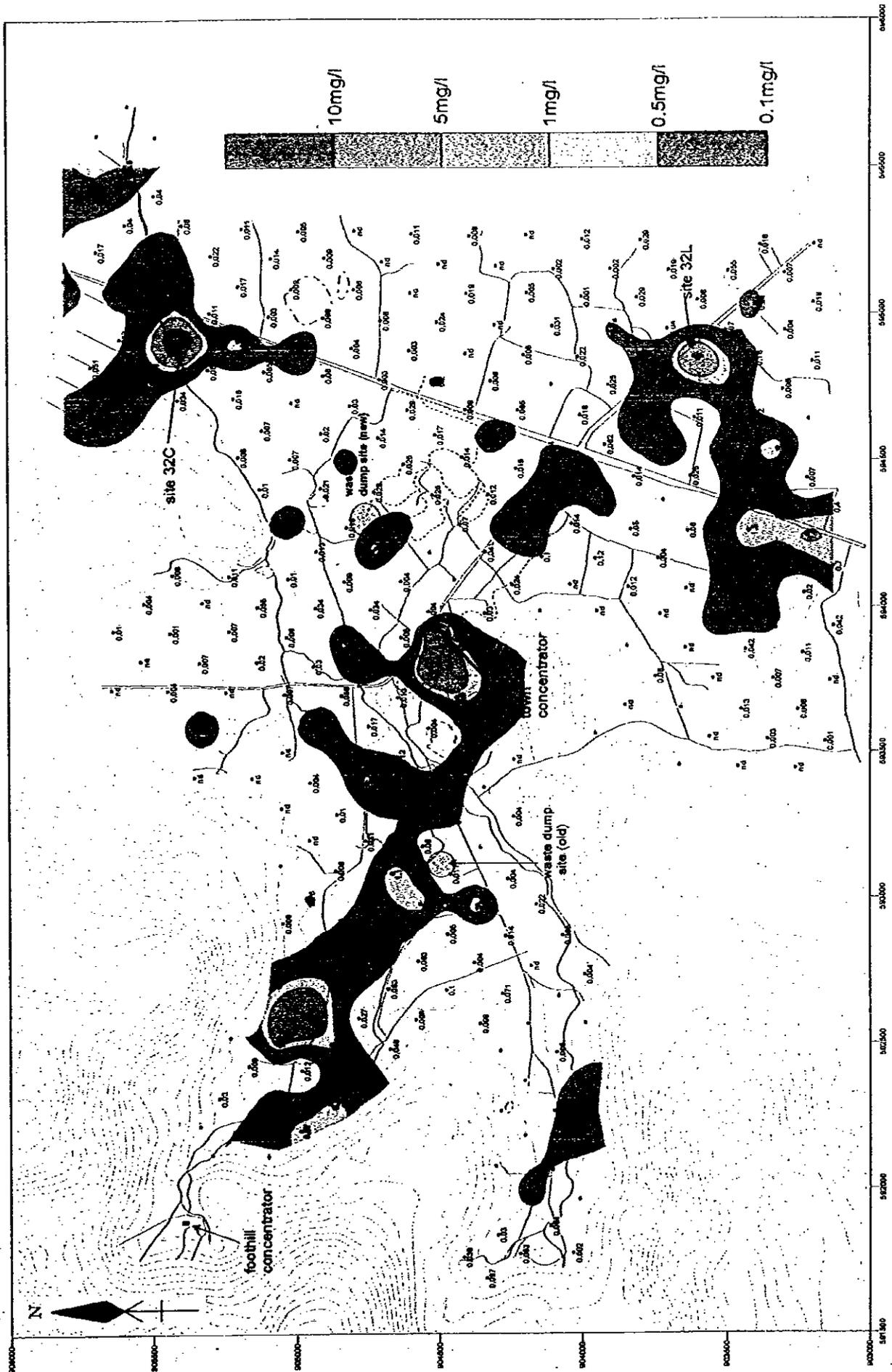


Fig 3 Arsenic Distribution of Auger Water ( 1998 )

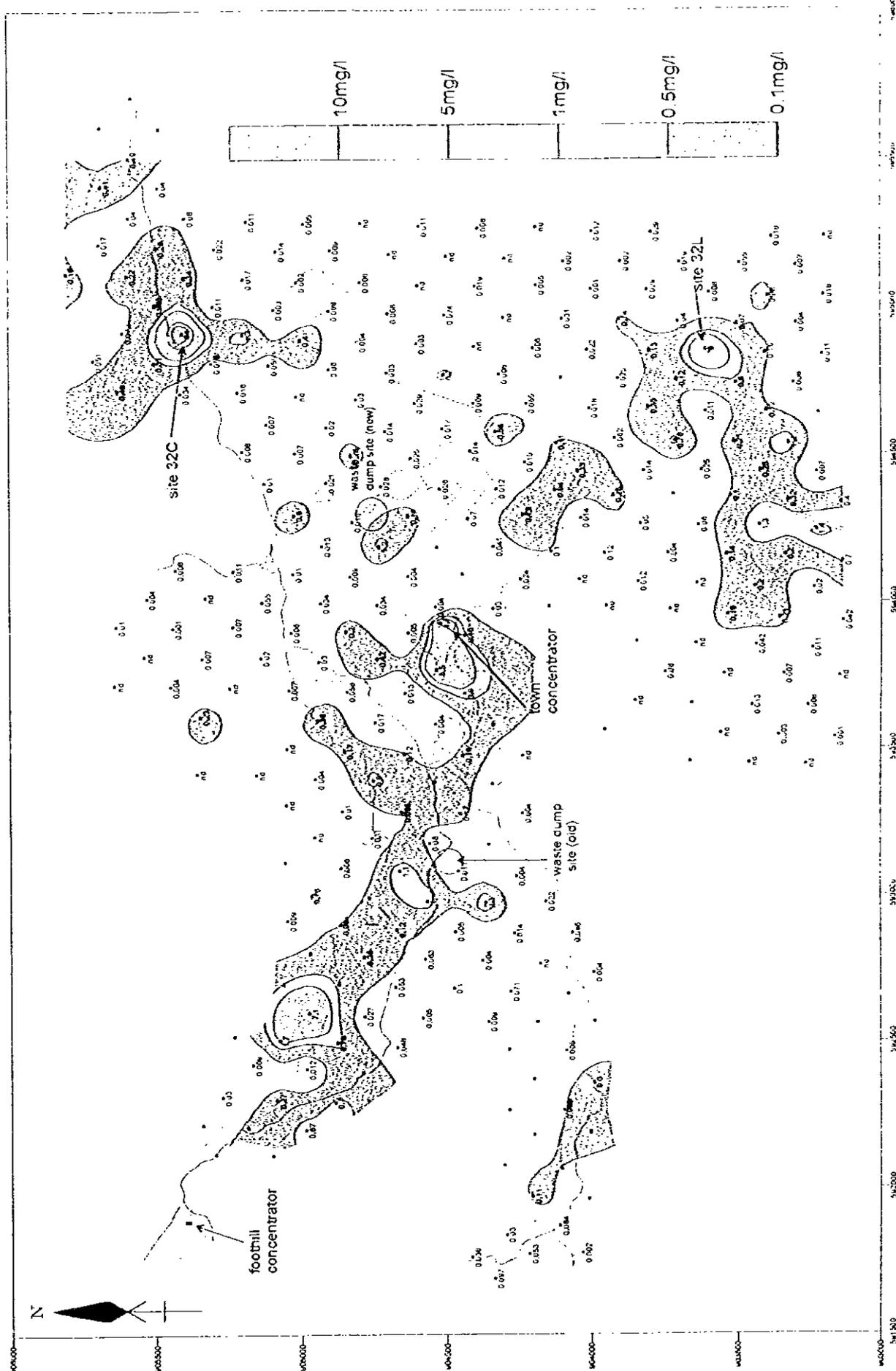
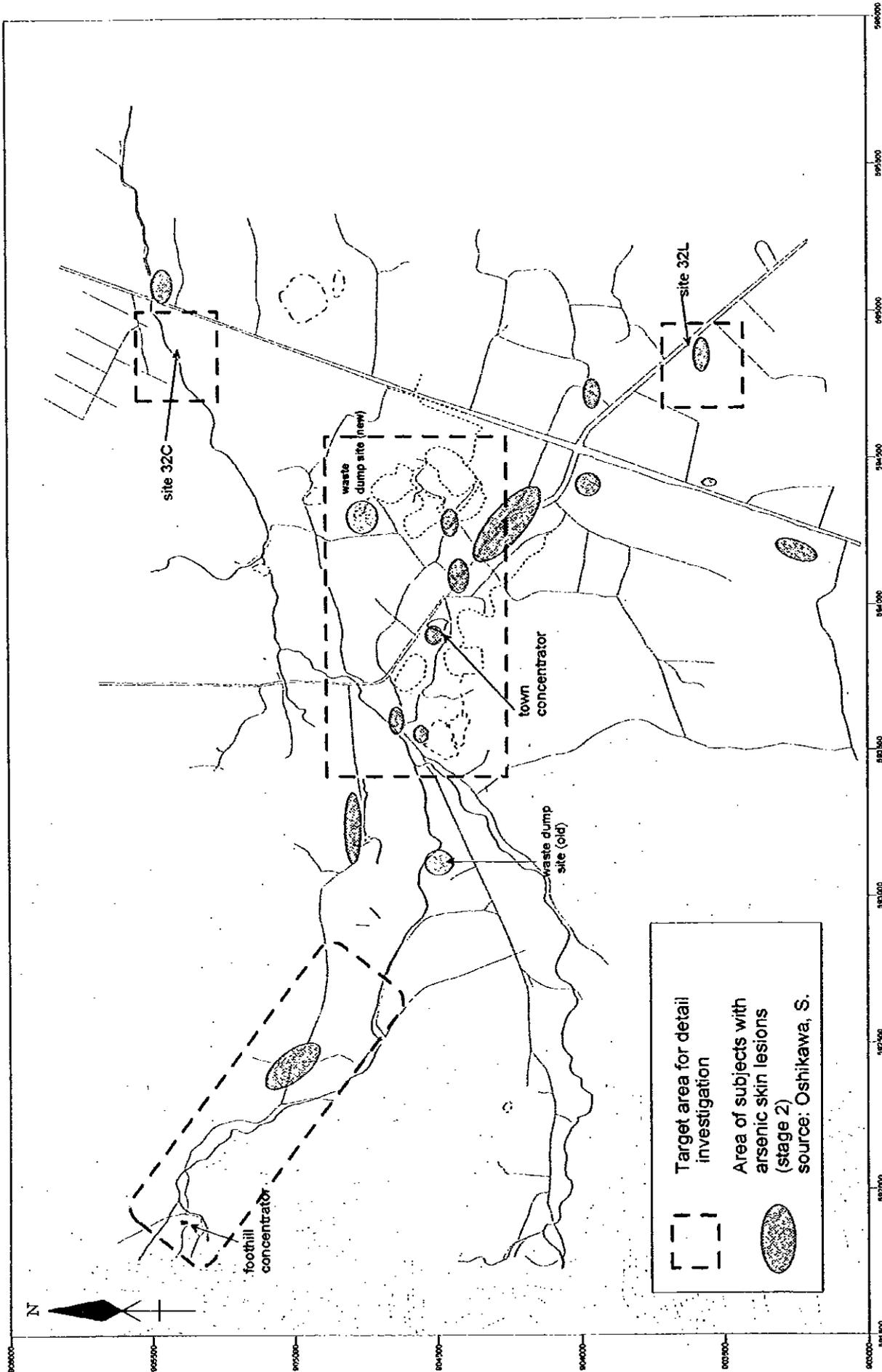
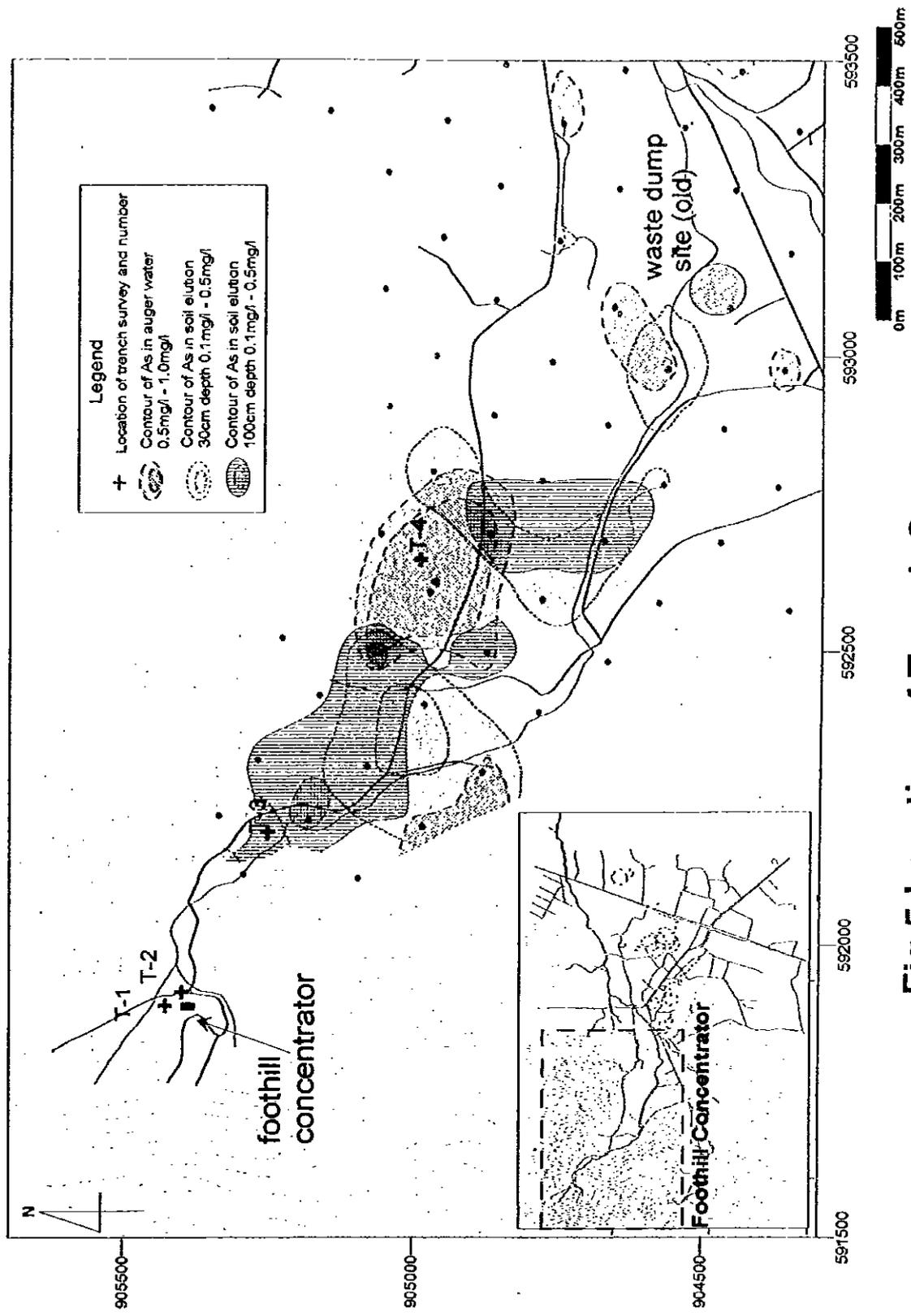


