

## Il sottosuolo della pianura tra Grosseto e Ribolla: ipotesi sul suo assetto strutturale

Gianfranco Censini, *geologo*

Armando Costantini, *docente Università di Siena*

Scopo del presente intervento è quello di fornire un contributo alla conoscenza stratigrafica, e soprattutto strutturale della zona Montepescali-Bottegone, in corrispondenza della quale, nel gennaio del 1999, si è verificato lo sprofondamento di terreno che ha determinato l'insorgere di una voragine di ampie dimensioni (vedi altri contributi in questo volume).

Le domande alle quali si cercherà di dare una risposta sono:

- quanto è profondo il substrato pre-quaternario e da quali formazioni è costituito?
- quale è l'assetto strutturale dell'area e la distribuzione delle faglie?
- quale ruolo possono aver giocato le faglie nella localizzazione e nel verificarsi della voragine?

Nel dare una risposta a questi quesiti ci si avvarrà dei dati strutturali forniti dalla letteratura ma ancor più di dati inediti degli scriventi ricavati da studi effettuati in aree limitrofe.

### **Piana Ribolla-Montemassi-Sticciano Montepescali**

Lo studio geologico effettuato nell'area di Ribolla (Bossio et alii, 1994; Costantini & Terzuoli, 1994; Costantini & Terzuoli, 1998) unitamente ai dati dei sondaggi realizzati per ricerche minerarie ha segnalato l'esistenza di un potente cuneo sedimentario mio-pliocenico delimitato da tre faglie (fig.11: in Costantini & Terzuoli, 1998).

I depositi mio-pliocenici, che affiorano abbondantemente tra Ribolla e Montemassi si immergono nel sottosuolo verso SE, al di sotto dei depositi alluvionali quaternari, ispessendosi.

Per gli Autori avanti citati lo spazio neces-

sario per la sedimentazione di tale cuneo è stato creato da una faglia sinsedimentaria diretta, con geometria listrica e direzione NNE-SSW, ubicata ai piedi delle pendici nord-occidentali del M. Leoni, oggi ricoperta dai depositi alluvionali del F. Bruna (Costantini & Terzuoli, 1998). A questa faglia, coincidente all'incirca con l'attuale corso rettilineo del Torrente Rigo (cui per comodità daremo il nome di "faglia del T.Rigo"), sarebbero abbinate due faglie, entrambe con direzione circa appenninica, il cui decorso nord-occidentale è rilevabile nella zona di Ribolla. Tale insieme di faglie viene pertanto ad individuare un settore ribassato, con geometria di semigraben, all'interno del quale lo spessore dei depositi miocenici, minore a NW (area di Ribolla) aumenta verso SE, in corrispondenza della faglia del T.Rigo.

L'area in oggetto è stata per lungo tempo, dal Miocene al Pliocene inferiore, sede di sedimentazione. Gli ambienti che vi si sono susseguiti spesso sono stati di tipo continentale e di acque molto basse. Il notevole spessore della successione miocenica, rilevabile sia in affioramento, sia nei sondaggi (quasi 1000 m, in Costantini & Terzuoli, 1998) si può giustificare allora solo con un consistente contributo dato dalla subsidenza cui è andata soggetta la zona.

Oltre a quest'aspetto di carattere strutturale l'area di Ribolla fornisce un altro dato di un certo interesse per poter ipotizzare, in assenza di dati diretti, la natura del substrato pre-quaternario al di sotto della voragine.

È quello relativo alla presenza, nel sottosuolo, di potenti livelli di gessi miocenici (anche 50 m di spessore), come già segnalato nel 1971 da Arisi Rota et alii, e confer-



mato da Costantini & Terzuoli (1994). Tali livelli di gessi, unitamente al resto della successione mio-pliocenica, potrebbero estendersi, nel sottosuolo, da Ribolla a Montepescali, fino ad arrivare alla faglia listrica del T. Rigo. La loro estensione verso SE è suggerita dal rinvenimento di 45 m di gessi in occasione della perforazione di un sondaggio effettuato in località Il Madonnino, presso Montepescali, (fig. 1), del quale si fornisce una colonna stratigrafica di massima come da comunicazioni orali del Dr. geol. Mauro Rocchi di Grosseto che qui particolarmente ringraziamo.

Considerando che la quota sul livello del mare di tale località è di 20 metri i gessi sarebbero stati incontrati tra quota -72 e -117. In considerazione dell'ispessimento della successione miocenica da Ribolla verso Montepescali visto prima, tali quote appaiono molto superficiali per essere relative a corpi gessosi incontrati all'interno del semigraben; sarebbero invece logiche se si riferissero a corpi gessosi incontrati su di un alto strutturale. È pertanto probabile che i gessi incontrati nel sottosuolo della località Il Madonnino si trovino a muro della faglia

che delimita a SW il semigraben. Se l'ipotesi strutturale del semigraben e della sua terminazione meridionale è giusta ne discenderebbe la possibilità per i gessi di continuare anche verso sud, fino ad arrivare nel sottosuolo della voragine.

Quindi nel sottosuolo della zona Ribolla-Montemassi-Sticciano-Montepescali sarebbe presente un semigraben mentre a partire dall'area de Il Madonnino verso sud il substrato pre-quadernario farebbe parte di un alto strutturale.

La rilevante estensione nel sottosuolo dei depositi gessosi sembra inoltre testimoniata dalla natura solfatica delle acque di molte sorgenti che contribuiscono alla ricarica delle falde superficiali con acque molto conduttive.

#### **Piana Vetulonia - Montepescali-Montepescali - Poggetti vecchi**

Nell'area in oggetto, Costantini et alii, (1982) e Bartolini et alii, (1983) ipotizzarono l'esistenza di un graben orientato N-S la cui faglia bordiere corrono, con stessa orientazione, lungo i rilievi Montepescali - Poggio Calvella e Giuncarico-Buriano.

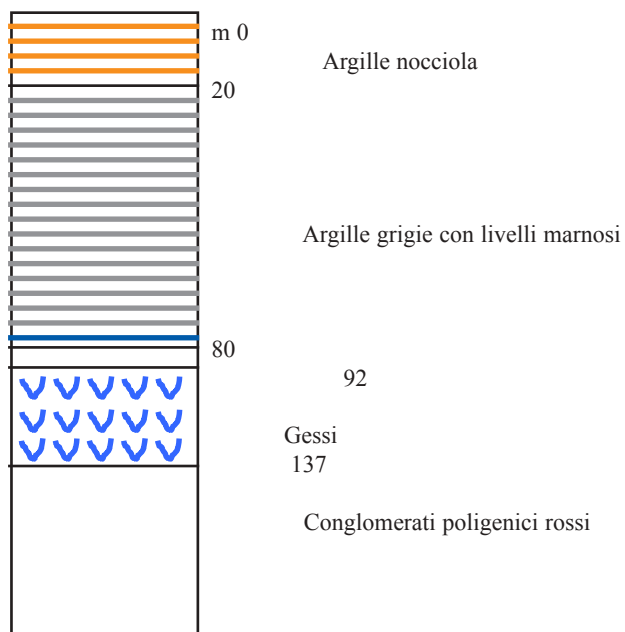


Fig. 1 - Stratigrafia del sondaggio effettuato in località Il Madonnino (Stratigrafia del Dr. Geol. Mauro Rocchi)

Quest'area è ritenuta da Bartolini et alii, (1983) in sprofondamento dagli ultimi 2 M.a., quindi successivamente al semigraben visto in precedenza.

Completa il quadro strutturale una faglia di estensione regionale, segnalata da Costantini et alii, (1982) e da loro denominata "Linea Grosseto-Pienza". Tale struttura, ad andamento anti appenninico, delimiterebbe verso sud le propaggini meridionali del Poggio Calvella e dei rilievi di Buriano, passando non lontano dalla località Bottegone nella quale si è verificata la voragine.

In questa zona, alcune decine di metri al di fuori della voragine stessa, è stato effettuato un sondaggio a carotaggio continuo spinto fino alla profondità di 170m. Qui di seguito viene riportata una sintetica descrizione della stratigrafia:

- argille limose fino a m 2,80
- limi, sabbie e ghiaie fino a m 60,60
- argille limose fino a m 84,10
- limi e ghiaie fino a m 87
- argille limose fino a m 112
- ghiaie e sabbie fino a m 120,30
- argille limose fino a m 130,50
- brecce e microbrecce fino a m 134,05
- calcareni fino a m 138,50
- argille limose fino a m 149
- brecce alternate ad argille fino a m 160
- ghiaie fino a m 165
- argille limose fino a m 170

Un primo esame macroscopico, molto sommaro, delle carote prelevate in occasione del sondaggio del Bottegone ha escluso la presenza di macrofossili ed ha suggerito che i 170 metri di sedimenti attraversati possano essere quaternari e di ambiente fluviale o fluvio-lacustre (1).

Del resto le indagini biostratigrafiche condotte nel sottosuolo della pianura di Grosseto hanno escluso la presenza di sedimenti neautoctoni del Miocene o del Pliocene, almeno per i primi 90-170 metri (Bravetti e Pranzini, 1987).

Certo è che il substrato pre-neogenico, rappresentato nelle vicine zone dalle formazioni del Verrucano, di Tocchi, del Calcarea cavernoso, del Macigno e delle Argille e

calcari, almeno in corrispondenza del sondaggio, si trova a profondità superiore ai 170m. Un tale spessore di depositi continentali suggerisce che questa zona della pianura ha subito una marcata subsidenza.

In questo settore di pianura il quadro strutturale si è arricchito di nuovi dati (fig. 2) grazie ad estese indagini geoelettriche condotte nella zona dalla Società Georisorse Italia di Siena, in collaborazione con lo Studio di Geologia del Dr. Mauro Rocchi di Grosseto, e per conto di vari Committenti.

In tutti i casi delle esplorazioni geofisiche l'obiettivo era quello di stabilire la posizione e la profondità di condizioni favorevoli alla ricerca di acqua nel sottosuolo: in alcuni l'obiettivo era rappresentato dal substrato costituito dalla Formazione di Calcarea Cavernoso e, pertanto, gli studi geoelettrici sono stati condotti con metodi idonei ad indicare la profondità di tale potenziale acquifero; in altri casi le indagini erano rivolte alla esplorazione del contesto alluvionale, quindi alla localizzazione e delimitazione di paleoalvei e conoidi di detriti provenienti dalle zone collinari.

Sia nella condizione operativa di ricerca di acque nel substrato, sia per la ricerca di acque nei complessi alluvionali, le indagini geofisiche hanno fornito informazioni stratigrafiche e strutturali che hanno contribuito a delineare, talvolta con maggior precisione, la rispettiva posizione di linee di discontinuità già ipotizzate sulla base della geologia di superficie.

Nella zona ad est e nord-est della voragine, nell'area de I Casoni del Terzo, (fig. 3) le indagini eseguite negli anni '80, hanno permesso di stabilire sia la profondità delle formazioni carbonatiche, che nella zona prossima alla Via aurelia supera i 200 m dal p.c., sia le possibili principali linee tettoniche dell'area, che si allineano secondo le direttrici appenniniche (prossime a N-S) ed anti-appenniniche. Il prolungamento di uno di questi allineamenti, con direzione antiappenninica, potrebbe raggiungere la zona della voragine.

1 - Sono in corso analisi micropaleontologiche allo scopo di confermare o meno le indicazioni ottenute dall'esame macroscopico.



