UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltá di Scienze MM. FF. NN.

Corso di Laurea in Geologia

Istituto di Geologia, Paleontologia e Geologia Applicata

Direttore: Prof. G. V. Dal Piaz

Tesi di Laurea in Geologia Applicata

Indagini litostratigrafiche ed idrogeologiche nell'anfiteatro morenico frontale del lago di Garda, nel tratto compreso tra i fiumi Chiese e Mincio (BS - MN - VR)

Relatore: Dott. RENZO ANTONELLI

Laureando: GIANFRANCO BAZZOLI

Anno Accademico 1982-83

I N D I C E

1.	PREMESSA	pag.1
2.	UBICAZIONE DEL TERRITORIO	" 4
3.	LINEAMENTI DELLA GEOLOGIA DI SUPERFICIE	" 6
4.	IDROGRAFIA	" 13
5.	COSTITUZIONE LITOSTRATIGRAFICA DEL SOTTOSUOLO	" 17
6.	CARATTERI IDROGEOLOGICI GENERALI ...	" 37
6.1	Regime delle acque sotterranee	" 42
6.1a	Regime delle falde freatiche	" 42
6.1b	Regime delle falde in pressione	" 45
6.2	Deflusso delle acque sotterranee ...	" 52
6.2a	Deflusso delle falde freatiche	" 53
6.2b	Deflusso delle falde in pressione ..	" 55
6.3	Alimentazione delle falde	" 58
7.	PARAMETRI IDRAULICI DELLE FALDE IN PRESSIONE DETERMINATI MEDIANTE TESTS DI POMPAGGIO	" 66
7.1	Tests di pompaggio:introduzione analitica	" 68

7.2 Tests di pompaggio in loc. "La Sacca" ... pag. 92

7.3 Tests di pompaggio in loc. "Ponte Cantone" " 102

7.4 Considerazioni riassuntive ..... " 115

8. UTILIZZAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE .... " 118

9. CONCLUSIONI ..... " 124

RINGRAZIAMENTI ..... " 129

BIBLIOGRAFIA ..... " 130

Appendice I : dati relativi ai pozzi in falde in pressione .

Appendice II : tavole delle funzioni W(u)-u , F(u)-u

Tavola 1 : ubicazione dei pozzi in falde in pressione

Tavola 2 : ubicazione dei pozzi freatici e delle sorgenti.

Tavola 3 : carta delle stratigrafie e tracce dei profili litostratigrafici .

Tavola 4a : sezioni litostratigrafiche 1-4

Tavola 4b : sezioni litostratigrafiche 5-10

Tavola 5 : diagramma di relazione tra ubicazione dei pozzi e quota delle fenestrature.

Tavola 6 : regime delle falde freatiche-pluviometria alla stazione di Peschiera .

Tavola 7 : regime delle falde in pressione ed idrometria del Garda a Peschiera.

Tavola 8a : carta dei deflussi delle falde freatiche.

Tavola 8b : carta dei deflussi delle falde in pressione .

Tavola 9 : curve tipo di THEIS .

1. PREMESSA

Questo studio è stato eseguito con lo scopo precipuo di definire, sia qualitativamente che quantitativamente, la situazione idrogeologica dell'anfiteatro morenico gardense nella sua parte centrale.
Si è cercato di individuare le caratteristiche principali, litostratigrafiche ed idrogeologiche, degli acquiferi esistenti, e le eventuali relazioni tra gli acquiferi stessi ed i principali fattori dell'alimentazione: apporti meteorici, afflussi superficiali e possibili connessioni idrogeologiche con il grande bacino del Garda.
Non esistono infatti a tutt'oggi studi sistematici e dettagliati volti a definire in un quadro generale l'assetto strutturale ed idraulico degli acquiferi nell'anfiteatro morenico gardesano. Solo di recente sono state compiute alcune ricerche, che tuttavia interessano solo parzialmente l'anfiteatro stesso, in quanto condizionate da limiti geografico-amministrativi [2], o limitantisi ad approfondire talu-

ni aspetti geologico-ambientali con un censimento di dati (stratigrafie,analisi chimiche,dati idraulici,ecc.) senza inserirli in una interpretazione di specifiche problematiche [36] .

È inoltre da annotare che la maggior parte delle terebrazioni idriche è stata effettuata in questa zona negli ultimi venti anni,e che pertanto solo da poco tempo è disponibile per gli studiosi l'oramai notevole patrimonio di informazioni rappresentato dalle stratigrafie di trivellazione,d'altra parte di assai difficile acquisizione nella sua totalità.

Le ricerche sono state svolte in due fasi:una prima di raccolta dei dati esistenti e di censimento dei pozzi,una seconda di natura sperimentale.

In un primo tempo è stata condotta un'attenta indagine bibliografica presso enti pubblici e privati, che ha portato al reperimento di molti dati:stratigrafie del sottosuolo,portate emunte e dati idraulici dei pozzi esistenti,rilievi pluviometrici e termometrici,idrometrie,quote assolute dei pozzi, notizie sull'utilizzazione delle acque sotterranee e superficiali.

Svolte parallelamente, oltre che di seguito, le indagini sperimentali sono consistite nell'esecuzione di una serie di tests di pompaggio; in misure periodiche del livello delle falde in pozzi rappresentativi; sono state effettuate campagne piezometriche sulle falde libere e sugli acquiferi in pressione; raccolti campioni di materiali del sottosuolo provenienti da trivellazioni o da cave.

Si è potuto inoltre ricostruire lungo una serie di profili la struttura del sottosuolo.

È stato altresì utile, al limite Sud dell'area di ricerca, poter utilizzare e confrontare i dati raccolti da un collega che sta svolgendo un'analoga indagine nell'alta pianura mantovana.

2. UBICAZIONE ED ESTENSIONE DEL TERRITORIO

L'area di studio comprende la quasi totalità dell'anfiteatro morenico frontale del lago di Garda, nel tratto compreso tra il corso dei fiumi Chiese e Mincio, essendone esclusi solamente i rilievi più esterni, mindeliani, per un'estensione di circa 350 Km^2. Questo territorio è suddiviso amministrativamente fra tre provincie: la provincia di Brescia, con i comuni di Calcinato, Bedizzole, Lonato, Desenzano, Sirmione, Pozzolengo; la provincia di Mantova, con i comuni di Castiglione delle Stiviere, Solferino, Cavriana, Ponti sul Mincio, Monzambano, Volta Mantovana, e, per una minima estensione, Valeggio; la provincia di Verona con il comune di Peschiera.

L'area è compresa nelle tavolette Calcinato (47 II NE), Desenzano del Garda (48 III NO), Peschiera (48 III NE), Castiglione delle Stiviere (48 III SO), Cavriana (48 III SE) e per piccoli lembi nelle tavolette Valeggio (48 II SO), Goito (62 IV NE), Montichiari (47 II SE) della carta d'Italia dell'I.G.M.

