

## CAPITOLO 13 - CHAPTER 13

# MOVIMENTI VERTICALI DEL SUOLO DESUNTI DALLE LIVELLAZIONI I.G.M. VERTICAL GROUND MOVEMENTS OBTAINED FROM I.G.M. LEVELLING SURVEYS

MARCO BONDESAN, MARCO GATTI & PAOLO RUSSO  
con il contributo di - *with a contribution by* C. ELMI

### 13.1 Le cause dei movimenti verticali del suolo

Ad integrazione della *Carta Altimetrica*, si è ritenuto opportuno presentare una documentazione semplice e generale del quadro dei movimenti verticali del suolo intervenuti nel 20° secolo, rilevati con successive determinazioni delle quote del terreno mediante livellazioni di precisione dell'I.G.M.. Si rimanda al Capitolo 14 l'integrazione di questi dati con quelli delle reti locali, e l'interpretazione di tutto il problema subsidenza dal punto di vista applicativo (impatto ambientale).

È noto che la Pianura Padana è caratterizzata da significativi movimenti verticali per effetto della neotettonica, della risposta isostatica della crosta al variare dei carichi superficiali (depositi sedimentari, acqua marina) e del costipamento dei sedimenti stessi (v. anche Cap. 14). Per questi ultimi i tassi di riduzione volumetrica sono ovviamente più elevati negli strati superiori che in quelli più profondi, ove il costipamento si è già in gran parte compiuto.

È quindi evidente che attualmente la subsidenza naturale è variabile da zona a zona: le velocità di abbassamento riconducibili a fenomeni naturali, valutate in base allo spessore dei sedimenti quaternari, sono generalmente abbastanza ridotte (meno di 0,3 mm/anno) nella fascia vicina ai rilievi appenninici e, soprattutto, a quelli alpini, nonché in corrispondenza della «dorsale ferrarese» (Groppi & Veggiani, 1984), mentre presentano valori particolarmente elevati (oltre 1 mm/anno) in alcune zone specifiche. Fra queste si possono segnalare un'area a ridosso del tratto terminale dell'Oglio, il delta del Po e il settore della Pianura Romagnola compreso fra Lugo, Ravenna e Cesenatico.

### 13.1 Causes of vertical ground movements

*For proper integration with the Map of Relief, it was believed opportune to present simple, general documentation of the framework of vertical ground movements which took place during the 20th century, recorded with repeated height determinations measured by means of spirit levelings of the I.G.M.. Chapter 14 integrates these data with those of local networks, and interprets the entire subsidence problem from the applicational viewpoint (environmental impact).*

*The Po Plain is known to be characterized by significant vertical movements due to the effects of neotectonics, the isostatic response of the crust to variations in surface loads (sedimentary deposits, sea water) and compaction of sediments (see also Chapter 14). In the latter case, the rates of volumetric reduction are obviously higher in the upper rather than lower levels, where compaction has already mainly completed.*

*It is therefore evident that, today, natural subsidence varies from area to area. The speed of movements due to natural phenomena, evaluated according to the thickness of the Quaternary sediments, is generally quite slight (less than 0.3 mm/year) in the belt near the Apennine and mainly Alpine reliefs, and near the Ferrara ridge (Groppi & Veggiani, 1984), whereas it is particularly high (more than 1 mm/year) in some specific areas. These include: an area along the terminal stretch of the river Oglio, the Po Delta, and the sector of the Romagna plain between Lugo, Ravenna and Cesenatico.*

*The Po Plain also reveals artificial subsidence, the speed of which is from 10 to 100 times faster. This type of subsidence is mainly found:*

Nella Pianura Padana sono d'altronde presenti anche fenomeni di subsidenza per cause artificiali, con velocità da 10 a 100 volte maggiori. Questo tipo di subsidenza è stata principalmente riscontrata:

- nelle aree sottoposte a bonifica per prosciugamento (per gravità o per scolo forzato), ove gli abbassamenti sono dovuti all'allontanamento di acque freatiche e all'ossidazione delle torbe;
- in zone ove è stata praticata un'eccessiva estrazione di acque (o di acque metanifere) da strati di scarsa profondità; sono invece generalmente minori gli abbassamenti dovuti all'estrazione di gas, o in genere di fluidi da strati profondi (Capitolo 14);
- in terreni ove siano state prodotte delle alterazioni al chimismo delle acque sotterranee;
- in zone sottoposte ad eccessive irrigazioni;
- localmente, in luoghi sottoposti all'apposizione artificiale di nuovi carichi.

### 13.2 Dati utilizzati

I movimenti verticali del suolo presentati nella *Carta Altimetrica* sono stati determinati elaborando i risultati di livellazioni geometriche ripetute nel tempo. Pur essendo numerosissimi i rilevamenti altimetrici eseguiti nella Pianura Padana dalla fine del 19° secolo ai giorni nostri, sono stati considerati solo quelli riguardanti le linee di livellazione della rete nazionale di alta precisione dell'I.G.M.. Il motivo principale di questa scelta risiede nel fatto che la rete dell'I.G.M. è l'unica in grado di fornire un quadro omogeneo e aggiornato della subsidenza a scala regionale.

