

## 第 2 章 物理探查

## 第2章 物理探査

### 2-1 調査概要

#### 2-1-1 目的

本調査地域の中の Tempursari 地区および Seweden 地区を対象に物理探査（電気探査 IP 法）を実施し、鉱化作用に関する比抵抗構造および IP 異常域を明らかにする。また、解析結果を地質調査結果と合わせて解釈することにより、ボーリング調査実施地区の絞り込みを行う。

#### 2-1-2 探査手法

時間領域 IP 法

#### 2-1-2 調査数量

調査数量は次に示すとおりである。

・現地調査

測線延長 30.2 km

測線数 10 本

測点数 555 点

・室内試験

21 件

### 2-2 調査方法

#### 2-2-1 測定原理

IP 法は大地の電氣的な分極効果（IP 効果）を観測する探査法である。IP 効果は次のような現象から生じる。

金属鉱物を含む岩石に直流電流を流すと、鉱物の表面と周囲の間隙水の間で電位が生じ、電荷が蓄えられ、分極が起こる。この電荷は電流の切断後徐々に放出され、時間の経過とともに減衰する残留電圧を発生させる。ただし、IP 効果は金属鉱物を含む岩石以外に、石墨、粘土を含む堆積岩などにおいても生じる場合がある。

時間領域 IP 法では、送信電流として通常 Fig.3-1 に示す方形波断続交流が用いられる。受信電位は通電時の 1 次電位  $V_p$  および電流切断時の減衰電圧（2 次電位  $V_s$ ）から形成される。IP 効果の大きさを表す指標としては、充電率を受信電位から求める。

充電率  $M$  は(3-1) 式で定義される。1 次電位に対する 2 次電位の時間積分の比であり、単位は  $mV/V$  である。

$$M = 1 / V_p / (t_2 - t_1) \cdot \int_{t_1}^{t_2} V_s dt \quad (3-1)$$

$t_1$  : 2 次電位積分開始時間     $t_2$  : 2 次電位積分終了時間

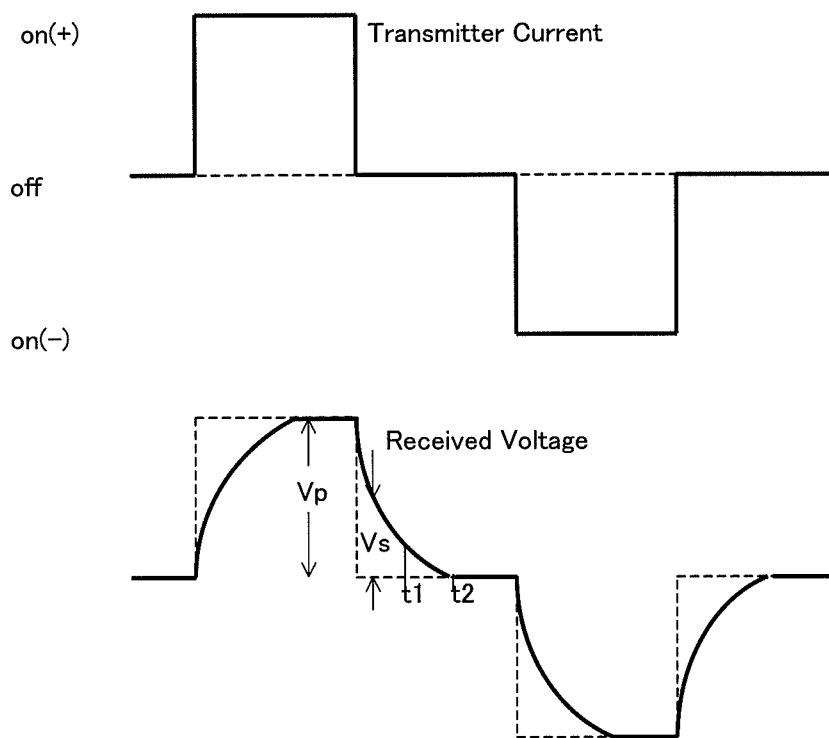
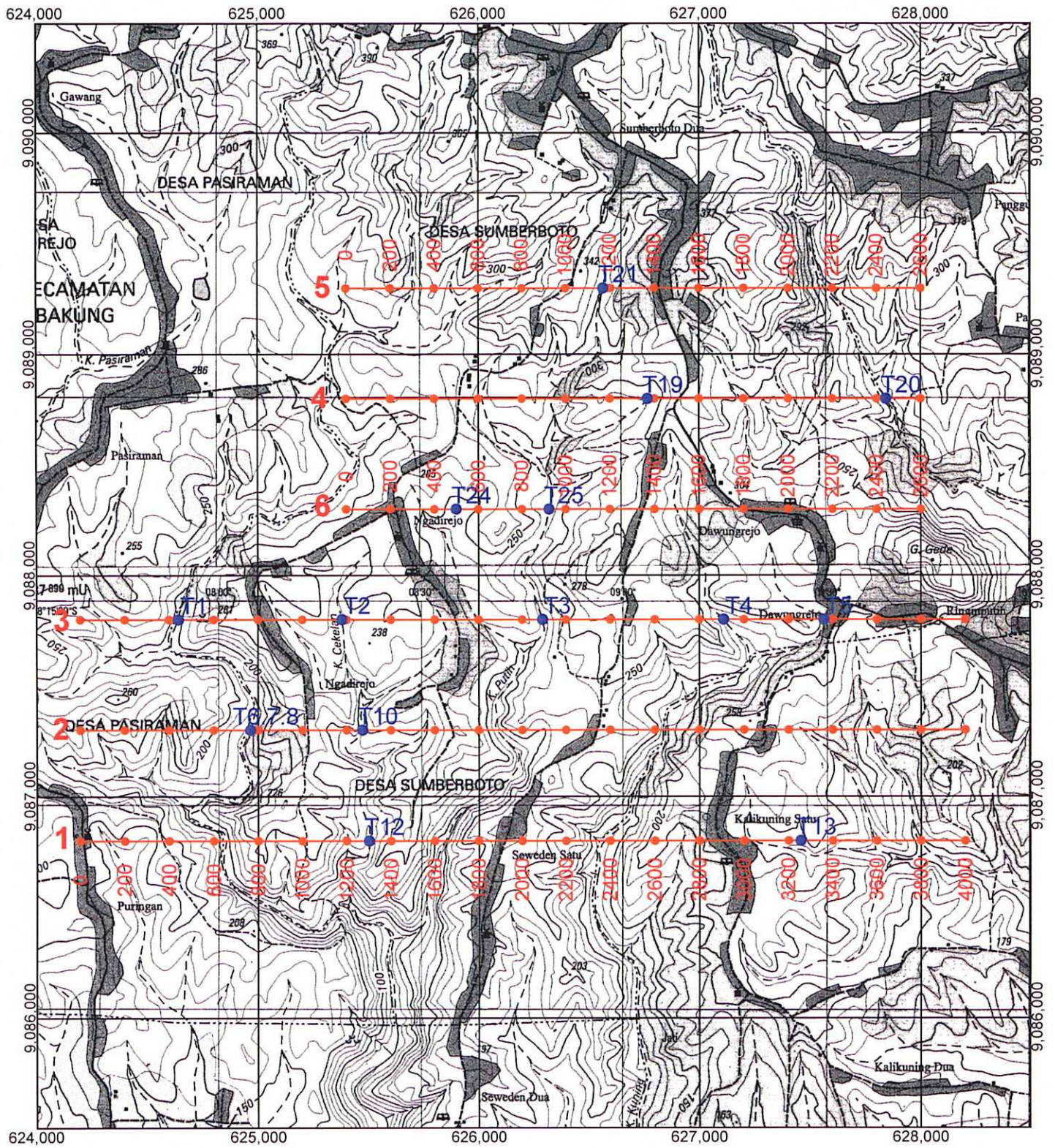


Fig. 3-1 Wave Form of Transmitter Current and Received Voltage



**LEGEND**

- Survey Line & Measurement points
- Rock Sample Locality

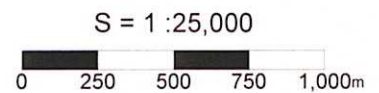


Fig.3-2 Location Map of IP Survey Lines and Rock Samples in the Seweden District

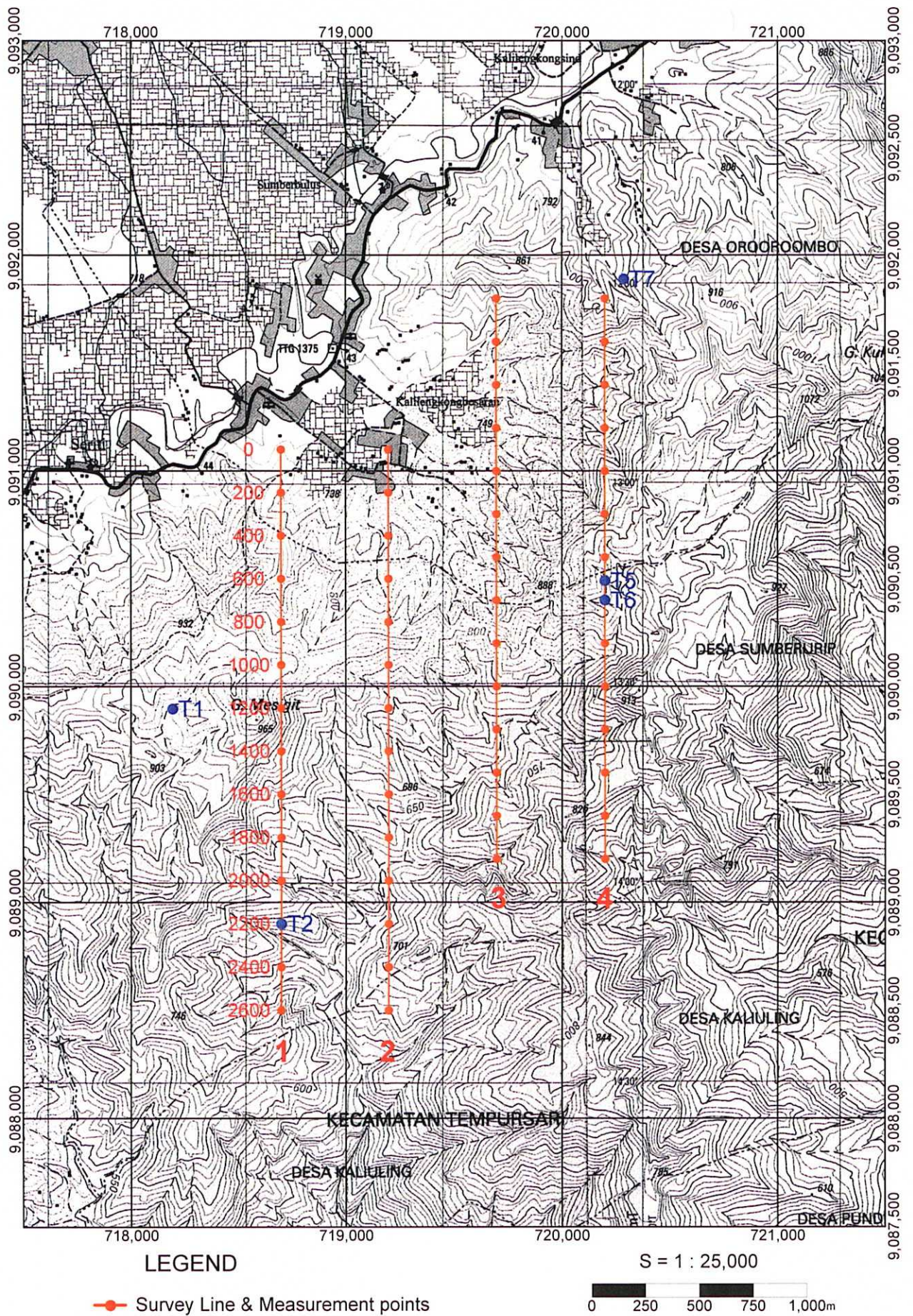


Fig.3-3 Location Map of IP Survey Lines and Rock Samples in the Tempursari District

## 2-2-2 測定方法

Seweden 地区および Tempursari 地区において、これまでに実施された地質調査および土壌地化学探査により抽出された鉱床が期待される区域に対して、それぞれ6本および4本の測線を Table 3-1 に示す延長で設定した (Fig.3-2, Fig.3-3 参照)。測線間隔はともに 500 m である。

Table 3-1 List of IP Survey Lines

| Area       | Line | Length [km] | Amount of Measuring Points |
|------------|------|-------------|----------------------------|
| Seweden    | SW1  | 4.0         | 80                         |
|            | SW2  | 4.0         | 80                         |
|            | SW3  | 4.0         | 80                         |
|            | SW4  | 2.6         | 45                         |
|            | SW5  | 2.6         | 45                         |
|            | SW6  | 2.6         | 45                         |
| Tempursari | TM1  | 2.6         | 45                         |
|            | TM2  | 2.6         | 45                         |
|            | TM3  | 2.6         | 45                         |
|            | TM4  | 2.6         | 45                         |
| Total      |      | 30.2        | 555                        |

測定の仕様は以下に示すとおりである。

- 電極配置 : ダイポール・ダイポール配置
- 測点間隔 : 200 m
- 電極間隔 : 200 m
- 電極隔離係数 : 1 ~ 5
- 観測量 : 電位および充電率
- ON/OFF タイム : 2 秒
- 2 次電位測定開始時間 : 450 ms
- 2 次電位測定終了時間 : 1,100 ms

使用した測定機器は Table 3-2 に示すとおりである。

Table 3-2 List of IP Survey Equipment

| ITEM                | MODEL  | SPECIFICATION  |
|---------------------|--|--|
| Transmitter         | Chiba CH-96T<br>Transmitter                                  | Output Voltage : 70, 120, 180, 250, 330,<br>420, 520, 630, 750, 880 V<br>Output Current : 0~15 A   |
|                     | Chiba CH-96A<br>Power<br>Controller                          | Wave Form : Rectangular Wave<br>Frequency Range : DC~10,000 Hz<br>Weight : 67 kg   |
| Engine<br>Generator | Honda ET4500<br>Engine<br>Generator                          | Output Power : 4.5 kW<br>Output Voltage : 200 V<br>Weight : 78 kg  |
| Receiver            | Scintrex IPR-12<br>Time Domain<br>IP/Resistivity<br>Receiver | On/Off Time : 1, 2, 4, 8, 16, 32 s<br>Resolution (VP) : 10 $\mu$ V<br>Resolution (M) : 0.01 mV/V<br>Power : 12V Battery<br>Weight : 5.8 kg |
| Electrode           |  | Current : Stainless Rod<br>Potential : Non Polarization<br>CuSO <sub>4</sub> Porous Pot  |