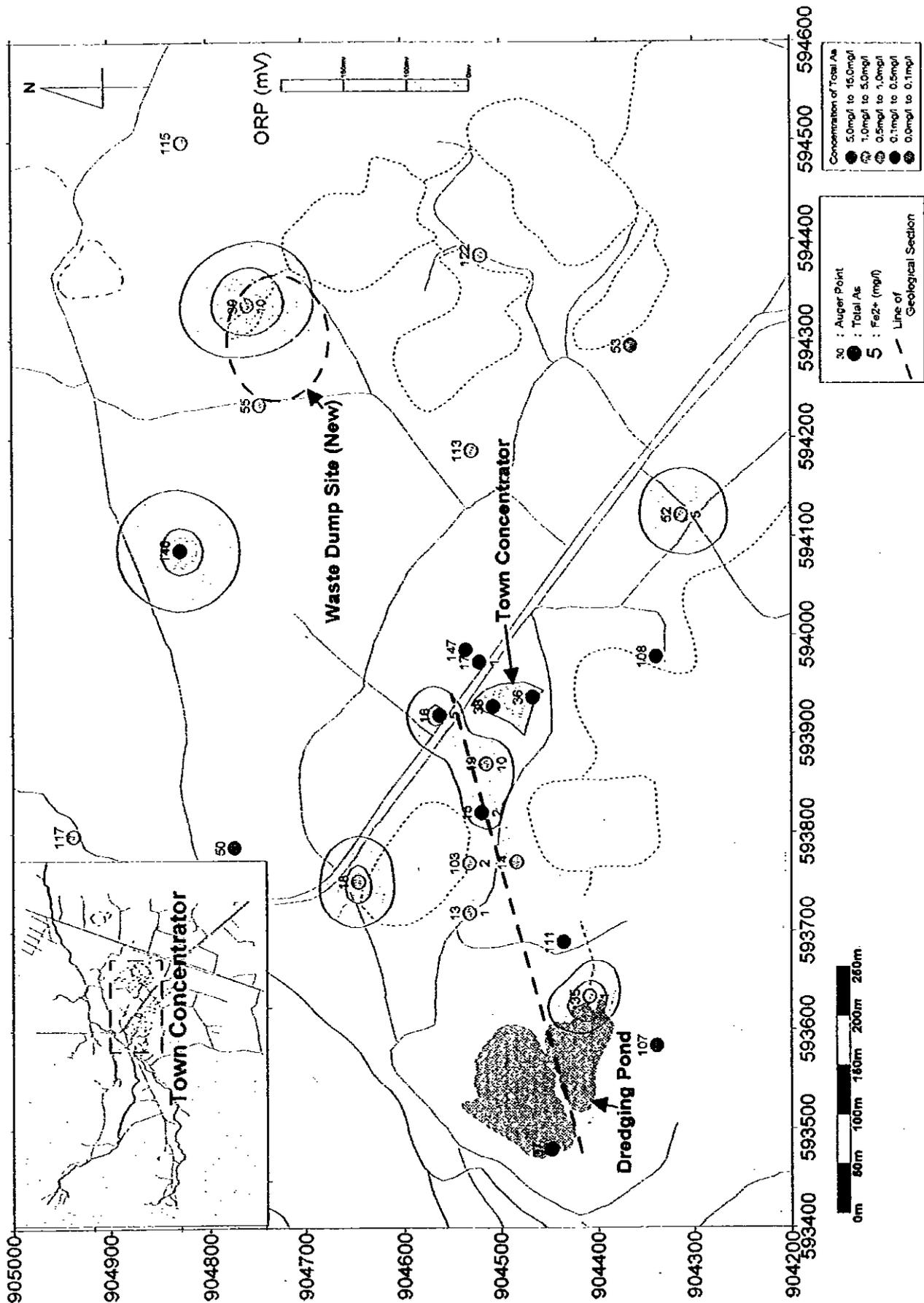
Fig 3 Arsenic Distribution of Auger Water ( 1998 )



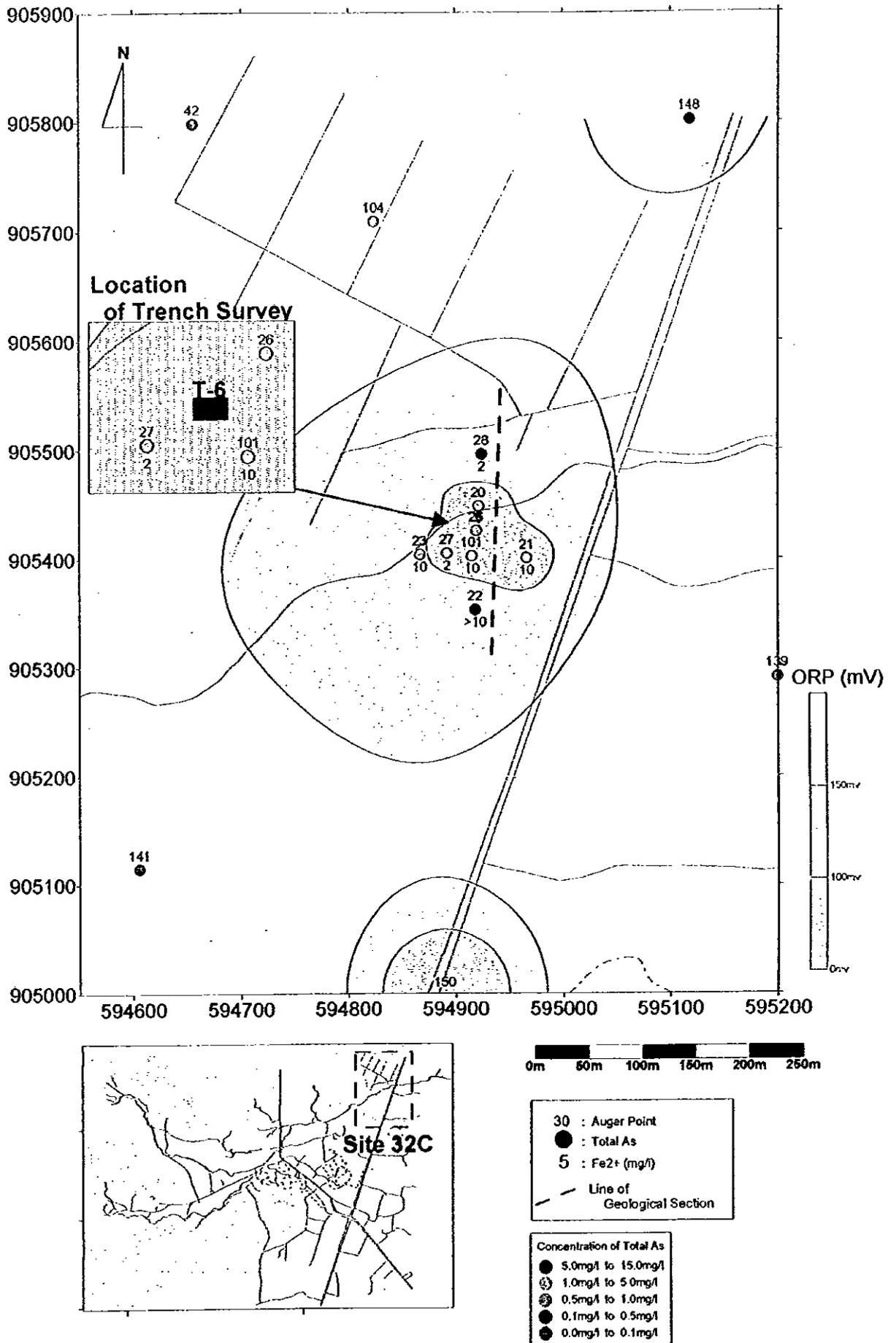
**Fig 4 Target Area for Detail Investigation**