Le prime livellazioni dell'I.G.M. sono quelle relative alla cosiddetta «vecchia rete altimetrica nazionale», misurata fra il 1878 e il 1900. Molti capisaldi di tale rete sono stati rintracciati e rimisurati a metà del secolo 20° per l'esecuzione della *Nuova Rete Altimetrica Fondamentale*, il cui sviluppo nell'Italia Settentrionale è presentato nel Foglio 3 della *Carta Altimetrica*, riquadro in basso, e il cui rilievo nella Pianura Padana orientale è stato eseguito nel periodo 1943-1956.

Il confronto fra le quote dei capisaldi comuni alle due reti ha fornito dati di estremo interesse sui movimenti del suolo avvenuti nella prima metà del 20° secolo (Salvioni, 1957). Il quadro in alto, nel Foglio 3, illustra la sintesi più aggiornata e dettagliata riguardante questo periodo, realizzata da Arca & Beretta (1985).

Livellazioni successive, eseguite nel periodo 1968-1973, oltre a confermare alcuni fenomeni di subsidenza artificiale già noti, ne hanno segnalati altri del tutto nuovi. Anche le ripetizioni eseguite dal Catasto nel periodo 1974-1977 hanno fornito informazioni di importanza fondamentale. In particolare si è avuta la conferma che i movimenti più notevoli riguardavano la Pianura Padana orientale.

- in areas subjected to reclamation by draining (gravity or pumping), where subsidence is due to removal of groundwaters and oxidation of peat;
- in areas where excessive amounts of water (or methane-bearing waters) have been pumped from shallow layers; lowering due to extraction of gas, or fluids in general, from deep layers is usually less (see Chapter 14);
- in soils where groundwaters have been chemically altered;
- in areas subjected to excessive irrigation;
- locally, in places subjected to new, artificial loads.

### 13.2 Data used

Vertical ground movements shown on the Map of Relief were determined by processing the results of spirit levellings repeated in time. Although very many altimetric surveys have been carried out in the Po Plain from the end of the 19th century to the present day, we consider here only those regarding the levelling lines of the first order levelling network of the I.G.M.. The main reason for this choice was that the I.G.M. network is the only one capable of supplying a homogeneous and updated picture of subsidence on a regional scale.

The first I.G.M. spirit levellings cover the so-called «old national levelling network», measured between 1878 and 1900. Many of its benchmarks were retraced and remeasured in the mid-20th century in order to establish the «Nuova Rete Altimetrica Fondamentale», the development of which in northern Italy is shown in the Sheet 3 of the Map of Relief, lower inset, and levellings were made in the eastern Po Plain between 1943 and 1956.

Comparisons between the heights of the benchmarks common to the two networks give data of extraordinary interest regarding ground movements in the first half of the 20th century (Salvioni, 1957). The upper inset in the Sheet 3 illustrates this period in its most updated and detailed form, made by Arca & Beretta (1985).

Later levellings, made between 1968 and 1973, not only confirmed some already-known phenomena of artificial subsidence, but also signalled others which were completely new. Repeated measurements carried out by the «Catasto» (land registry) in 1974-1977 also supplied information of great importance. In particular, the fact that the greatest movements occurred in the eastern Po Plain was confirmed.

In order to document the Map of Relief, it was therefore decided to limit attention to this eastern area, partly because the results of levelling campaigns carried out in 1980-1990 were already available for it. Levelling data from the period 1943-1956 until today were therefore processed (see table 13.1).

It should be noted here that the most recently examined levellings (1990) are those in which data were available officially at the moment the map was presented. The height values of the benchmarks, desumed directly from I.G.M. monographs, were considered to be homogeneous, i.e., referring to the same origin, and have therefore not been corrected in any way.

Per la documentazione della carta in oggetto si è quindi deciso di limitare l'attenzione a questa zona, anche in considerazione del fatto che per essa erano già utilizzabili i risultati delle campagne di livellazione del periodo 1980-1990, e si è provveduto ad elaborare i dati delle livellazioni eseguite a partire dal periodo 1943-1956 fino ai giorni nostri (v. tab. 13.1).

È bene precisare, a questo proposito, che le livellazioni più recenti prese in esame (1990) sono quelle i cui dati erano disponibili in forma ufficiale al momento della realizzazione della *Carta*. I valori delle quote dei capisaldi, desunti direttamente dalle monografie dell'I.G.M., sono stati considerati omogenei, cioè riferiti ad una stessa origine, pertanto non sono stati corretti in alcun modo.

Per il calcolo dei movimenti del terreno, sono state individuate per ogni linea di livellazione le campagne di misura che presentavano il maggior numero di capisaldi comuni. Tra di esse sono state successivamente selezionate quelle più adatte ad evidenziare il fenomeno della subsidenza e la sua tendenza evolutiva.

### 13.3 Rappresentazione grafica dei movimenti

Per la rappresentazione dei movimenti verticali del suolo avvenuti nella Pianura Padana nella prima metà del 20° secolo, è stata presentata nel Foglio 3 la già citata carta tratta da Arca e Beretta (1985), ridisegnata alla scala di 1:2.000.000 circa, che riporta il confronto fra le livellazioni dell'I.G.M. effettuate nel periodo 1897-1957 nella Pianura Padana e aree limitrofe: i movimenti sono indicati come velocità, in mm/anno, mediante isocinetiche ad equidistanza di 0,5 mm.