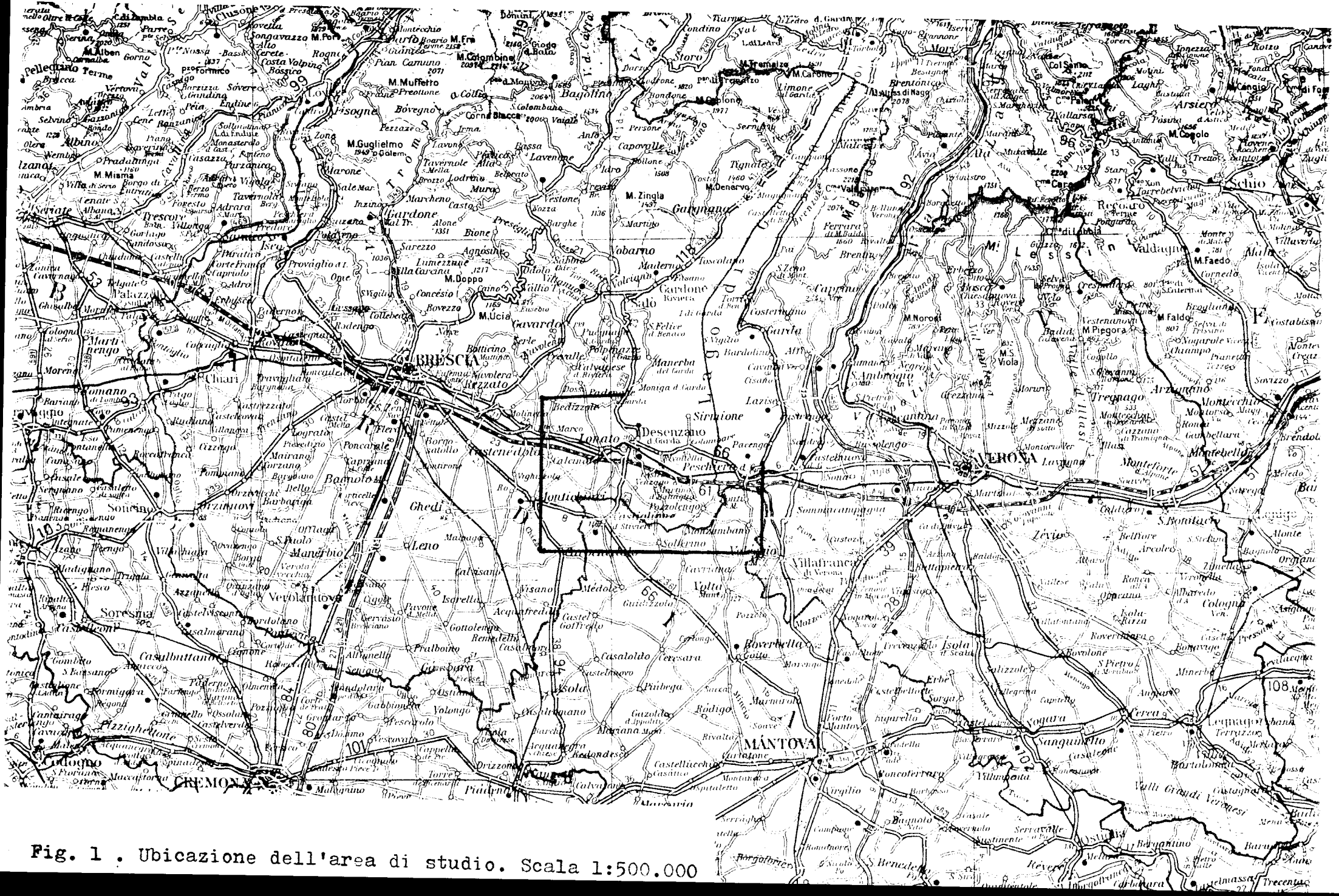


Fig. 1 . Ubicazione dell'area di studio. Scala 1:500.000

3. L I N E A M E N T I D E L L A G E O L O G I A D I S U P E R F I C I E

Le attuali conoscenze geologiche della regione sono dovute ai lavori di A.PENCK [3I] ,che nel I909 per primo pubblicò uno schizzo geologico della regione alla scala 1:500.000 ,di A.COZZAGLIO [11, 12,13] ,che curò il rilevamento geologico della zona per la stesura della Carta Geologica delle Tre Venezie,edita nel I934,ed infine di S.VENZO [43, 44,45] ,il cui decennale lavoro ha portato alla elaborazione di una carta geologica alla scala 1:40.000 comparsa nel I965 ed a cui si rinvia per un riscontro cartografico di quanto accennato in seguito. Da ricordare è anche un lavoro del I969 di W.K.HABBE [20].

Tutti gli autori citati sono concordi nel ritenere che il Garda è stato interessato da tutte le quattro grandi fasi glaciali alpine,GÜNZ,MINDEL,RISS, WÜRM : più problematico pare invece stabilire in qual misura le testimonianze di ognuna di queste glaciazioni siano rappresentate nell'anfiteatro mo-

renico. Mentre PENCK aveva attribuito un'enorme estensione alle morene würmiane, COZZAGLIO ne ridimensionò di molto lo sviluppo; in seguito VENZO confinò la cerchia würmiana nel tratto a ridosso del lago. La maggiore estensione che al Würm fu attribuita da PENCK e COZZAGLIO viene spiegata da VENZO come dovuta al fatto che le morene rissiane appaiono in genere di aspetto würmiano, cioè morene ghiaiose bianche, in quanto il loro caratteristico paleosuolo rossiccio venne eroso e dilavato dai rilievi verso la parte bassa dei versanti e verso i fondovalle degli scaricatori fluvioglaciali.

La diminuita importanza attribuita all'episodio würmiano ha come conseguenza l'assegnazione [45] di ben maggiore estensione alle morene rissiane, che vengono a costituire la parte di gran lunga più vasta ed importante dell'anfiteatro frontale. Infatti la cerchia morenica mindeliana, la più esterna, è ridotta ed addolcita dall'erosione, mentre le testimonianze dell'evento günziano sono conservate solo in ridottissimi lembi.

Da VENZO sono state altresì distinte e cartografate

le testimonianze di vari episodi interglaciali (cataglaciale Mindel,interglaciale Mindel-Riss,interglaciale Riss-Würm,cataglaciale Würm),che hanno condotto alla deposizione di materiali indicativi di fasi di clima arido e stepposo (terreni argillosi, argilloso torbosi,loess).

I materiali presenti in superficie e,come vedremo,nel sottosuolo rispecchiano,per composizione e geometria,le caratteristiche degli agenti deposizionali che contraddistinguono l'ambiente glaciale e proglaciale,nella loro complessa dinamica e nelle loro complesse interazioni;vorrei qui,pur in modo sommario e semplificativo,accennare brevemente ad esse. I cordoni morenici sono costituiti da un insieme caotico di materiali,estremamente eterogenei nella loro composizione e granulometria,per effetto del trasporto in massa operato dal ghiacciaio;i materiali che hanno subito un tale trasporto sono riconoscibili,oltre che dall'apparenza caotica,per la presenza di numerosi ciottoli striati. Nella parte inferiore del deposito può prevalere una matrice argilloso-limosa,che contraddistingue la cosiddetta morena

di fondo. Tali materiali sono definibili come morenici strictu sensu.

Analogamente mal classati e caotici sono i depositi dovuti ai torrenti di ablazione glaciale [16] , che presumibilmente andavano soggetti ad enormi variazioni di portata. I materiali da essi deposti sono difficilmente distinguibili dai morenici s.s.

Si può asserire che gran parte dei sedimenti affioranti nell'anfiteatro morenico appartengono a questi due tipi di deposito.

Di ambiente proglaciale,i depositi dei torrenti scaricatori fluvio-glaciali si distinguono per essere stratificati e relativamente ben classati. Infatti il range granulometrico di questi depositi è ancora ampio,dai ciottoli alle sabbie,ma a meno di un effetto di sbarramento del torrente da parte di ostacoli di varia natura,sono assenti le frazioni fini,che vengono trasportate più a valle o sono soggette a deflazione ed in molti casi perdono la loro identità per mescolamento con altri sedimenti [16] .

Dalla coalescenza delle conoidi dei depositi dei vari scaricatori fluvioglaciali traggono origine le

piane di alluvionamento proglaciali,che possono essere molto estese e sono ben addentellate con le cerchie moreniche esterne. Un esempio di piana di alluvionamento proglaciale potrebbe essere costituito dall'alta pianura mantovana,che ha profonde ed estese interdigitazioni con l'anfiteatro morenico gardesano.

Questi materiali,costituiti prevalentemente da ghiaie grossolane,ghiaie,sabbie,con clasti petrograficamente eterogenei,risultano i più interessanti per uno studio di carattere idrogeologico. Infatti spesso le fasce di materiali grossolani si localizzano in corrispondenza di paleoalvei che costituiscono le direzioni preferenziali di un eventuale deflusso idrico sotterraneo.

VENZO [45] ha ricostruito l'andamento e la direzione di deflusso di molti scaricatori,nella maggior parte wurmiani e rissiani,evidenziando come essi dipendessero dalla topografia.

I materiali argillosi e limosi,insieme con le sabbie fini,quando non appartenenti a morena di fondo,testimoniano vari meccanismi di deposizione,la cui

individuazione va ovviamente effettuata in campagna, caso per caso, come ad esempio :

- fasi di impaludamento e ristagno da parte di acque di scaricatori fluvioglaciali, che attraversavano un territorio morfologicamente complesso; a tali fasi va attribuita anche la formazione di torbe
- alterazione pedogenetica in senso argilloso di terreni preesistenti, prevalente nei periodi interglaciali ed interstadiali
- minore competenza dei torrenti per cause di varia natura.

Con questa esposizione sia pur semplificativa e ridotta dei processi di messa in posto dei materiali in ambiente glaciale si è voluto mostrare come in realtà sia possibile ricostruire strutture ordinate e geometriche ricollegabili a ben precisi motivi deposizionali, innestatesi sui corpi sedimentari originali che apparirebbero ad un'analisi sommaria del tutto caotici.

L'unico affioramento in roccia presente nell'area in esame è situato a Sirmione, all'estremità della omonima penisola: è costituito da conglomerati mio-

cenici a contatto tettonico con calcari marnosi del Cretaceo superiore, su un allineamento secondo la direzione strutturale giudicariense, con sollevamento ad Ovest.

A Sirmione, in corrispondenza di tale linea e verosimilmente ad essa geneticamente collegata, si colloca la sorgente termale Boiola, nota sin da epoca romana, sgorgante da una sorta di cratere di fanghiglia cinerea dovuta probabilmente a morena di fondo.

L'acqua termale è sulfurea e sgorga all'origine ad una temperatura di 70°C .

4 . I D R O G R A F I A

L'elemento di maggior rilievo del sistema idrografico dell'area in esame è senza dubbio il lago di Garda, che con i suoi 368 Km^2 di superficie dello specchio liquido è il maggiore d'Italia.

Di seguito vengono forniti i dati più significativi dal punto di vista idrologico [26] :

- altezza della superficie dell'acqua : 65 m.s.m.
- profondità media : 133.3 m
- profondità massima : 350 m
- volume d'acqua : $49030 \cdot 10^6$ m^3
- tempo teorico di ricambio dell'acqua, fornito dal rapporto tra volume del lago e portata media annua dell'emissario : 26.6 anni

Il lago, che ha origine glaciale, esercita una notevole influenza sul clima locale; l'area del suo bacino imbrifero, lago compreso, è di 2260 Km^2 .

I corsi d'acqua principali compresi nell'area di studio sono i fiumi Chiese e Mincio.

Il Chiese fu un importante scaricatore delle fronti glaciali della zona occidentale. A valle di Ga-

vardo,ove transita con una portata media di 58.4 m^3/ sec.,esso scorre incassato entro un suo terrazzo fluvioglaciale würmiano. È interessato lungo il suo corso da humerose opere di canalizzazione e derivazione,fra cui la più importante è la Seriola Lonata. Il Mincio,emissario del lago di Garda,scorre con una portata media di 58.4 m^3/sec. nella stessa valletta percorsa da un grande scaricatore würmiano,sino all'abitato di Borghetto:a valle di questo centro corre incassato di 30 m rispetto ad un terrazzo fluvioglaciale tardo-rissiano [45] ,e scende al di sotto del livello della falda freatica,sviluppando un'azione drenante sulla stessa. All'altezza di Ponti s/M il fiume è sbarrato da una traversa di ripartizione,che tramite due canali ne immette le acque nella rete irrigua dell'alta pianura mantovana.