### 2-2-3 室内試験

両調査地区内において代表的な岩石および鉱石を採取し、現地調査に準じた測定方法により、比抵抗および充電率の測定を行った。室内試験を行ったサンプル数は 21 件である。Seweden 地区および Tempursari 地区におけるサンプルの採取位置をそれぞれ Fig.3-2 および Fig.3-3 に示す。

## 2-2-4 解析方法

解析は Fig.3-4 のフローに従って行い、各地区の平面図および断面図を作成した。

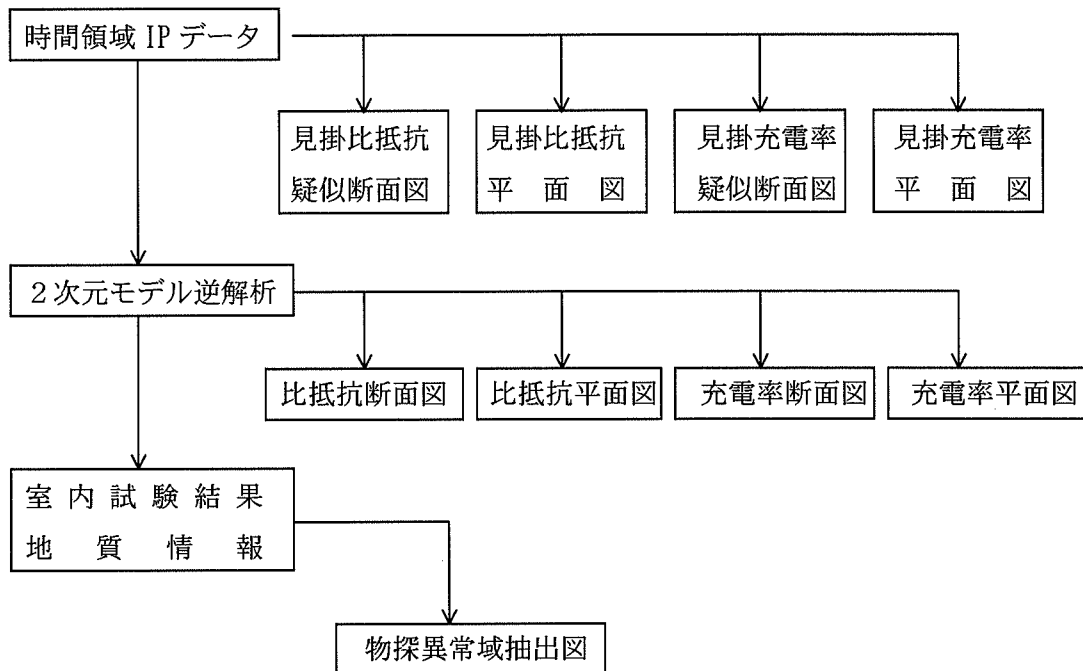


Fig. 3-4 Flow Chart of the Analytical Method

### (1) 見掛比抵抗疑似断面図

見掛比抵抗値を測定に使用した電極系の中点の直下，深度  $a(n+1)/2$  の位置にプロットし，測線毎に断面図にしたものである。ただし， $a$ は電極間隔， $n$ は電極隔離係数である。

### (2) 見掛比抵抗平面図

見掛比抵抗値を電極隔離係数別にプロットした平面図である。

### (3) 見掛充電率疑似断面図

見掛充電率値を測定に使用した電極系の中点の直下，深度  $a(n+1)/2$  の位置にプロットし，測線毎に断面図にしたものである。



(4) 見掛充電率平面図

見掛充電率値を電極隔離係数別にプロットした平面図である。

(5) 2次元モデル逆解析

測線毎に構造を2次元と仮定し、観測値に最も近似した見掛比抵抗分布を与える比抵抗分布を求めるものである。2次元モデルの順解析には有限要素法を用い、比抵抗分布の最適化には平滑化拘束付最小二乗法を用いている。比抵抗分布を決定した後、最小二乗法により充電率の分布を求める。この際、見掛充電率は見掛比抵抗の感度を重み関数とした充電率の加重平均であると仮定する。

(6) 比抵抗断面図

2次元モデル逆解析で得られた比抵抗分布を測線毎に断面図にしたものである。

(7) 比抵抗平面図

2次元モデル逆解析で得られた結果から、一定深度における比抵抗分布を作成した平面図である。

(8) 充電率断面図

2次元モデル逆解析で得られた充電率分布を、測線毎に断面図にしたものである。

(9) 充電率平面図

2次元モデル逆解析で得られた結果から、一定深度における充電率分布を作成した平面図である。

(10) 物探異常域抽出図

物理探査結果の異常域を抽出した平面図である。

## 2-3 調査結果

### 2-3-1 Seweden 地区

#### (1) 測定値

##### ①見掛比抵抗

6本の測線の見掛比抵抗擬似断面図を Fig.3-5 に示し、 $n=3$ での見掛比抵抗平面図を Fig.3-6 に示す。

本地区の比抵抗は、見掛比抵抗の平均値が約 70 ohm-m であることから、全般的に低い。比抵抗は南から北に向けてやや高くなる傾向があり、概ね南側の3測線では 20~100 ohm-m、北側の3測線では 50~200 ohm-m の比抵抗域が分布する。

##### ②見掛充電率

6本の測線の見掛充電率擬似断面図を Fig.3-7 に示し、 $n=3$ での見掛充電率平面図を Fig.3-8 に示す。

本地区の充電率のバックグラウンド値は、見掛充電率から判断して、10 mV/V 程度である。充電率は測線 2 および測線 3 の東部を中心として高く、北および西に向かって低くなる傾向がある。30 mV/V 以上の充電率異常域は、測線 2 および測線 3 の東部の深部に認められる。

#### (2) 解析結果

##### ①比抵抗

2次元逆解析結果から作成した比抵抗断面図を Fig.3-9 に示し、2レベル（海拔 100 m および 海拔-100 m）の比抵抗平面図をそれぞれ Fig.3-10 および Fig.3-11 に示す。

本地区の比抵抗構造は南東部で低く、北西部で高くなる傾向が見られる。北西部および深部の一部を除き全般に数 10 ohm-m オーダーの低比抵抗値を示すことから、広く変質を受けている可能性がある。

##### ②充電率

2次元逆解析結果から作成した充電率断面図を Fig.3-12 に示し、2レベル（海拔 100 m および 海拔-100 m）の充電率平面図をそれぞれ Fig.3-13 および Fig.3-14 に示す。

2次元逆解析により充電率異常域が明瞭に抽出された。本地区の充電率は中東部で高く、西部で低い。また、深部で高く、浅部で低い傾向がある。30 mV/V 以上の強充電率異常は測線 1 から測線 4 の中東部の深部においてそれぞれ 1~3 箇所認められる。これらの充電率異常は海拔

-100 m レベルでは 2 本の南北に伸びる異常域を形成し、充電率は測線 3 の測点 2400 および測点 3200 付近が最も高く、50 mV/V を越える。この異常域はいずれも低比抵抗域に分布している。

## 2-3-2 Tempursari 地区

### (1) 測定値

#### ①見掛比抵抗

4 本の測線の見掛比抵抗疑似断面図を Fig.3-15 に示し、 $n=3$  での見掛比抵抗平面図を Fig.3-16 に示す。

本調査地区の見掛比抵抗値はほぼ 50~500 ohm-m にあり、その平均値は約 180 ohm-m である。Seweden 地区に比べ比抵抗値は全般にやや高く、変化が大きい。

#### ②見掛充電率

4 本の測線の見掛充電率疑似断面図を Fig.3-17 に示し、 $n=3$  での見掛充電率平面図を Fig.3-18 に示す。

本調査地区の充電率は、見掛充電率の平均値が約 18 mV/V と比較的高い。充電率は測線 2 を中心として高く、東および北に向かって低くなる傾向がある。30 mV/V 以上の充電率異常は、測線 1 および測線 2 の断面においてそれぞれ V 字型および逆 V 字型の形状に分布する。

### (2) 解析結果

#### ①比抵抗

2 次元逆解析結果から作成した比抵抗断面図を Fig.3-19 に示し、2 レベル（海拔 600 m および 海拔 400 m）の比抵抗平面図をそれぞれ Fig.3-20 および Fig.3-21 に示す。

本地区の比抵抗は概ね 100 ohm-m 以上の値を示す。部分的には 500 ohm-m 以上の高比抵抗を示す。100 ohm-m 以下の低比抵抗域は測線 3 および測線 4 の北部と測線 1 から測線 3 の南部の浅部から中深部にかけての範囲である。後者は海拔-100 m レベルでは南西-北東方向に伸びている。

#### ②充電率

2 次元逆解析結果から作成した充電率断面図を Fig.3-22 に示し、2 レベル（海拔 600 m および 海拔 400 m）の充電率平面図をそれぞれ Fig.3-23 および Fig.3-24 に示す。

2 次元逆解析により充電率異常域が明瞭に抽出された。本地区の充電率は概ね西部で高く、東部で低い傾向がある。30 mV/V 以上の強充電率異常は 4 本の測線において 1~2 箇所認められる。これらの充電率異常は海拔 400 m レベルでは測線 2 の測点 600 および測点 1800 付近を中心と