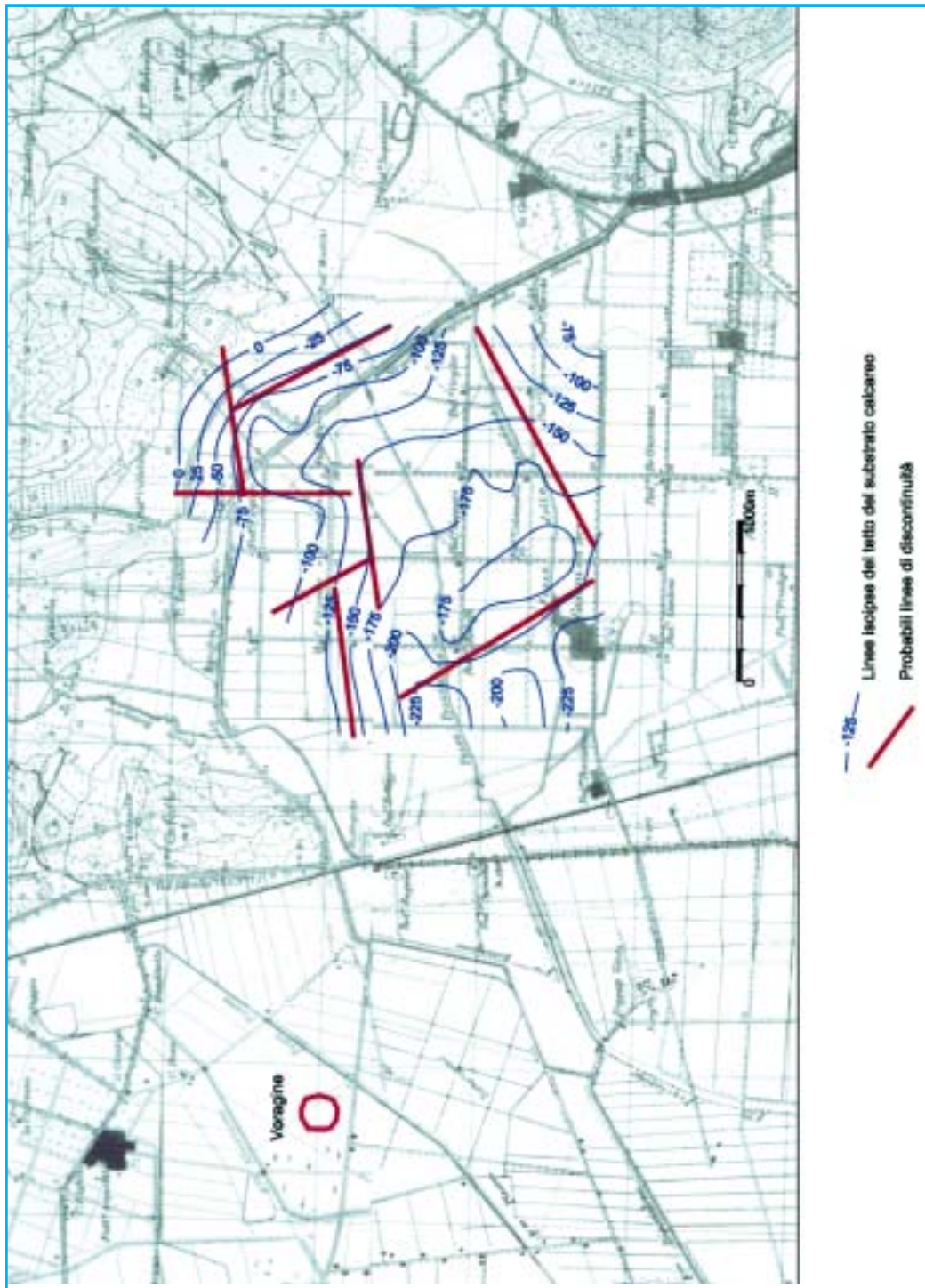


Fig. 3 - Indagini eseguite nell'area de I Casoni del Terzo.



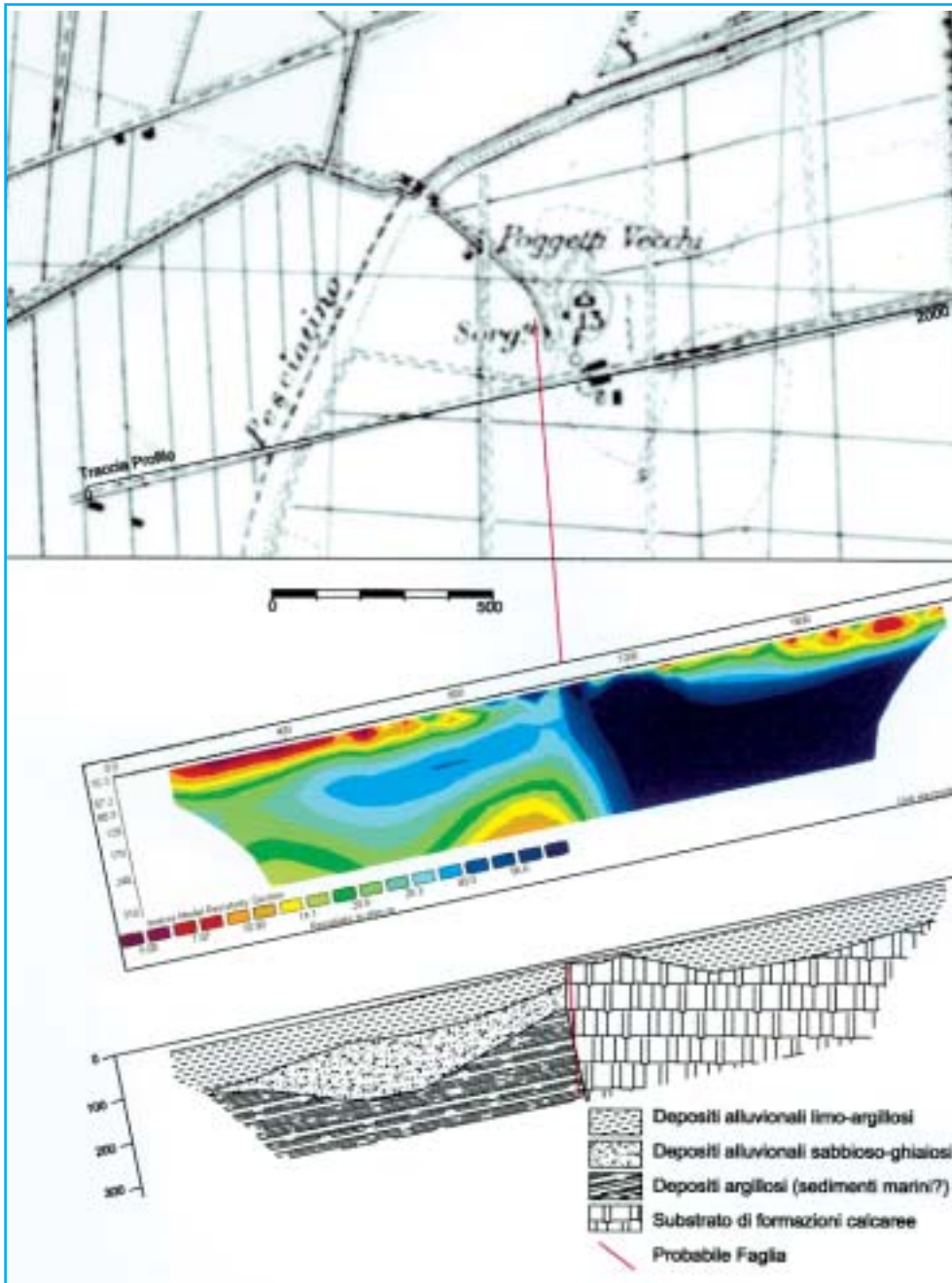


Fig. 4 - Indagini eseguite in prossimità della Fattoria dei Poggetti Vecchi con la tecnica del profilo Polo-Dipolo.

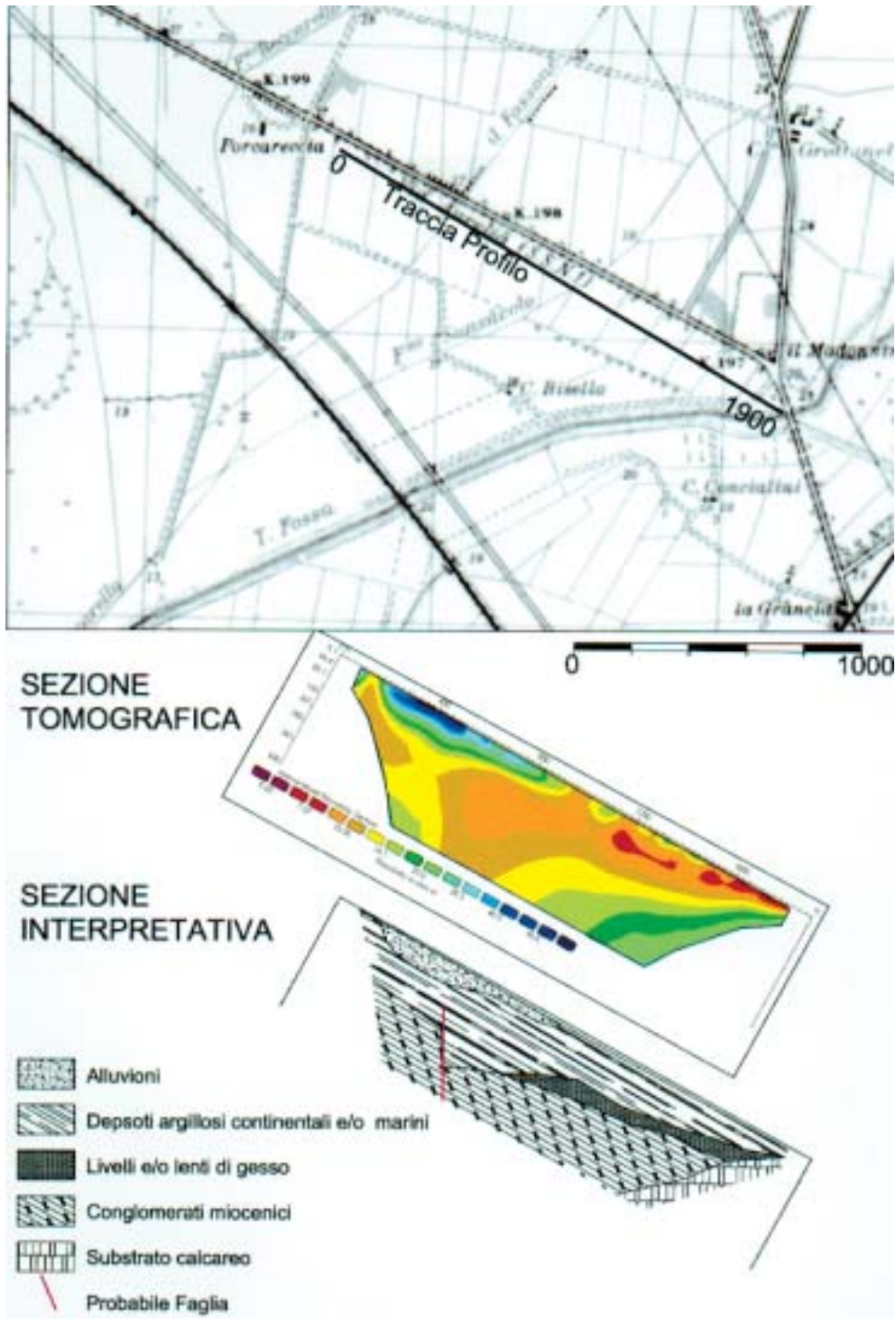


Fig. 5 - Indagini eseguite nella zona "il Madonnino".