L'anfiteatro morenico vero e proprio è interessato da corsi d'acqua minori:

- il fosso Redone Superiore,il più importante,nasce presso M.Forca (BS),defluisce lungo la valletta di un antico scaricatore con un percorso sinuoso ed a tratti parallelo ai cordoni morenici rissiani,immet-

tendosi infine nel Mincio presso Monzambano.
Ha un bacino in massima parte pianeggiante, di 66 Km^2 ed una portata media di piena, secondo COZZAGLIO [11], di 2.5 m^3/sec.

- il fosso Redone Inferiore, emissario del laghetto di Castellaro Lagusello, defluisce per un breve tratto verso Nord, seguendo le cerchie rissiane, per poi piegare verso Est ed immettersi presso Monzambano nel canale Virgilio.

- dalla zona paludosa di Barche di Castiglione nasce il fosso Albanella, che dopo un tratto verso Ovest con andamento meandriforme e con sponda in erosione, raggiunto l'abitato di Castiglione, con una profonda incisione piega bruscamente verso Sud. Da qui, canalizzato, viene immesso nella rete irrigua della pianura mantovana.

- una serie di piccoli fossi che nascono nelle zone interne dell'anfiteatro e defluiscono verso la pianura mantovana a Sud, o verso il Garda a Nord, a seconda della morfologia dei terreni da essi incontrati.

Si possono individuare inoltre alcuni piccoli specchi d'acqua, fra cui i più notevoli sono il laghetto di

Castellaro Lagusello ed il lago del Frassino.

Trascurando momentaneamente i fiumi Chiese e Mincio, che peraltro interessano marginalmente l'area di studio, l'idrografia della zona in esame nel suo complesso appare piuttosto ridotta e condizionata dalla morfologia superficiale. Le portate defluenti sono sempre modeste e a carattere stagionale. Conseguentemente si può considerare marginale l'influenza della rete idrica superficiale sugli acquiferi dell'area considerata.

5. COSTITUZIONE LITOSTRATIGRAFICA DEL SOTTOSUOLO

La ricostruzione litostratigrafica del sottosuolo è stata svolta utilizzando una settantina di stratigrafie, reperite presso enti pubblici e privati. La loro ubicazione viene riportata nella planimetria di tav. 3 , le stratigrafie stesse in appendice I . Le colonne stratigrafiche, tutte relative a terebrazioni di pozzi per acqua, permettono di conoscere i caratteri litologici dell'anfiteatro morenico per una profondità variabile dai 50 ai 150 m ; alcune di esse si spingono ad una profondità di 190 m.

Gli unici dati a disposizione circa la profondità del substrato roccioso dell'area in esame sono desunti da sondaggi sismici eseguiti nel bacino del Garda [19] . Essi indicano una profondità del substrato variabile dai -650 m.s.m. ai -1200 m.s.m., con inclinazione del tetto del substrato in roccia da N verso S ed un angolo di pendenza medio di circa 2 ° .

Non facile è stato il lavoro di correlazione delle

colonne stratigrafiche,in quanto nella compilazione delle stesse gli esecutori dei sondaggi non utilizzano una terminologia di classificazione adeguata, ma spesso essa viene derivata da pure valutazioni soggettive. Nell'elaborazione dei profili si è pertanto proceduto ad una semplificazione delle stratigrafie,effettuando una suddivisione in base soprattutto alle caratteristiche granulometriche e quindi di permeabilità dei materiali.

Si sono pertanto distinti i seguenti litotipi :

- materiali praticamente impermeabili a composizione mista:si tratta dell'agglomerato,comunissimo in tutta la zona considerata,dato da argille con ghiaia o con ciottoli e trovanti,in cui la percentuale dei materiali argillosi è variabile,ma comunque tale da rendere impermeabile l'agglomerato stesso
- materiali impermeabili o scarsamente permeabili a grana fine o finissima:limi,argille,limi argillosi, argille limose,limi sabbiosi,sabbie fini limose
- materiali a buona permeabilità:sabbie,da grossolane a fini
- materiali a granulometria grossolana ed elevate

permeabilità: ghiaia, ghiaietto, ghiaie con ciottoli, ghiaia con sabbia, conglomerati fessurati o poco cementati .

Vengono inoltre distinti:

- ceppo e conglomerati compatti, in quanto, anche se presenti in lenti, essi determinano una diminuzione della permeabilità e riducono la sezione efficace di percolazione dell'acquifero
- torba: i depositi torbosi, per quanto limitati, vengono evidenziati perchè indicativi di un particolare ambiente di sedimentazione (cfr. pag.11) e per le particolari specifiche caratteristiche geotecniche e di permeabilità.

Nel complesso è da rilevare come i materiali del sottosuolo siano estremamente eterogenei, sia dal punto di vista granulometrico (si va dalle argille ai trovanti), che mineralogico-petrografico, in relazione alla complessa litologia del bacino montano alimentante l'antico ghiacciaio.

In particolare nei cordoni morenici si ha una distribuzione caotica dei materiali, secondo i motivi richiamati nell'inquadramento geologico.

Come si può vedere dalla fig. 2 il contrasto tra le caratteristiche granulometriche dei materiali costituenti le morene ed i materiali di deposito fluvioglaciale è piuttosto marcato.

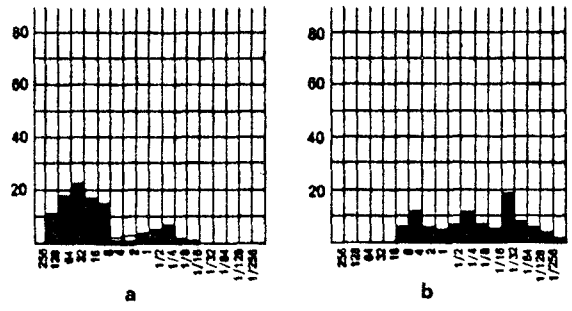


Fig. 2

Istogrammi granulometrici.
In a)deposito di torrente di ablazione glaciale;in b)morena fangosa di fondo . Da:Pettijohn F.J. Sedimentary Rocks, Harper Ed.,1957 New York

Nelle figg. 3 , 4 , 5 sono rappresentate le curve granulometriche relative a campioni raccolti in diversi livelli di una cava in materiali deposti da uno scaricatore fluvioglaciale.
Campioni raccolti da orizzonti acquiferi nel corso di trivellazioni seguite nella zona durante il periodo di ricerca,e che non è stato possibile sottoporre alle prove granulometriche in quanto piuttosto alterati dallo scalpello di perforazione,hanno mo-