Per i movimenti avvenuti nella Pianura Padana orientale nella seconda metà del secolo, si è preferito effettuare una rappresentazione più analitica. La densità dei capisaldi disponibili e la distribuzione temporale delle campagne di misura non era però adatta per un'attendibile interpolazione dei movimenti e delle velocità in tutta l'area, e quindi per produrre carte delle isocinetiche per successivi periodi. Pertanto si sono dovute adottare altre soluzioni, ossia costruire dei profili di spostamento verticale per descrivere i movimenti, e una cartografia delle linee con fasce di diverso colore e larghezza per descrivere le velocità.

I profili, presentati nella sezione inferiore del Foglio 2, sono stati costruiti nel modo seguente: una linea retta orizzontale rappresenta la campagna di misura di riferimento (rilievo della Nuova Rete Altimetrica Fondamentale). Su di essa sono riportate le posizioni dei capisaldi in funzione della loro distanza dal caposaldo origine. I capisaldi riportati nei grafici sono quelli comuni alle campagne di misura confrontate. Per ognuno di essi e per ognuna della campagne di misura selezionate è riportata, in scala, la variazione di quota subita rispetto alla campagna di misura di riferimento. Congiungendo i punti così

TABELLA 13.1 - Linee di livellazione I.G.M.: date delle misurazioni  
TABLE 13.1 - I.G.M. levelling lines: dates of measurements.

Linea di livellazione	Date delle misurazioni
n. 4 Padova - Mestre	1883; 1950/53; 1967/70; 1974 (*); 1986
n. 6 Bologna - Ferrara	1886/1900; 1943/49; 1973; 1990
n. 7 Ferrara - Padova	1884; 1942/47; 1970; 1978; 1984; 1986
n. 15 Rimini - Bologna	1889/1900; 1949/53; 1970/72; 1977 (*); 1990
n. 16 Rimini - Portomaggiore	1885/1902; 1950/53; 1970; 1977 (*); 1990
n. 17 Bologna - Parma	1887/1900; 1949/52; 1972/73; 1974 (*); 1980
n. 18 Portomaggiore - Ferrara	1885/1902; 1950/53; 1970; 1986; 1990
n. 19 Portomaggiore - Mestre	1884/1909; 1925; 1950/51; 1956/57; 1958/59; 1970; 1977 (*); 1988
n. 40 Parma - Verona	1952/53; 1974 (*); 1985
n. 41 Padova - Verona	1883; 1950/53; 1974 (*); 1986

(\*) Livellazioni eseguite dal Catasto italiano.

(\*) *Measurements carried out by Italian Cadastral.*

*In order to calculate ground movements for each levelling line, the measurement campaigns which had the highest number of benchmarks in common were identified. Among these, those most suitable for highlighting subsidence and its trends were then selected.*

### 13.3 Graphic representation of vertical ground movements

*In order to represent the vertical ground movements which took place in the Po Plain in the first half of the 20th century, the already-mentioned map taken from Arca & Beretta (1985) and redrawn to a scale of approximately 1:2,000,000, showing comparisons between levelling measurements made by the I.G.M. between 1887 and 1957 in the Po Plain and surrounding areas, is presented in the Sheet 3: movements are indicated as speeds, in mm/year, by means of isokinetic lines of 0.5 mm.*

*For movements in the eastern Po Plain in the second half of the 20th century, a more analytical representation was preferred. However, the density of available benchmarks and the temporal distribution of measurements were not suitable either for reliable interpolation of movements and speeds throughout the area or for isokinetic maps for later periods. Other solutions therefore had to be adopted, i.e., construction of vertical displacement profiles to describe movements, and cartography of lines with belts of different colours and widths to illustrate speeds.*

*The profiles, shown in the lower section of the Sheet 2, were constructed in the following way: a horizontal straight*

ottenuti si è costruito il profilo che rappresenta l'abbassamento del terreno lungo la linea di livellazione. La scala verticale è di 1:40; solo nei grafici delle linee 4, 40 e 41, nelle quali i movimenti sono stati molto piccoli, la scala verticale è stata dilatata (da 1:40 si è passati a 1:4). La scala orizzontale è sempre di 1:500.000.

Le linee sono state sviluppate secondo l'orientamento da Sud a Nord, seguendo la convenzione usata dallo stesso I.G.M.. I capisaldi nodali (Rimini, Bologna, Portomaggiore, Parma, Ferrara, Padova, Verona, Mestre) non sono stati considerati in tali profili; per fornire informazioni sui loro movimenti, nelle presenti note sono riportati i diagrammi quota/tempo nelle figure 13.1 e 13.2.

Le velocità di movimento sono state presentate invece in una apposita carta alla scala 1:500.000 riportata nel Foglio 3. Di fianco alle tracce planimetriche delle linee di livellazione (linee nere) in tale carta sono disegnate delle fasce di larghezza proporzionale alla velocità dei movimenti,

line represents the measurement campaign of reference (from the «Nuova Rete Altimetrica Fondamentale»). On it were then marked the positions of the benchmarks according to their distance from the original mark. Benchmarks reported in the graphs are those common to compared measurement campaigns. For each of them, and for each of the selected campaigns, movements occurring with respect to the reference campaign are reported, in scale. Joining the resulting points thus gives profiles which represent ground lowering along the line. The vertical scale is 1:40; only for the graphs of lines 4, 40 and 41, in which movements were very slight, was the vertical scale extended from 1:40 to 1:4. The horizontal scale is always 1:500,000.