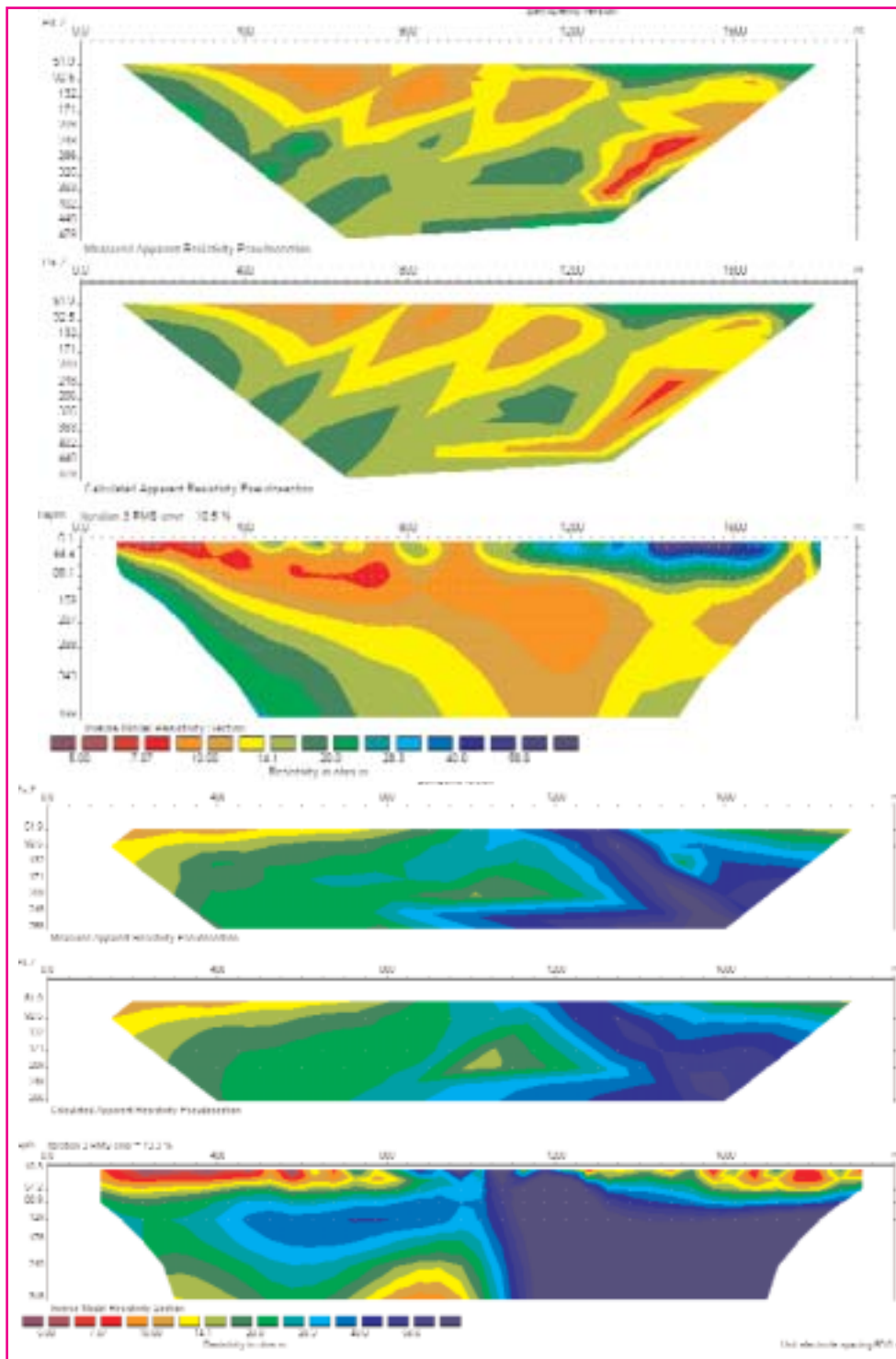
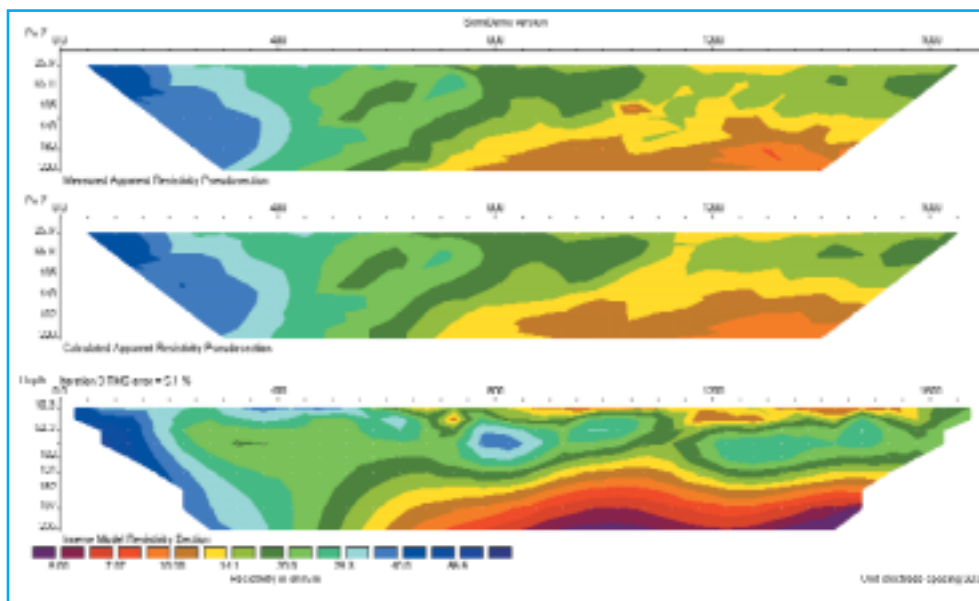


Fig. 6 - Principali eventi geologici che hanno interessato l'area compresa tra Ribolla e Grosseto ed il litorale grossetano



Nella zona a sud, in prossimità della Fattoria dei Poggetti Vecchi (*fig. 4*) una indagine eseguita con la tecnica del profilo Polo-Dipolo con dipoli di grandi dimensioni, (100 m ed esplorazione fino ad oltre 400 m dal p.c.) ha permesso di stabilire che il piccolo affioramento di calcari presente nella zona della sorgente termale rappresenta la punta di un esteso massiccio calcareo che verso Est si mantiene a profondità di circa 200-250 m, mentre ad Ovest scompare in tutta la profondità esplorata. Questa importante discontinuità litologica sembra, ragionevolmente, correlabile con una linea di faglia, probabilmente con direzione N-S, anche in questo caso il prolungamento di questa linea potrebbe intercettare la zona della voragine.

Ad Ovest dell'area di interesse, lungo il bordo occidentale della pianura, un'altra indagine geofisica finalizzata a ricerche idriche ha permesso di stabilire la posizione di una delle faglie che delimitano la pianura stessa; anche in questo caso la direzione probabile è N-S, e la posizione risulta interna alla pianura alluvionale, ulteriore conferma che il complesso dei sedimenti recenti maschera una struttura del substrato molto complessa ed interessata da numerose linee

di frattura che possono aver condizionato la circolazione idrica ed i fenomeni di dissoluzione delle litologie più solubili.

La già citata presenza di lenti di gesso, anche di grandi dimensioni, nel complesso dei depositi miocenici, nella zona del pozzo del Madonnino, di circa 45 m di gesso microcristallino, è stata individuata e confermata anche da varie indagini geofisiche con differenti metodologie (*fig. 5*); dai risultati ottenuti sembra di poter sostenere che la bancata di gesso si appoggia lateralmente (verso Est) al complesso del Cavernoso delimitato da importanti faglie già segnalate nelle cartografie geologiche della zona, mentre verso Ovest sembra sfumare verso un contesto prevalentemente argilloso.

Da queste informazioni ottenute da alcune indagini geofisiche, eseguite in zone limitrofe all'area della voragine, sembra di poter sostenere che alcune importanti linee di discontinuità, presenti in maniera molto diffusa nel substrato della pianura alluvionale, tendono a dirigersi verso la voragine stessa e, inoltre, in prossimità di una importante faglia che potrebbe svilupparsi anche fino alla suddetta zona, è stata riscontrata una potente bancata di gesso.



### Conclusioni e suggerimenti:

In considerazione di quanto esposto precedentemente non si può non rilevare che la località dove si è verificata la voragine si trova prossima ad un'area intensamente fagliata; tutto ciò sembra suggerire che le faglie possono aver giocato un ruolo nella localizzazione della voragine stessa.

Diventa pertanto estremamente importante accertare, con indagini geofisiche, l'assetto strutturale della zona prossima alla voragine. Si dovrà accertare se le strutture individuate nella zona de Il Madonnino e dei Poggetti Vecchi, avanti riportate, proseguono e con quale orientazione verso l'area della voragine e quale è il ruolo rivestito dalla "Linea Grosseto-Pienza". In questo contesto strutturale si suggerisce anche di verificare la profondità del substrato pre-quadernario nel sottosuolo della voragine e l'esistenza di livelli di gessi miocenici.

In *figura 6* vengono riportati, in modo estremamente schematico, i principali even-

ti geologici che hanno interessato l'area compresa tra Ribolla e Grosseto ed il litorale grossetano.

Volendoci soffermare solo sugli ultimi in ordine di tempo vale la pena sottolineare, come già fatto da Mazzanti (1983), che nel periodo etrusco-romano l'apporto terrigeno dell'Ombrone riusciva a controbilanciare la risalita del livello del mare, determinando l'avanzamento del suo delta. Nello scorso secolo invece, ed in particolare negli ultimi 50 anni, la linea di costa si è spostata verso terra. Una tale situazione, come è noto, si può giustificare o con la riduzione dell'apporto solido da parte dei corsi d'acqua e conseguente erosione dei litorali o con una generale subsidenza della pianura, forse accentuata in questi ultimi anni, da un eccessivo emungimento di acqua dalla falda. Potrebbe pertanto essere molto utile verificare se sono in atto fenomeni di subsidenza ed in tal caso, il ruolo giocato dall'emungimento di acqua.

### Tasso di sollevamento relativo del l.m. negli ultimi 2000 anni circa 0,5mm/anno

1900 - 2000  
(in particolare dagli anni 50)

La linea di costa si è spostata verso terra  
- compattazione dei sedimenti conseguente all'elevato emungimento della falda ?  
- riduzione dell'apporto terrigeno?

Lavori di bonifica

Periodo etrusco-romano

L'apporto terrigeno dell'Ombrone controbilancia la risalita del livello del mare e determina l'avanzamento del suo delta verso mare.

2.200 - 2000 anni fa

L. m. circa 1 m più basso di quello odierno  
(spiagge fossili con scorie etrusche)

Trasgressione versiliana

L. m. in sollevamento

18.000 anni fa (glaciale Würm)  
EROSIONE

L. m. circa 100 m più basso di oggi

700.000 anni fa verso il recente

Area tra Ribolla e Montepescali in sprofondamento nei graben N-S



2-0,7 Ma (Pleistocene inferiore)

Area tra Ribolla e Montepescali in sprofondamento nei graben N-S



4 - 2 Ma (Pliocene medio-superiore)

Area tra Ribolla e Montepescali in sollevamento



5 - 4 Ma (Pliocene inferiore)

Area tra Ribolla e Montepescali in probabile sprofondamento



6 - 5 Ma (Messiniano superiore)

Episodio fluviale del Conglomerato di Montebamboli



8 - 6 Ma (Messiniano inferiore)

Area tra Ribolla e Montepescali sede di un bacino prima lacustre poi salmastro, infine marino.