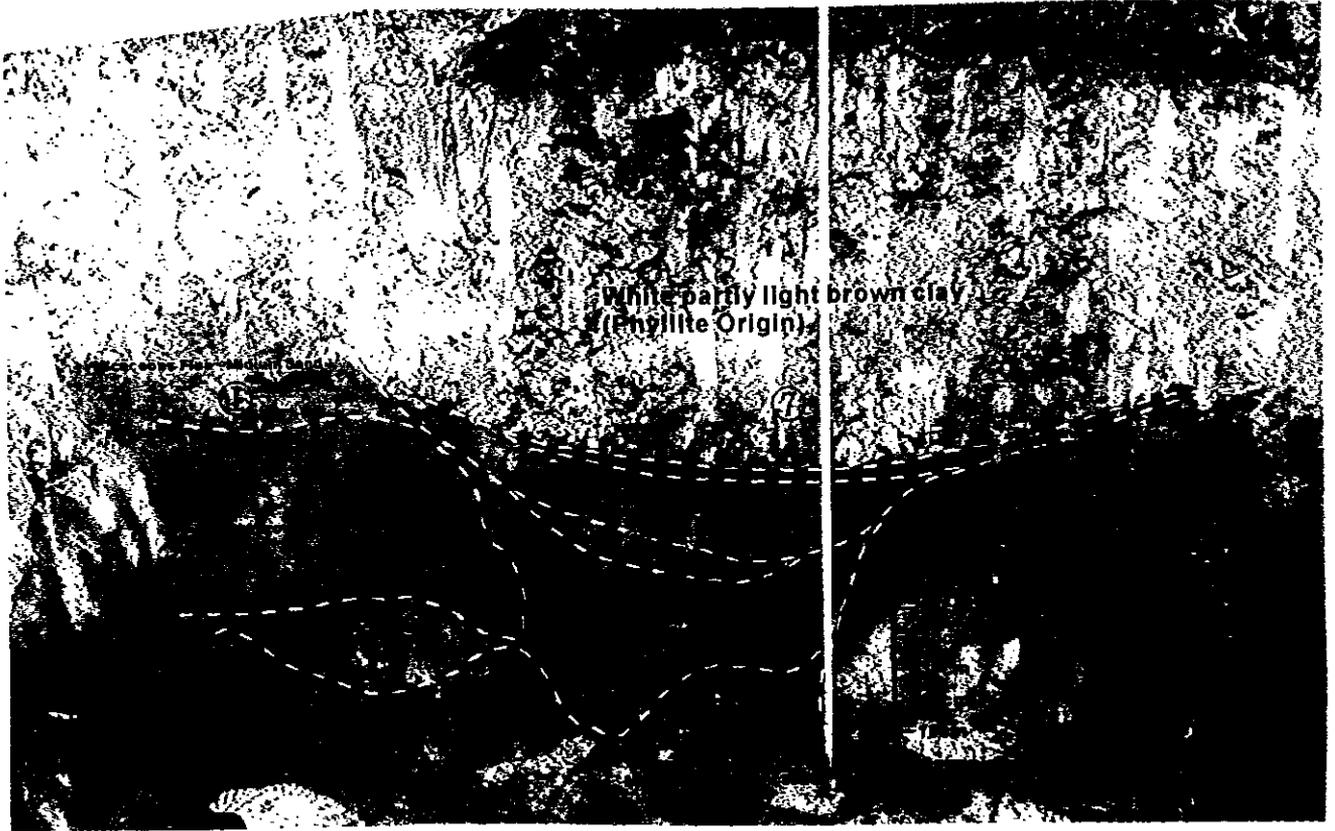
**Fig 5 Location of Trench Survey**



**Fig 6 Survey Map around the Town Concentrator**

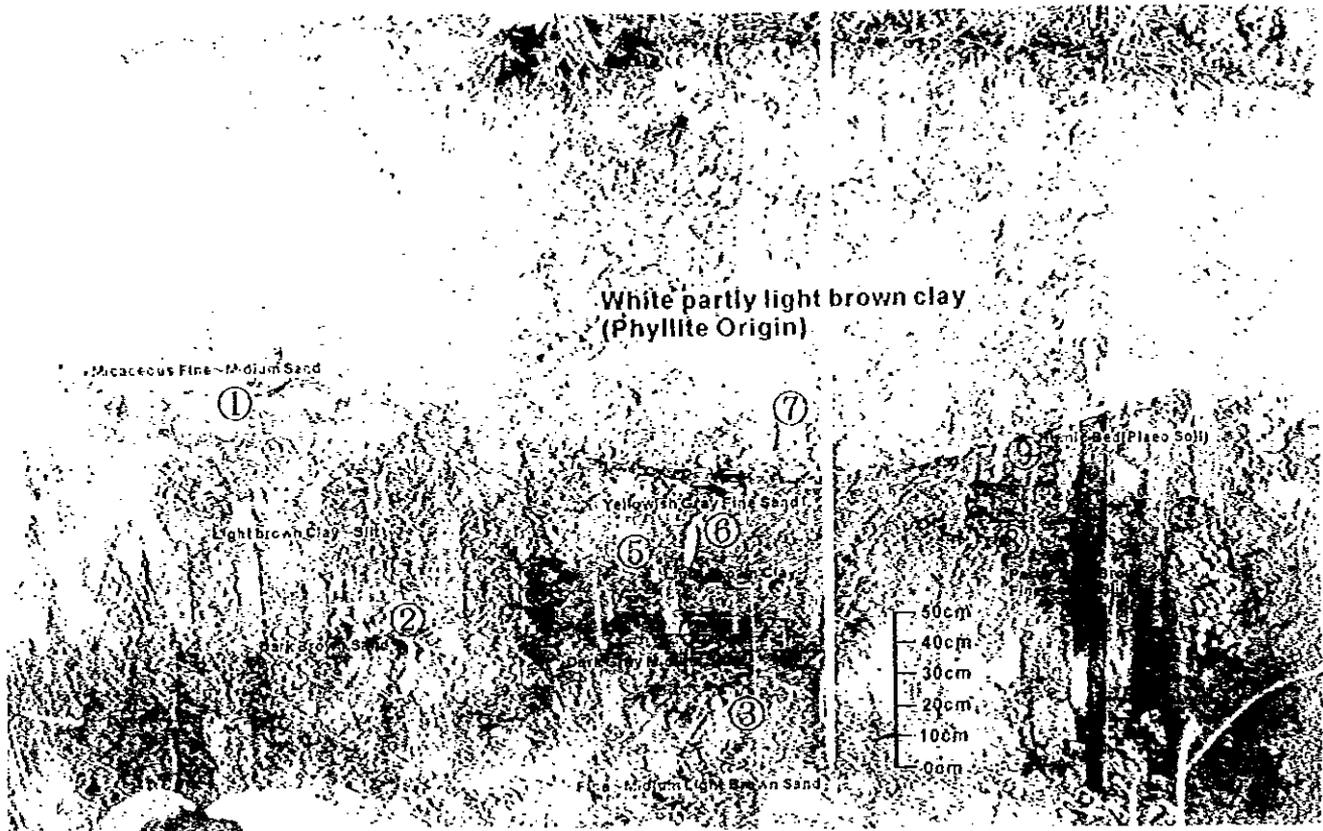


**Fig 7 Survey Map around the Site 32C**



Elution Result					
No.	Code	As (mg/l)	No.	Code	As (mg/l)
①	T-6-1	3.3	⑥	T-6-6	0.1
②	T-6-2	0.4	⑦	T-6-7	0.0
③	T-6-3	0.7	⑧	T-6-8	0.2
④	T-6-4	0.2	⑨	T-6-9	0.3
⑤	T-6-5	0.1	-	-	-

**Fig 8 Cross Section of Trench T-6 Site**



Flotation Result					
No.	Code	As mg/l	No.	Code	As mg/l
1	1-6-1	3.3	7	1-6-6	0.1
2	1-6-2	0.4	8	1-6-7	0.0
3	1-6-3	0.7	9	1-6-8	0.2
4	1-6-4	2.7	10	1-6-9	0.3
5	1-6-5	0.7			