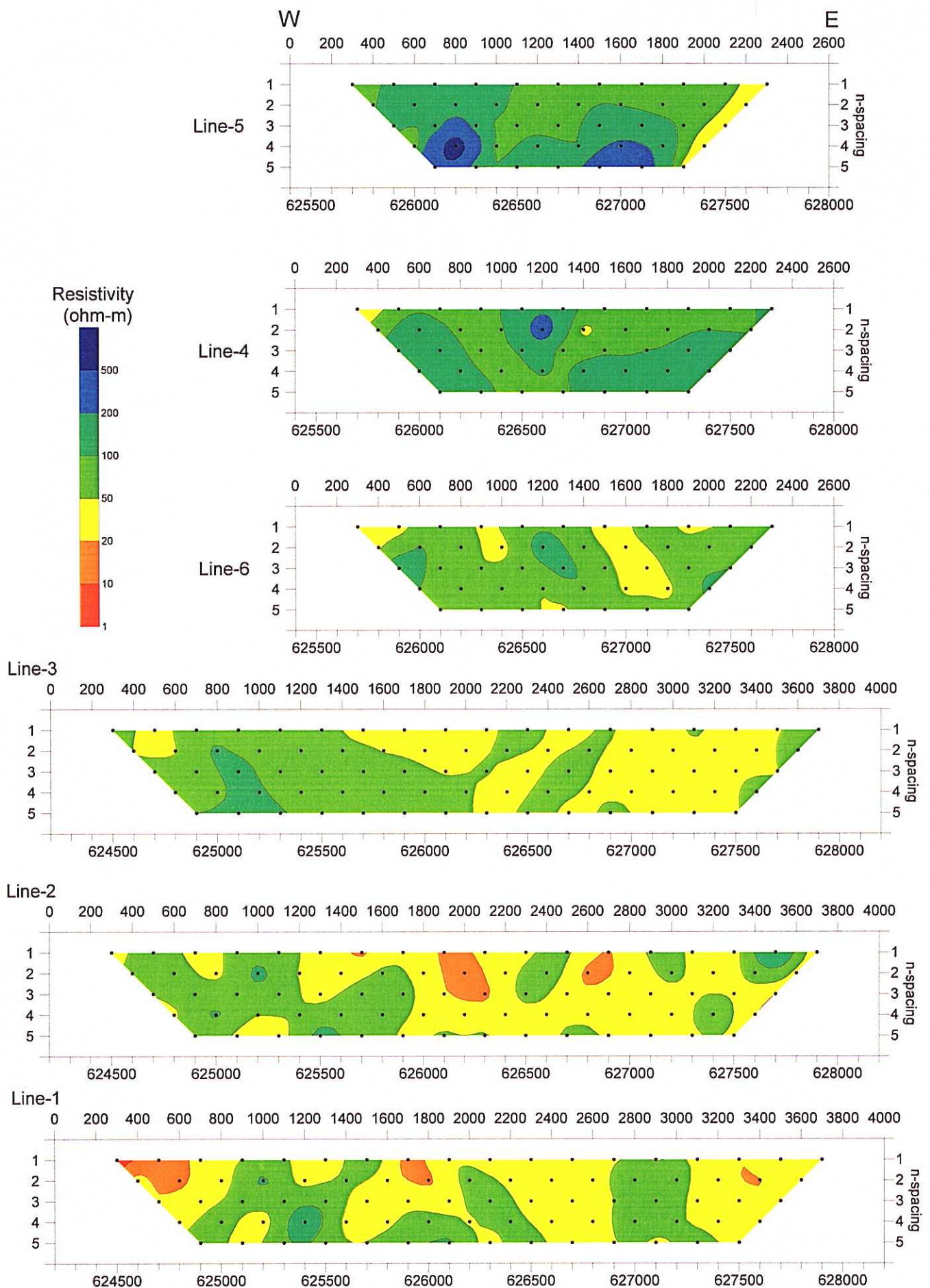


Fig.3-5 Apparent Resistivity Pseudo-sections of the Seweden District

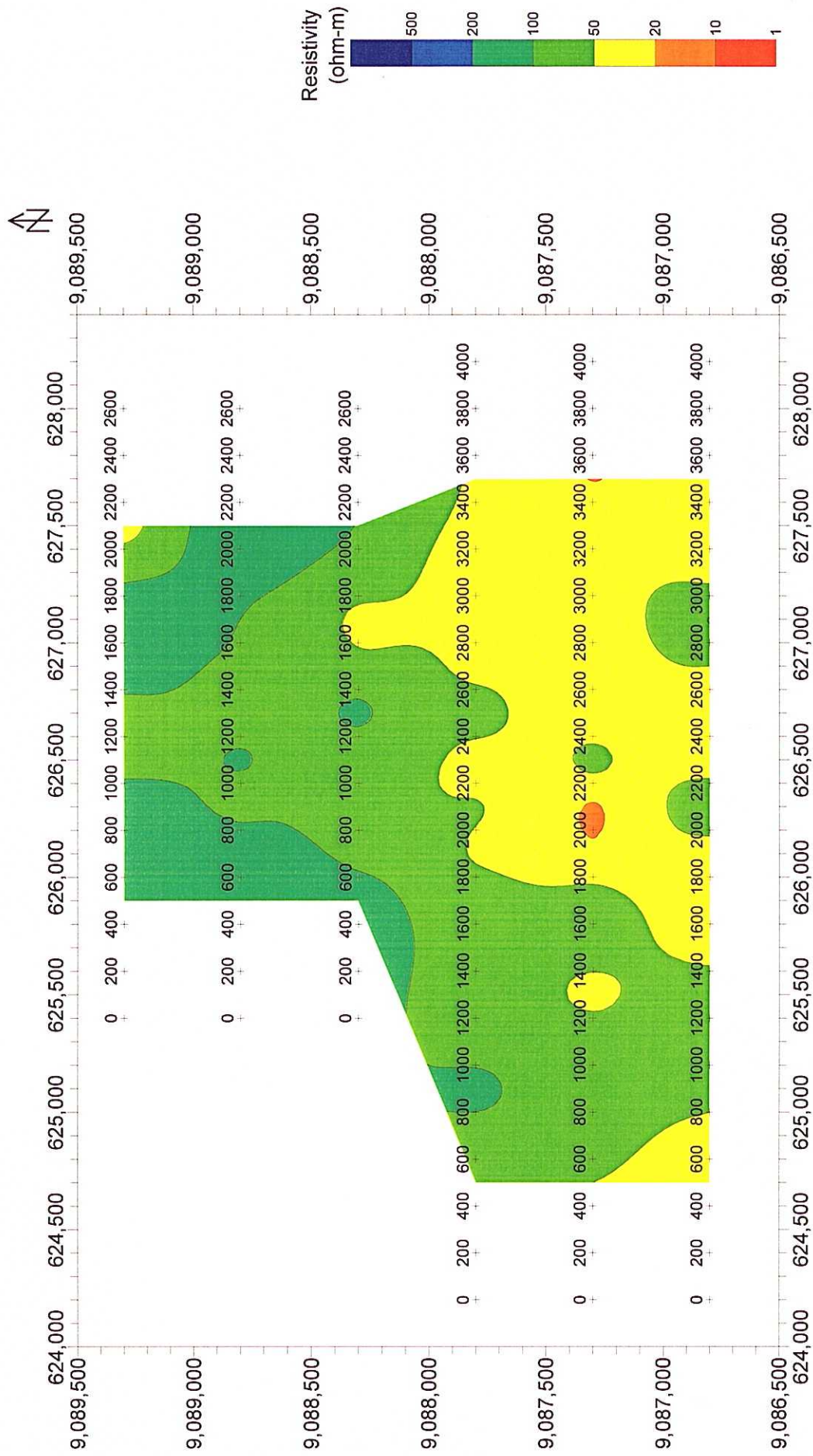


Fig.3-6 Apparent Resistivity Map of the Seweden District (n=3)

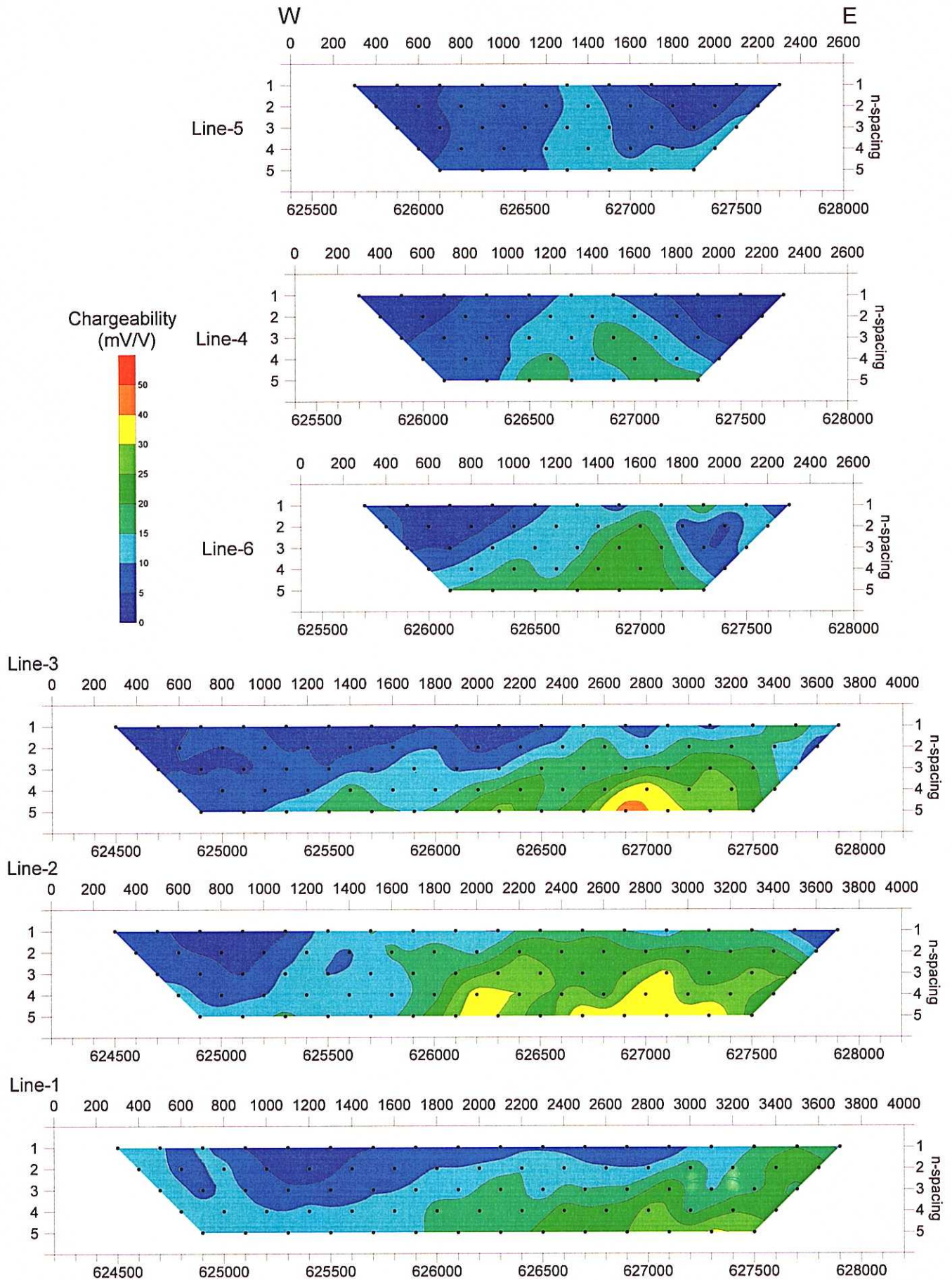


Fig.3-7 Apparent Chargeability Pseudo-sections of the Seweden District

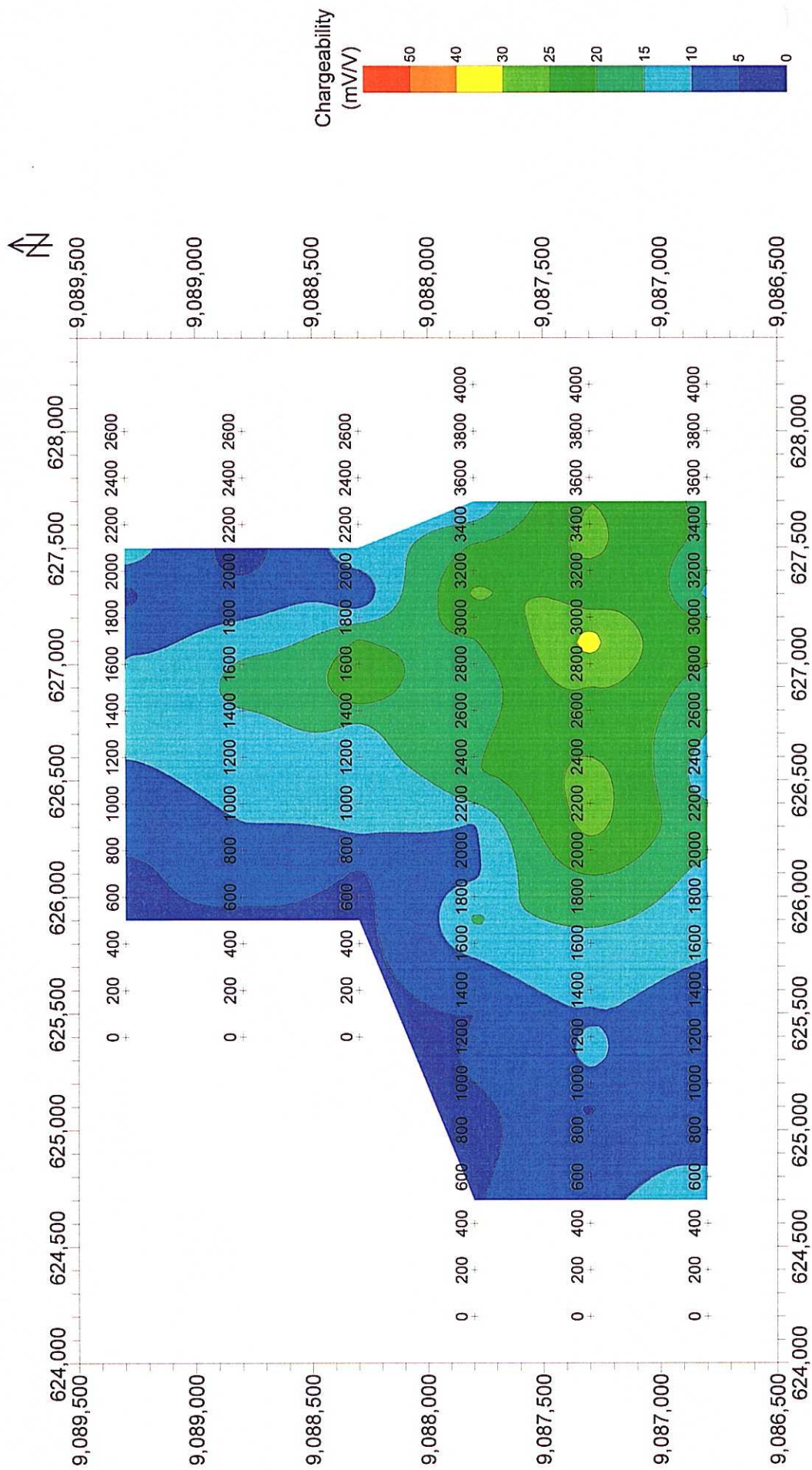


Fig.3-8 Apparent Chargeability Map of the Seweden District (n=3)