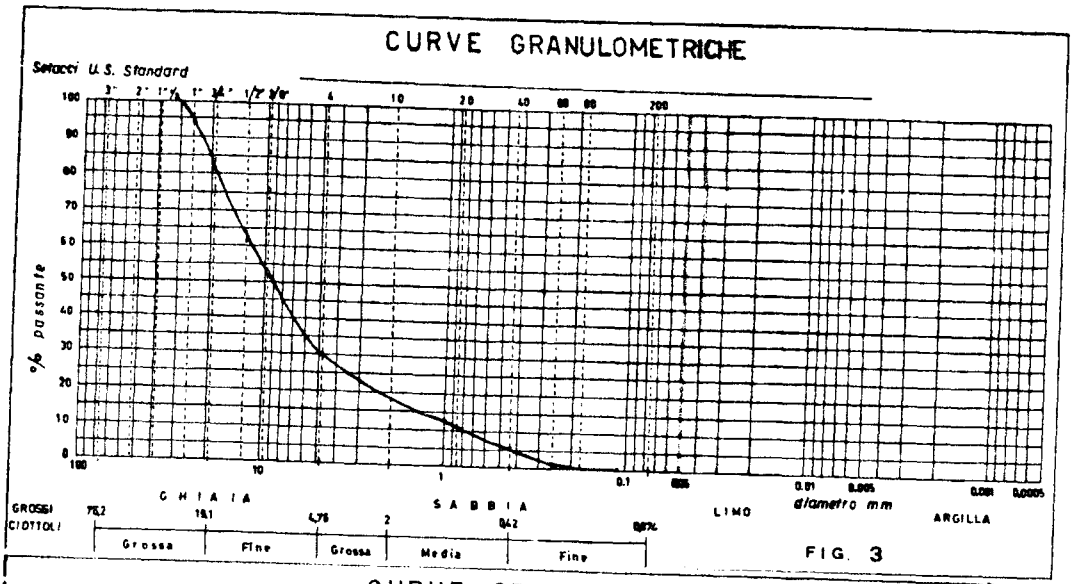


FIG. 3

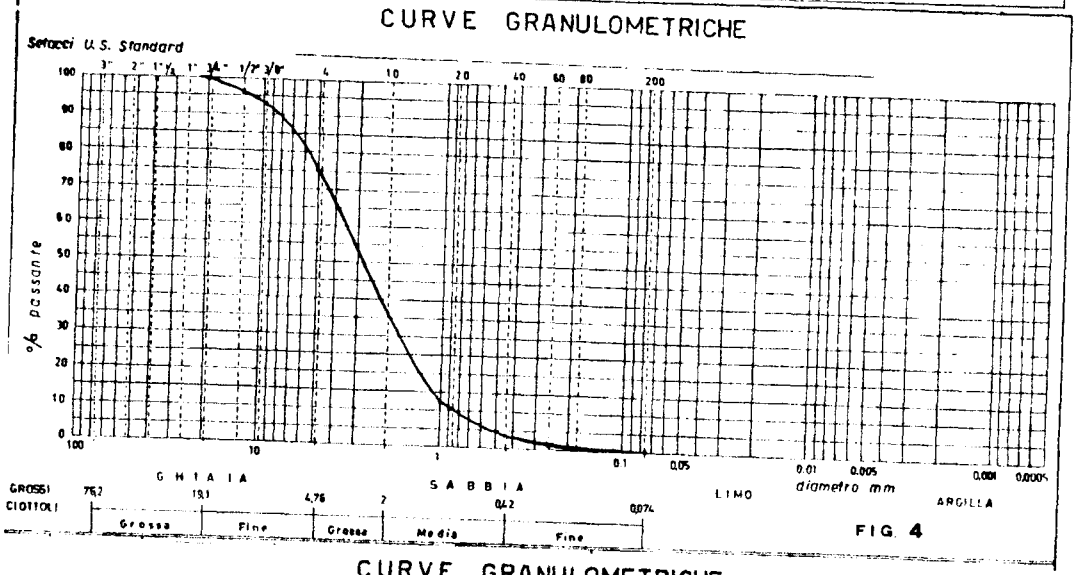


FIG. 4

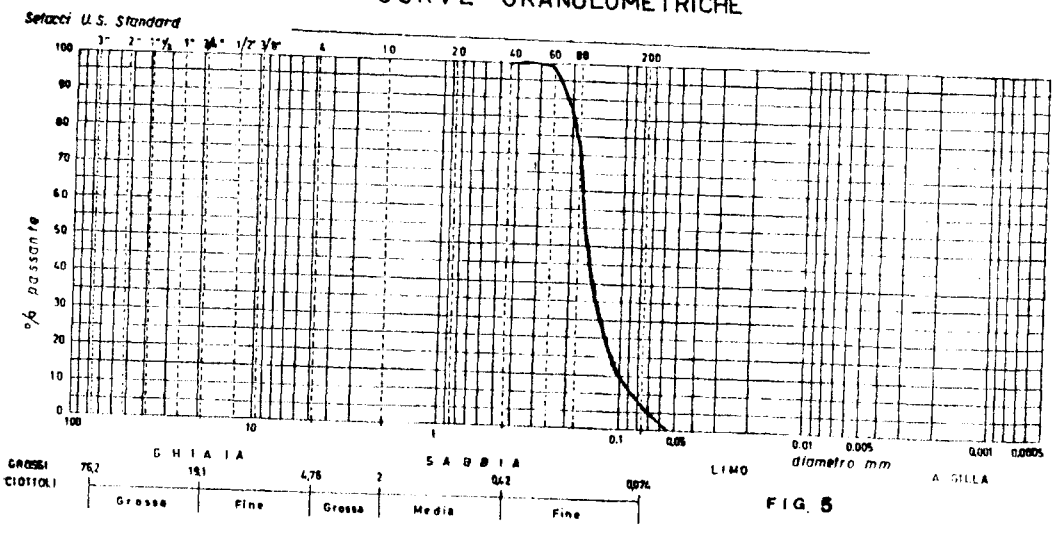


FIG. 5

Fig. 6 . Cave di ghiaia e sabbia presso l'abitato di Castelvenzago (BS), in depositi fluvioglaciali. È ben visibile la stratificazione dei depositi.

a = argille s = sabbia gs = ghiaia con sabbia

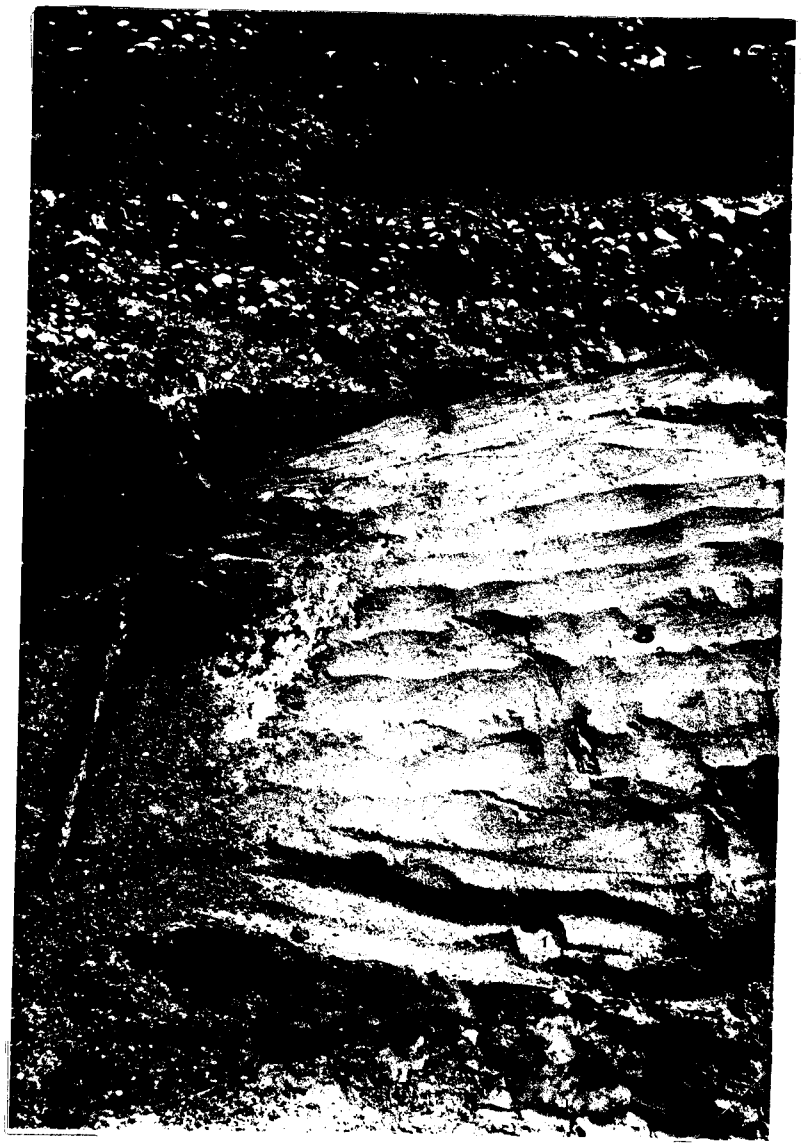


Fig. 7 . Cave di ghiaia e sabbia presso Castelvenzago (BS) . Dettaglio di fig. 6 .
a = argilla s_1 = sabbia fine s_2 = sabbia limosa (punto di prelievo del campione che ha fornito la curva granulometrica di fig.5) gs = ghiaia con sabbia .

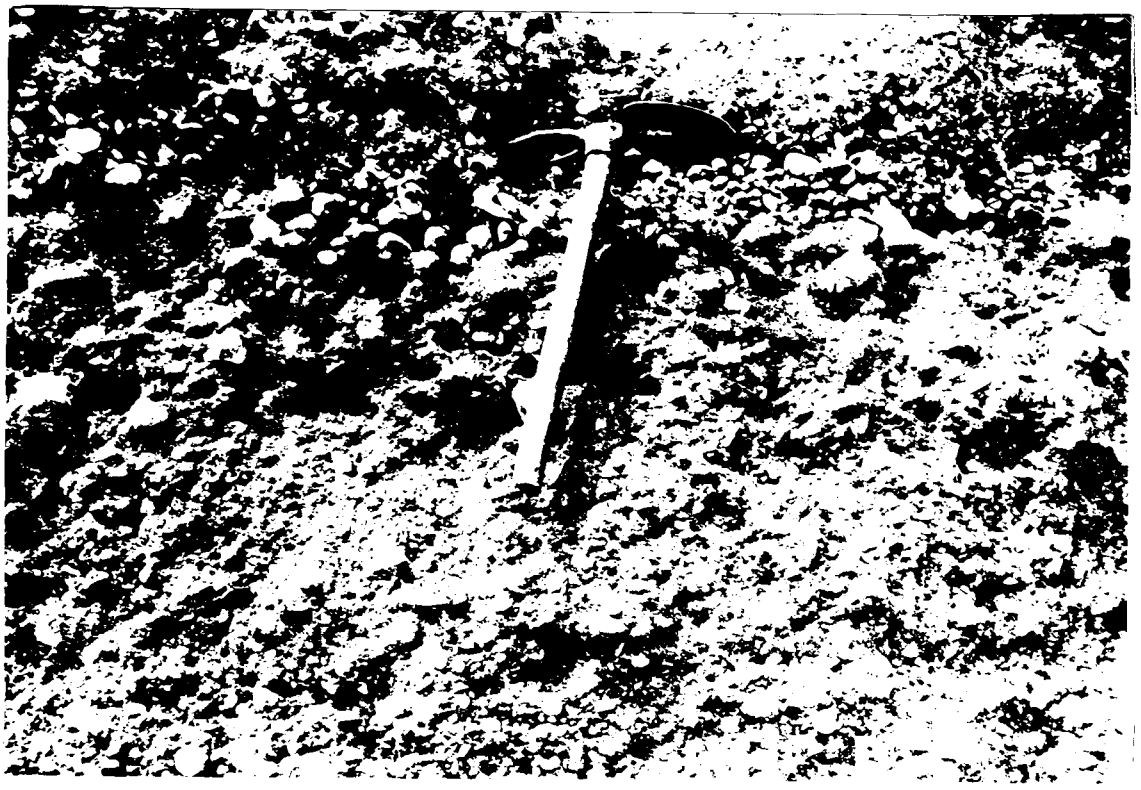


Fig. 8 . Cave di ghiaia e sabbia presso Castelvenzago (BS) . Livello di ghiaie pulite con elementi ben arrotondati. È visibile la gradazione verticale normale di questo livello. Nel sottosuolo dell'anfiteatro morenico del Garda orizzonti di questo tipo sono frequenti,e possono raggiungere diversi m di spessore.

strato ad un esame speditivo caratteristiche granulometriche simili a quelle di fig. 5 ,ma con diametri maggiori,trattandosi di ghiaie.