Fig 8 Cross Section of Trench T-6 Site

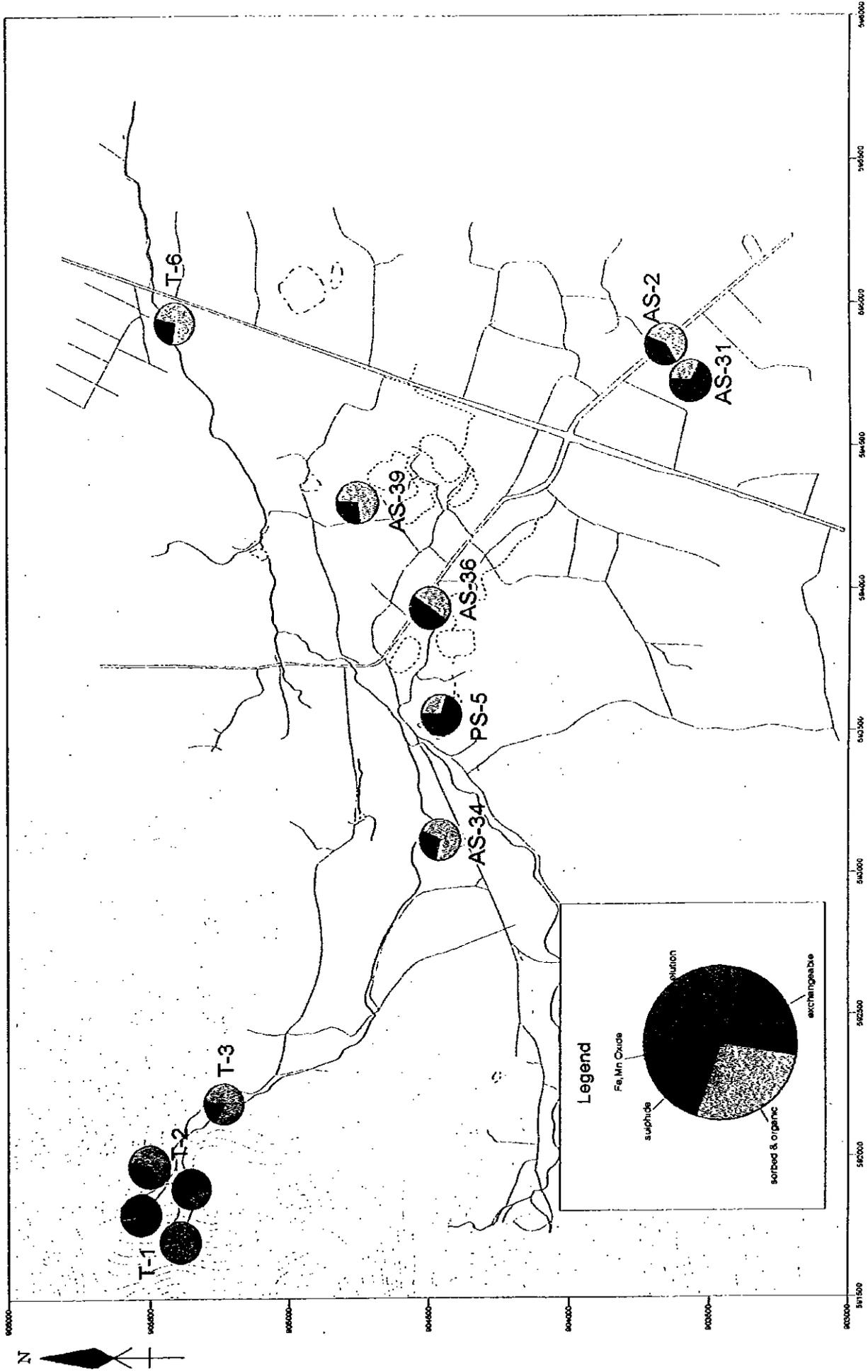


Fig 9 Geochemical Phase and Sampling Location

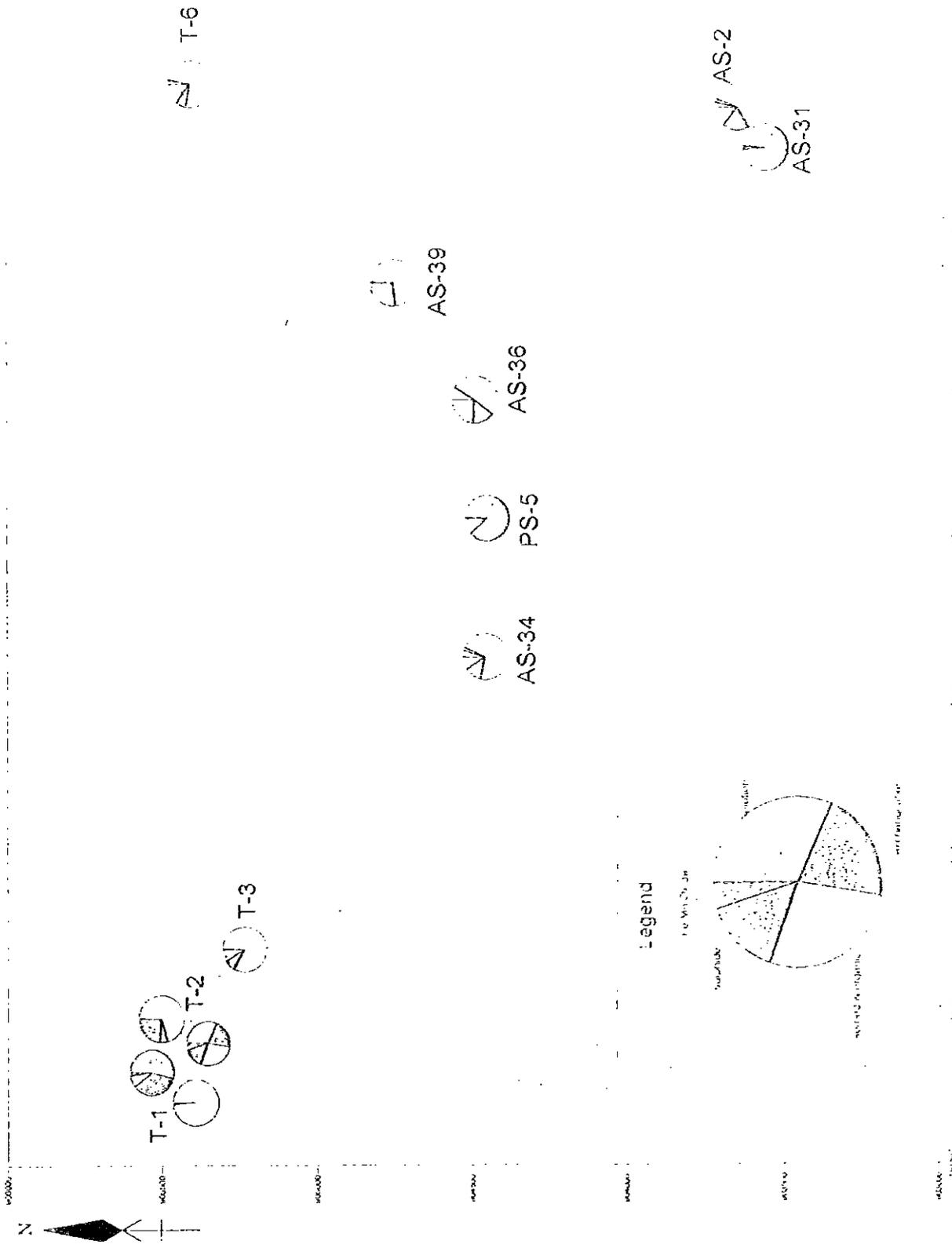
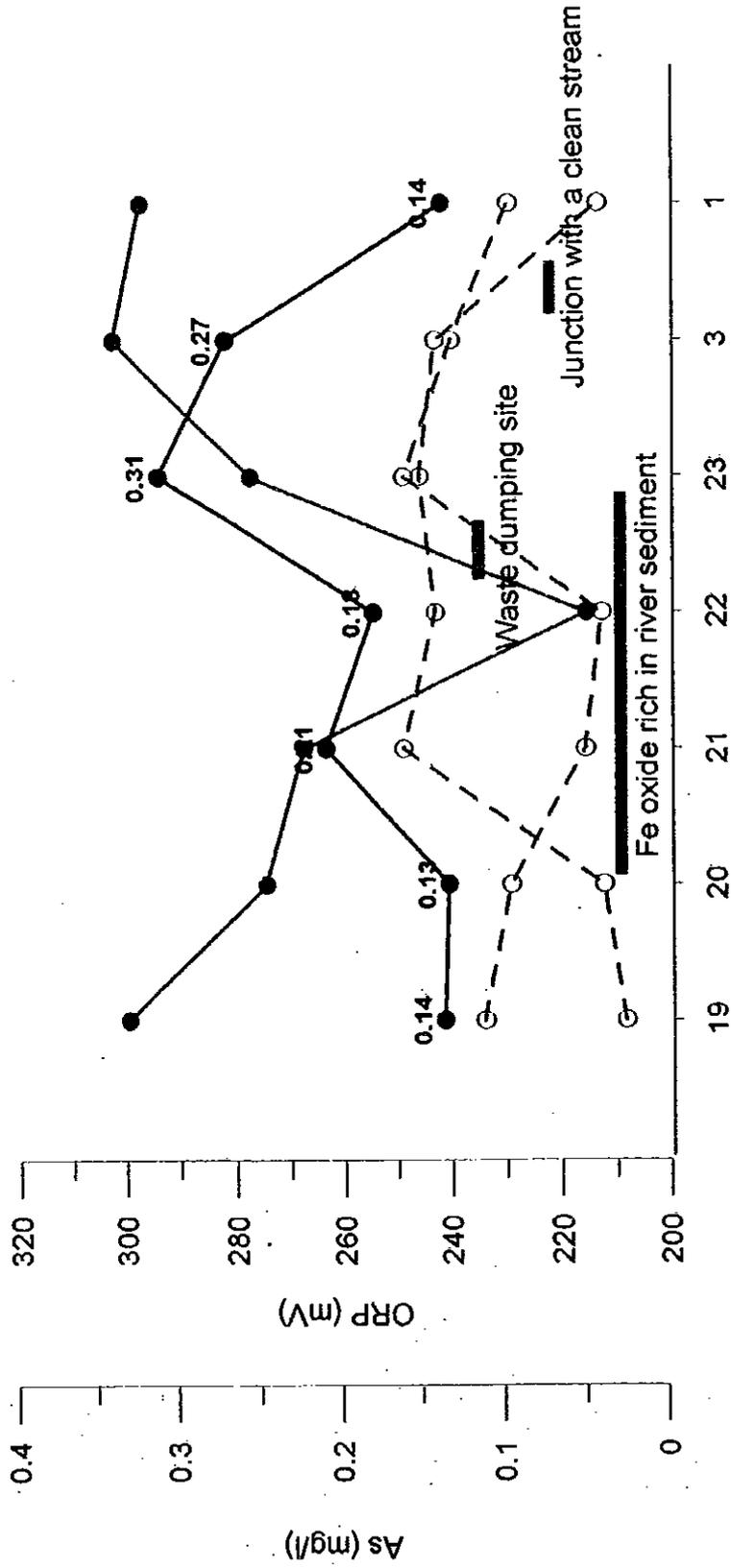
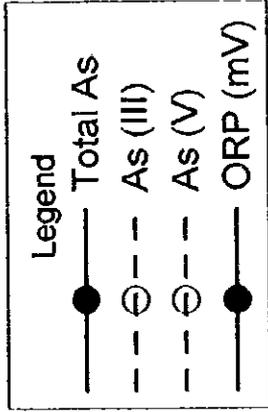
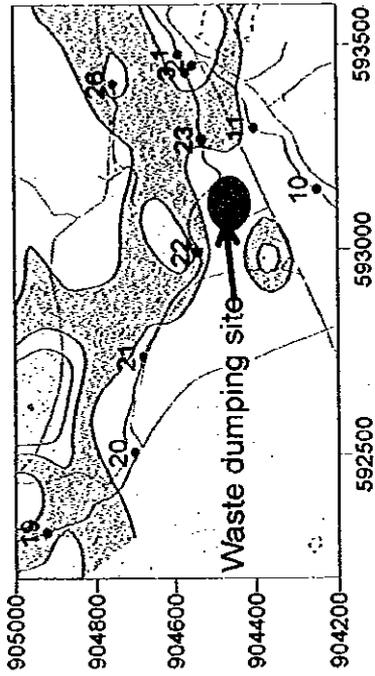
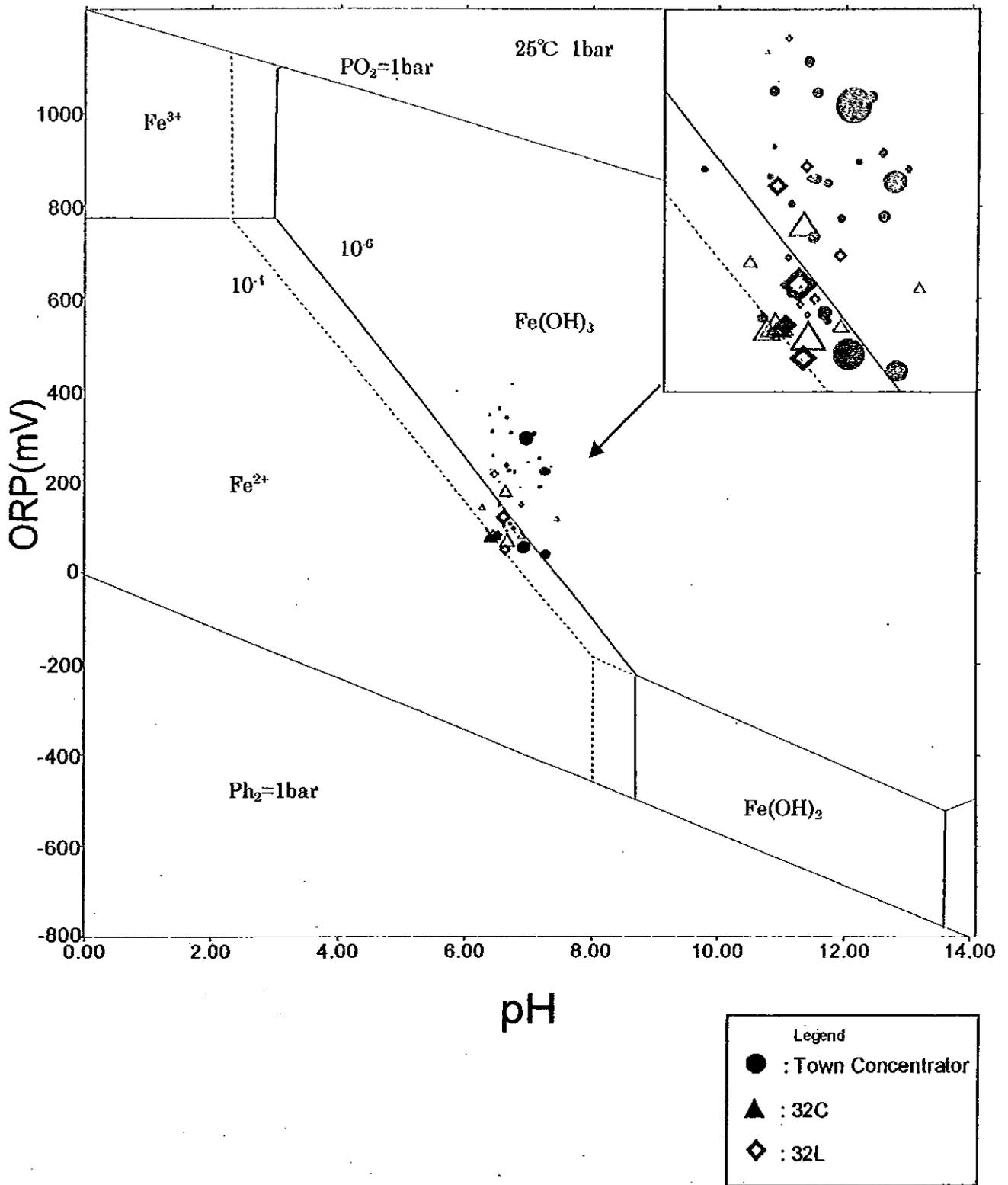