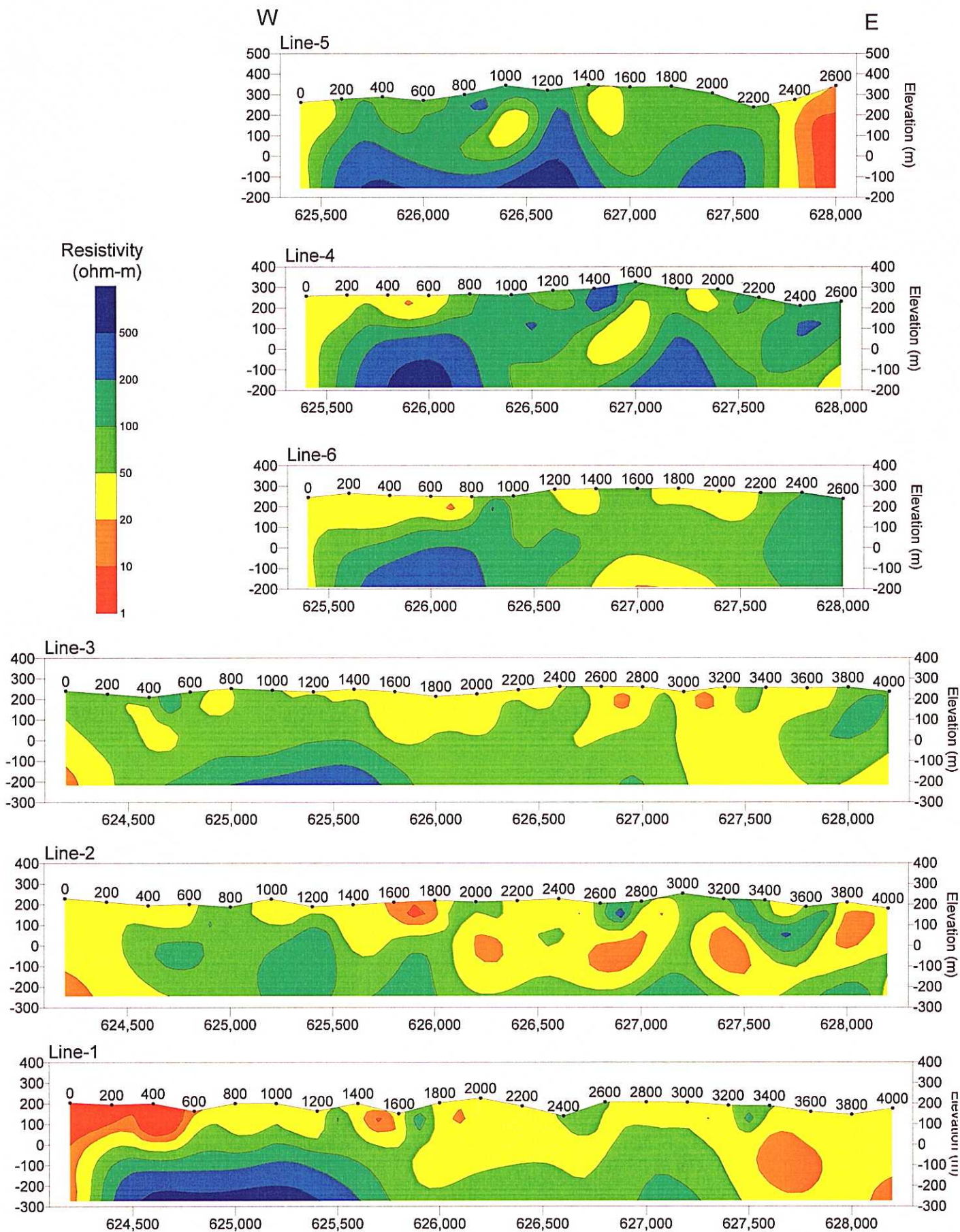


Fig.3-9 Resistivity Sections of the Seweden District



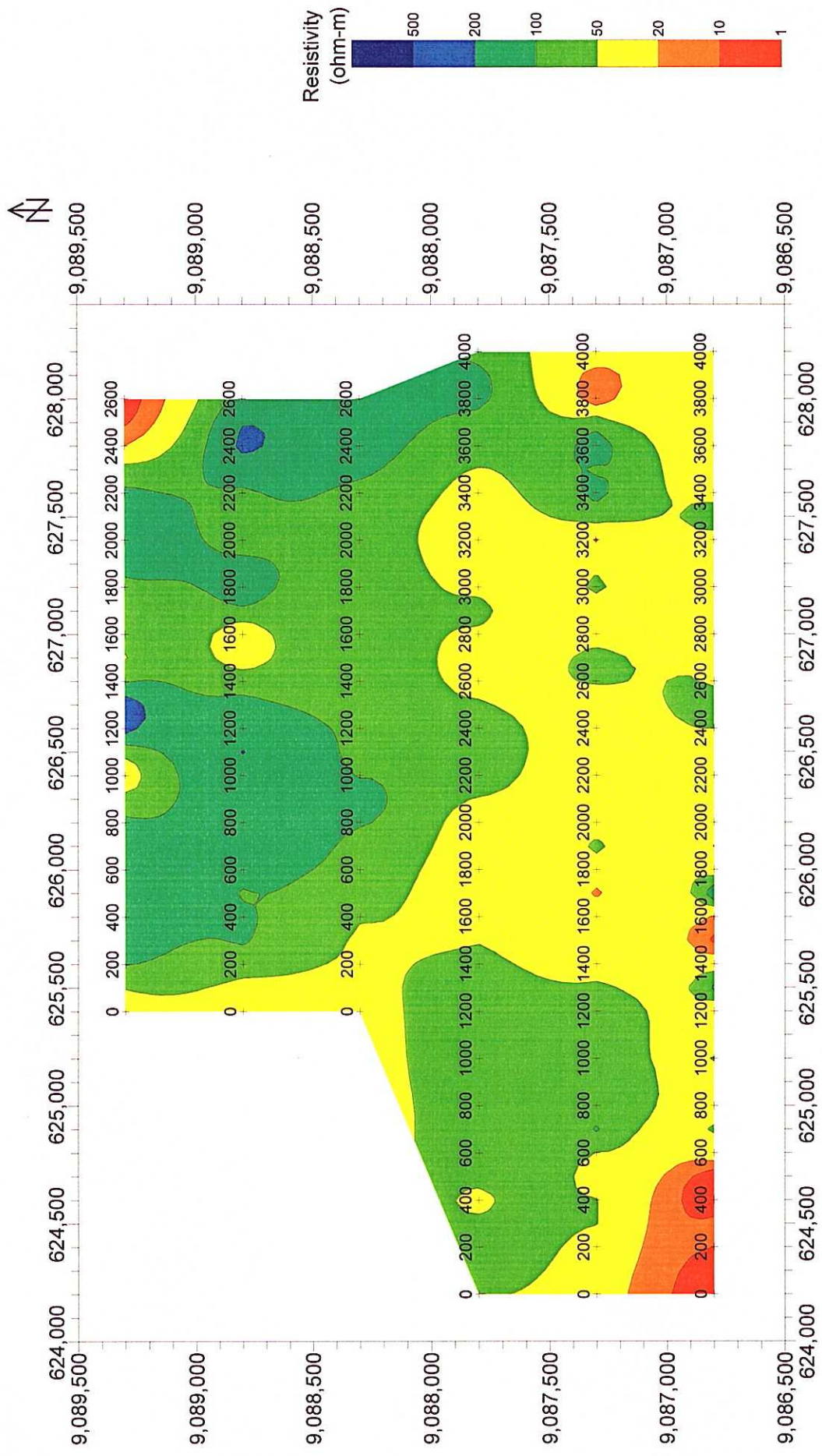


Fig.3-10 Resistivity Map of the Seweden District (SL=100m)

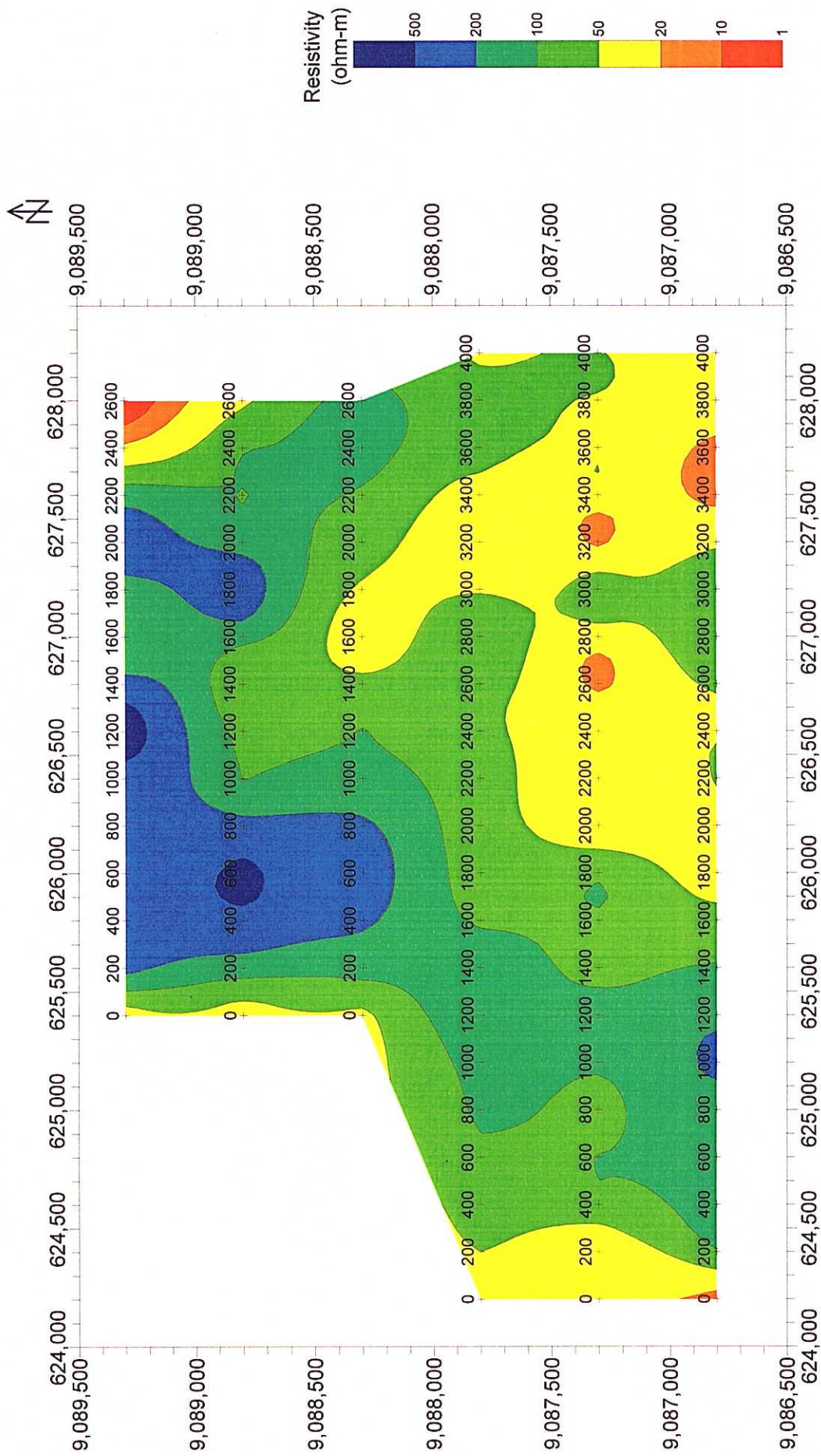


Fig.3-11 Resistivity Map of the Seweden District (SL=-100m)

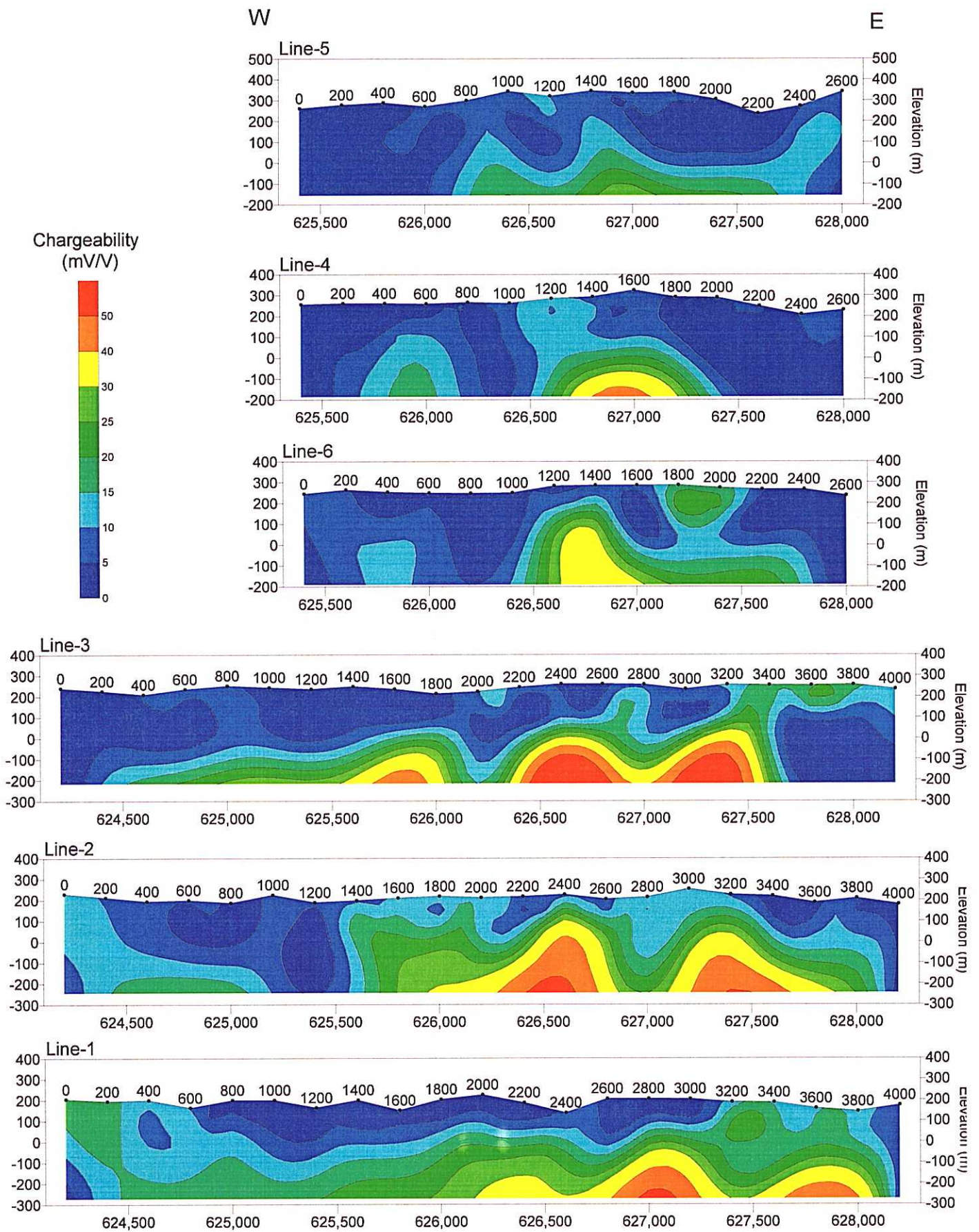


Fig.3-12 Chargeability Sections of the Seweden District

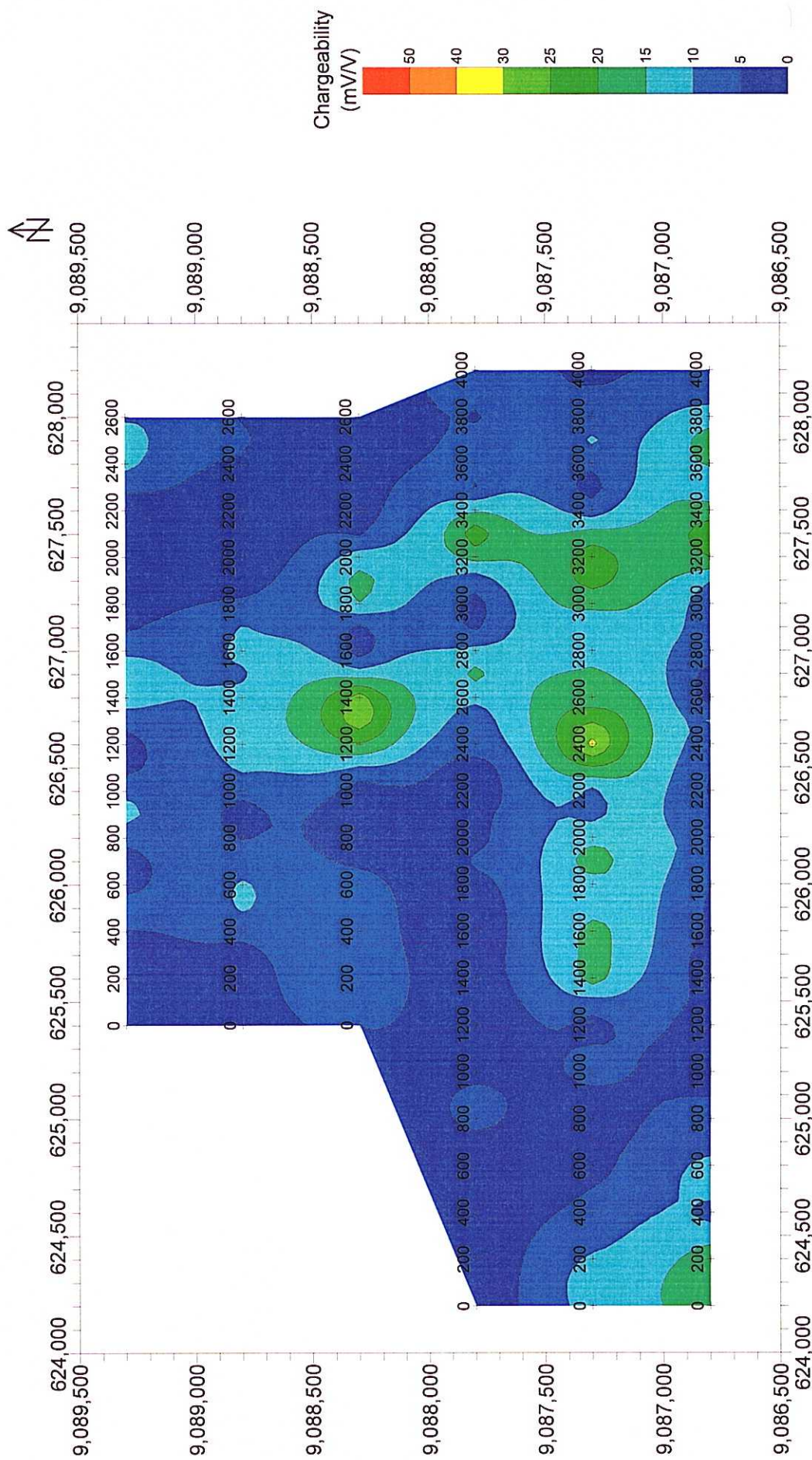


Fig.3-13 Chargeability Map of the Seweden District (SL=100m)