### Riferimenti bibliografici

- ARISI ROTA F., BRONDI A., DESSAU G., FRANZINI M., Monte Amiata S.m.p.A., stabilimento minerario del SIELE S.p.A., Stea B. & Vighi L. (1971) - *I Giacimenti minerali*. In: La Toscana meridionale rend. S.I.M.P., 27(fasc. sp.): 357-544.
- BARTOLINI C., BERNINI M., CARLONI G.C., COSTANTINI A., FEDERICI P.R., GASPERI G., LAZZAROTTO A., MARCHETTI G., MAZZANTI R., PAPANI G., PRANZINI G., RAU A., SANDRELLI F., VERCESI P.L., CASTALDINI D., FRANCAVILLA F. (1983) - *Carta neotettonica dell'Appennino Settentrionale*. Note illustrative. Boll. Soc. Geol. It., 191(1982), 523-549.
- BOSSIO A., COSTANTINI A., SALVATORINI G., TERZUOLI A. (1995) - *The Neogene of the Ribolla Area*. Mem. Soc. Geol. It., 48 (1994), 409-414.
- BRAVETTI L. & PRANZINI G. (1987) - *L'evoluzione quaternaria della pianura di Grosseto (Toscana): prima interpretazione dei dati del sottosuolo*. Geogr. Fis. Din. Quat., 10 (1987), 85-92.
- CENSINI G., COSTANTINI P., Profilo Geoelettrico Dipolare continuo. *Descrizione della Metodologia ed esempi di applicazioni a problemi di ingegneria civile, ricerche idriche e minerarie*. Atti del Congresso internazionale di Geingegneria "Suolo Sottosuolo", Torino, Settembre 1989, Vol.1°, pagg.201-208.
- COSTANTINI A., LAZZAROTTO A., SANDRELLI F. (1982) - *Conoscenze geologico-strutturali*. In: Il Graben di Siena - Studi geologici, idrogeologici e geofisici finalizzati alla ricerca di fluidi caldi nel sottosuolo. CNR, Progetto Finalizzato Energetica, Sottoprogetto Energia Geotermica, RF-9, 11-33.
- COSTANTINI A., TERZUOLI A. (1998) - *Stratigrafia sequenziale del Neogene di Ribolla* (Grosseto): un'ipotesi di lavoro. Boll. Soc. Geol. It., 117, 297-311.
- COSTANTINI A., TERZUOLI A. (1994) - *Carta geologica dell'Area di Ribolla* (alla scala 1:10.000) Centrooffset, Siena
- GIANNINI E., LAZZAROTTO A., SIGNORINI R.(1971) "*Carta Geologica della Toscana Meridionale*" in: "La Toscana Meridionale" Rendiconti della S.I.M.P. vol. 27, fascicolo speciale.
- KUNETZ, GEZA, "*Principles of Direct Current Resistivity Prospecting*", Geoprospection Monographs, series 1-No.1, ed. H. Braekken, Trans. From The French By R. Van Nostrand. Berlin, Gebrüder Borntraeger, 1996
- LOKE M. H. , "*Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method*", note del programma Res2dinv. ver. 3.41, 1999
- LOKE M. H., BARKER R.D., "*Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*", Geophysical Prospecting, n. 44, 1996, pp. 131-152
- LOKE M.H. , BARKER R.D. , "*Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion*", Geophysical Prospecting, n.44, 1966
- MAZZANTI R. (1983) "*Il punto sul Quaternario della fascia costiera e dell'arcipelago di Toscana*." Boll. Soc. Geol. It. 102, 419-556.

## Risultati preliminari delle indagini sullo sprofondamento in loc. Bottegone (Grosseto)

Gianluca Berti, Paolo Canuti, Nicola Casagli, Giovanni Pranzini

*Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze*

Luigi Micheli, *Regione Toscana - Dipartimento Ambiente e Politiche Territoriali*

### Riassunto

La presente nota ha come oggetto l'analisi dei risultati preliminari inerenti allo sprofondamento avvenuto il 29 gennaio 1999 in loc. Bottegone (prov. di Grosseto). L'indagine, oltre per chiarire le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche dell'area del dissesto, è stata svolta per capire quali possano essere state le cause che hanno determinato la voragine. Sulla base delle conoscenze acquisite si ipotizzano i possibili meccanismi che hanno generato lo sprofondamento e si indicano le indagini da eseguire in un futuro prossimo per una migliore comprensione dell'evento.

**Termini chiave:** *sprofondamento, Calcare Cavernoso, faglie, circolazione idrica.*

### 1. Lo sprofondamento

Il giorno 29 gennaio 1999 nella tenuta agricola Fattoria Acquisti in località Bottegone (prov. di Grosseto) si è sviluppata una voragine di forma ellittica allungata in direzione N-S, con diametro maggiore di circa 180 m, diametro minore di circa 150 m e volume di circa 140000 m<sup>3</sup> (Fig. 1).

Lo sprofondamento massimo, valutabile intorno ai 13 m, ha interessato un settore decentrato verso il margine settentrionale dell'ellisse; in seguito all'evento è stata

anche rilevata una variazione evidente nella portata e nella torbidità della sorgente termale in loc. Poggetti Vecchi e nella portata della sorgente Le Caldanelle.

Si sono inoltre formati alcuni vulcanetti di fango nelle vicinanze della sorgente Poggetti Vecchi.

Il fenomeno si è propagato in un'area agricola ma in vicinanza di due edifici di privata abitazione e della sede della S.P. n° 108.

In base ai dati del monitoraggio topografico messo inizialmente in opera dal Comune di

Fig. 1. La voragine vista da una ricognizione aerea. In alto a destra è visibile la Strada Provinciale 108



La ricerca è stata finanziata con fondi CNR del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, linea 2 "Previsione e prevenzione di eventi franosi a grande rischio", responsabile nazionale Prof. Paolo Canuti.

Grosseto si è notato un rapido esaurimento dell'approfondimento in poche ore successive all'innesco, mentre l'ampliamento laterale, connesso con fenomeni di assestamento e franamento di pareti, è continuato per alcuni giorni e si è propagato verso nord ed est, cioè in direzione opposta agli edifici. Cessati i movimenti di stabilizzazione del terreno, la voragine si è andata progressivamente colmando d'acqua fino a formare, nel giro di un anno circa, un laghetto pressoché circolare.

## 2. Geologia

La voragine si è formata in un'area pianeggiante, nell'alta pianura grossetana, costituita prevalentemente da argille e limi argillosi. La causa principale del fenomeno, così come di altri dello stesso tipo in Italia (Canuti *et al.*, 2000, in questo volume), è da ricercarsi nella presenza, al di sotto dei sedimenti alluvionali della pianura, di calcari soggetti a

processi di dissoluzione di tipo carsico. In effetti nei colli adiacenti affiorano litotipi appartenenti al Calcare Cavernoso (Fig. 2), la formazione geologica della Toscana nella quale sono più diffusi i fenomeni carsici; tuttavia non è da escludere l'esistenza nel substrato di litologie appartenenti alla formazione del Calcare Massiccio, presenti in limitati affioramenti insieme al Cavernoso in loc. Poggetti Vecchi.

Un sondaggio geognostico, effettuato dalla Geotecno S.r.l. per conto della Regione Toscana in corrispondenza dello sprofondamento, ha raggiunto i 170 m di profondità incontrando solo sedimenti di copertura, quindi non ha permesso di verificare direttamente la natura litologica del substrato e la sua profondità.

La voragine si è aperta in corrispondenza o in prossimità di una faglia, a direzione approssimativamente N-S, già cartografata come presunta da Gelmini (1969).

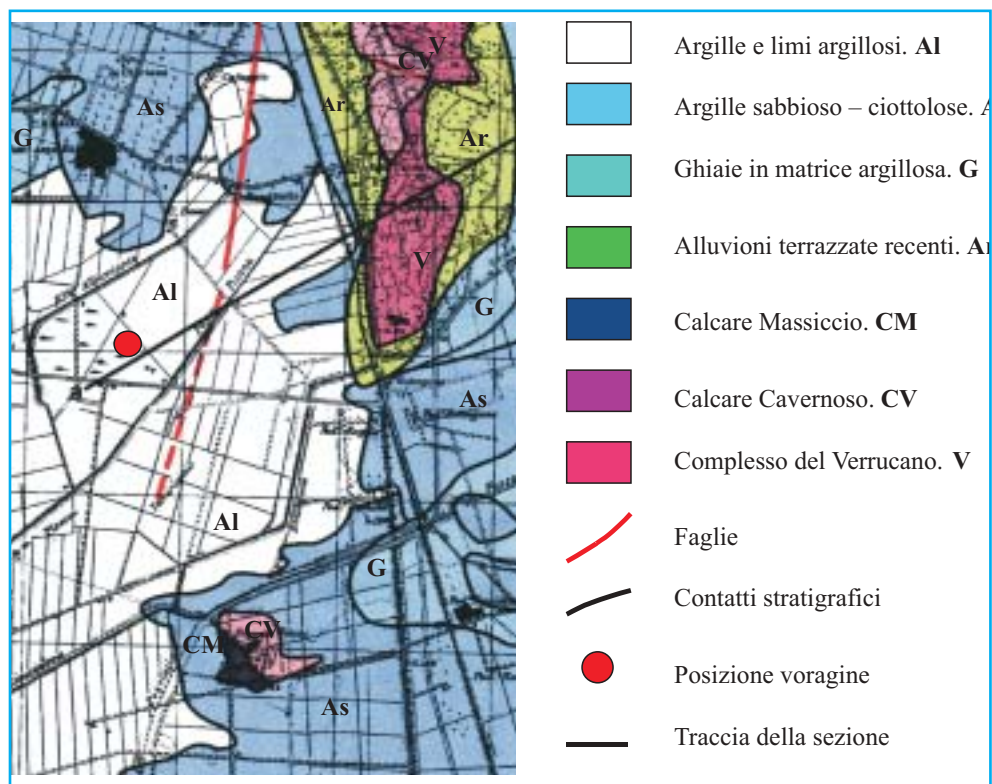


Fig. 2. Carta geologica dell'area intorno alla voragine.

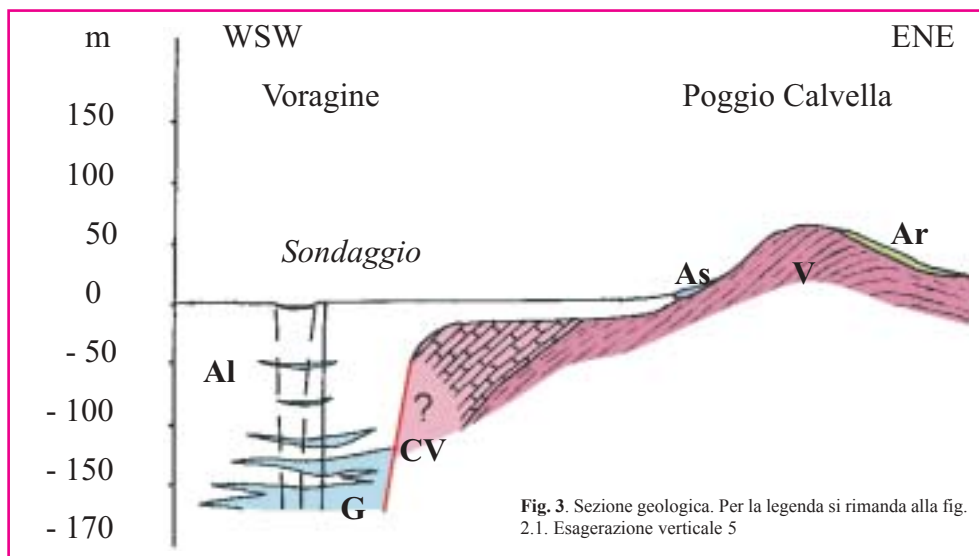


Fig. 3. Sezione geologica. Per la legenda si rimanda alla fig. 2.1. Esagerazione verticale 5

La faglia ha un'importanza regionale, come risulta dal fatto che i rilievi che delimitano ad est la pianura sono costituiti dai termini inferiori della Serie Toscana (Verrucano e Calcere Cavernoso in prevalenza) mentre in quelli ad ovest affiorano il Macigno ed alcune Unità Liguri.

Nel sottosuolo della pianura l'esistenza della dislocazione tettonica è giustificata dai dati stratigrafici inerenti ai pozzi della zona: infatti, il substrato di Calcere Cavernoso viene raggiunto nelle perforazioni ad est della presunta faglia (a -5 m dal p.c. nel pozzo P5 in loc. Caldanelle; a -25 m da p.c. nel pozzo P6 Fattoria Acquisti), mentre non è mai raggiunto nelle perforazioni ad ovest, che arrivano ad una profondità massima di 110 metri per i pozzi per acqua, addirittura 170 metri, come detto, per il sondaggio eseguito nei pressi della voragine.

Sulla base di queste indicazioni viene proposta una sezione geologica attraverso la zona del dissesto (Fig. 3).