Fig 9 Geochemical Phase and Sampling Location

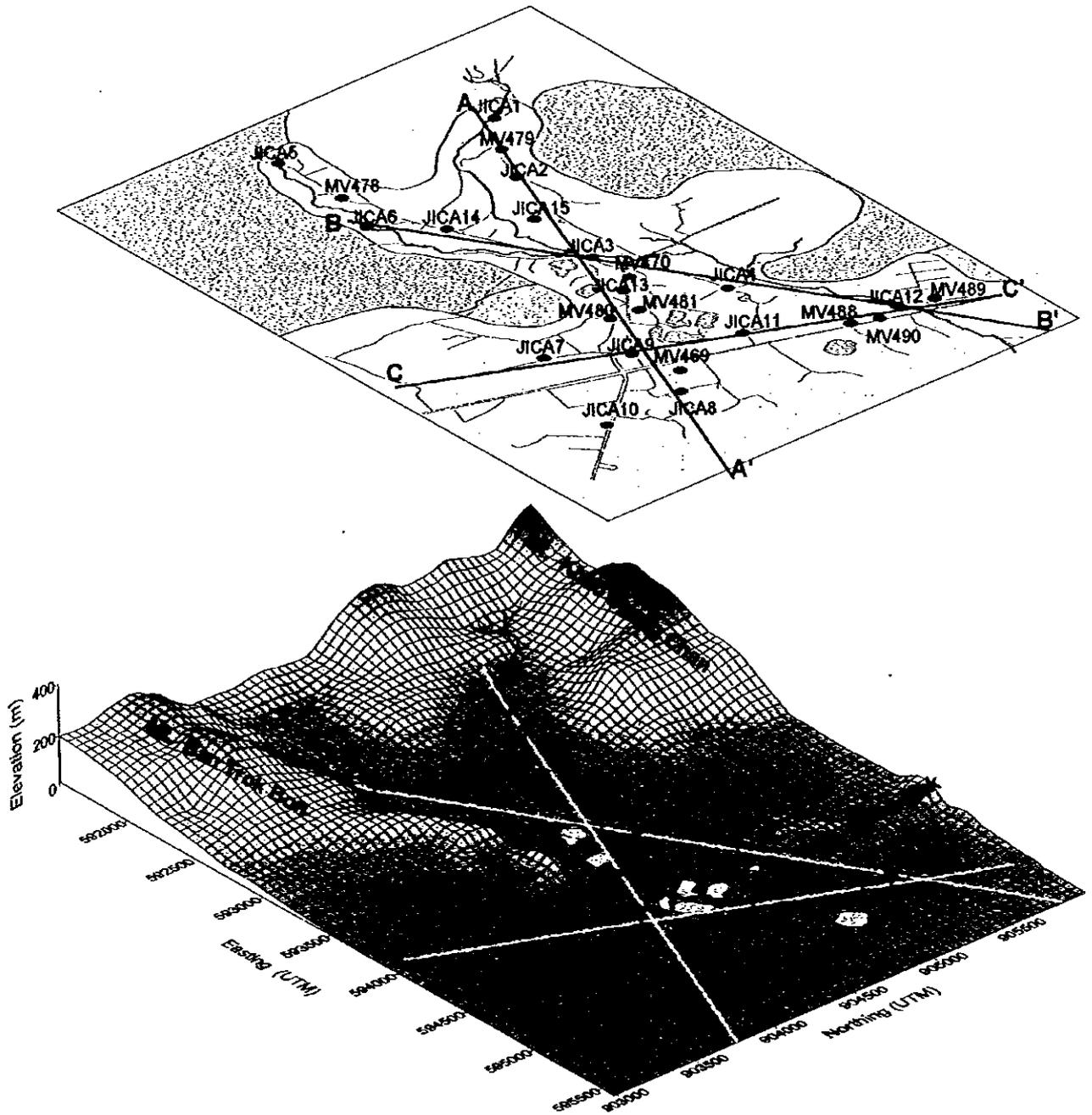
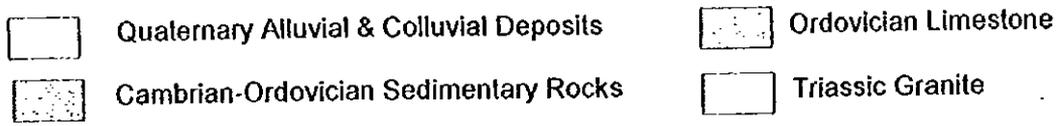


Sample code SW99

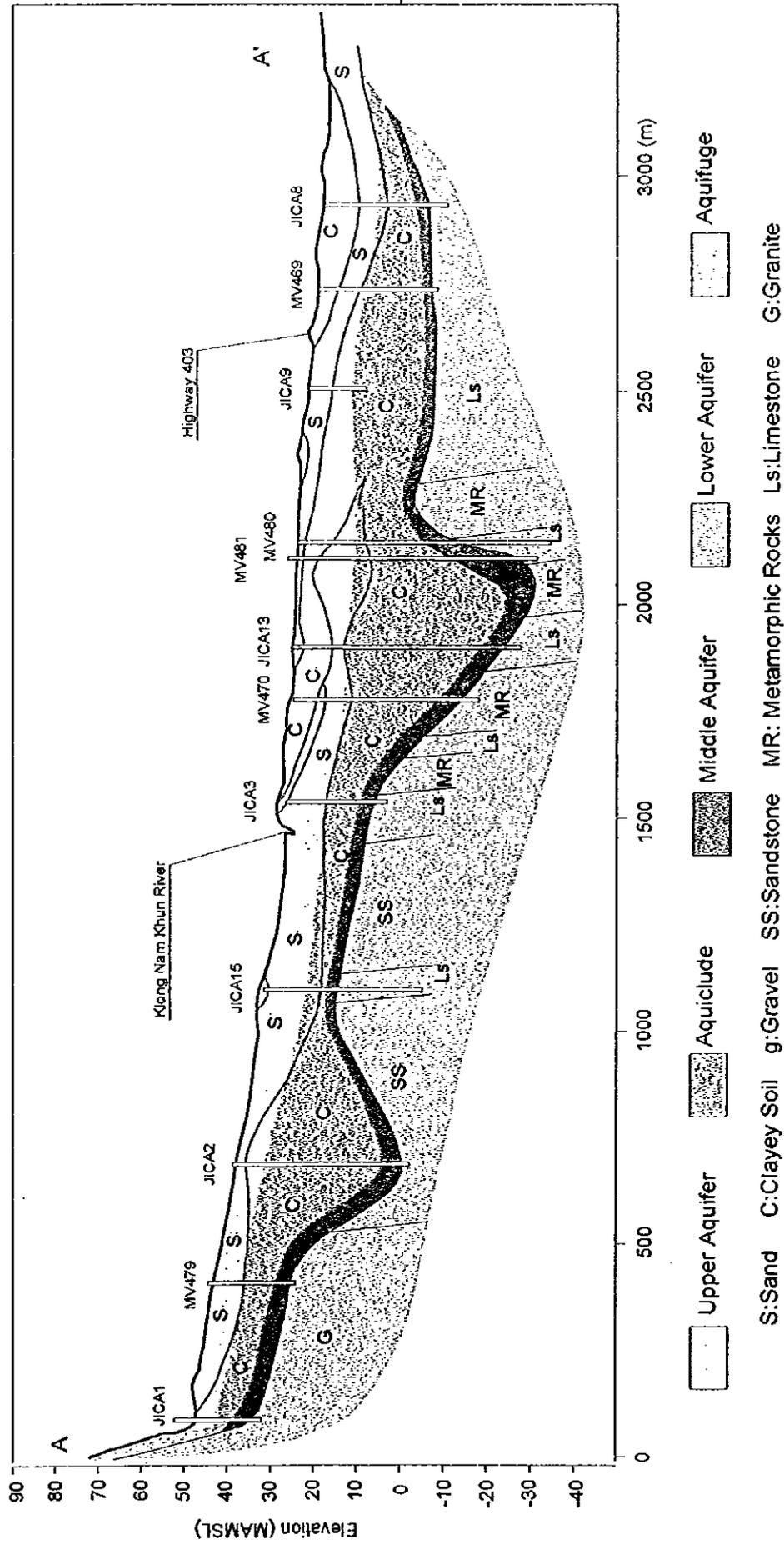
**Fig 10 Arsenic Species and ORP in Surface Water**