The lines were developed along a S-N orientation, following the convention used by the I.G.M.. The nodal benchmarks (Rimini, Bologna, Portomaggiore, Parma, Ferrara, Padova, Verona, Mestre) were not considered in these profiles; for information on their movements, see height/time diagrams in figures 13.1 and 13.2.

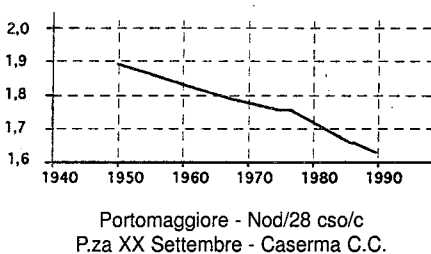
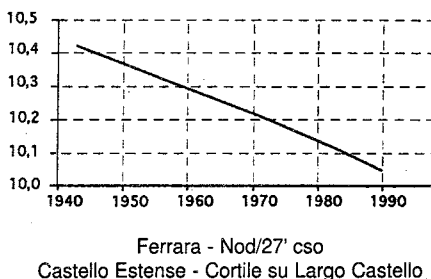
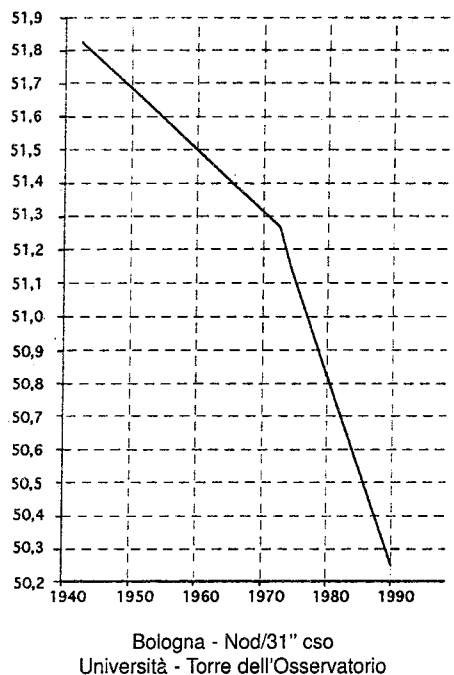
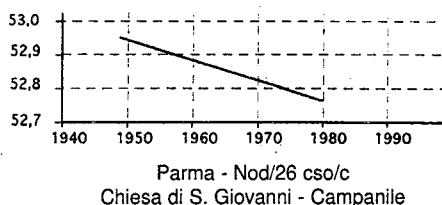
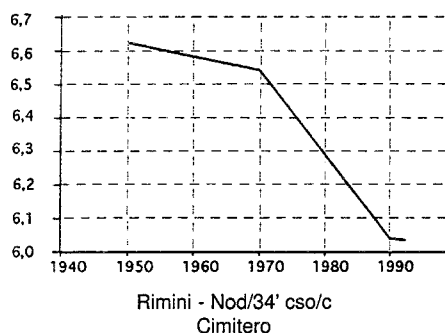
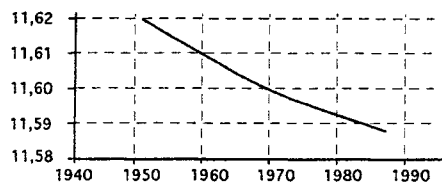


FIG. 13.1 - Grafici quota/tempo dei capisaldi nodali Rimini, Bologna, Parma, Ferrara e Portomaggiore.

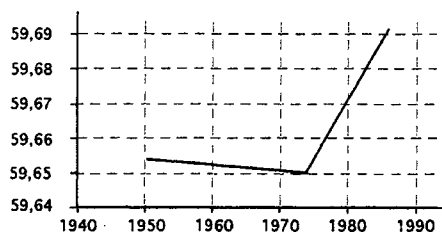
FIG. 13.1 - Height/time graphs for nodal Rimini, Bologna, Parma, Ferrara and Portomaggiore benchmarks.

FIG. 13.2 - Grafici quota/tempo dei capisaldi nodali Padova, Verona e Mestre (Marghera).

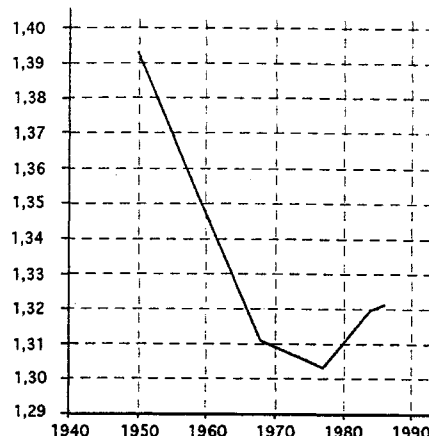
Fig. 13.2 - Height/time graphs for nodal Padova, Verona and Mestre (Marghera) benchmarks.