La scarsità dei dati relativi al substrato non consente di definire l'esatta posizione della faglia né il suo rigetto.

L'attività recente della faglia è testimoniata da:

1. le manifestazioni idrotermali (vedi oltre)
2. il fatto che la linea di faglia divide la pianura di Grosseto in due aree a diversa morfologia: ad est affiorano sedimenti

fluviali anche grossolani, in terrazzi appena pronunciati; ad ovest solo sedimenti fini o depositi di colmata. In sostanza l'area ad est appare stabile o in rialzo relativo, mentre quella ad ovest è in abbassamento.

Lo sprofondamento di Bottegone, sviluppatosi in prossimità di questa "master fault" che delimita il bacino distensivo a nord di Grosseto, è collegato anche ad un'altra frattura ad andamento all'incirca E-W, la cui esistenza è confermata dalle stratigrafie dei pozzi della zona.

Infatti, considerando un'ipotetica sezione N-S dalla località Caldanelle ai Poggetti Vecchi, si nota che la profondità del substrato va dai 5 m in loc. Caldanelle, a 24 m più a Sud, fino ad oltre 70 m in loc. Le Rogaie (come dimostra la stratigrafia del pozzo P17) per poi affiorare ai Poggetti Vecchi in un piccolo rilievo di Calcere Massiccio emergente sulla pianura. Tuttavia non è possibile dire a priori se le differenze di quota siano dovute a faglie ipotetiche o a fenomeni di dissoluzione, che comunque agiscono maggiormente lungo lineazioni tettoniche preesistenti.

Mediante un campagna geofisica si potrebbero ottenere maggiori informazioni sulla morfologia in profondità del Cavernoso (presenza di doline e cavità carsiche) e sulla

effettiva esistenza delle lineazioni tettoniche ipotizzate; inoltre si chiarirebbero probabilmente con certezza i rapporti tra le strutture presenti e la voragine.

La morfologia del substrato e le faglie presunte sono rappresentate nel blocco dia-

gramma di *Figura 4*, elaborato utilizzando i dati stratigrafici noti. La profondità del Calcere Cavernoso nell'area del dissesto (circa 250 m) è stata stimata considerando i possibili meccanismi di collasso, la forma e le dimensioni della voragine.

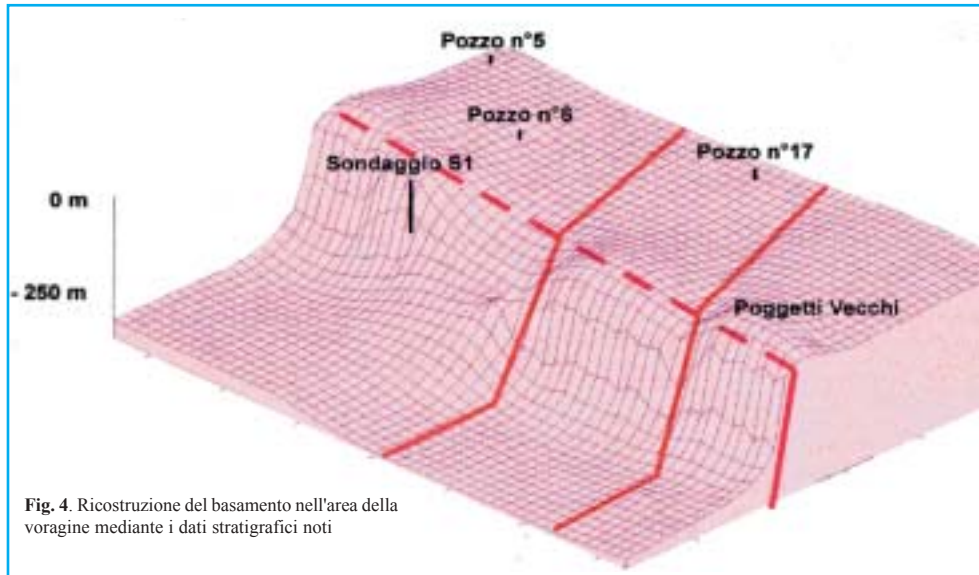


Fig. 4. Ricostruzione del basamento nell'area della voragine mediante i dati stratigrafici noti

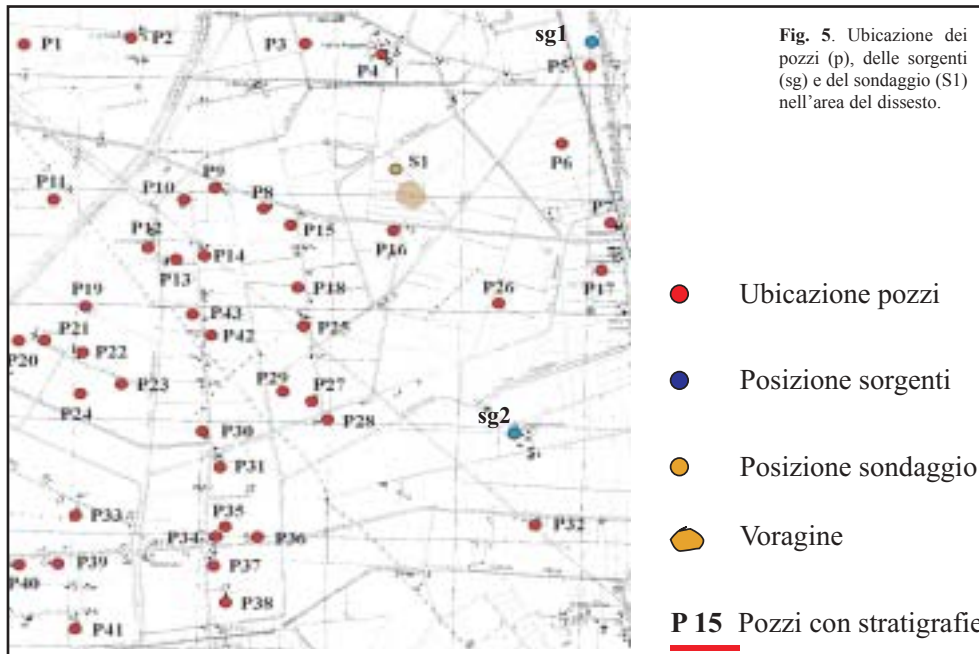


Fig. 5. Ubicazione dei pozzi (p), delle sorgenti (sg) e del sondaggio (S1) nell'area del dissesto.

- Ubicazione pozzi
  - Posizione sorgenti
  - Posizione sondaggio
  - Voragine
- P 15 Pozzi con stratigrafie



### 3. Stratigrafia idrogeologica

La ricostruzione della morfologia del substrato (limitatamente all'area ad est della faglia ipotizzata) e della sedimentologia

della pianura nei dintorni della voragine è stata possibile grazie alle colonne litostratigrafiche di alcuni pozzi, la cui ubicazione è rappresentata in (fig. 5).

Fig. 6 - Colonne stratigrafiche e correlazioni per i pozzi P4, P5, P6, P17

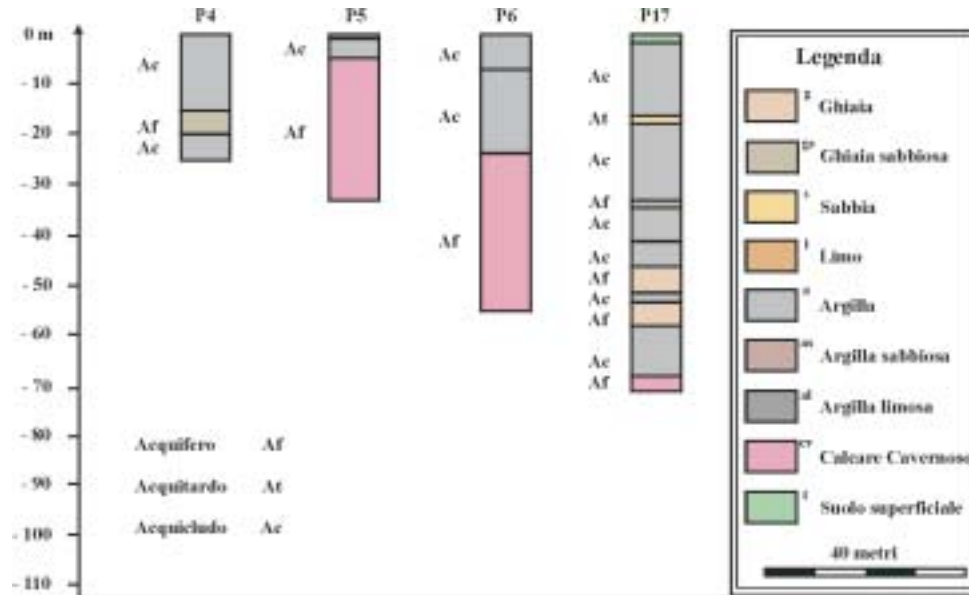


Fig. 7 - Colonne stratigrafiche e correlazioni per i pozzi P11, P19, P20, P24

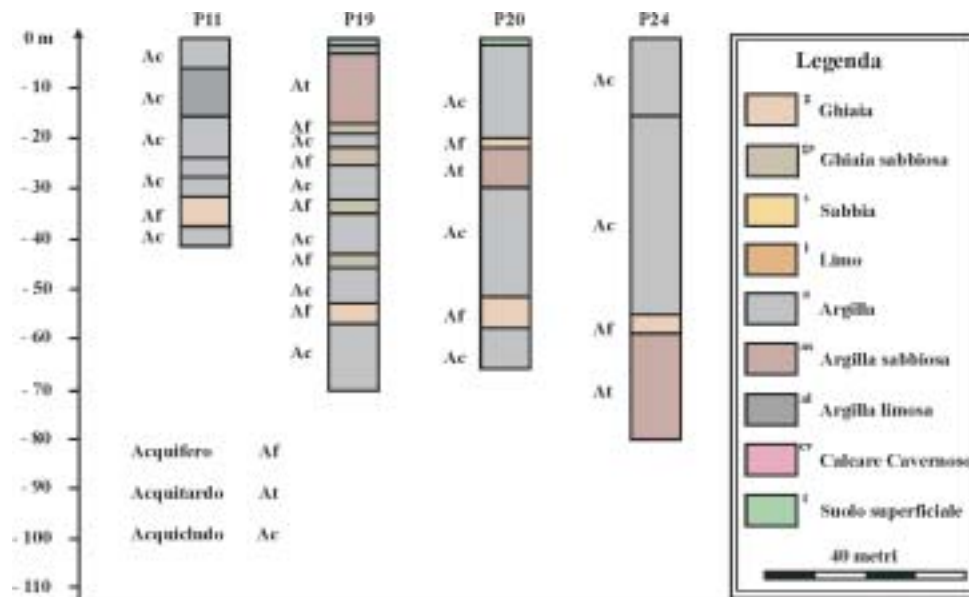
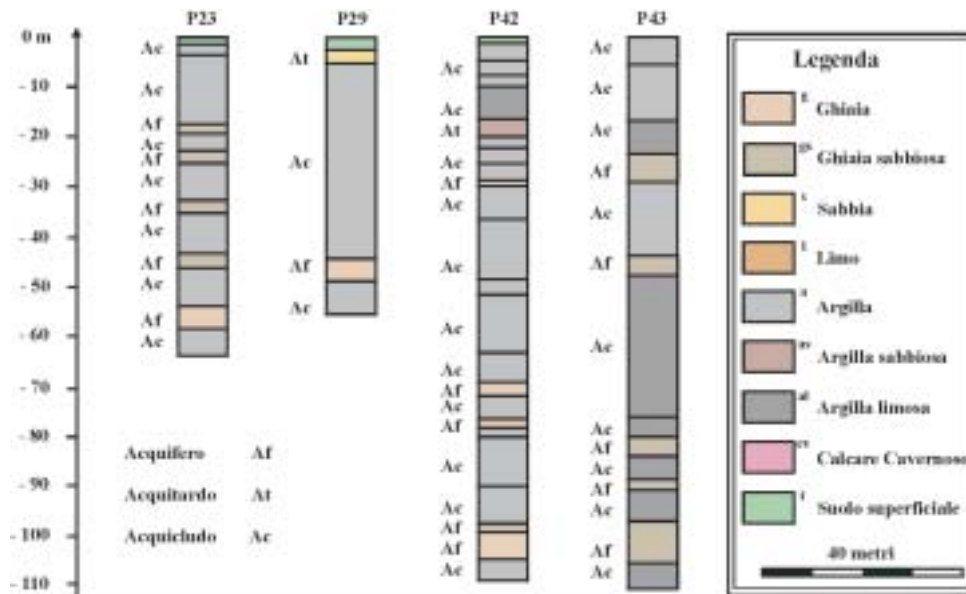


Fig. 8 - Colonne stratigrafiche e correlazioni per i pozzi P23, P29, P42, P43



Nei depositi alluvionali di questa zona è evidente una netta dominanza dei litotipi fini, limi ed argille, rispetto a depositi più grossolani costituiti da ghiaie e sabbie. Osservando le figure 6, 7, e 8, si possono fare alcune considerazioni:

- Nei pozzi P4, P5, P6, P17, cioè nell'area adiacente ai rilievi, l'unico livello acquifero è costituito dal Calcare Cavernoso. Nel pozzo P17 sono evidenti livelli ghiaiosi tra i -50 e -60 metri circa di profondità.