**Fig 11 ORP – pH Diagram for Fe Hydroxide**



**Fig 12 Topography and Simplified Geology of Ron Phibun Basin**



**Fig 13 Hydrogeological Cross Section A-A'**

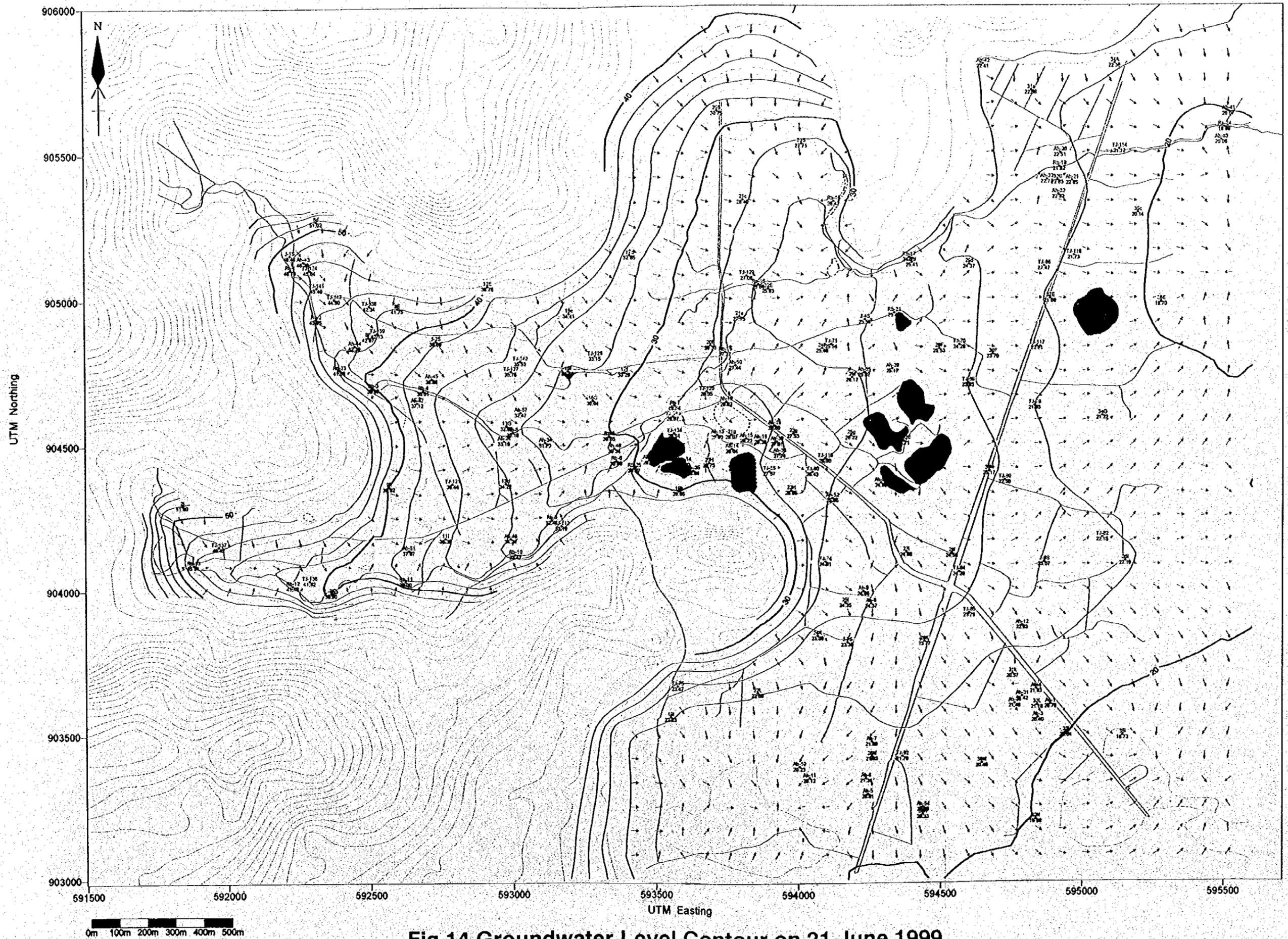


Fig 14 Groundwater Level Contour on 21 June 1999

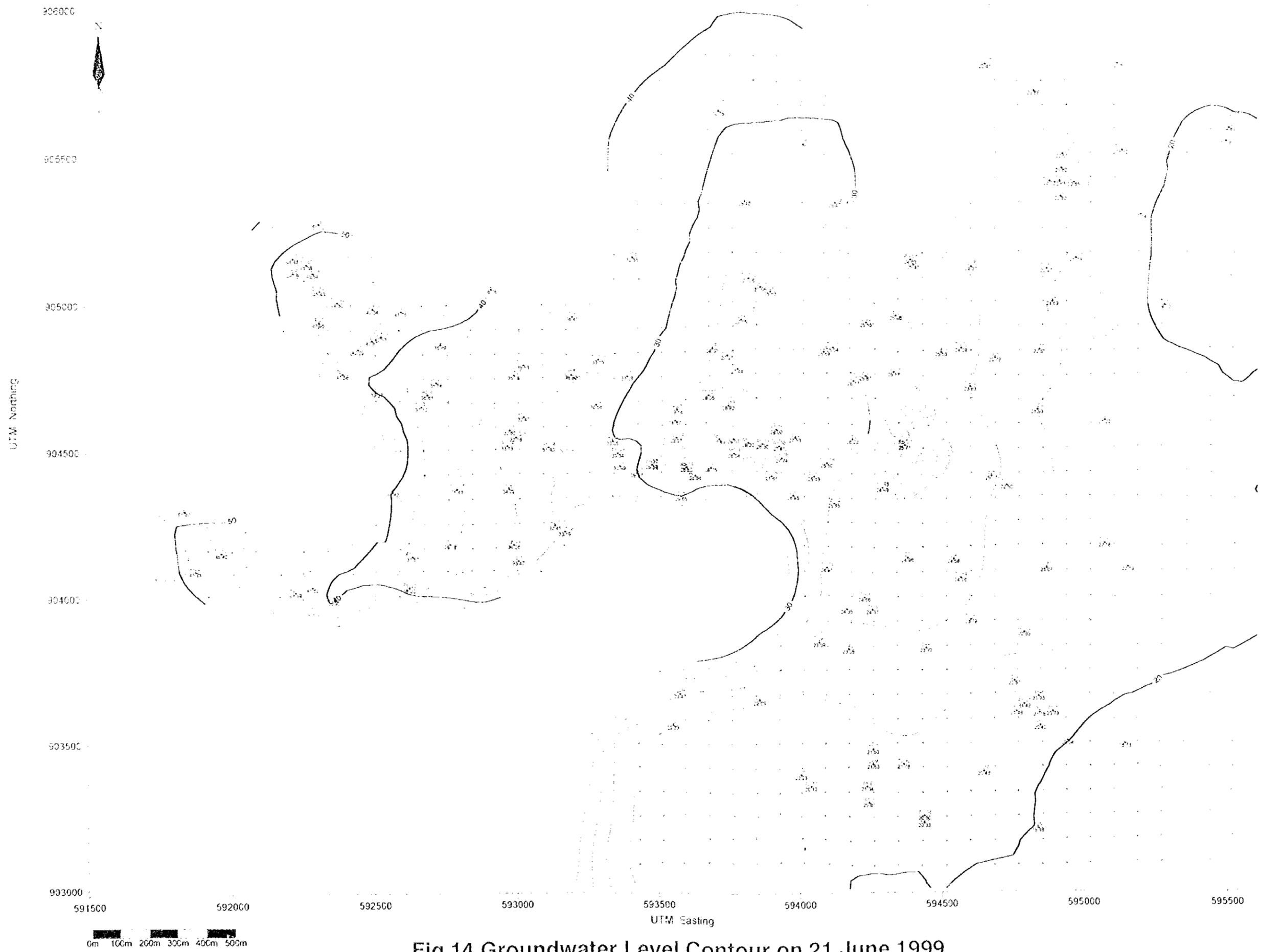


Fig 14 Groundwater Level Contour on 21 June 1999

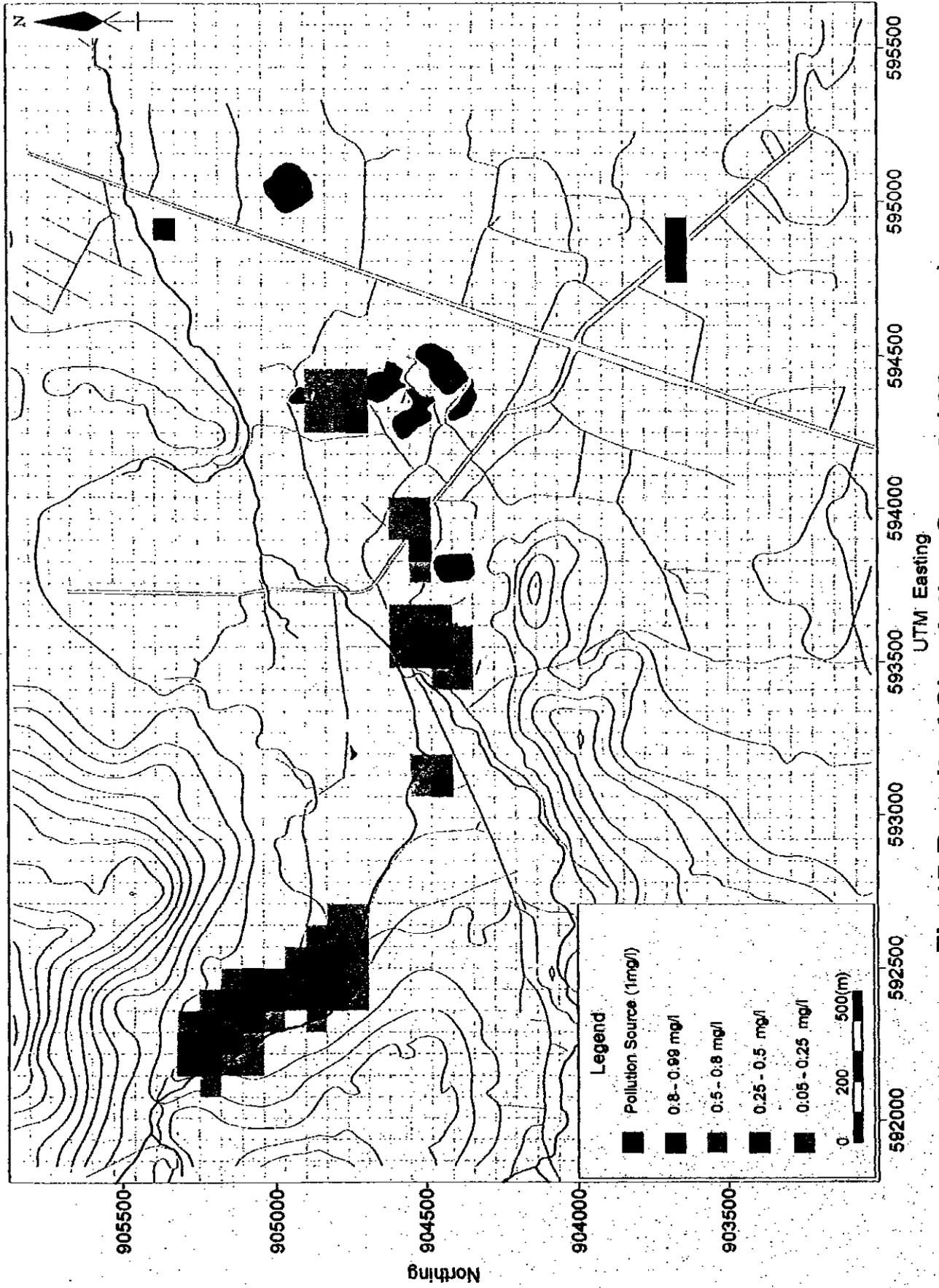
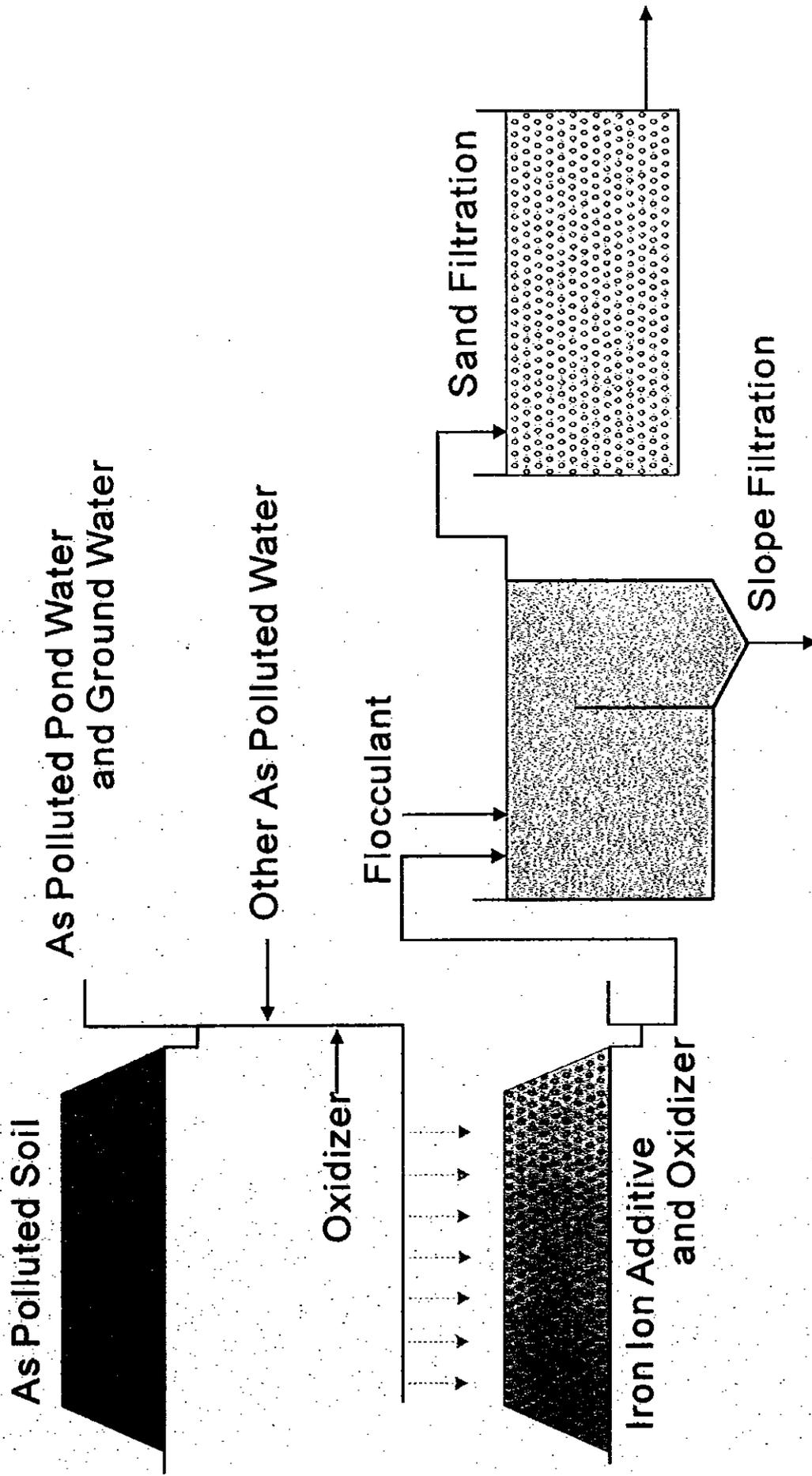
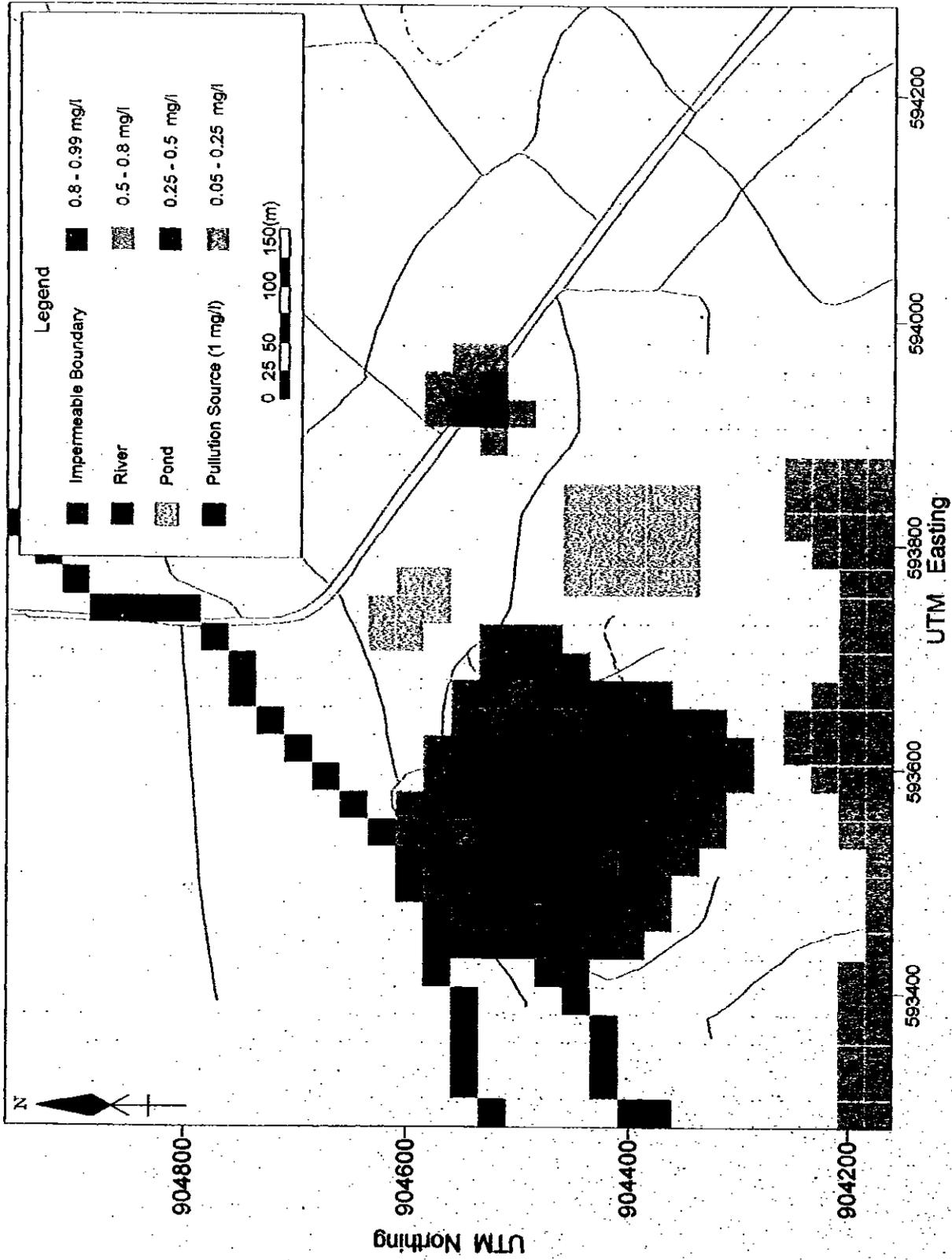