Padova - Nod/21' cso  
Prato della Valle - Loggia Amulea



Verona - Nod/20 cso  
Municipio



Mestre-Marghera - Nod/19 cso/c''  
Via Canal - Scuole Elementari

secondo la scala di 1:4. Le fasce disegnate sul lato destro di ciascuna linea rappresentano le velocità calcolate con i rilievi più recenti (in rosso gli abbassamenti, in verde gli innalzamenti). Le fasce, in rosa e verde, disegnate sul lato sinistro rappresentano le velocità massime riscontrate nei periodi precedenti. Per una migliore comprensione di come va letta questa carta, si veda la fig. 13.3.

Per ciascun tratto compreso tra due capisaldi consecutivi, i valori delle velocità sono stati interpolati ottenendo una fascia senza discontinuità. Per i tratti con capisaldi mancanti è stata egualmente eseguita un'interpolazione fino a coprire una lunghezza massima di tre km; in questi casi però i valori sono stati rappresentati con il solo bordo della fascia. Le fasce sono state invece interrotte per lunghezze superiori.

È opportuno precisare che mentre i profili di spostamento verticale sono stati costruiti con le quote dei capisaldi comuni a tutte le livellazioni, per le indicazioni di velocità sono stati considerati tutti i capisaldi che rendessero possibile confronti fra almeno due misurazioni successive, ossia capaci di fornire una significativa indicazione di velocità anche per un solo periodo.

Per quanto riguarda i valori dei movimenti e delle velocità, è necessario sottolineare che questi sono significativi soltanto quando risultano superiori ad opportuni limiti stabiliti in relazione agli errori di misura, all'incertezza sulla quota dei capisaldi di riferimento e alle ipotesi circa le leggi temporali di evoluzione del fenomeno. Si tratta di una valutazione piuttosto complessa, che non è stato possibile svolgere in questo lavoro perché non erano disponibili molte delle informazioni necessarie. Soltanto in alcuni casi le velocità dei movimenti sono risultate troppo limitate per poter essere considerate significative e rappresentate.

Speeds of movement are presented in a special map, scale 1:500,000, shown in the Sheet 3. Next to the planimetric traces of the levelling lines (black), this map shows belts of width proportional to speed, scale 1:4. The belts on the right of each line represent speeds calculated according to the most recent measurements (red: lowering; green: uplift). The pink and green belts on the left represent maximum speeds measured in preceding periods. For more information on how this map may best be used, see fig. 13.3.

Speeds are interpolated, giving a continuous belt, for each stretch between two consecutive benchmarks. For stretches with missing benchmarks, an interpolation was carried out all the same, up to a maximum distance of 3 km, although in these cases values are only shown at the border of the belt. Belts are interrupted for distances exceeding 3 km.

It should be noted that, while vertical displacement profiles were constructed with the heights of the benchmarks common to all levelling measurements, for indications of speed, all benchmarks were considered which allowed comparisons between at least two successive measurements, i.e., capable of supplying significant indications of speed, even in the case of a single period.

It should be emphasized that values representing movement and speed are only significant when they exceed certain limits established in relation to errors of measurement, uncertainty regarding the height of reference benchmarks, and hypotheses regarding the temporal laws affecting the evolution of the phenomena. This required quite complex assessments, which could not be undertaken here because much necessary information was not available. Only in some cases were movement speeds too small to be considered significant and thus represented.

### 13.4 Analisi dei confronti fra le livellazioni eseguite dall'I.G.M. dall'istituzione della Nuova Rete Altimetrica Fondamentale al 1990

Per quanto riguarda le livellazioni I.G.M. eseguite negli anni quaranta-cinquanta e quelle degli anni settanta (vedi anche I.G.M., 1971), gli abbassamenti più notevoli sono stati registrati lungo la linea 19, con velocità massime di quasi 10 cm/anno a NE del Delta del Po (periodo 1950-1970), e presso Adria (periodo 1956-1970); le velocità di abbassamento risultavano elevate anche presso Codigoro (intorno a 5 cm/anno). Lungo la stessa linea i valori desumibili dal confronto con l'ultima livellazione (1988) sono invece sempre inferiori a 1,2 cm/anno.

Intorno alla Laguna di Venezia (linea 19) gli abbassamenti più rilevanti riguardavano il periodo 1956-1970 e sono stati registrati a Chioggia (da 0,7 a 0,9 cm/anno), nel bordo occidentale della laguna (oltre 0,9 cm/anno) e presso Mestre (1 cm/anno); l'ultima livellazione denota qui una diminuzione generalizzata del fenomeno (v. anche linea 4).

Una analoga evoluzione è osservabile lungo la linea 7, fra il Po e l'Adige. A Sud di Rovigo, infatti, si è passati da massimi di 3,2 cm/anno per il periodo 1942-1970 a meno di 0,1 cm/anno nel periodo 1978-1986; pur essendo scarsi i dati recenti, appaiono invece in aumento gli abbassamenti già registrati nel 1970 nel tratto presso Abano (da meno di 1 a oltre 1,5 cm/anno).

Abbassamenti sensibili continuano ad interessare la linea 16 nella parte settentrionale del Ravennate, con velocità dell'ordine di 2 cm/anno; a Ravenna si è passati da 3 cm/anno nel periodo 1950-1970 a 6-7 cm/anno nel periodo 1970-1977, a 1,2 cm/anno nel periodo 1977-1990; si registrano invece diminuzioni nel tratto fra Ravenna e Cervia. Lungo la stessa linea si registrano diminuzioni anche nel Forlivese: presso Cesenatico si è passati dalle velocità di 6 cm/anno e oltre del periodo 1970-1977, a velocità di 4 cm/anno.