Le tracce dei profili stratigrafici eseguiti sono riportate in tav.3,i profili stessi nelle tavv. 4a e 4b . Le sezioni sono state concentrate soprattutto nella parte centrale dell'area in esame,e sono state tracciate sia parallelamente che trasversalmente all'andamento dei cordoni morenici.
Alcune di esse interessano parzialmente la pianura mantovana e bresciana a ridosso dell'anfiteatro morenico,illustrando i rapporti intercorrenti tra le due unità morfologiche.
Sono stati segnalati nelle sezioni i tratti fenestrati dei pozzi per acqua,in modo da poter più facilmente individuare gli orizzonti acquiferi.
Nell'esame delle sezioni si è posta maggior attenzione alla definizione della geometria degli orizzonti ghiaiosi e ghiaioso-sabbiosi,in ordine alle finalità di questo studio. I più importanti di essi, riconoscibili in più sezioni,sono stati contrassegnati nel profilo con una lettera maiuscola.

Per cercare di fornire un quadro dettagliato del sottosuolo dell'area esaminata, si è ritenuto opportuno far precedere da una descrizione delle sezioni più significative le osservazioni di carattere generale.

Nel profilo 4 , trasversale rispetto all'andamento delle cerchie moreniche, si individua un notevole orizzonte (A) , a ghiaia con sabbia, acquifero, potente circa 50 m, con spessore in aumento da N verso S , situato da q. 85-80 a q. 35-30 m.s.m.

A quote superiori, separati da livelli argilloso-ghiaiosi impermeabili talora di notevole potenza, si individuano alcuni orizzonti di ghiaia con sabbia con limitata continuità laterale e modesto spessore.

Nel profilo trasversale 7 al di sotto di una coltre argillosa potente una cinquantina di metri entro la quale si possono identificare delle lenti di materiali ghiaioso-sabbiosi e ghiaiosi dello spessore di una dozzina di m, si localizza un consistente livello a ghiaia e sabbia, acquifero, presentante talora intercalazioni argillose.

Esso è sito da q. 75 m.s.m. a 25 m.s.m., con una

potenza di 50 m e con notevole continuità laterale. La sua potenza aumenta verso S;è riconoscibile come il livello A del profilo 4. Sempre nel profilo 7 , al tetto della copertura argillosa si individuano localmente dei livelli ghiaiosi che danno origine a piccole falde sospese. Il profilo 9 situato più ad oriente,mostra al di sotto di una forte copertura di materiali argillosi che dalla base dei rilievi morenici si spinge per una quarantina di m sino a circa q. 50 , tre orizzonti costituiti da ghiaia e ghiaia con sabbia, tutti acquiferi,tra loro separati da argille e conglomerati compatti. Il primo di essi si spinge da q. 65 a q. 50 con un progressivo aumento di potenza da N verso S , il secondo (C),da q. I5 a q. 5 ,è dotato di notevole estensione laterale;il terzo (B) infine,si spinge da q. -10 sino ad almeno q. -25 m.s.m.

Per le sezioni condotte con andamento circa parallelo ai cordoni morenici,il tratto occidentale dei profili 3 e 2 ,il primo più settentrionale, mette ancora in evidenza l'orizzonte (A) ,a ghiaia con sabbia,con una potenza di 15-20 m in aumento verso S,posto da q. 50

a q. 35-30 ,caratterizzato da notevole continuità laterale. Esso è sovrastato da una potente copertura di argille e di materiali morenici s.s.
Solo presso Desenzano,separato dall'orizzonte acquifero descritto da 10-12 m di argille,si trova un livello ghiaioso-sabbioso di circa 20 m di potenza, acquifero anch'esso,che si rastrema in direzione NW-SE . Sopra di esso si trova uno strato di argille per 6-7 m,e quindi un acquifero freatico sito in depositi morenici. Il tratto orientale del profilo 3 mostra al di sotto della copertura argillosa che si spinge sino ad 80-100 m dal p.c. una serie di livelli ghiaioso sabbiosi di limitata estensione laterale. Di questi i due più importanti sono posti rispettivamente da q. -25 a q. -30 e da q. -50 a q. -65 ; entrambi sono acquiferi.
Nel tratto orientale del profilo 2 la copertura argillosa giunge sino a 75 m dal p.c. nelle aree pianeggianti;sotto di essa è localizzato un livello a ghiaia con sabbia,acquifero,di 7-10 m di potenza, molto esteso,con intercalazioni argillose e conglomeratiche al suo interno (B?).

Altri due livelli ghiaioso-sabbiosi,anch'essi acquiferi,ma di minore estensione laterale,sono posti da q. 25-20 a q. 5-0, e da q. 40 a q. 32 m.s.m.
Nel tratto occidentale del profilo 1 si ritrova il potente livello ghiaioso-sabbioso (A) individuato nei profili 4,7,2 e 3 ,di cui viene evidenziata la continuità laterale. Ad esso sovrastante è ancora una potente copertura argilloso-ghiaiosa,con lenti di materiali più fini o più grossolani. Nel tratto orientale del profilo I si nota che nella zona più esterna dell'anfiteatro la copertura non è più solamente argillosa come nella zona più a ridosso del Garda, ma diviene argilloso-ghiaiosa. Ad essa soprastanti si identificano due livelli a ghiaia con sabbia,da q. 55 a q. 43 e da q. 37 a q. 23,separati da argille. Infine,con al tetto un orizzonte di una quindicina di m di argille,si trova un livello prevalentemente sabbioso,acquifero,della potenza di almeno 25 m,con tetto a q. 7-0 m.s.m. (C) .
Il profilo trasversale 8 nel suo tratto occidentale conferma quanto visto dai proff. 1 e 3;nel tratto orientale,al di sotto di una copertura argillosa

della potenza di circa 60 m si individuano due orizzonti acquiferi principali:uno,costituito da ghiaia e conglomerato poco cementato,è situato da q. 25 a q. 35 (C);il secondo,B,separato dal primo da 30 m di materiali argillosi,a ghiaia con sabbia,va da q. - 12 a q. - 35 m.s.m.

I proff. 5 e 6 e parzialmente il prof. 8 evidenziano i rapporti tra anfiteatro morenico e pianura antistante;infatti è ben osservabile come gli orizzonti ghiaioso-sabbiosi proseguano sino alla zona di pianura,interdigitandosi al contempo con gli orizzonti di materiali più fini che in essa iniziano a prevalere. In particolare nei proff. 5 e 6 si può osservare un netto aumento della percentuale dei materiali ghiaiosi in direzione del Garda.

La sezione 10 ,la cui traccia è fuori carta,è ubicata nella parte veronese dell'anfiteatro morenico: essa mostra che le caratteristiche litostratigrafiche descritte si mantengono pressochè costanti nell'intero anfiteatro.

Da quanto detto sopra, in una visione più sintetica, risultano chiari alcuni aspetti per ciò che concerne il sottosuolo dell'area in esame:

- esiste, subito al di sotto dei materiali più propriamente morenici, che formano le cerchie dell'anfiteatro, un notevole spessore di materiali impermeabili, con una maggior percentuale di elementi grossolani nella zona più occidentale dell'anfiteatro; nella parte più orientale dello stesso tale "copertura" è più spiccatamente argillosa, soprattutto in corrispondenza delle aree pianeggianti situate a ridosso del Garda: più a Sud aumenta anche in quest'area la percentuale di frazione grossolana.
- si possono individuare numerosi orizzonti di materiali permeabili: molti di essi mostrano una notevole continuità laterale ed una certa omogeneità litologica, oltre che potenza considerevole; solo alcuni di essi hanno significative variazioni litologiche laterali (e.g. il livello C, ghiaioso verso N, sabbioso più a S, verso la pianura). Particolarmente importanti sono risultati dalle sezioni costruite il livello (A) nella zona più occidentale dell'anfitea-

tro,ed i livelli (B) e (C) nella zona orientale. In genere i livelli permeabili risultano anche acquiferi;essi mostrano una chiara connessione con gli analoghi livelli dell'alta pianura mantovana,della pianura bresciana orientale e probabilmente anche dell'alta pianura veronese:in direzione della pianura la potenza degli strati acquiferi tende complessivamente ad aumentare,ma al contempo questi tendono ad approfondirsi,mentre aumenta lo spessore delle intercalazioni di materiali impermeabili in essi presenti. Alcuni importanti orizzonti ghiaioso-sabbiosi inoltre sembrano intersecare a N la superficie costituita dai fondali del lago di Garda.

- il sistema delle alluvioni del Chiese è nettamente separato,come unità litostratigrafica,dal morenico gardense sino ad una profondità di circa 50 m.s.m.; dai proff. 5 e 6 si può infatti vedere come nella stretta fascia di transizione tra i due sistemi la variazione litologica da ghiaie a materiali argillosi sia piuttosto brusca. I materiali ghiaioso-sabbiosi compaiono nell'intervallo più superficiale solo in prossimità del Chiese,di cui costituiscono i depositi alluvionali più recenti o attuali. La connessione tra

area morenica e pianura si sviluppa a maggior profondità. Pertanto nella zona prossima al F.Chiese si viene ad assistere alla sovrapposizione,ed interdigitazione,di due diversi sistemi deposizionali:in profondità si ritrovano sedimenti in continuità laterale con quelli del sottosuolo dell'anfiteatro morenico e verosimilmente ad essi geneticamente collegati;più in superficie materiali appartenenti esclusivamente al sistema alluvionale del Chiese stesso.