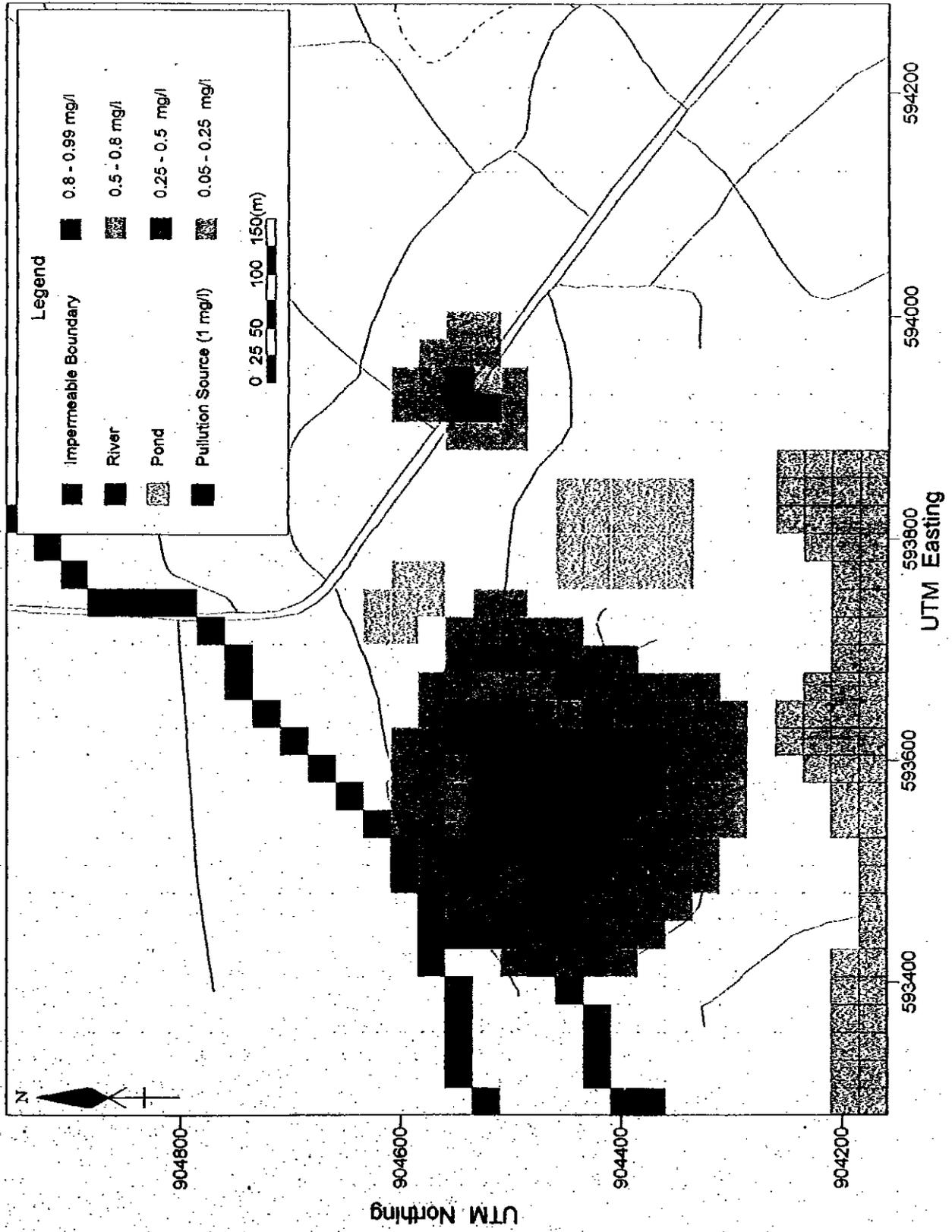
Fig 15 Result of Simulation Case 3 ( 30 years )



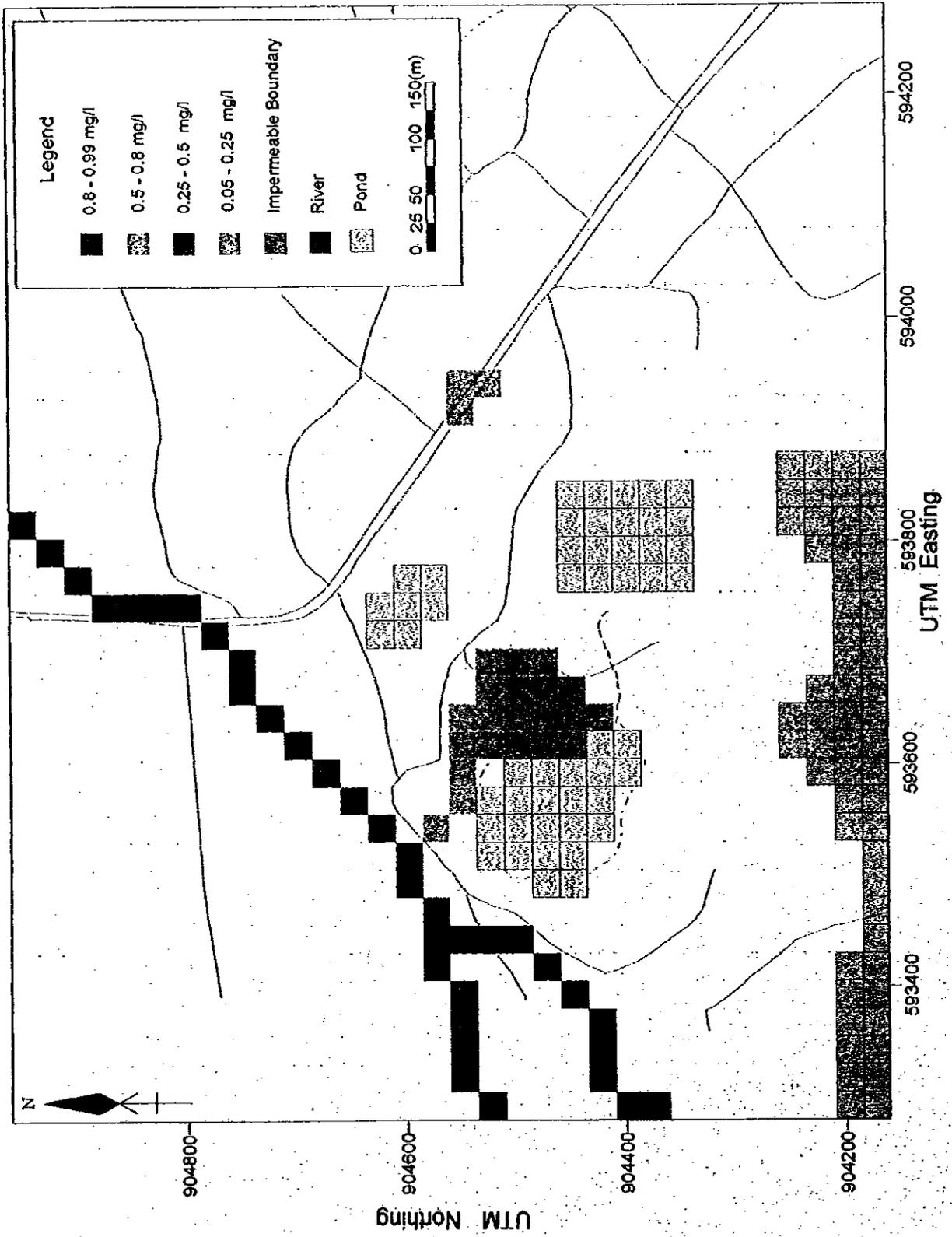
**Fig 16 Process Flow of Arsenic Removal from Water**