Gli abbassamenti risultano invece in sensibile aumento a Bologna (v. anche fig. 13.1), e soprattutto a N della città, lungo la linea 6, ove risultano ormai comparabili con quelli registrati nel Delta negli anni cinquanta e sessanta; qui le velocità sono infatti più che raddoppiate: da punte di circa 4 cm/anno per il periodo 1943-1973 si è passati a punte di 10 cm/anno per il periodo 1973-1990.

Le velocità risultano in aumento, sia pur su valori assai più ridotti, anche intorno a Ferrara, come è osservabile sia lungo la stessa linea 6, sia lungo la linea 18 (v. anche Bondesan & Talassi, 1987).

Altri abbassamenti sono messi in evidenza dalle ultime livellazioni a SE di Forlì (linea 15); qui erano stati segnalati abbassamenti anche nel periodo 1942-1972, ma la loro quantificazione era incerta (Pieri & Russo, 1978).

Sensibili aumenti delle velocità di abbassamento sono inoltre osservabili, confrontando i dati del periodo 1948-1974 con quelli del periodo 1974-1980, lungo la linea 17: i valori massimi, presso Anzola (ad Ovest di Bologna) passano da 4,5 cm/anno a 10 cm/anno; presso Modena pas-

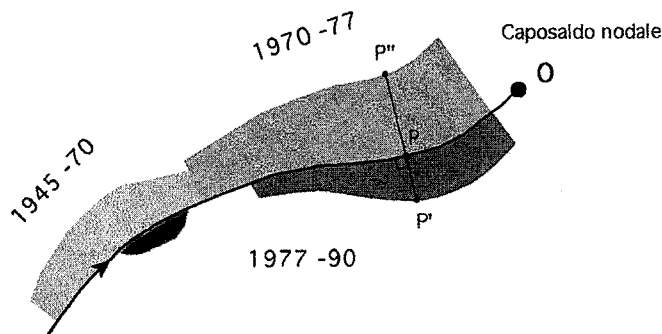


FIG. 13.3 - Esempio di come deve essere letta la carta sulle velocità dei movimenti verticali del suolo (carta alla scala 1: 500.000 riportata nel Foglio 3). La larghezza delle fasce colorate è proporzionale alla velocità di movimento. Si mostra il caso di una linea rilevata negli anni 1943, 1970, 1977 e 1990. Il segmento PP', perpendicolare in P alla linea, esprime il valore della velocità di abbassamento del suolo nel periodo più recente (1977-90). Il segmento PP'', costruito nello stesso modo, esprime il valore della velocità massima rilevata nei periodi precedenti. Ad ogni mm di lunghezza dei segmenti (ossia di larghezza della fascia) corrisponde una velocità di 4 mm/anno.

FIG. 13.3 - Example of how to read map of vertical ground movements (scale 1:500,000, Sheet 3). Width of coloured belts is proportional to speed of movement. Example: one line recorded in 1943, 1970, 1977 and 1990: segment PP', perpendicular to line in P, expresses lowering speed of ground in most recent period (1977-90). Segment PP'', constructed in same way, expresses peak speeds measured in preceding periods. Every mm of segment length (or belt width) corresponds to speed of 4 mm/year.

### 13.4 Analysis of comparisons between I.G.M. levellings, from institution of «Nuova Rete Altimetrica Fondamentale» to 1990

As regards I.G.M. levellings carried out in the 1940s/1950s and 1970s (see also I.G.M., 1971), the greatest values were recorded along line 19, with maximum speeds of almost 10 cm/year NE of the Po Delta (1950-1970) and near Adria (1956-1970). Lowering speeds were also high near Codigoro (about 5 cm/year). Instead, along the same line, the values obtained by comparison with the last levelling (1988) were always less than 1.2 cm/year.

Around the Lagoon of Venice (line 19), the most outstanding lowerings cover the period 1956-1970 and were recorded near Chioggia (from 0.7 to 0.9 cm/year), in the western border of the Lagoon (more than 0.9 cm/year) and near Mestre (1 cm/year). The last measurement made here records a generalized reduction in the phenomenon (see also line 4).

Similar evolution is apparent along line 7, between the Po and the Adige. South of Rovigo, peaks of 3.2 cm/year in the period 1942-1970 fell to less than 0.1 cm/year in 1978-1986. Although recent data are scanty, lowering recorded in 1970 in the stretch near Abano appears to be increasing (from less than 1 to more than 1.5 cm/year).

Considerable lowerings continue to be revealed by line 16, in the northern part of the Ravenna area, with speeds of the order of 2 cm/year; at Ravenna values pass from 3 cm/year in the period 1950-1970, then to 6-7 cm/year in 1970-1977, and later fall to 1.2 cm/year in 1977-1990; reductions

sano da 1,6 cm/anno a oltre 3,2 cm/anno. Per il tratto Reggio Emilia-Parma della stessa linea, solo dalle livellazioni del 1949 e del 1980 emergono dati comparabili, e segnalano una modesta tendenza all'abbassamento, con massimi di 1,2 cm/anno.