- In tutti i pozzi più occidentali il substrato non viene mai raggiunto; gli orizzonti acquiferi con una certa continuità si trovano in prevalenza nei seguenti intervalli di profondità: tra -50 e -60 metri, intorno a -100 metri. Gli altri livelli acquiferi rappresentano con buona probabilità delle lenti senza una eccessiva continuità laterale.

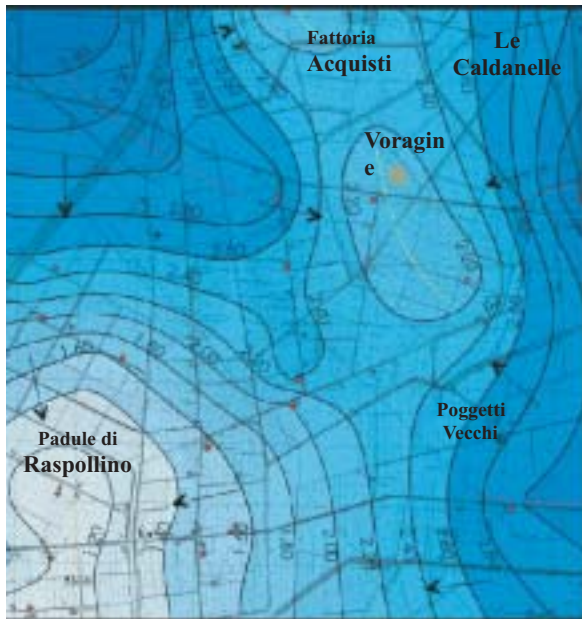
- Dai dati del sondaggio viene confermata l'esistenza di un livello acquifero tra -50 e -60 metri, e presenza di acquiferi tra -110 e -120 m, tra -160 e -165 m.

In sintesi, nel sottosuolo della nostra area s'incontrano litotipi diversi: limi ed argille dominanti, localmente con torba, limi sabbiosi, ghiaie sabbiose, ghiaie in matrice argillosa e ghiaie pulite.

L'ambiente di sedimentazione risulta vario: si passa da ambiente marino prossimale (sabbie con gusci di lamellibranchi) ad ambiente palustre (argille con torba) ed a condizioni di deposizione fluviale (alternanza di ghiaie, sabbie e limi). È interessante osservare che, mentre nella parte occidentale della pianura grossetana le stratigrafie dei pozzi riportano litotipi di colore grigio, in quelle dei pozzi scavati nell'area a nord di Grosseto ricorrono i litotipi di colore rossastro o bruno (Bravetti & Pranzini, 1987). In pratica abbiamo sedimenti più vecchi e pedogenizzati ad est della linea di faglia citata nel paragrafo precedente, e sedimenti freschi e recenti, anche per un notevole spessore, ad ovest della linea stessa.

In sostanza, anche i dati di sottosuolo confermano l'attività recente della faglia ipotizzata in corrispondenza della voragine.

Secondo Bravetti & Pranzini (op. cit.) l'evoluzione della pianura può essere così riassunta: nell'ultimo glaciale il livello marino si era abbassato di circa 100 metri determinando l'erosione dei sedimenti del Pleistocene sup., mentre l'Ombrone e il Bruna avevano scavato due valli lasciando in rilievo la parte mediana.



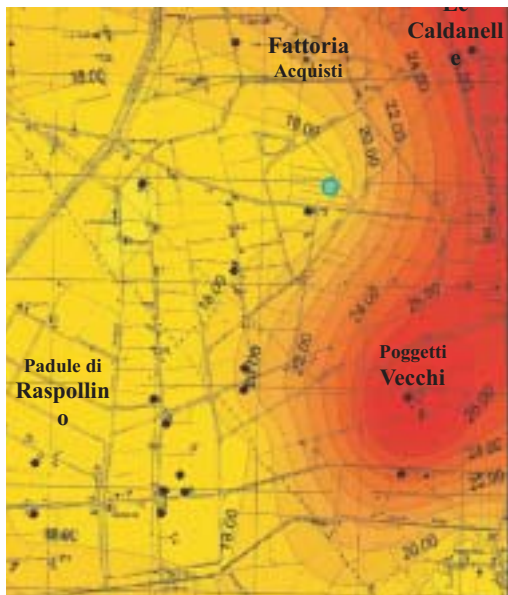
**Fig. 9** - Rappresentazione della superficie della falda libera (in m s.l.m.)

- Posizione voragine
- Ubicazione pozzi
- ↗ Linee di flusso

**2.00** Misure (in m s.l.m.)

Le valli sono state trasformate in insenature marine a seguito della trasgressione versiliana, e sono state soggette ad un'alternanza di episodi palustri e lagunari, fino alla completa bonifica per colmata avvenuta in tempi storici (Repetti, 1835). I principali livelli acquiferi del sottosuolo sono rappresentati dalle ghiaie deposte

durante l'ultima fase glaciale: queste ghiaie sono a piccola profondità allo sbocco dei due corsi d'acqua nella pianura (in particolare in prossimità di Grosseto, dove l'Ombrone si presenta nella pianura) e si approfondiscono fino ad 80-100 m procedendo verso la linea di costa.



**Fig. 10**.- Andamento delle isoterme nei dintorni del dissesto.

- Posizione voragine
- Ubicazione pozzi
- Curve isoterme

**18.00** Temperatura (in °C)

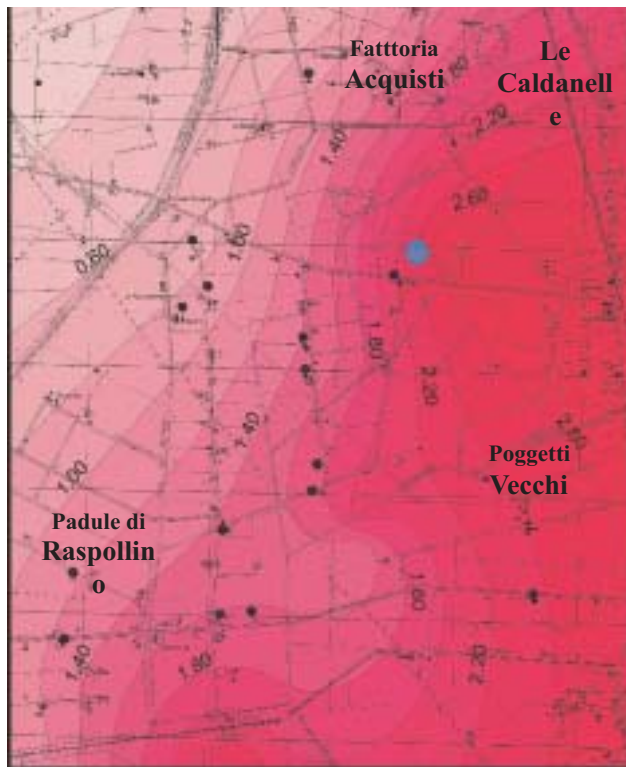


Fig. 11. Andamento delle isoconduttive nei dintorni della voragine

- Posizione voragine
  - Ubicazione pozzi
  - Curve isoconduttive
- 2.20** Conducibilità (in mS/cm)

#### 4. Idrogeologia

Nell'area settentrionale della pianura di Grosseto, tra il corso del fiume Bruna e la località Bottegone, è stata eseguita una indagine idrogeologica finalizzata alla ricostruzione della superficie piezometrica nei dintorni della voragine.

Sono state effettuate misure di livello piezometrico statico in 33 pozzi la cui ubicazione è rappresentata in (Fig. 5).

I livelli di ghiaie e sabbie costituiscono falde in pressione e si può ritenere che la superficie piezometrica risultante da misure di livello statico fornisca con buona approssimazione le direzioni di flusso delle falde. È stata ricostruita la morfologia della falda al termine della stagione estiva, quindi nel momento più critico dell'anno idrologico, quando alla minore alimentazione delle falde si è sommato il loro massimo sfruttamento ai fini irrigui; le misure di livello statico sono infatti state effettuate nei giorni 28-29-30 settembre 1999.

Osservando la carta (Fig. 9), si nota la pre-

senza di due zone depresse, una a SW dello sprofondamento, in località Paduline di Raspollino, l'altra sviluppata dalla Fattoria Acquisti sino ai Poggetti Vecchi. La prima, situata nella zona centrale più depressa della pianura, corrisponde all'asse di drenaggio della falda ed è probabilmente conseguenza anche degli emungimenti effettuati durante il periodo estivo per l'irrigazione.

La seconda, localizzata in corrispondenza dell'area in cui si è verificato il dissesto, potrebbe anche indicare una perdita di acqua nel substrato.

Sulla base delle ricostruzioni piezometriche realizzate in anni diversi si conclude che le oscillazioni della falda superficiale in prossimità della voragine variano da un massimo di 4 m s.l.m. (circa -1 m dal piano di campagna) ad un minimo di 2 m s.l.m. (circa -3 m dal p.c.). Tale variazione risulta molto minore rispetto alla profondità dello sprofondamento che è di circa 13 metri e del tutto trascurabile rispetto alla profondità del substrato; si può perciò affermare che eventuali pompaggi



effettuati non possono avere determinato fenomeni di filtrazione tali da avere innescato il meccanismo di formazione del dissesto. Sono inoltre state compiute misure di temperatura e di conducibilità delle acque dei pozzi, le quali hanno permesso di ricostruire l'andamento delle isoterme (Fig. 10) e delle isoconduttive (Fig. 11) dell'area in esame.

La distribuzione della temperatura e della conducibilità elettrica dell'acqua di falda indica un anomalo flusso termico ed una maggiore salinità delle acque in corrispondenza dei pozzi lungo la fascia da Le Caldanelle ai Poggetti Vecchi; questo deve essere messo in relazione con la risalita di acqua dal basamento calcareo, risalita concentrata in prossimità della faglia più volte citata. L'elevata salinità delle acque in alcune aree interne della pianura di Grosseto era già stata rilevata in lavori precedenti (Bencini & Pranzini, 1992; Pranzini e Bencini, 1996).

### 5. Sorgenti ed Idrogeochimica

Su tutto il territorio vi sono sorgenti di varia natura e portata, localizzate principalmente alla base dei rilievi che delimitano la pianura o in prossimità dei contatti tra i terreni permeabili (conoidei alluvionali, detriti di falda) e i sedimenti prevalentemente argillosi della pianura.