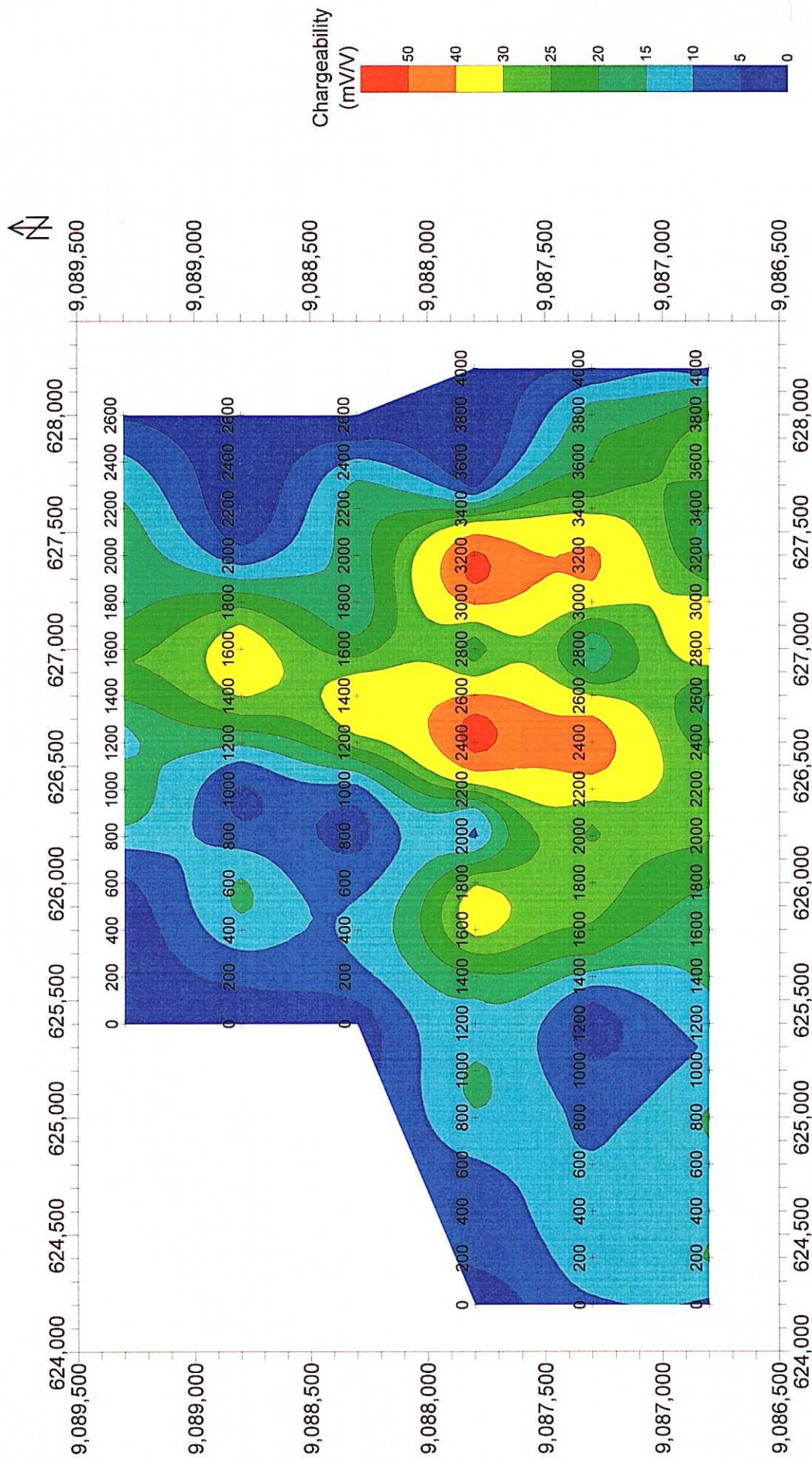


Fig.3-14 Chargeability Map of the Seweden District (SL=-100m)

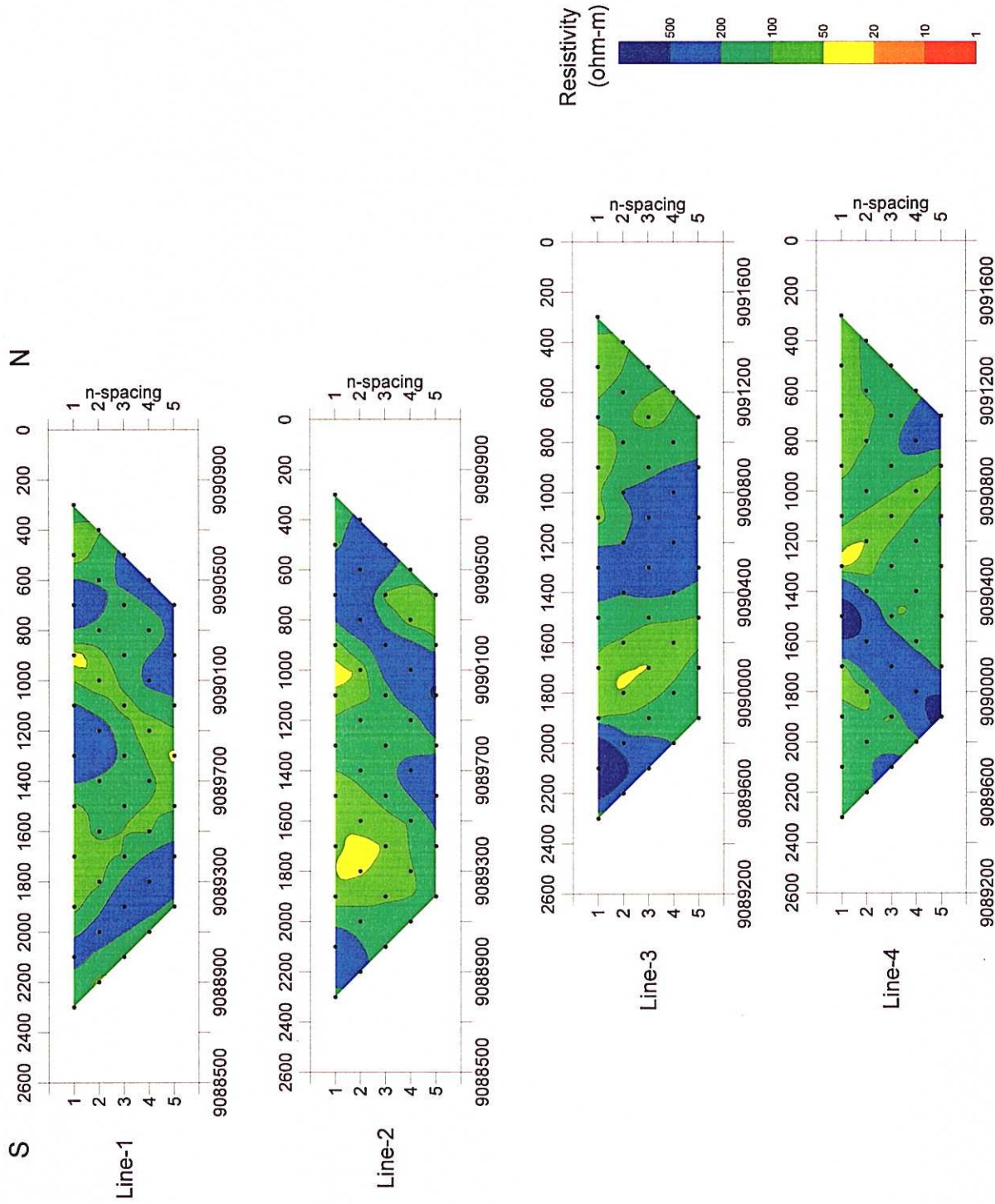


Fig.3-15 Apparent Resistivity Pseudo-sections of the Tempursari District

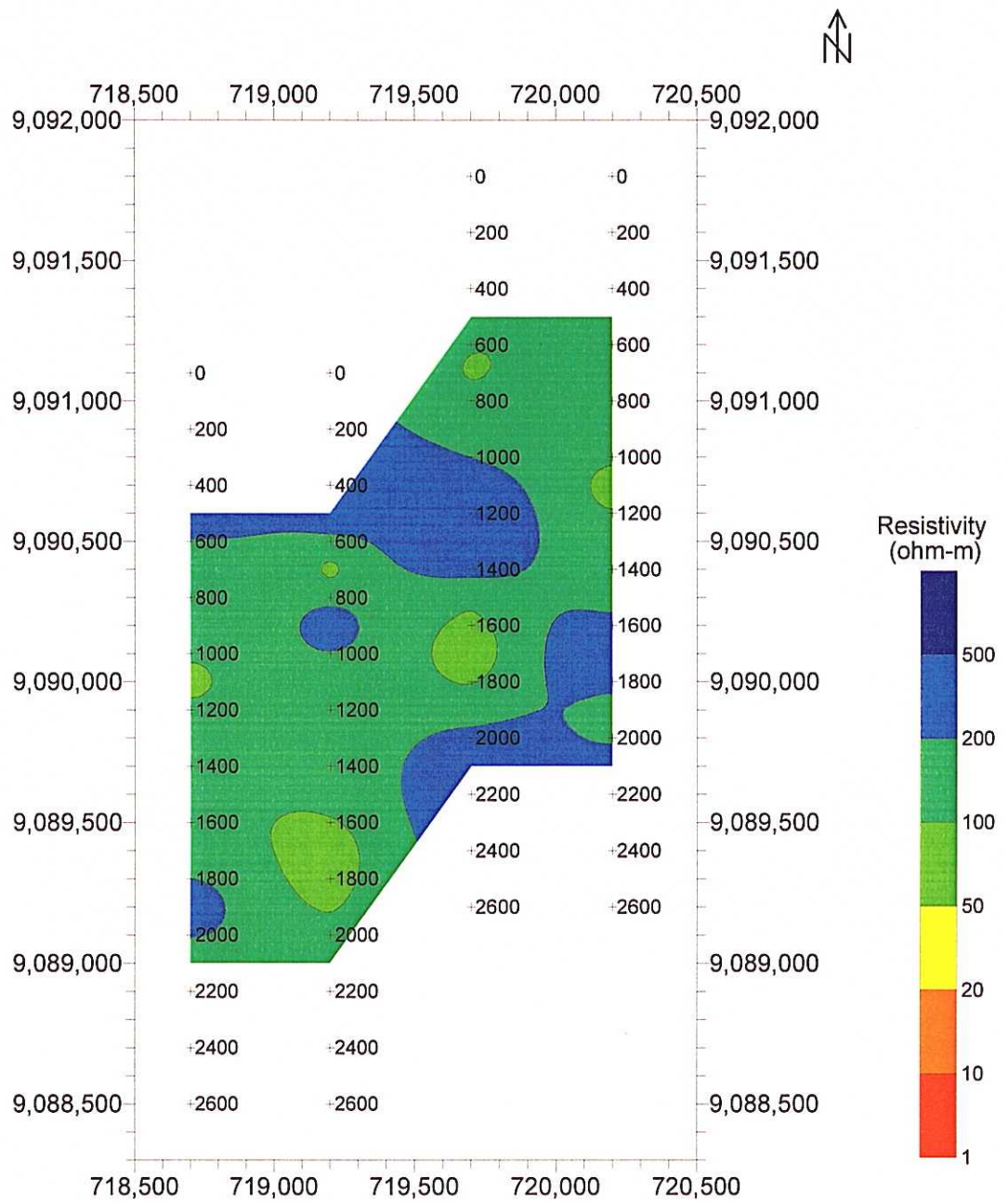


Fig.3-16 Apparent Resistivity Map of the Tempursari District (n=3)