Non risulta possibile un esame del *trend* di movimento, per la seconda metà del 20° secolo per la linea 40 (Parma-Verona) e per la linea 41 (Padova-Verona). Su queste linee, in tale periodo, sono state infatti eseguite dall'I.G.M. solo due campagne di livellazioni; l'ultima campagna (eseguita nella seconda metà degli anni ottanta) ha però reso possibile almeno un confronto fra quote e i movimenti risultano in genere modesti. Sulla linea 40, a Sud del Po si ha una prevalenza di abbassamenti, mentre a Nord del Po si hanno soltanto innalzamenti. Sulla linea 41 si osserva un'alternanza di tratti in abbassamento e di tratti in innalzamento, con una prevalenza dei secondi intorno a Vicenza (tratto ai piedi dei Colli Berici) e verso Verona (tratto ai piedi dei Monti Lessini).

### 13.5 Interpretazione dei risultati

Il primo quadro (riportato nel Foglio 3) che rappresenta i movimenti registrati nella prima metà del 20° secolo, mette in evidenza un innalzamento generale della parte nord-occidentale della pianura, con valori massimi di circa 4 mm/anno, a fronte di un generale abbassamento della parte centro-orientale, con valori massimi di 7 mm/anno. Lo studio da cui è tratto (Arca & Beretta, 1985) sottolinea una buona corrispondenza fra i movimenti verticali e le strutture geologiche profonde. Tale considerazione appare fondata, dal momento che nel periodo osservato erano ancora assai ridotte le attività capaci di dar luogo a subsidenza artificiale (anche se il comportamento dell'area del delta del Po e delle zone limitrofe appare già influenzato dalle estrazioni di acque metanifere e dalle bonifiche).

Per quanto riguarda gli abbassamenti registrati fra gli anni cinquanta e gli anni settanta, si possono segnalare le seguenti interpretazioni, confermate anche da livellazioni di altri enti e su reti locali specifiche (v. Capitolo 14).

Per il delta del Po e le aree adiacenti, fino a Codigoro e a Rovigo, è stato possibile dimostrare che si tratta prevalentemente delle conseguenze dell'attività di estrazione di acque metanifere dagli strati quaternari, effettuata fra il 1938 e il 1964 (Puppo, 1957; Caputo & *alii*, 1970; Barbujani, 1973; Colombo, 1973; Mazzalai & *alii*, 1978; Borgia & *alii*, 1982); i forti abbassamenti qui registrati anche negli anni settanta sono per lo più interpretabili come le ultime conseguenze di tale attività (Elmi, 1984; Bondesan & *alii*, 1986, 1990). I valori desumibili dagli ultimi rilievi sono, per queste zone, notevolmente diminuiti, anche se risultano ancora, in genere, più elevati di quelli attribuibili alla subsidenza naturale.

Per il Ravennate e per la fascia costiera fino a Rimini gli abbassamenti sono stati causati soprattutto dalle intense estrazioni d'acqua praticate specialmente negli anni ses-

are recorded between Ravenna and Cervia. Line 16 also shows reductions in the province of Forlì, passing from 6 cm/year or more in 1970-1977 near Cesenatico, to 4 cm/year later.

Instead, lowering is becoming intensified at Bologna (see also fig. 13.1), above all North of the city, along line 6, where values are now comparable with those recorded in the Po Delta in the 1950s and 1960s. Here, indeed, speeds have more than doubled: from peaks of about 4 cm/year for 1943-1973 to ones of 10 cm/year for 1973-1990.

Speeds are also on the increase, although to a lesser extent, around Ferrara, as shown along lines 6 and 18 (see also Bondesan & Talassi, 1987).

Other movements are highlighted by recent levellings SE of Forlì (line 15); here, ground subsidence was also detected in the period 1942-1972, but its extent was uncertain (Pieri & Russo, 1978).

Serious increases in lowering speeds along line 17 may also be observed by comparing data for 1948-1974 with those for 1974-1980. Maximum values near Anzola (W of Bologna) pass from 4.5 to 10 cm/year, and from 1.6 to more than 3.2 cm/year near Modena. For the Reggio Emilia-Parma stretch of the same line, comparable data emerge from levellings made in 1949 and 1980, signalling peaks of 1.2 cm/year and a slight tendency towards lowering.

Movement trends for the second half of the 20th century were not possible for lines 40 (Parma-Verona) and 41 (Padova-Verona), because only two levelling campaigns were carried out by the I.G.M. along these lines in the period in question. However, the last campaign (second half of the 1980s) does allow comparisons between heights, and movements turn out to be quite small. Along line 40, South of the Po, lowering prevails, whereas to the North only uplifts are recorded. Line 41 reveals alternating stretches of lowering and uplift, the latter prevailing near Vicenza (foot of Berici Hills) and towards Verona (foot of Lessini Hills).

### 13.5 Interpretation of results

The first inset (Sheet 3), showing movements recorded in the first half of the 20th century, highlights the general uplift of the NW part of the plain, with peaks of about 4 mm/year, whereas general lowering occurs in the central-eastern part, with peaks of 7 mm/year. The work from which these values were taken (Arca & Beretta, 1985) emphasizes the good correspondence between vertical movements and deep geological structures. This consideration appears to be well-founded, since activities leading to artificial subsidence were greatly reduced in the period in question (although the behaviour of the Po Delta and surrounding areas was already influenced by pumping of methane-bearing waters and reclamation operations).