- si rileva nella distribuzione verticale degli orizzonti una fascia di discontinuità abbastanza netta,lungo la quale non risulta possibile correlare i vari livelli senza impartire agli stessi angoli di raccordo quanto meno improbabili per dei sedimenti praticamente sciolti. Tale fascia divide il sottosuolo dell'anfiteatro in una zona occidentale ed in una zona orientale,separabili da una linea che in planimetria va da Sirmione verso la pianura mantovana,secondo una direzione circa N-S .

Quest'ultimo aspetto ha indotto a sviluppare qui di seguito,in un tentativo di chiarimento,una serie di considerazioni,anche alla luce di risultati che sa-

ranno esposti nei paragrafi successivi.

Il diagramma di tav. 5 riporta in ascissa la quota rispetto al livello del mare dei tratti fenestrati dei pozzi di cui sono note le stratigrafie, contrassegnati in ordinate dal loro numero progressivo. Il diagramma è stato costruito ordinando i pozzi sull'asse delle ordinate in modo tale che quelli di essi posti ad Ovest di una linea, segnata sul diagramma e nella planimetria di tav. 3 , di direzione circa N20E - S20W , risultino nella parte inferiore del diagramma stesso, mentre gli altri nella parte superiore. Si può notare uno spiccato raggruppamento dei tratti fenestrati, e precisamente: i tratti fenestrati, e quindi i livelli acquiferi, della parte superiore del diagramma , cioè della zona orientale, sono, salvo poche eccezioni, posti al di sotto dei 20 m.s.m., mentre i livelli acquiferi della parte occidentale sono, salvo un'unica eccezione, posti al di sopra dei 20 m.s.m. La differenza di quota tra i due gruppi viene così ad essere di circa 30 m.l. mediamente. Il diagramma conferma quanto si era tratto dall'analisi delle sezioni, e viene ad essere di grande ausi-

lio nel tracciamento della linea di cui sopra, dato che molti pozzi sono collocati a breve distanza da una parte e dall'altra della linea stessa. Inoltre il buon numero di stratigrafie considerate conferisce significatività statistica al raggruppamento osservato. Ancora, come meglio si vedrà in seguito, dall'analisi delle direzioni di deflusso delle falde in pressione (cfr.par.6.2) risulta evidente la presenza nell'anfiteatro di due diverse strutture di deflusso che sono bruscamente separate proprio in corrispondenza della linea tracciata .

Tutto ciò si potrebbe spiegare come effetto della influenza di un disturbo strutturale, secondo due diverse modalità:

a) il disturbo si situa a livello del substrato (soglia rocciosa o faglia?) e la copertura sedimentaria si è venuta a modellare su di esso; in questo caso essa avrebbe maggior potenza nella parte E dell'anfiteatro, probabilmente anche per intervento di fenomeni di costipamento differenziale

b) il disturbo ha interessato anche i materiali morenici l. s. , dislocandone i vari orizzonti :

verrebbe così ad identificarsi come una faglia neotettonica.

I dati finora a disposizione e le caratteristiche litologiche dei materiali interessati non consentono per il momento di discernere tra le due possibilità presunte.

Come ulteriore e conclusiva considerazione, resta da dire che la linea tracciata parrebbe collegarsi con la linea Garda-Sirmione (cfr.pag. 12) e che il disturbo ben si inquadra, sia come direzione, che sarebbe quella giudicariense, che per modalità di sollevamento ad W , in un più ampio contesto strutturale regionale, caratterizzato da una subsidenza molto attiva più a S [32] e da una intensa attività tettonica e neotettonica sia a S che ad W dell'area considerata [42,46] (+).

(+) Non essendo stato possibile definire compiutamente la natura del fenomeno, per carenza di dati relativi e per la sua singolarità, in accordo e su consiglio del mio relatore, di seguito continuerò ad indicarlo come "disturbo strutturale".

6. CARATTERI IDROGEOLOGICI GENERALI

L'anfiteatro morenico del lago di Garda è caratterizzato dal punto di vista idrogeologico dalla presenza di una attiva circolazione idrica sotterranea. L'ubicazione dei numerosi (107) pozzi attingenti alle falde in pressione che sono stati censiti, ed il cui numero è notevolmente inferiore a quello effettivo, è riportata in tav. 1 : si può notare in essa quanto sia fitta la distribuzione dei pozzi e di conseguenza intuire la grande potenzialità delle falde interessate. Da quanto detto nei paragrafi precedenti risulta infatti che la costituzione litostratigrafica del sottosuolo della zona ben si presta alla presenza di corpi idrici di notevole continuità e spessore.

Nella tav. 2 viene riportata l'ubicazione dei pozzi attingenti alla falda freatica, anch'essi numerosi, ma molto meno importanti nell'economia idrica della regione.

Per quanto riguarda la falda più superficiale,

essa è suddivisa in numerosi corpi idrici tra loro indipendenti:questo è evidenziato dalla limitata estensione laterale e verticale degli acquiferi che li ospitano,come risulta dalle sezioni stratigrafiche costruite (cfr.par.5),e dalla scarsa potenzialità delle falde stesse.

Queste falde sono caratterizzate da gradienti molto variabili,quindi da varie direzioni di deflusso in stretta relazione con l'andamento locale della morfologia dei vari bacini di alimentazione.

La loro profondità dipende dalla morfologia della superficie topografica,ma risulta sempre modesta: si va da meno di 1 m di profondità dal p.c. sino a 30 m circa.

Locali situazioni di intersezione della superficie della falda con la superficie topografica danno luogo a manifestazioni sorgentizie ed a collegamenti con la rete idrografica:i corsi d'acqua minori ("fossi") descritti nel par. 4 scorrono incassati rispetto al morenico,esercitando verosimilmente una azione drenante sulle falde superficiali ad essi limitrofe.

Comune a tutti questi corpi è il regime, il che indica l'esistenza di un'unica sorgente alimentante, costituita, come si vedrà in seguito, dagli apporti meteorici efficaci.

I caratteri idrogeologici delle falde libere della zona in esame sono nettamente distinti da quelli delle falde freatiche dell'alta pianura veneta. In quest'area infatti gli acquiferi si collocano entro un potente materasso ghiaioso indifferenziato, ed il loro regime appare chiaramente influenzato dai vicini corsi d'acqua [4;5;27] . Non è stato riscontrato alcun collegamento significativo tra le falde freatiche dell'anfiteatro morenico e quelle della pianura padana mantovana e veronese.

I corpi idrici più importanti dell'area in esame sono tuttavia da individuare nelle potenti falde in pressione, situate a maggior profondità entro gli orizzonti ghiaioso-sabbiosi descritti nel par. 5 . Per genesi, litostratigrafia e caratteristiche idrauliche essi costituiscono una unità idrogeologica, di tipo multistrato, caratterizzata da un notevole spessore complessivo e da una grande continuità

laterale nei suoi orizzonti maggiori.

Inoltre è molto grande la sua potenzialità,e ciò la rende il corpo idrico di gran lunga più importante della zona dal punto di vista dello sfruttamento.

Si è gia accennato (pagg. 3 5) e si richiamerà anche in seguito (par.6.2b),che questa unità è suddivisibile in due subunità,una occidentale e l'altra orientale,con diverso andamento dei deflussi,ma egual regime e potenzialità:tale suddivisione è evidenziata dalla ricostruzione delle strutture litostratigrafiche.

In particolare nella zona occidentale si può distinguere un orizzonte acquifero principale,che nelle sezioni litostratigrafiche è stato contrassegnato con la lettera A (cfr.par.5). Caratteristica di questa falda è la grande continuità laterale.A Sud dell'anfiteatro morenico essa si raccorda con le falde in pressione della pianura mantovana. Ad essa sovrastanti sono alcune falde in pressione di limitata estensione laterale. La geometria e posizione dei corpi sedimentari che le ospitano sono state descritte nel par. 5 .

Nella zona orientale i principali acquiferi in pressione sono tre:due sono insediati nei livelli indicati con le lettere B e C nelle sezioni stratigrafiche,il terzo in un livello sito da q. 60 a q. 45 m.s.m. circa (prof. 9).

Sempre nella zona orientale si trovano altri livelli acquiferi in pressione,di importanza minore per potenza ed estensione(cfr.par.5) .

Come detto,comune ai livelli in pressione delle due zone è il regime delle oscillazioni della superficie piezometrica,il che fa supporre un comune processo di alimentazione.

Nel par. 6.3 verrà individuata una almeno parziale connessione di queste falde con il lago di Garda; d'altra parte s'è visto che esiste un raccordo tra i livelli acquiferi in pressione della zona morenica con quelli dell'alta pianura padana. L'anfiteatro morenico verrebbe così a costituire un elemento di transizione e collegamento tra bacino del Garda e pianura antistante.

6.1 REGIME DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Il regime delle acque sotterranee è stato desunto da misurazioni periodiche della superficie piezometrica eseguite su 8 pozzi freatici e su 7 pozzi attingenti da falde in pressione, con frequenza settimanale durante un arco di tempo di circa 14 mesi dal 1982 ai primi mesi del 1983.
I pozzi di misura sono stati per quanto possibile omogeneamente distribuiti nel territorio in esame, sì da considerare valide per l'intera area le misure ottenute.