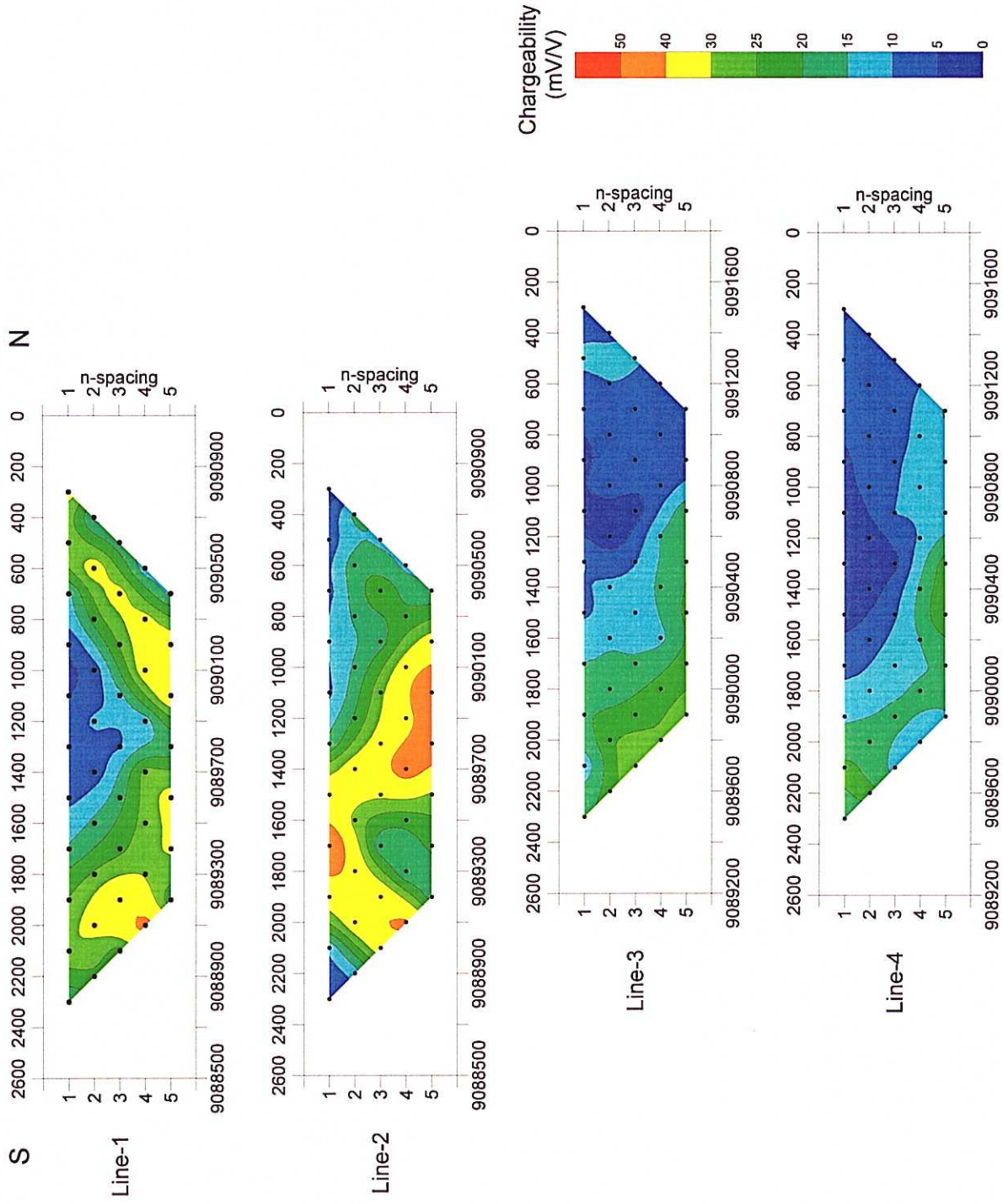


Fig.3-17 Apparent Chargeability Pseudo-sections of the Tempursari District



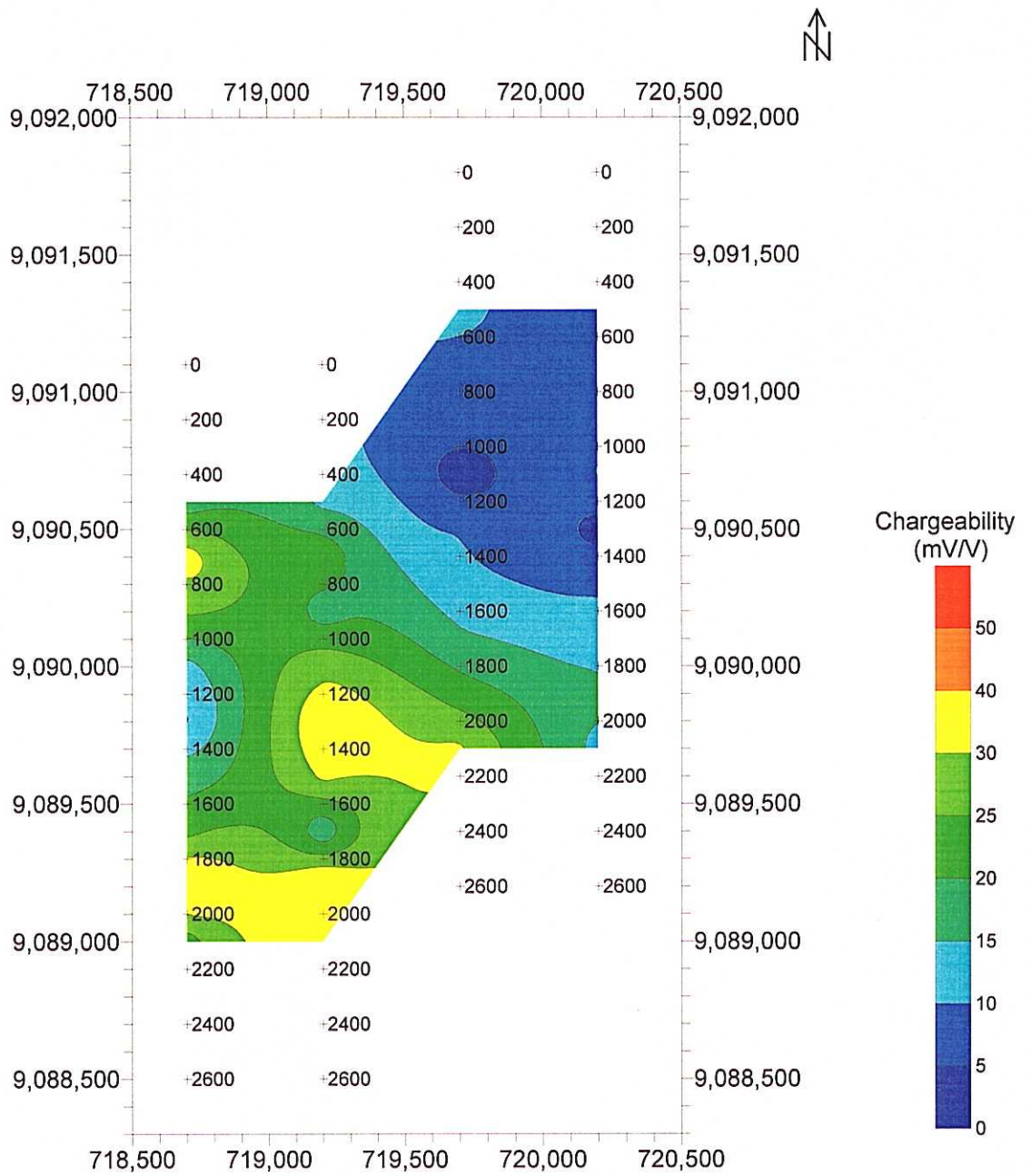


Fig.3-18 Apparent Chargeability Map of the Tempursari District (n=3)

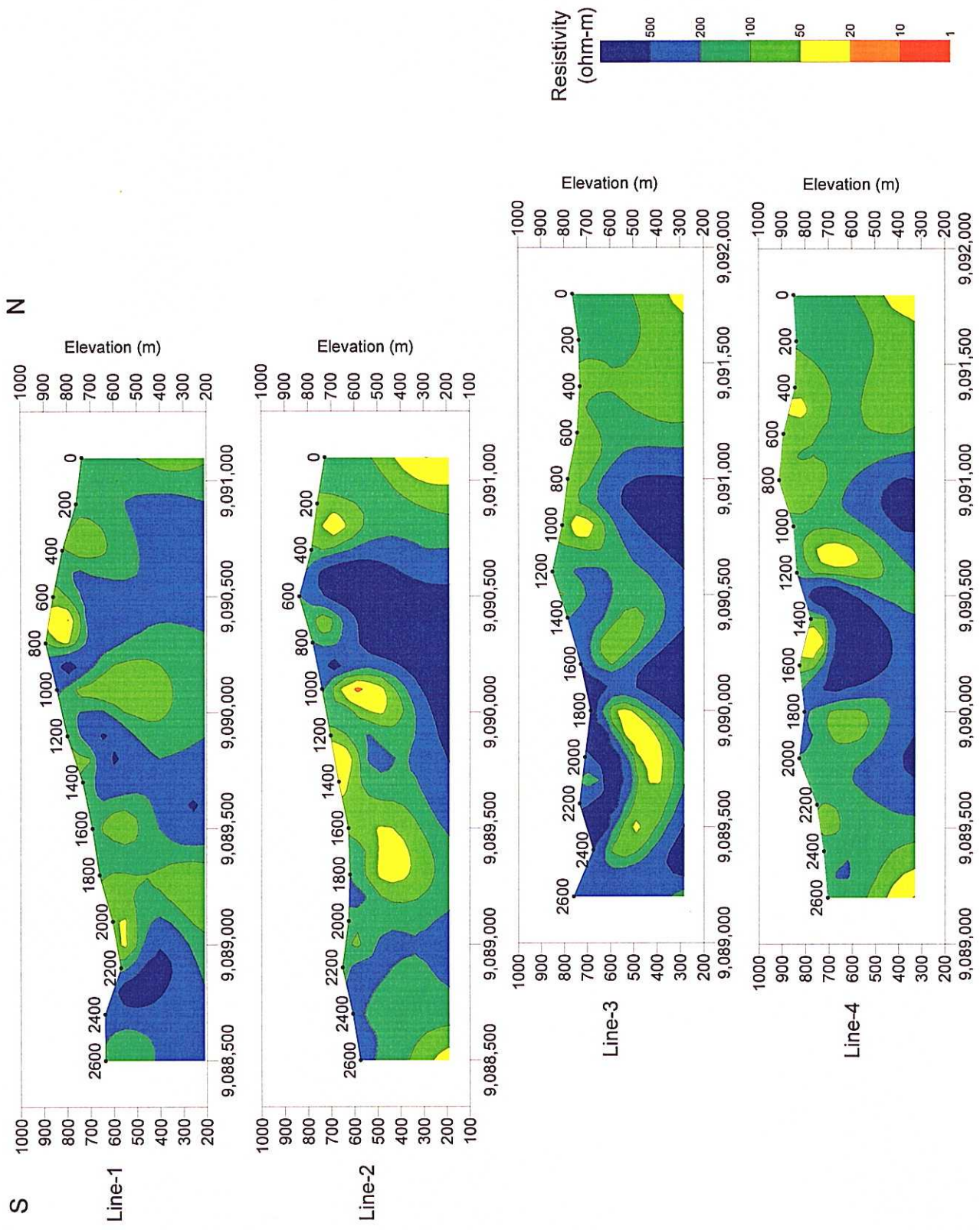


Fig.3-19 Resistivity Sections of the Tempursari District

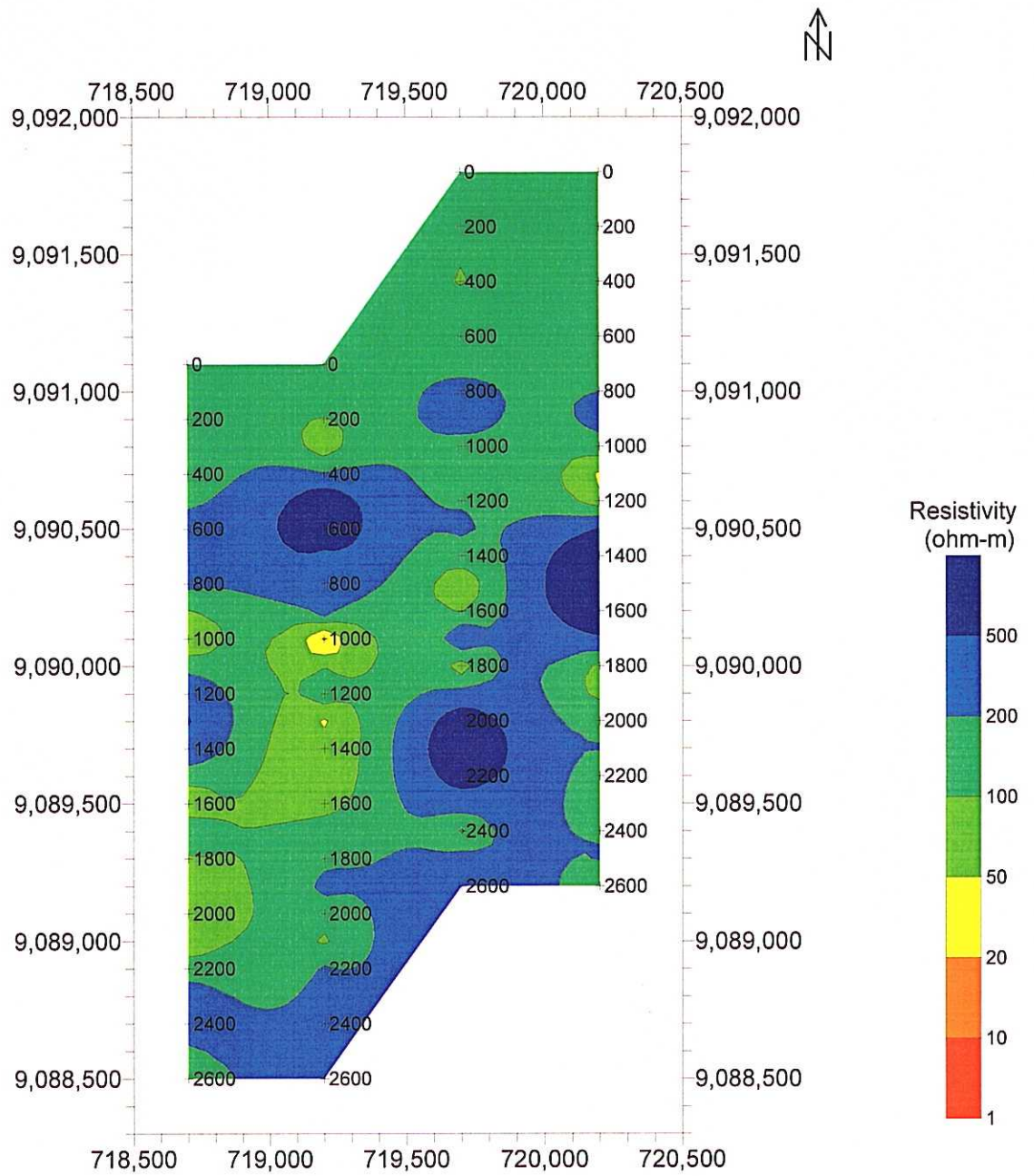


Fig.3-20 Resistivity Map of the Tempursari District (SL=600m)

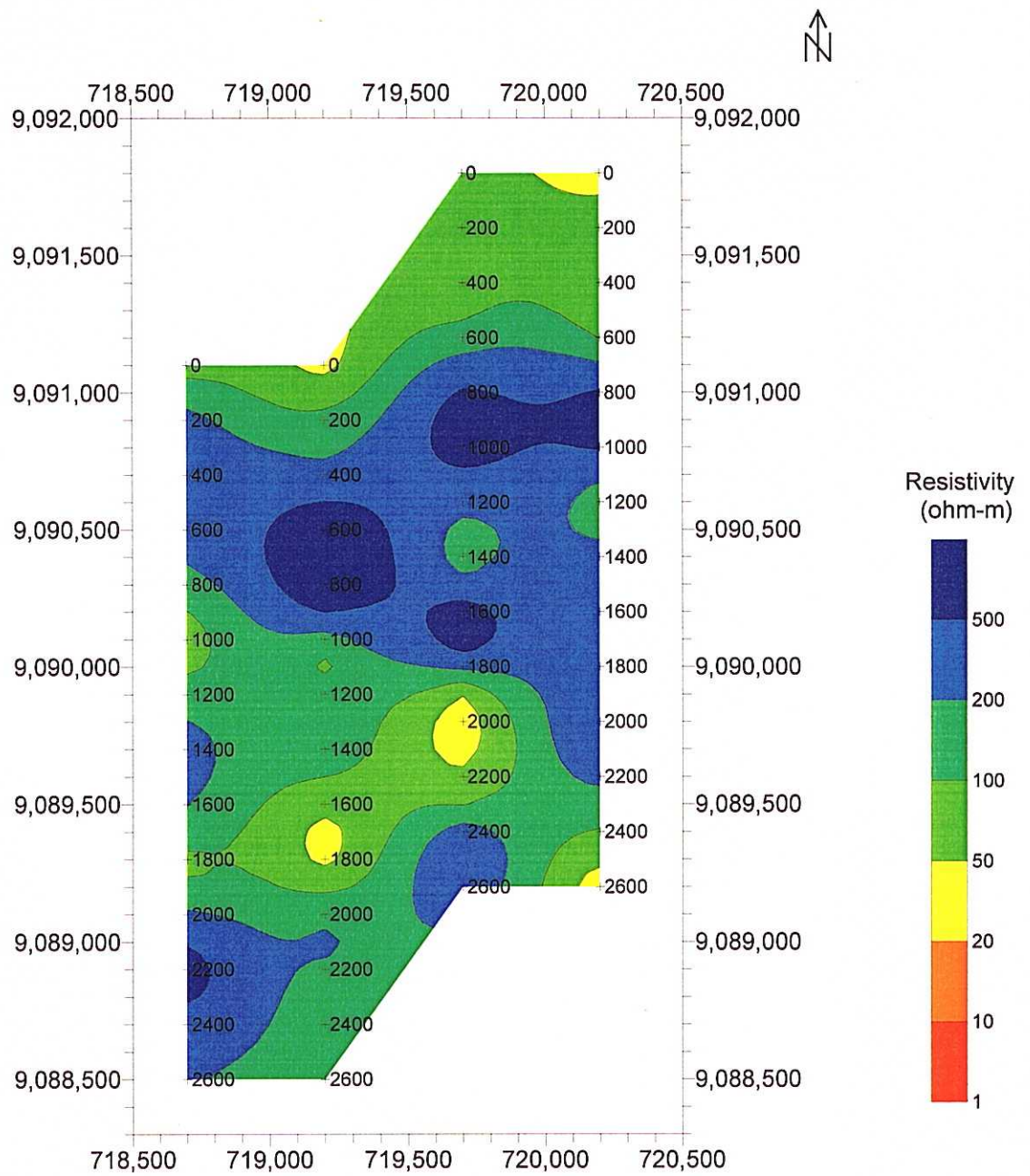


Fig.3-21 Resistivity Map of the Tempursari District (SL=400m)