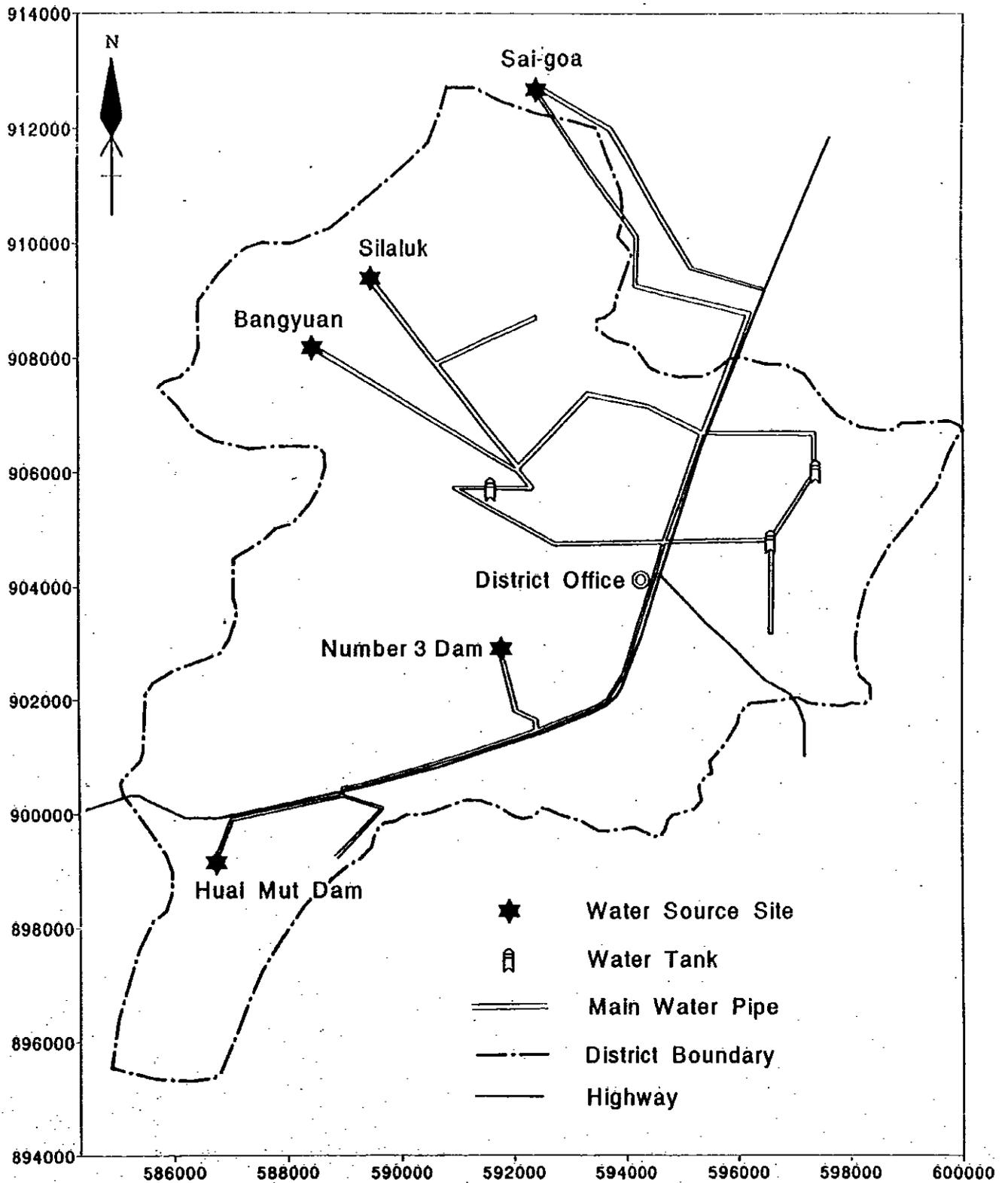
**Fig 17 Result of Simulation around the Town ( Current Situation )**



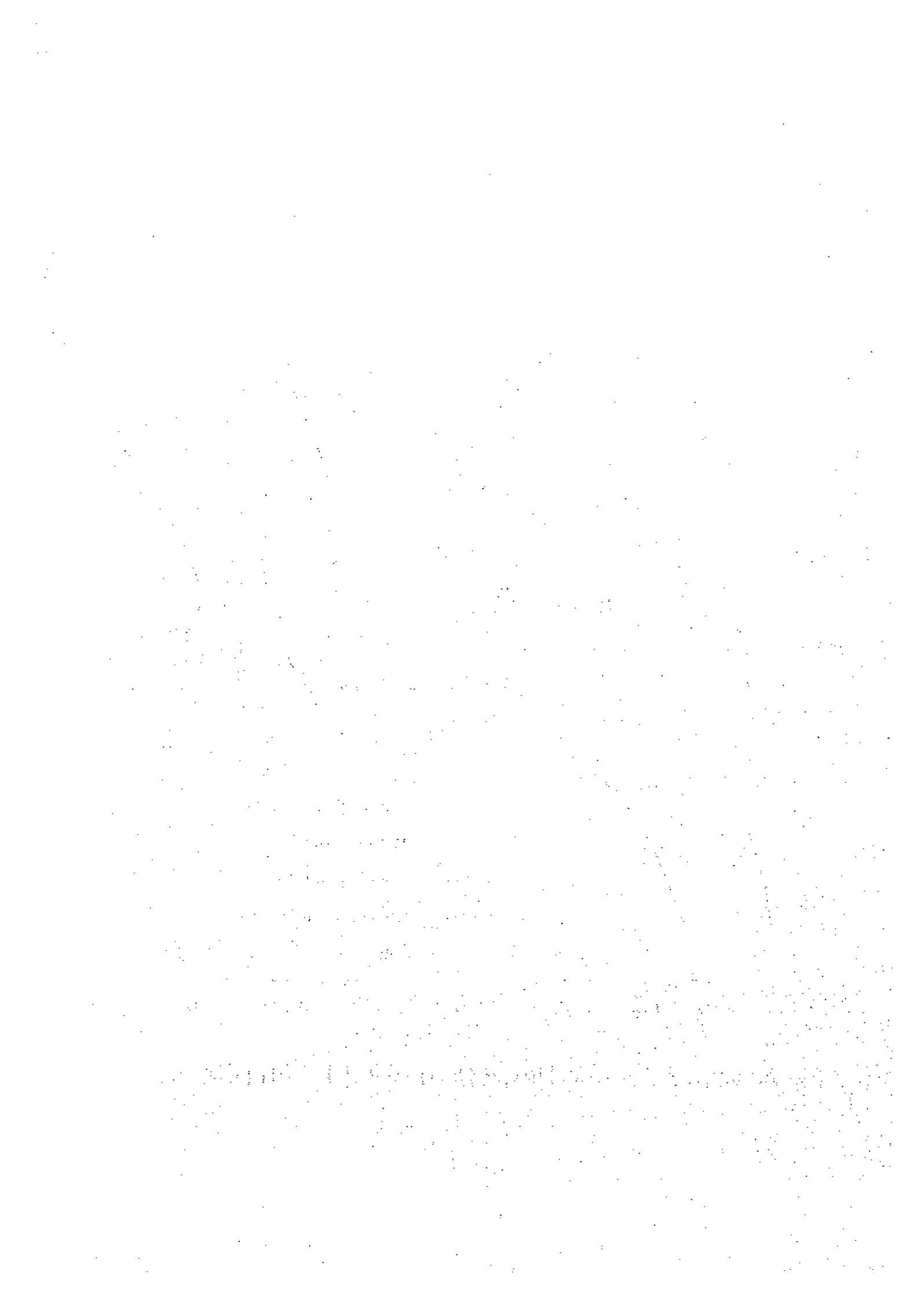
**Fig 18. Result of Simulation around the Town without Countermeasure ( +50 years )**



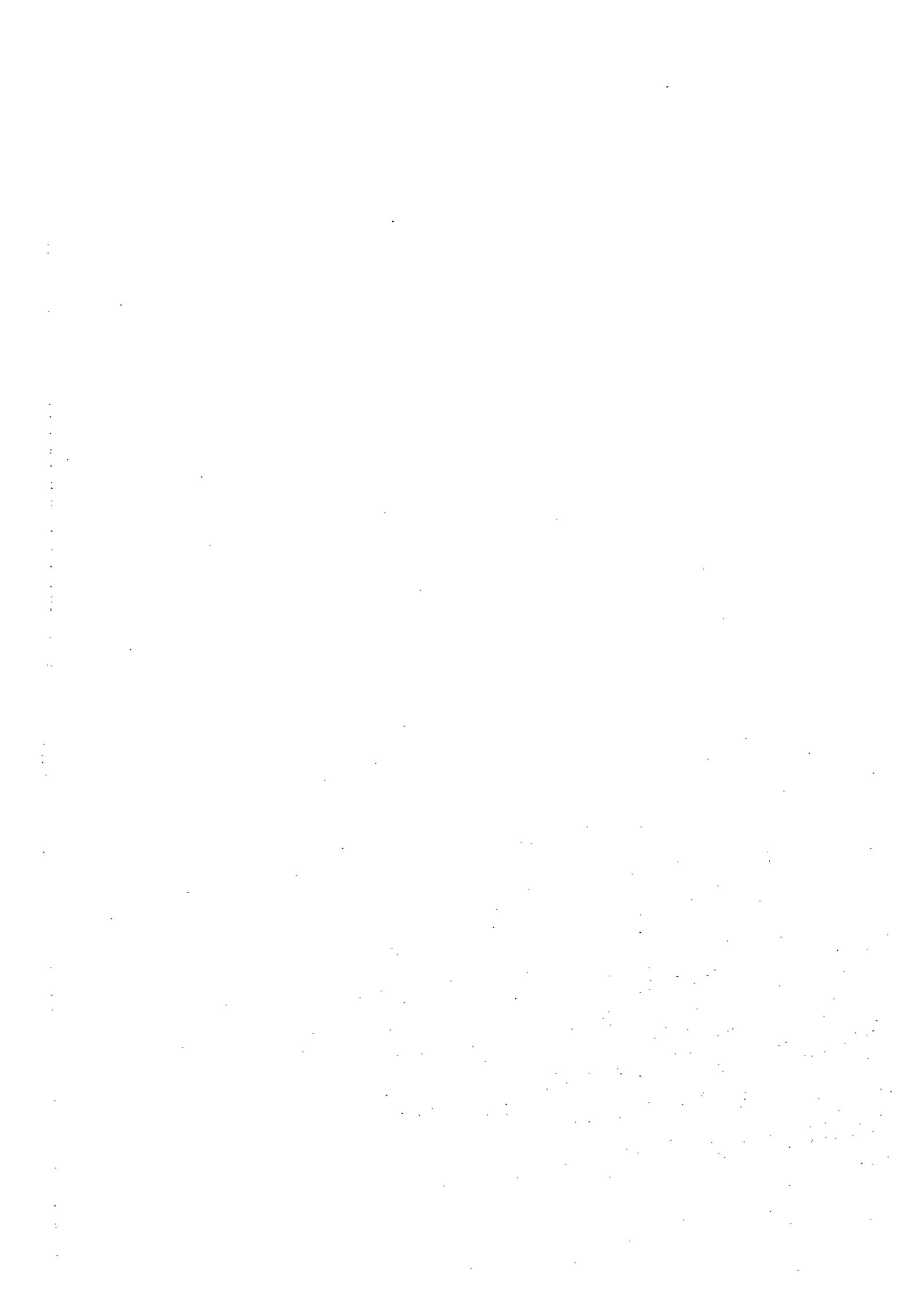
**Fig 19 Result of Simulation around the Town with Countermeasure ( +30 years )**



**Fig 20 Water Service Network in Ron Phibun District**









JICA

LIB