6.1a Regime delle falde freatiche

In tav. 2 è riportata l'ubicazione dei pozzi freatici posti sotto osservazione nel periodo considerato. Le oscillazioni della superficie delle falde freatiche sono riportate in tav. 6, insieme con l'istogramma delle precipitazioni medie decadiche per il periodo considerato al pluviometro di Peschiera.
L'ampiezza di oscillazione settimanale della quota della superficie freatica è variabile, ma limitata in

media a circa 30 cm;l'ampiezza massima di oscillazione nei 14 mesi considerati non supera i 3 m . Questo valore è inferiore ai valori di oscillazione assoluta che vengono registrati nella pianura veronese,adiacente alla zona in esame [4;5] ,e nell'alta pianura veneta in generale:questo fatto è,come si vedrà in seguito,legato all'alimentazione delle falde.

Comparando l'andamento delle curve di oscillazione con l'istogramma delle precipitazioni,si nota,per tutti i pozzi considerati,una buona correlazione tra apporti meteorici ed andamento delle curve. In base a tale correlazione i periodi di magra e di piena delle falde corrispondono ai periodi di minore e maggiore apporto meteorico rispettivamente.

I maggiori apporti meteorici nell'arco di tempo considerato si sono verificati nei mesi di maggio-giugno e ottobre-novembre,i minori nei mesi di gennaio-febbraio e luglio,rispettando la tendenza media accertata per queste località in base ad osservazioni su un cinquantennio (figg. 9 - 14).

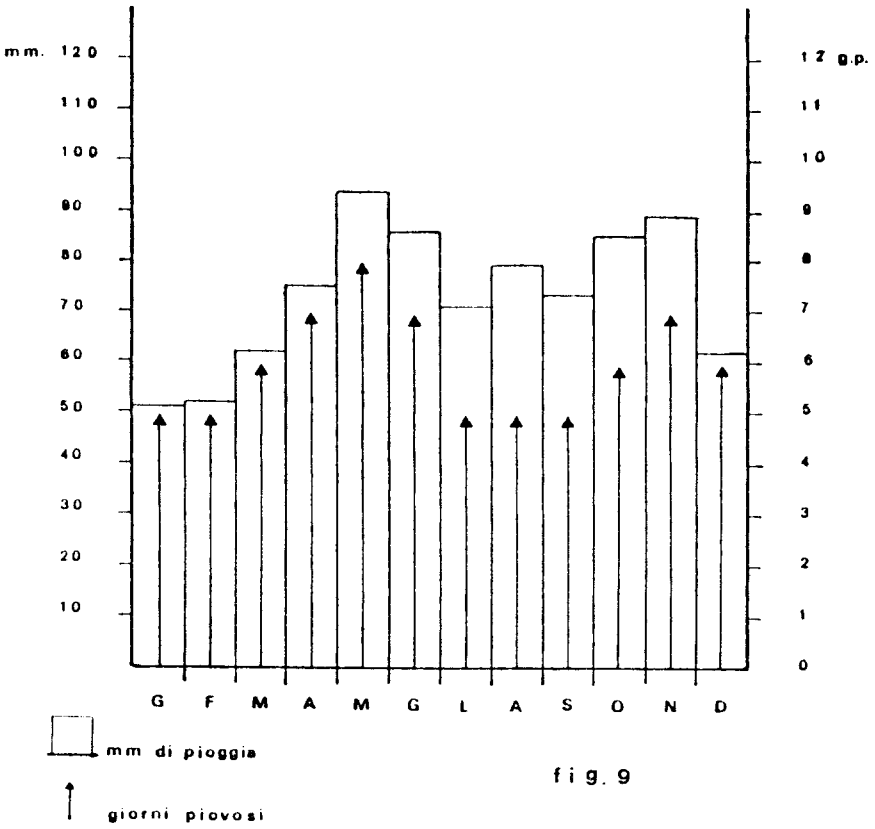


fig. 9

Stazione pluviometrica di DESENZANO (BS)

Periodo 1921—1971

cfr. [2]

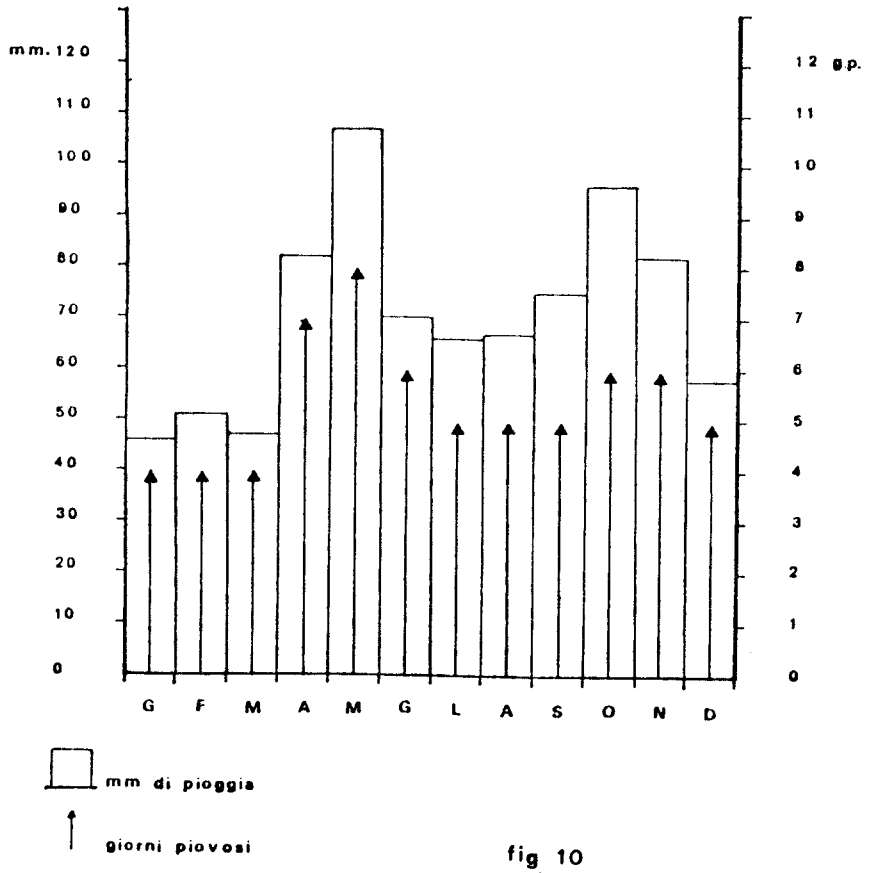


fig. 10

Stazione pluviometrica di CASTIGLIONE DELLE STIVIERE

Periodo 1921—1960

cfr. [2]

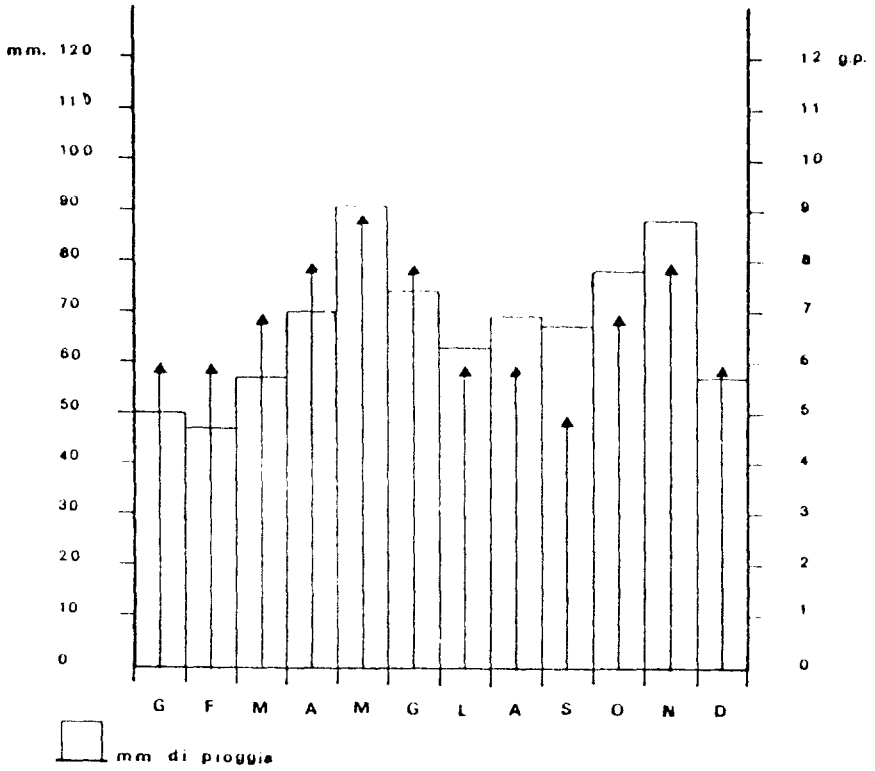


fig. 11

- Stazione pluviometrica di PESCHIERA (VR)
- Periodo 1921–1971

cfr. [2]