Oltre a queste manifestazioni sorgive, correlate ad una circolazione superficiale, esistono varie sorgenti di acque termali ubicate lungo i sistemi di faglie che separano l'area pianeggiante dai rilievi carbonatici, quali la "Sorgente delle Terme Vecchie", la sorgente del "Vescovo" e la fonte "Calvello" in loc. Roselle, la sorgente "Poggetti Vecchi" e quella delle "Caldanelle" lungo la faglia che separa i rilievi di Montepescali dalla pianura adiacente. I primi impianti termali a Roselle risalgono all'epoca romana. Popolarmente si tramanda l'antica nomenclatura di Terme di Diocleziano ed effettivamente i resti dell'impianto termale, costituiti da un padiglione circolare ornato da due leoni di marmo, sono di origine romana.

Nel Medioevo queste terme furono abbandonate, per poi riscoprirne l'uso per fini curativi intorno al 1400; ma solo nel 1822 il

granduca Ferdinando III di Lorena intraprese le grandi opere di rifacimento delle strutture, nonostante la zona fosse affetta dalla malaria che ostacolava lo sviluppo demografico ed economico della Maremma. Addirittura nel XVI e XVII secolo le acque termali furono considerate più che fonte di salute fonte di malattia, perché contribuivano all'impaludamento della pianura. Attualmente le acque che fuoriescono abbondantemente vengono disperse.

Associati a queste acque, troviamo a Roselle i più estesi affioramenti di travertino della pianura. Spostandoci a N-W, nella zona della voragine, ci sono altre sorgenti. In loc. Poggetti Vecchi le acque termali di varie piccole sorgenti di faglia sono raccolte in una vasca nel Calcere Massiccio; la portata era di 45-50 l/s prima dello sviluppo dello sprofondamento (comunicazione personale del proprietario, che aveva fatto eseguire varie prove in periodi diversi) ed è aumentata a 70 l/s in seguito all'evento.

Sono qui di seguito riportati (tabella 1) i valori del chimismo delle acque ripresi da Bencini et al. (1977).

Sulla base di queste analisi le acque sono classificabili come solfato alcalino - terrose (Fig. 12); le acque termali risultano inoltre sottosature in anidrite e sovrasature in gesso e calcite (tabella 2), come testimoniano gli estesi affioramenti di travertino nelle adiacenze delle varie sorgenti.

La temperatura del serbatoio profondo da cui provengono le acque termali è stata stimata utilizzando il geotermometro a quarzo; per le sorgenti Poggetti Vecchi e Caldanelle la temperatura dell'acquifero profondo si attesta su 75° C circa, mentre per le sorgenti della zona di Roselle intorno a 85° C (tabella 2).

Questi valori sono comunque in difetto poiché l'acqua, durante la risalita, raffreddandosi e miscelandosi con acque superficiali più fredde, potrebbe aver precipitato parte della silice. Il termalismo di queste sorgenti è interpretabile con il gradiente geotermico presente in tutta la zona della Toscana centro - meridionale, corrispondente a circa 57° C/km (Del Chicca et al., 1988; Missale & Duchi, 1988).

**Tabella 1-** Parametri fisici e chimici delle sorgenti termali. Tutti i costituenti sono espressi in meq/l, eccetto H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub> che sono espressi in millimoli per litro (da Bencini et al., 1977).

	<b>poggetti vecchi</b>	<b>caldanelle (f.acquisti)</b>	<b>acqua dei bagni</b>
<b>T (°C)</b>	37	37	36
<b>pH</b>	6,65	6,80	6,95
<b>Cond. (µS/cm)</b>	2190	1830	2340
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	27	22	30
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	9,6	7,8	10
<b>Na<sup>+</sup></b>	1,6	1,2	1,3
<b>K<sup>+</sup></b>	0,088	0,085	0,096
<b>Li<sup>+</sup></b>	0,0049	0,0001	0,0062
<b>Rb<sup>+</sup></b>	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
<b>Sr<sup>2+</sup></b>	0,23	0,20	0,25
<b>Σ Cationi</b>	38,52	31,28	41,65
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	4,0	4,1	4,7
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	30	28	34
<b>Cl<sup>-</sup></b>	1,3	0,85	1,1
<b>F<sup>-</sup></b>	0,070	0,056	0,064
<b>Br<sup>-</sup></b>	0,0022	< 0,0001	0,0013
<b>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></b>	0,0060	0,0030	0,015
<b>Σ Anioni</b>	35,38	33,01	39,88
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,41	0,37	0,51

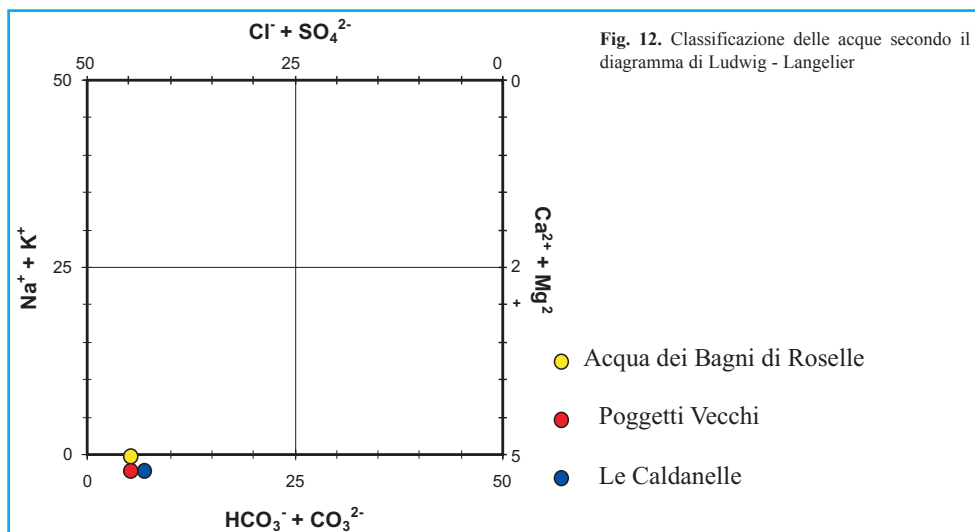
**Tabella 2.-** Saturazione delle acque delle sorgenti termali e temperatura del serbatoio.

	<b>POGGETTI VECCHI</b>	<b>CALDANELLE</b>	<b>ACQUA DEI BAGNI</b>
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<i>Sovrasatura</i> $(\log_{10} K_a = -8,2 > \log_{10} K_{ps} = -10,2)$ a T = 37° C	<i>Sovrasatura</i> $(\log_{10} K_a = -8,1 > \log_{10} K_{ps} = -10,2)$ a T = 37° C	<i>Sovrasatura</i> $(\log_{10} K_a = -7,8 > \log_{10} K_{ps} = -10,2)$ a T = 36° C
<b>CaSO<sub>4</sub></b>	<i>Sottosatura</i>	<i>Sottosatura</i>	<i>Sottosatura</i>
<b>CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O</b>	<i>Sovrasatura</i> $(\log_{10} K_a = -4,0 > \log_{10} K_{ps} = -4,6)$ a T = 37° C	<i>Sovrasatura</i> $(\log_{10} K_a = -4,4 > \log_{10} K_{ps} = -4,6)$ a T = 37° C	<i>Sovrasatura</i> $(\log_{10} K_a = -3,9 > \log_{10} K_{ps} = -4,6)$ a T = 36° C
<b>T (°C)*</b>	77°	74°	85°

\* T del serbatoio profondo data da:  $T (°C) = [ 1533 / 5,768 - \log_{10}(\text{SiO}_2) ] - 273,15$  con SiO<sub>2</sub> (quarzo) espresso in ppm.

Sulla base di questo gradiente e dei valori di temperatura alle sorgenti, la profondità di circolazione delle acque si attesta ad 1 km circa. Le misure di temperatura ed i parametri chimici ottenuti per le diverse sorgenti suggeriscono che le acque sorgive hanno lo

stesso serbatoio, localizzato nelle formazioni carsificabili del basamento (Calcere Cavernoso e Anidriti di Burano, Calcere a Rhaetavicula, Calcere Massiccio). A causa del raffreddamento e della diminuzione di pressione della CO<sub>2</sub> avviene la pre-



cipitazione dei carbonati e di parte della silice nei condotti, mentre esternamente si assiste allo sviluppo di concrezioni gessoso-travertinose più o meno estese nei dintorni delle sorgenti. Non è da escludere una diluizione di questi fluidi con acque fredde superficiali. La bassa concentrazione di ioni sodio e cloruro indica l'assenza di acque connate nei depositi pliocenici e di livelli evaporitici. Acque di questo tipo si trovano invece nella parte della pianura fra Grosseto ed il mare (Bencini & Pranzini, 1992).

### 6. Circolazione idrica

L'alimentazione degli acquiferi della pianura avviene secondo più vie:

1. infiltrazione diretta delle acque di pioggia;
2. percolazione dai subalvei dei corsi d'acqua;
3. infiltrazione dai conoidi alluvionali e dai detriti di falda;
4. infiltrazione dalle aree collinari circostanti.

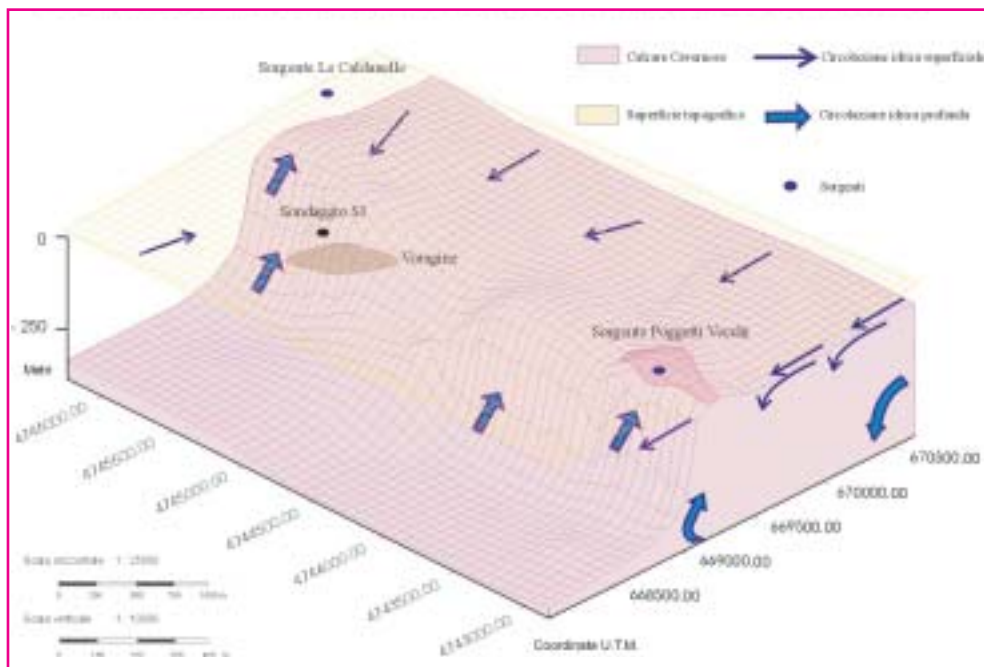
Per quanto riguarda il punto 4, anche se non possono essere trascurati i rilievi occidentali in cui affiora un Macigno prevalentemente arenaceo (e quindi abbastanza permeabile), certamente la maggiore alimentazione viene dalle aree collinari orientali dove affiorano litologie più permeabili, in particolare modo il Calcare Cavernoso ed il Calcare Massiccio.

In questi affioramenti, oltre alle fratture ed alle aree di cava attive ed inattive (queste ultime ormai la maggioranza), rappresentano vie d'infiltrazione preferenziale le doline e le altre forme di dissoluzione; alcune doline sono evidenti dalle foto aeree, in particolare nel Calcare Massiccio di Poggio Moscona, mentre è presumibile l'esistenza di ingressi carsici soprattutto nel Calcare Cavernoso. Questi ingressi, non distinguibili mediante fotointerpretazione date le loro modeste dimensioni, sono spesso mascherati dalla vegetazione.

Nell'area in esame sono state censite dalla Federazione Speleologica Toscana otto cavità carsiche accessibili, tre nel Poggio di Moscona e cinque nei dintorni di Poggio Spiaggione (Cavanna, 1998).