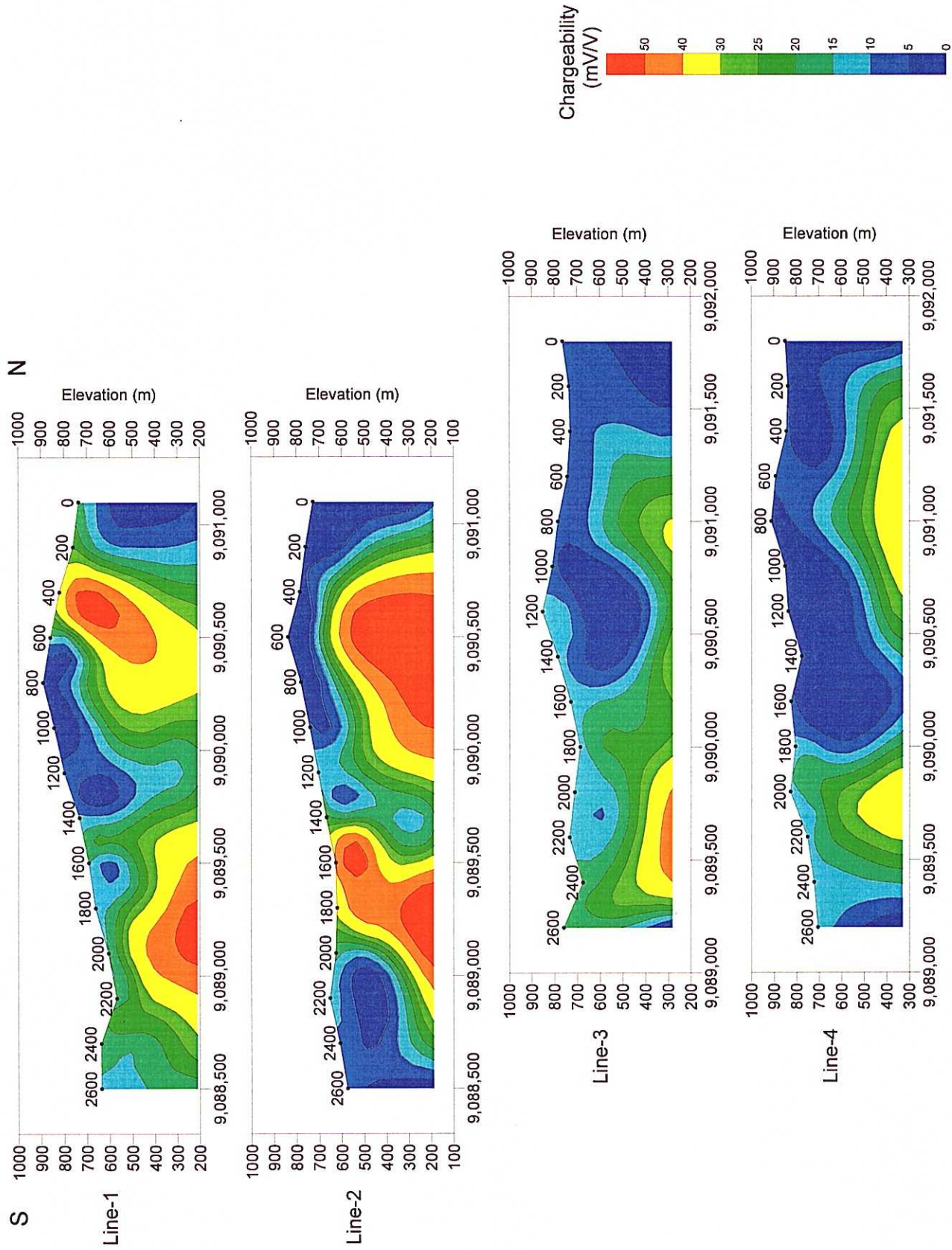


Fig.3-22 Chargeability Sections of the Temprusari District

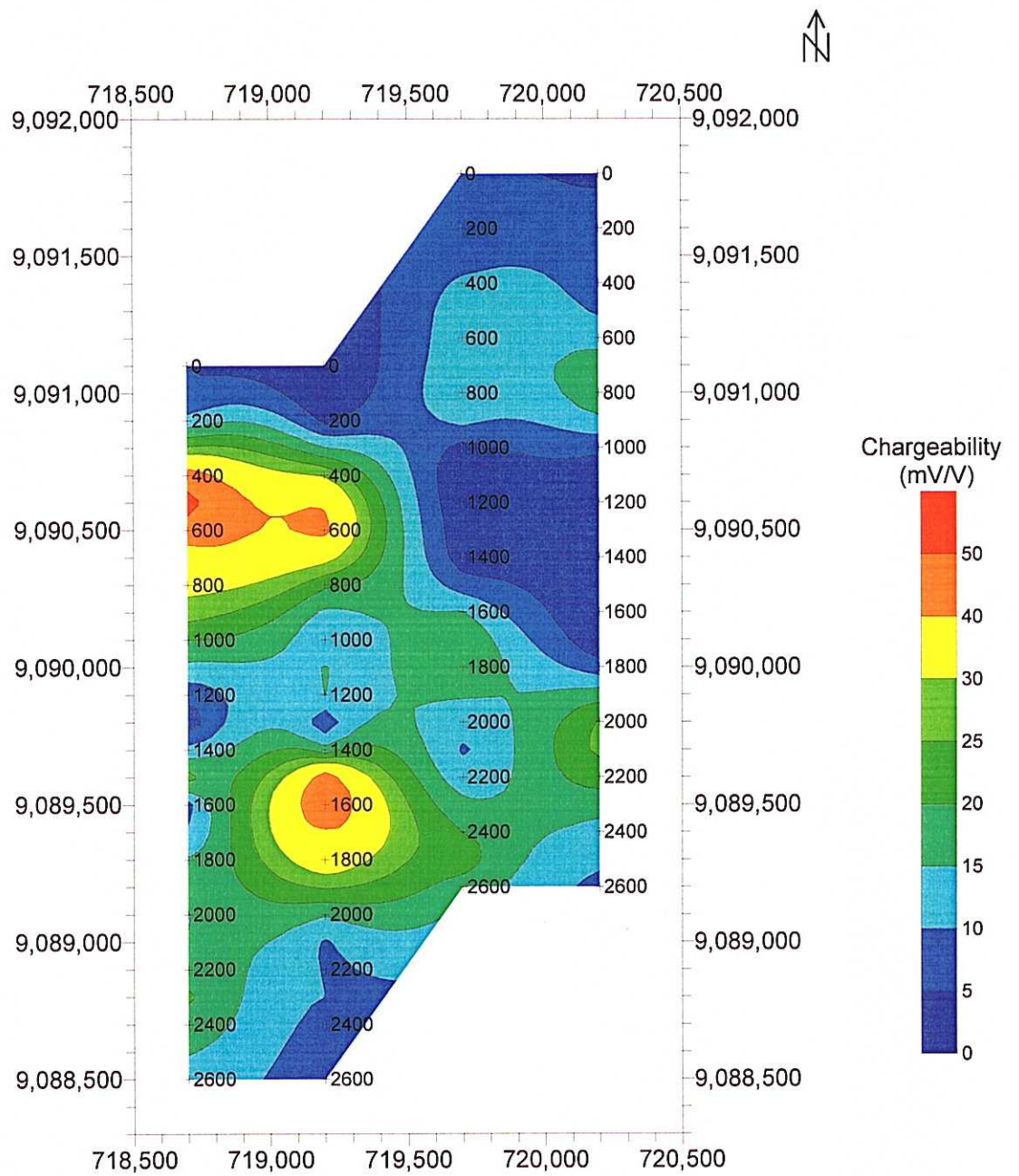


Fig.3-23 Chargeability Map of the Tempursari District (SL=600m)

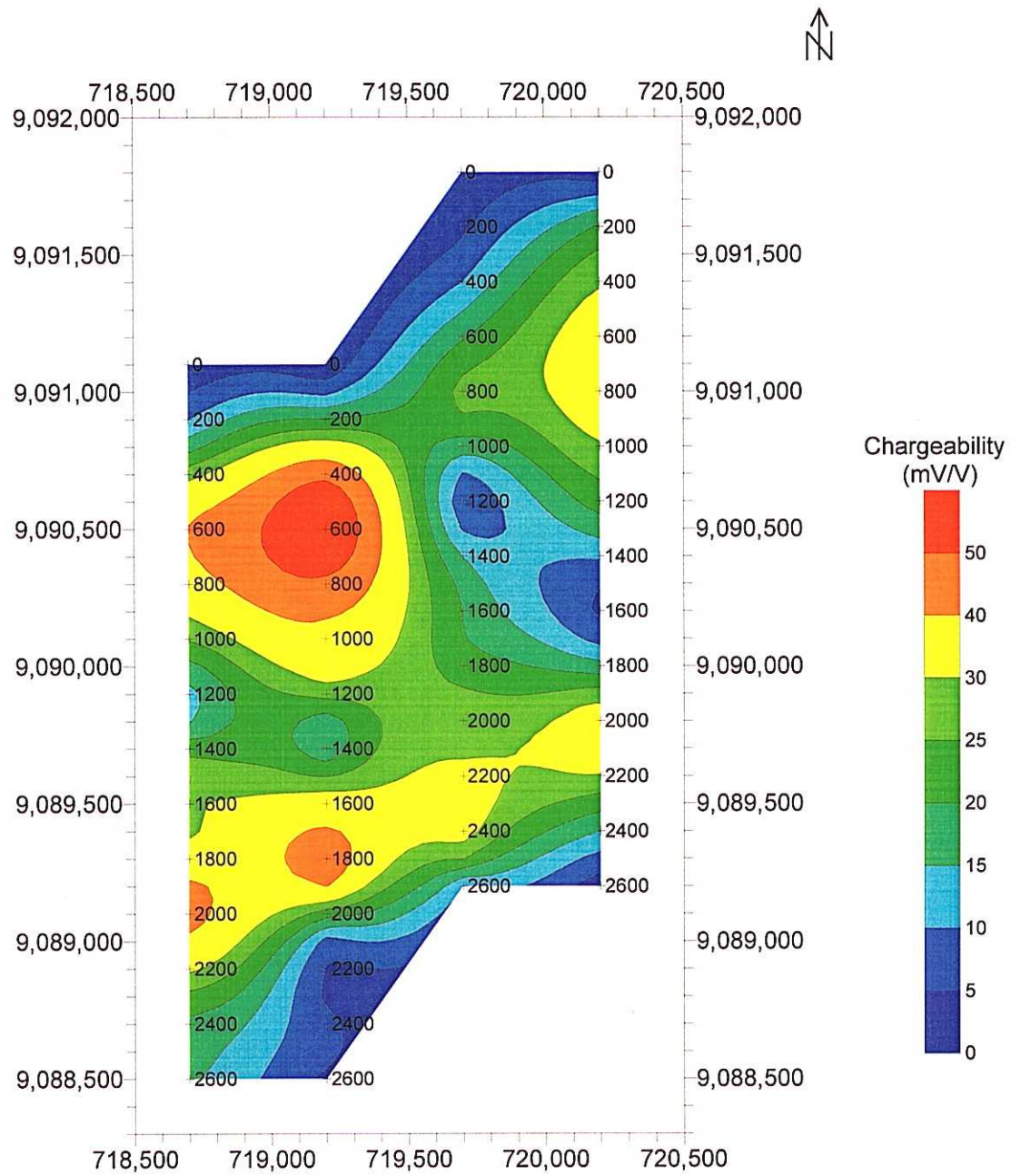


Fig.3-24 Chargeability Map of the Tempursari District (SL=400m)

する2つの異常域を形成する。充電率は前者が最も高く、50 mV/V を越える。この異常域はいずれも垂直的な構造を示している。

### 2-3-3 室内試験

Table 3-3 に室内試験の結果を示す。Seweden および Tempursari の両調査地区に分布する主たる岩種の比抵抗および充電率の平均値は、以下に示すとおりである。

| Area       | Rock         | No. of Sample | Resistivity<br>[ohm-m] | Chargeability<br>[mV/V] |
|------------|--------------|---------------|------------------------|-------------------------|
| Seweden    | 石灰岩          | 2             | 16,200                 | 7                       |
|            | 凝灰岩          | 3             | 220                    | 22                      |
|            | 凝灰角礫岩（珪化）    | 5             | 900                    | 12                      |
|            | 凝灰角礫岩（粘土化）   | 2             | 80                     | 29                      |
|            | 安山岩類         | 4             | 750                    | 12                      |
| Tempursari | 凝灰角礫岩        | 3             | 930                    | 21                      |
|            | 安山岩          | 2             | 350                    | 18                      |
|            | (黄鉄鉱 磁鉄鉱 染岩) | 6             | 590                    | 19                      |
|            | (風化変質岩)      | 4             | 160                    | 21                      |