As regards lowering recorded between 1950 and 1970, the following interpretations may be noted, also confirmed by levellings made by other organizations and on specific local networks (see Chapter 14).

For the Po Delta and adjacent areas, as far as Codigoro and Rovigo, lowering was clearly a consequence of pumping

santa e settanta (per usi connessi all'agricoltura, all'industria e al turismo), e in minor misura dall'estrazione di idrocarburi da formazioni profonde (Carbognin & alii, 1978a; Bertoni & alii, 1987, 1995; Bondesan & alii, 1997). Successivamente questo territorio è stato servito da acque superficiali portate da nuovi canali e da acquedotti. Le ultime misurazioni dell'I.G.M. segnalano ancora sensibili abbassamenti, sempre riconducibili agli effetti di tali attività estrattive e ad altre cause legate a recenti sviluppi urbani ed industriali, ma in generale il fenomeno risulta in attenuazione.

Anche nell'*hinterland* veneziano, come presso Bologna, Ferrara, Forlì e Modena, gli abbassamenti segnalati dalle livellazioni precedenti erano risultati prevalentemente attribuibili all'eccessivo emungimento di acque sotterranee (Caputo & alii, 1972; Mozzi & alii, 1973; Carbognin & alii, 1978b; Dazzi & alii, 1994). Fatta eccezione per l'area veneziana, le ultime campagne di misura segnalano che le velocità di abbassamento sono ulteriormente aumentate in tutte queste zone, e specialmente presso Bologna, a Modena e ad Est di Forlì. Mentre nel primo caso, infatti, le estrazioni d'acqua sono state fortemente ridotte già dal 1975, negli altri casi, anche dopo gli anni settanta, si sono verificate espansioni degli insediamenti urbani e industriali, ove tale attività estrattiva è stata intensamente praticata (Regione Emilia Romagna, 1994). Sempre al prelievo di acque sotterranee, questa volta termali (v. Capitolo 14), appaiono attribuibili gli abbassamenti registrati presso Abano (Brighenti, 1991).

Le indicazioni di movimenti di sollevamento possono trovare varie spiegazioni. Ad esempio, quelli indicati dalla livellazione Rimini-Bologna del 1972 sembrano dovuti ad errori di *adjustment* causati da problemi di stabilità di uno dei capisaldi assunti per il riferimento delle quote. Non si può invece escludere, per alcuni tratti ove le livellazioni indicano movimenti sensibili, la presenza di fenomeni di neotettonica: appare, ad esempio, ragionevole dare questa spiegazione alla prevalenza di sollevamenti osservata in corrispondenza della «dorsale lessino-berico-euganea» lungo la linea di livellazione Padova-Verona, e forse anche per il tratto a Nord del Po della linea di livellazione Parma-Verona.

*of methane-bearing waters from Quaternary layers between 1938 and 1964 (Puppo, 1957; Caputo & alii, 1970; Barbuja-ni, 1973; Colombo, 1973; Mazzalai & alii, 1978; Borgia & alii, 1982). The strong lowering recorded here in the 1970s is interpreted as due to the final consequences of this activity (Elmi, 1984; Bondesan & alii, 1986, 1990). Values de-duced from the most recent levellings in these areas have fallen considerably, although they are still generally higher than those attributed to natural subsidence.*

*For the Ravenna area and the coastal belt as far as Ri-mini, lowering was mainly caused by intensive water pump-ing, mainly in the 1960s and 1970s (for agricultural, indus-trial and tourist use) and, to a lesser extent, to extraction of hydrocarbons from deep formations (Carbognin & alii, 1978a; Bertoni & alii, 1987, 1995; Bondesan & alii, 1997). This area was later served by surface waters transported by new canals and aqueducts. The latest I.G.M. measurements still show definite lowering, always due to the effects of pumping and also to other causes linked to recent urban and industrial development, but the phenomenon is gene-rally becoming attenuated.*

*Also in the Venetian hinterland, and near Bologna, Fer-rara, Forlì and Modena, lowering recorded in previous years is mainly attributed to excessive pumping of groundwaters (Caputo & alii, 1972; Mozzi & alii, 1973; Carbognin & alii, 1978b; Dazzi & alii, 1994). Except for the Venetian area, the most recent campaigns record that lowering speeds have further increased in all these areas, especially near Bologna, Modena and east of Forlì. While in the former case water pumping was greatly reduced as far back as 1975, in the other cases, after the 1970s urban and industrial expansion still increased considerably, and pumping was intense (Re-gione Emilia Romagna, 1994). The lowering recorded near Abano (Brighenti, 1991) is attributable to pumping of groundwaters, this time for thermal spa purposes (see Chapter 14).*

*Indications of uplift movements may be explained in various ways. For example, those shown by the 1972 Ri-mini-Bologna measurements appear to be due to adjustment errors caused by stability problems in one of the bench-marks assumed as a reference for height. Instead, for some stretches where levellings indicate definite movements, the occurrence of neotectonic phenomena cannot be excluded. For example, it appears reasonable to give this explanation to the prevalence of uplift observed near the «Lessini-Ber-rici-Euganei ridge» along the Padova-Verona line, and perhaps also the Parma-Verona line in the stretch North of the Po.*