La circolazione idrica profonda della zona si può così schematizzare (Fig. 13): le acque meteoriche s'infiltrano negli affioramenti collinari più permeabili alimentando l'acquifero principale costituito dal Calcare Cavernoso. Grazie alla elevata permeabilità le acque si spingono in profondità e si riscaldano per l'elevato gradiente geotermico tipico di quest'area e di tutta la Toscana meridionale. Chiaramente la circolazione profonda è anche alimentata da acque infiltratesi in aree più lontane.

Fig. 13 Rappresentazione della circolazione idrica profonda e superficiale.



La risalita, che avviene lungo le fratture, è favorita dalla spinta idraulica delle acque infiltratesi più a monte, dall'alta temperatura e dalla  $CO_2$  disciolta che abbassano la densità. Accanto a questo circuito profondo è presente anche una circolazione superficiale che si sviluppa nei livelli ghiaiosi e sabbiosi dei conoidi e nella coltre di sedimenti che ricopre con spessore variabile il substrato. Nella zona del dissesto l'alimentazione degli acquiferi intercalati ai potenti spessori di argille limose avviene sia per circolazione superficiale, sia per l'abbondante risalita dal substrato di acque termali.

Per accertare eventuali variazioni del flusso idrico alle sorgenti come conseguenza dello sprofondamento del 29 gennaio 1999, sono state effettuate prove di portata in data 29/9/1999 e 16/11/1999.

In effetti, alla sorgente di Poggetti Vecchi, la cui portata era di 40-50 l/s prima dell'evento, si è calcolato un valore di circa 70 l/sec a settembre, saliti a circa 77 l/sec a novembre. Questo secondo valore risulta più ele-

vato perché la misura è stata compiuta in un periodo particolarmente piovoso.

Oltre all'aumento di portata della sorgente, subito dopo il verificarsi della voragine si è assistito ad un aumento della torbidità dell'acqua e allo sviluppo di "vulcanetti" di fango in vicinanza dell'abitato (Fig. 14).

Più a N, ma sempre lungo lo stesso sistema di fratture, si trova la sorgente "Le Caldanelle", un tempo costituita da un invaso di raccolta delle acque per bagni termali, ora ridotta ad uno stagno circondato da un fitto canneto che ne impedisce l'accesso; la portata prima del dissesto era stimata in circa 10 l/s (Rosetti & Valentini, 1987).

Nelle ore successive allo sprofondamento è stato osservato un intorbidamento ed un evidente aumento di portata nelle acque che si è manifestato con un innalzamento del livello di circa 13 cm nella vasca di raccolta.

Purtroppo non è possibile determinare la portata attuale sia per l'inaccessibilità del luogo, sia per lo scarso flusso e l'assenza di una sezione regolare lungo il fosso scolmatore.



Fig. 14 - Vulcanetti di fango formatisi dopo il dissesto nelle vicinanze della sorgente Poggetti Vecchi

### 7. Ipotesi sui meccanismi

Uno sprofondamento del terreno come quello verificatosi in loc. Bottegone il 29/1/1999, in ordine al contesto geologico ed idrogeologico suddetto, può essere ricondotto ad una delle seguenti cause:

- rottura di equilibrio dei terreni in seguito al crollo di una cavità formatasi nei sedimenti di copertura per asportazione di materiale ad opera delle acque circolanti;
- crollo in profondità di una porzione della roccia carsificata che costituisce il piano di appoggio dei terreni alluvionali e successivo richiamo dei materiali fino alla superficie.

Sulla base dell'osservazione di fenomeni analoghi, il meccanismo prospettato nella prima ipotesi richiede una profondità del substrato non molto elevata, la presenza di terreni di copertura a granulometria intermedia / grossolana non compatti e variazioni di falda rapide.

Il primo meccanismo appare al momento improbabile per alcune semplici osservazioni: nonostante spostandoci in profondità si assista ad un aumento della granulometria dei materiali, questi presentano un'elevata compattazione. Anche ipotizzando velocità elevate delle acque circolanti nell'interfaccia basamento / sedimenti di copertura, non

si potranno perciò sviluppare fenomeni di filtrazione con asportazione di particelle.

Inoltre, anche se alcuni pozzi ad uso agricolo sono attestati nei calcari del substrato, il loro emungimento non determina grosse depressioni della superficie piezometrica, almeno tali da creare un flusso idrico così veloce nella zona della voragine.

Resta da studiare la possibilità che la migrazione di materiale dai terreni argillosi residuali alle cavità carsiche dei calcari di fondo sia dovuta, per qualche meccanismo al momento non noto, a variazioni rapide della pressione idraulica nei calcari, come conseguenza dei pompaggi (depressioni) o delle ricariche rapide ed abbondanti (sovrapressioni).

Attualmente la seconda ipotesi risulta la più attendibile; la presenza di acque termali molto aggressive facilita la dissoluzione delle rocce del basamento fino al crollo delle cavità il cui tetto non sorregge più il peso dei materiali sovrastanti.

Considerando la forma della voragine e le sue caratteristiche dimensionali si può ipotizzare non tanto un crollo di una cavità sferoidale, bensì il crollo di una cavità cilindrica con un'altezza molto minore rispetto al raggio oppure il crollo di una serie di cavità e condotti di varie dimensioni e comunicanti tra loro.

La validità di questa ipotesi è confermata dai fenomeni successivi allo sprofondamento, quali l'aumento di portata e torbidità nelle sorgenti ed i vulcanetti di fango in loc. Poggetti Vecchi.

Tutte queste osservazioni dimostrano che il dissesto si è sviluppato in profondità, influenzando la circolazione idrica profonda; il probabile crollo di una cavità o di un reticolo di cavità comunicanti riempite d'acqua ha determinato un aumento della pressione dei fluidi ed un intasamento delle vie di deflusso sotterranee con conseguente sviluppo in superficie dei fenomeni suddetti.

Il fenomeno appare comunque eccezionale, rispetto alla casistica internazionale (Beck, 1984; Beck & Wilson, 1987), soprattutto per la grande profondità del substrato calcareo. Pertanto risulta di estremo interesse, anche ai fini di protezione civile, il proseguimento delle indagini per la comprensione del fenomeno, con uno studio che deve essere necessariamente interdisciplinare per non trascurare alcuna ipotesi.

### 8. Indagini future

In considerazione di quanto sopra riportato si possono indicare indagini future che permetteranno una migliore comprensione del fenomeno e delle cause innescanti.

Innanzitutto risulta opportuno ricostruire l'effettiva superficie del substrato in un intorno significativo della voragine e verificare sia l'esistenza delle dislocazioni tettoniche sia la presenza di forme carsiche ipogee. Inoltre è necessario chiarire se il basamento sia esclusivamente costituito da litotipi appartenenti alla formazione del Calcarea Cavernoso o se siano presenti anche litologie del Calcarea Massiccio; in tal caso chiarire i rapporti tra le diverse formazioni. Per fare ciò è necessario:

- programmare un sondaggio almeno fino a 250/300 metri che permetta di arrivare al

substrato, eventualmente poco più ad est della voragine;

- compiere una campagna geofisica di sismica a riflessione nell'area dello sprofondamento;
- eventualmente effettuare un sondaggio nei dintorni della località Poggetti Vecchi per chiarire l'esistenza di litologie appartenenti al Calcarea Massiccio e la loro relazione con le rocce del Cavernoso.

Per definire con maggior dettaglio le connessioni idrauliche esistenti tra le varie falde ed in modo particolare per avere ulteriori informazioni sulla circolazione profonda, sarebbe inoltre opportuno predisporre pozzi – piezometro che, raggiungendo il substrato, possano essere utilizzati sia come pozzi di prova per valutazioni idrodinamiche, sia come piezometri di monitoraggio dei vari acquiferi, in particolare per registrare le eventuali variazioni rapide della pressione idraulica in profondità.

Nell'ambito di una campagna di perimetrazione delle zone a rischio a più vasto raggio, comprendente per esempio tutta l'area della pianura settentrionale del comune di Grosseto, sarebbe opportuno in via preliminare definire, sulla base di tutte le conoscenze geologiche acquisibili, le zone in cui sia presente un basamento carsificabile.

All'interno di questa vasta area individuare successivamente, mediante indagini geofisiche mirate, eventuali cavità ipogee evolutive nel substrato, con particolare attenzione per quelle zone in cui le condizioni al contorno siano favorevoli a fenomeni di questo tipo (basamento carsificabile, presenza di faglie, risalita di acque termali).

In seguito allo studio effettuato le aree sottoposte a maggior rischio, e quindi da monitorare con attenzione, sono la fascia da Poggetti Vecchi a Braccagni ed il territorio alle pendici occidentali del Poggio di Moscona nei dintorni di Roselle.

## Bibliografia

- BECK BARRY F. (1984) – *Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact*. (1984). Ed. A.A. Balkema / Rotterdam / Boston / 1984.
- BECK BARRY F. & WILSON WILLIAM L. (1987) – *Karst hydrogeology: engineering and environmental applications*. (1987). Ed. A.A. Balkema / Rotterdam / Boston / 1987.
- BENCINI A., DUCHI V., MARTINI M. (1977) – *Geochemistry of thermal springs of Tuscany (Italy)*. Chemical Geology, vol. 19, 1977, pp.229-252.
- BENCINI A. & PRANZINI G. (1992) – *The salinization of groundwaters in the Grosseto Plain (Tuscany, Italy)*. In “Study and modelling of saltwater intrusion into aquifers (Custodio & Galofré eds.). Proc. of Salt Water Intrusion Meeting”, Barcelona, 1 – 6 Nov. 1992, pp. 161 – 176.
- BRAVETTI L. & PRANZINI G. (1987) – *L’evoluzione quaternaria della pianura di Grosseto (Toscana): prima interpretazione dei dati del sottosuolo*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 10 (1987), pp. 85-92.
- CANUTI P., CASAGLI N., BERTI G. (2000) – *Voragini e sprofondamenti nel territorio nazionale: rassegna di alcuni casi caratteristici in aree appenniniche*. (2000). Nota per il convegno “Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana”, Grosseto 31 Marzo 2000. In questo volume.
- CAVANNA C. (1998) – *Le grotte della provincia di Grosseto*. Società naturalistica speleologica maremmana. Ed. Scripta Manent, Grosseto (1998).
- DEL CHICCA G., GIORGI R., SQUARCI P., TAFFI L. (1988) – *Sulle risorse geotermiche a medio – bassa temperatura nella parte meridionale del bacino neoautoctono della Val d’Elsa – Studi preliminari – Misure di gradiente geotermico*. CNR, Progetto Finalizzato Energetica, Sottoprogetto Energia Geotermica. In : AA.VV., 2° seminario informativo sulle attività di ricerca promosse con i progetti esecutivi 1984 e 1986, Ferrara 21 – 22 dicembre 1987. SI – 5. P.F.E. Roma 1988, pp. 563 – 571.
- GELMINI R. (1969) – *Ricerche geologiche nel gruppo di M. Leoni (Grosseto, Toscana)*. 1. *La geologia di M. Leoni tra Montepescali e il fiume Ombrone*. Mem. Soc. Geol. It., 8 (1969), pp. 765-796.
- MINISSALE A. A. & DUCHI V. (1988) – *Geothermometry on fluids circulating in a carbonate reservoir in north – central Italy*. Journal of volcanology and Geothermal Research, 35 (1988), pp 237 – 252.
- PRANZINI G. & BENCINI A. (1996) – *Groundwater salinization in Southern Tuscany*. Proc. of Salt Water Intrusion Meeting ’96, Malmo, Svezia, pp. 261 – 270.
- REPETTI E. (1835) – *Dizionario Geografico Fisico Storico della Toscana*. Vol. 1/5, (1835), Accademia dei Georgofili.
- ROSETTI E. & VALENTI L. (1987) – *Terme e sorgenti della Toscana*. Ed. Le Lettere, 1989, Firenze.