本調査地区に分布する主な岩石の物性値は、石灰岩と粘土化凝灰角礫岩を除いて、概ね比抵抗は100～1,000 ohm-m、充電率は10～20 mV/Vを示し、岩種による特徴的な違いは見られない。石灰岩は比抵抗数1,000 ohm-m以上、充電率10 mV/V以下の高比抵抗、低充電率を示す。また、粘土化した凝灰角礫岩は比抵抗100 ohm-m以下、充電率20 mV/V以上の低比抵抗、高充電率を示す一方、珪化した凝灰角礫岩は高比抵抗、低充電率を示すのが特徴的である。

黄鉄鉱を含有している凝灰角礫岩や安山岩類も含有していないものに比べ高い充電率を示すが、比抵抗には大きな変化は見られない。ただし、黄鉄鉱を多量に含有する磁石サンプルは低比抵抗を示すと考えられる。風化変質を受けた岩石では比抵抗は低く、充電率は高くなっている。

室内試験の結果から、本調査地区に分布する岩石の物性は一般に比抵抗数100 ohm-m、充電率10数 mV/Vを示し、その違いは岩種によるものより珪化、粘土化、風化等の変質作用の程度や黄鉄鉱の含有による影響が大きいといえる。



Table 3-4 Results of Laboratory Test

| Sample No. | Area       | Location      | Rock Name    | Remarks                     | Resistivity [ohm-m] | Chargeability [mV/V] |
|------------|------------|---------------|--------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|
| S12        | Seweden    | Line1:1300m   | Limestone    | Hard                        | 2,314               | 12.5                 |
| S24        | Seweden    | Line6:500m    | Limestone    |                             | 30,086              | 0.7                  |
| S2         | Seweden    | Line3:1250m   | Fine tuff    | Weak alteration             | 62                  | 27.0                 |
| S5         | Seweden    | Line3:3300m   | Tuff         | Silicified                  | 370                 | 17.1                 |
| S13        | Seweden    | Line1:3200m   | Tuff         | Silicified, Altered         | 231                 | 21.7                 |
| S1         | Seweden    | Line3:500m    | Tuff breccia | Silicified                  | 2,759               | 5.5                  |
| S4         | Seweden    | Line3:2900m   | Tuff breccia | Silicified                  | 847                 | 4.7                  |
| S6         | Seweden    | Line2:750m    | Tuff breccia | Silicified, Py disseminated | 240                 | 15.6                 |
| S7         | Seweden    | Line2:750m    | Tuff breccia | Silicified, Py disseminated | 509                 | 13.2                 |
| S19        | Seweden    | Line4:1400m   | Tuff breccia | Silicified, Weak alteration | 123                 | 19.2                 |
| S3         | Seweden    | Line3:2100m   | Tuff breccia | Clayey, Silicified          | 99                  | 15.5                 |
| S10        | Seweden    | Line2:1250m   | Tuff breccia | Clayey, Weak silicified     | 59                  | 42.5                 |
| S8         | Seweden    | Line2:750m    | Propylite    | Py disseminated             | 152                 | 13.1                 |
| S21        | Seweden    | Line5:1200m   | Propylite    | Py disseminated             | 375                 | 13.4                 |
| S20        | Seweden    | Line4:2400m   | Andesite     | Silicified, Py disseminated | 2,246               | 5.0                  |
| S25        | Seweden    | Line6:900m    | Dacite       | Altered                     | 205                 | 16.0                 |
| T1         | Tempursari | West of Line1 | Tuff breccia | Non alteration              | 822                 | 10.9                 |
| T2         | Tempursari | Line1:2200m   | Tuff breccia | Py disseminated             | 1,716               | 44.3                 |
| T5         | Tempursari | Line4:1300m   | Tuff breccia | Non alteration              | 239                 | 7.1                  |
| T6         | Tempursari | Line4:1400m   | Andesite     | Py disseminated             | 566                 | 12.4                 |
| T7         | Tempursari | Line5:0m      | Andesite     | Non alteration              | 142                 | 22.8                 |

## 2-3-4 考 察

### (1) 比抵抗・充電率特性

室内試験および地質情報から、本調査地域の岩石および地質構造に対して、以下の比抵抗・充電率特性が推定される。

#### ①比抵抗特性

本調査地区の岩石の比抵抗は、室内試験の結果から、石灰岩を除き、概ね数 100 ohm-m を示し、岩種による特徴的な違いはあまり見られない。石灰岩は数千 ohm-m オーダーの高比抵抗を示し、珪化変質は比抵抗を高くすると考えられる。本調査地区において、低比抵抗を形成する主たるものには、粘土化帯や風化変質帯が挙げられる。

#### ②充電率特性

本調査地区の充電率のバックグラント値は、室内試験の結果から、10 数 mV/V と高い。石灰岩は 10 mV/V 以下の低充電率を示し、珪化変質は充電率を低下させると考えられる。本調査地区において、高充電率異常を引き起こすものとしては黄鉄鉱染帯、粘土化変質帯が考えられる。

### (2) IP 法調査結果と地質構造・鉱化作用の関係

上記特性を踏まえて、IP 法調査結果と地質構造および鉱化作用の関係を考察する。

#### ①IP 法調査結果と地質構造の関係

Seweden 地区の岩石は全般に数 10 ohm-m オーダーの低比抵抗値を示すことから、広く変質を受けている可能性がある。

#### ②IP 法調査結果と鉱化作用の関係

Fig.3-25 に Seweden 地区の海拔-100 m レベルでの充電率異常域を示し、Fig.3-26 に Tempursari 地区の海拔 400 m レベルでの充電率異常域を示す。この図から Seweden 地区の測線 3 の測点 2400 および測点 3200 周辺、Tempursari 地区の測線 2 の測点 600 周辺の 3 箇所が強充電率異常域（以下、それぞれ SW3-2400, SW3-3200 および TM2-600 と呼ぶ）を抽出した。各異常域の特徴を以下に示す。

SW3-2400: 低比抵抗 (50~100 ohm-m)

N-S 方向に伸びる

SW3-3200: 低比抵抗 (20~50 ohm-m)

N-S 方向に伸びる

TM2-600: 高比抵抗 (200 ohm-m 以上)

E-W 方向に伸びる

充電率異常は断面図で垂直的分布を示す

地質調査によれば、Seweden 地区には広い範囲に白色粘土化変質作用、黄鉄鉱鉱染が認められ、特に Putih 川流域ではデイサイト質貫入岩とその周辺で珪化作用、粘土化作用が特に著しく、銅、金の鉱化作用が認められている。したがって、SW3-2400 および SW3-3200 の異常域は低比抵抗、高充電率であることから深部に発達した黄鉄鉱鉱染を伴う粘土化変質帯を示している可能性がある。

また、Tempursari 地区では第三紀安山岩質火山岩・火山砕屑岩とこれらを貫く閃緑岩中に黄鉄鉱の鉱染、セリサイト物などの変質鉱物が広く発達し、一部で石英脈とこれに伴う金・銀・銅の鉱化作用が認められている。したがって、TM2-600 異常域は高比抵抗、高充電率、垂直構造であることから貫入岩や珪化変質脈に伴う黄鉄鉱鉱染帯を反映している可能性がある。

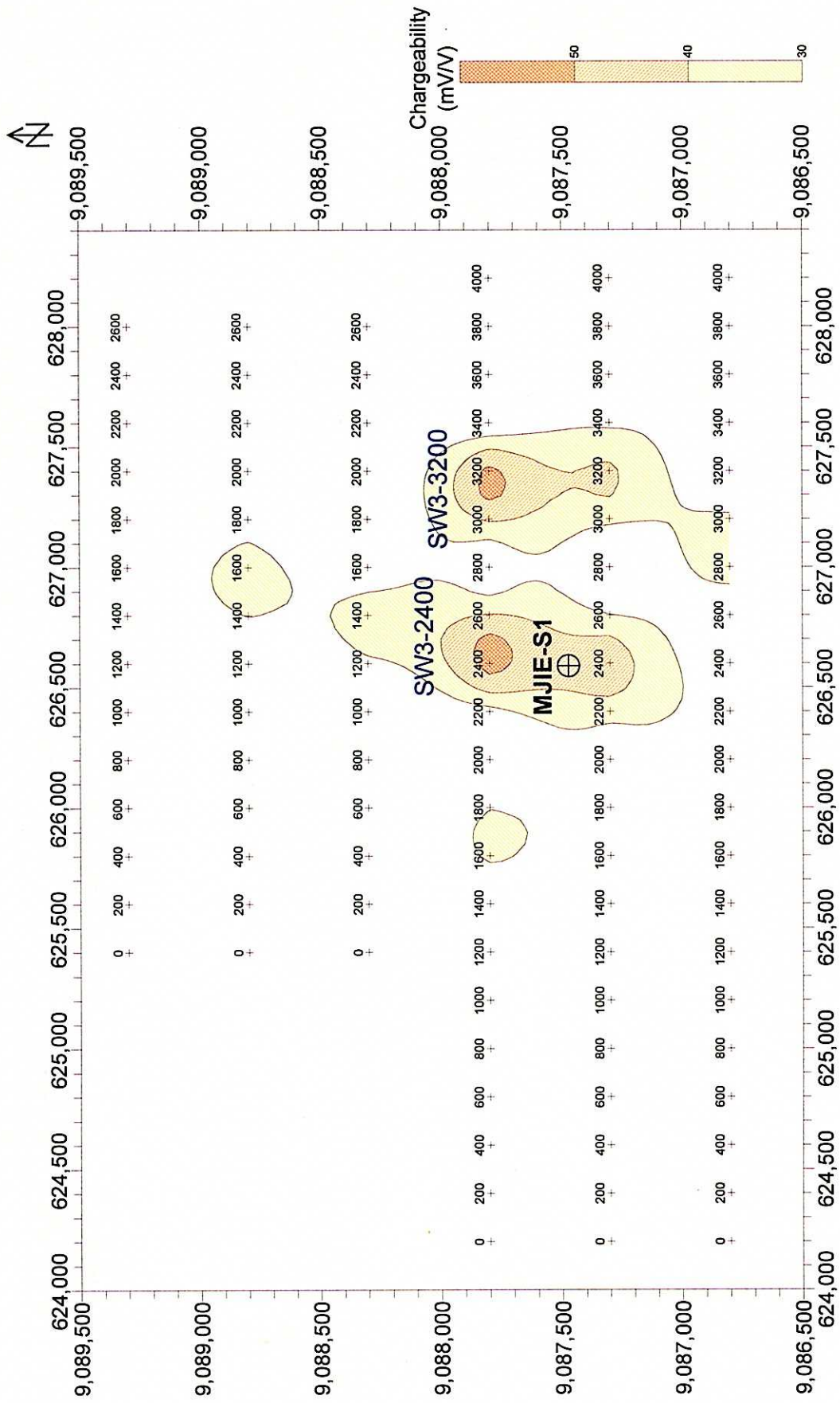


Fig.3-25 Geophysical Anomaly Map of the Seweden District

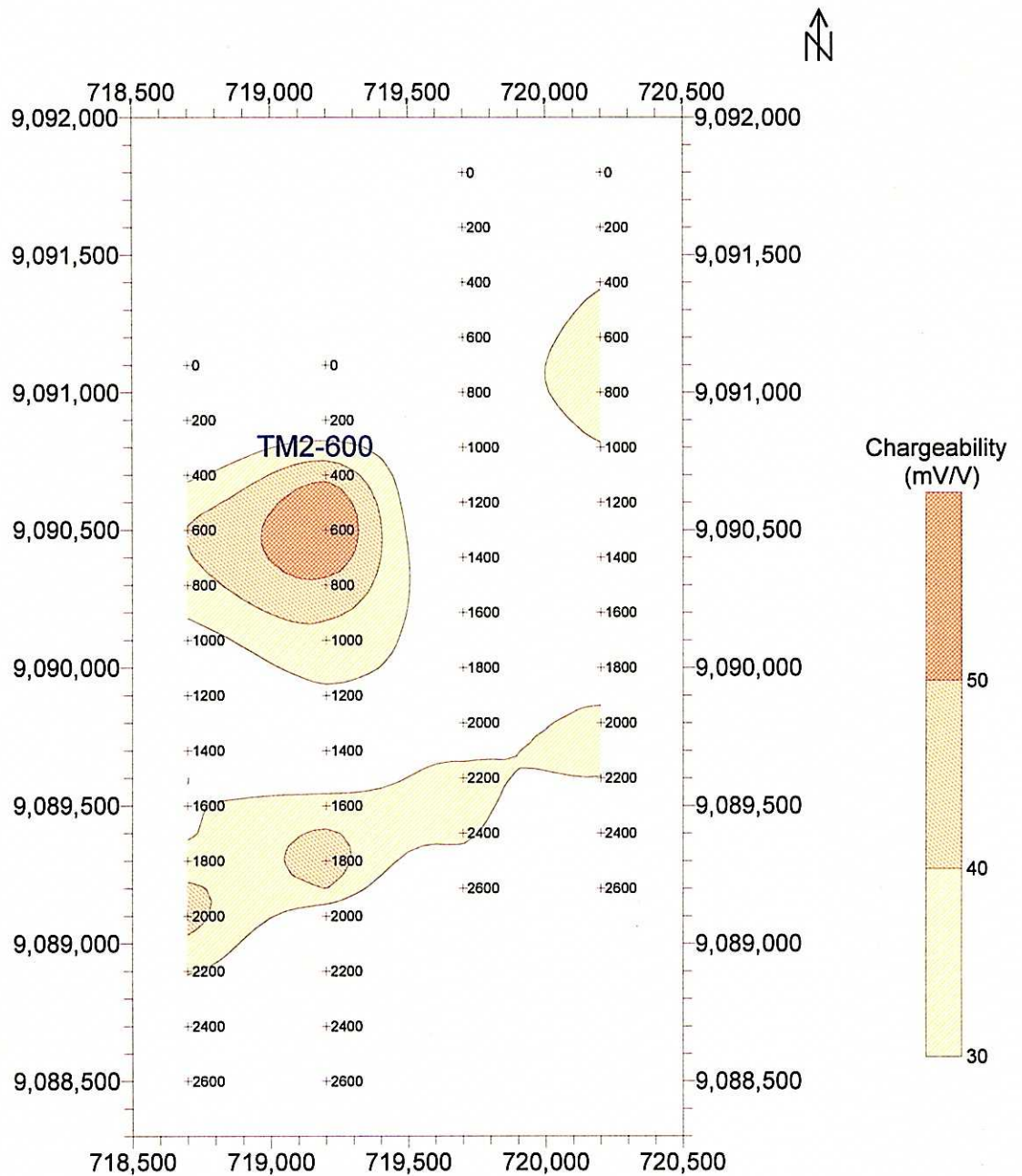


Fig.3-26 Geophysical Anomaly Map of the Tempursari District