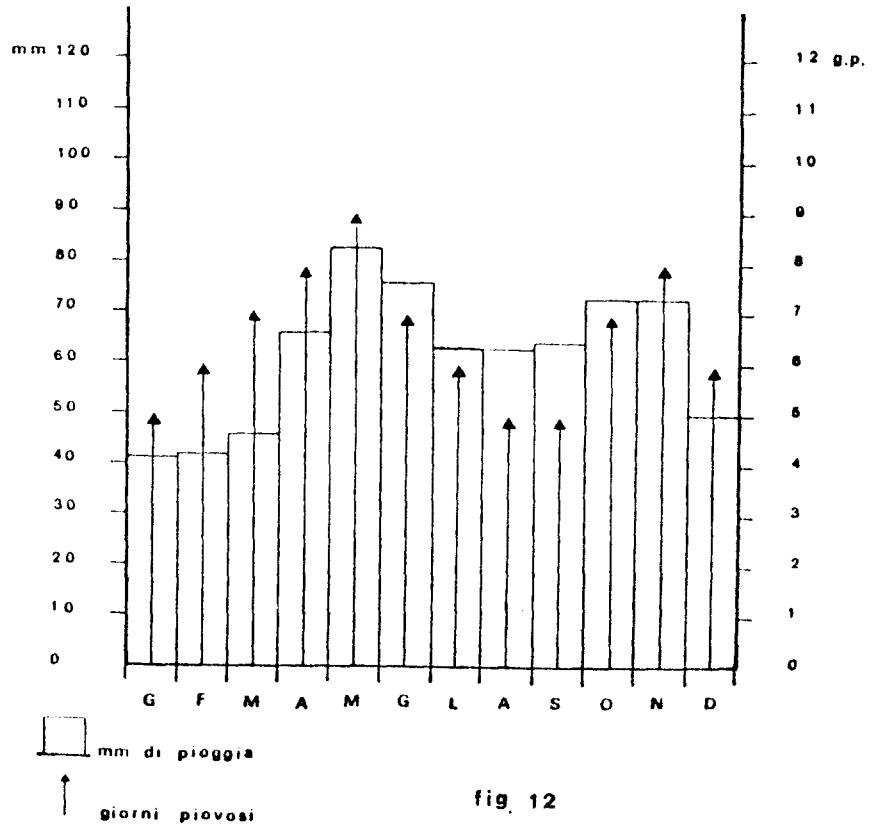


fig. 12

Stazione pluviometrica di MONZAMBANO

Periodo 1921–1974

cfr. [2]

CARTA DELLE ISOIETE MEDIE ANNUE

Stazioni di:

Castiglione delle stiviere (1921-1960)

Ceresara (1921-1960)

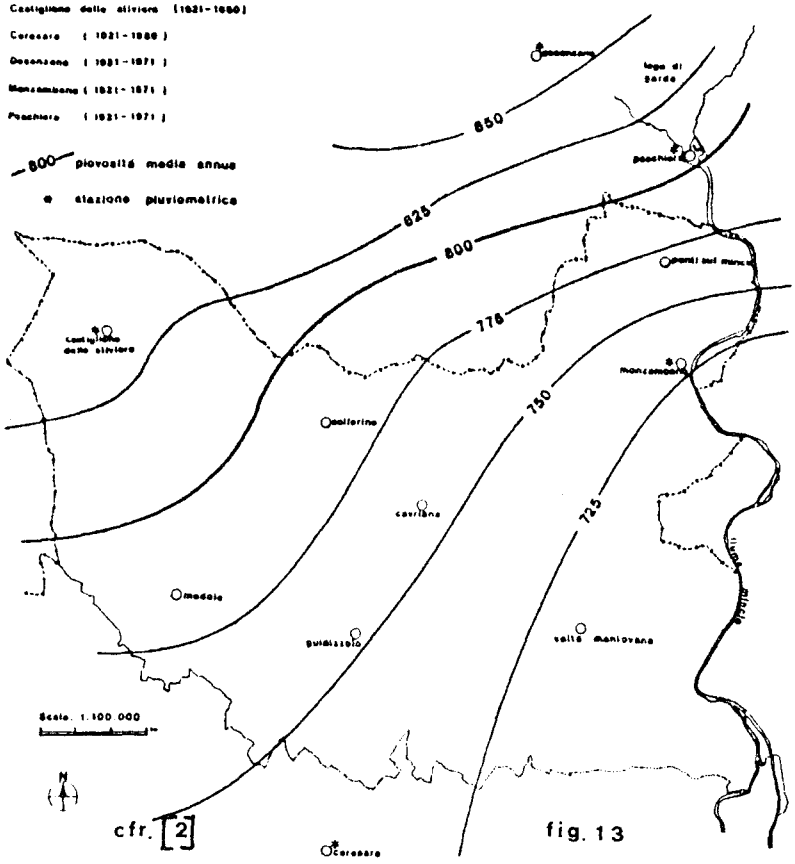
Desenzano (1921-1971)

Monzambano (1921-1971)

Peschiera (1921-1971)

800 piovosità media annua

stazione pluviometrica



cfr. [2]

fig. 13

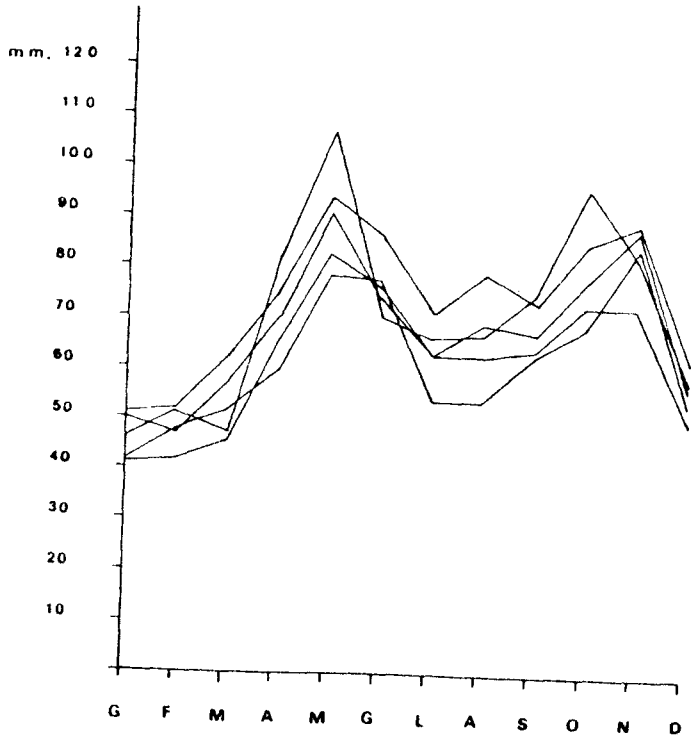


fig.14

Precipitazioni mensili medie cadute nelle stazioni pluviometriche di Desenzano, Peschiera, Castiglione delle Stiviere, Ceresara, Monzambano, nel periodo 1921 1970

cfr. [2]

Le oscillazioni della superficie freatica rispecchiano fedelmente e con sfasamento temporale praticamente nullo (dell'ordine delle 24 h) l'andamento delle precipitazioni ora descritto. Abbiamo pertanto che nel periodo in esame la falda freatica ha raggiunto la quota massima tra autunno ed inverno, con un massimo relativo all'inizio dell'estate. La quota minima è stata invece raggiunta a febbraio; un minimo secondario si colloca in luglio.

Pertanto il regime della falda freatica è da considerarsi in quest'area tipicamente prealpino nelle sue linee principali, essendo modellato sul regime delle precipitazioni locale.

Quanto sopra individua nelle infiltrazioni efficaci dovute all'apporto meteorico il principale meccanismo di alimentazione di queste falde. Inoltre indica che i materiali morenici s.s. che ospitano molte di queste falde sono dotati di una certa permeabilità, almeno sino ad una quota a cui la frazione più fine prevalente nel morenico di fondo inizia ad influenzare in maggior misura il grado stesso di permeabilità dei materiali.

Si può infine notare dalla tav. 6 che per alcuni pozzi,come il n° 43 ed il n° 57 , in corrispondenza ad un periodo di scarso o nullo apporto meteorico in giugno-luglio si ha un leggero innalzamento della superficie freatica,in contrasto con quanto detto innanzi:ciò è conseguenza di una notevole e prolungata attività irrigua locale. Le acque utilizzate per l'irrigazione,di varia provenienza (cfr.par.8),contribuiscono infatti,ove la natura del suolo lo consenta,alla rialimentazione delle falde freatiche.

6.1b Regime delle falde in pressione

In tav. 1 è riportata l'ubicazione dei pozzi attingenti alle falde in pressione osservati nel periodo considerato. Per il pozzo n° 97 si sono dovute interrompere le osservazioni dopo un periodo di 6 mesi circa,per cause indipendenti dalla volontà dell'operatore.

I valori delle oscillazioni della superficie piezometrica sono diagrammati in tav. 7 .

Si noti che le oscillazioni hanno un'ampiezza settimanale molto contenuta in tutti i pozzi,in media di

venti centimetri,mentre l'ampiezza di oscillazione annua è di circa 4 m.

Tutti i pozzi osservati presentano una buona uniformità di regime,che è caratterizzato da una sola fase di piena,che si protrae da ottobre a febbraio,e da un'unica fase di magra,da maggio ad agosto compreso. Si noti il singolare andamento di questi grafici, se confrontato con quello della pianura padano-veneta;subito evidente appare l'ampia persistenza delle fasi di magra e di piena,che purtuttavia manifestano in ben determinati periodi dell'anno una rapida inversione di tendenza. Un simile andamento testimonia di un processo di alimentazione estremamente graduale e costante,confermato dall'assenza di rapidi ed irregolari episodi di variazione che si innestino sul regolare andamento dell'idrogramma,come spesso avviene per lo stesso tipo di falde nella pianura veneta [3;14;15] .

Da quanto detto ora e dal raffronto diretto della tav. 7 con l'istogramma di tav. 6,appare chiaro che il regime della falda in pressione non ha nulla a che vedere con il regime delle precipitazioni descrit-

to a pag. 43e di conseguenza con il regime della falda freatica. Ciò è particolarmente evidente per le osservazioni relative ai mesi di novembre e dicembre,caratterizzati da scarso apporto meteorico:in questo periodo invece la falda in pressione era in fase di ricarica.

Ora,poichè ampiezza ed andamento delle oscillazioni della superficie piezometrica sono ricollegabili:

- alle modalità di alimentazione delle falde
- alle condizioni litostratigrafiche
- alla distanza dell'area di ricarica
- alla direzione dei deflussi

vediamo come questi fattori fanno risaltare una completa diversità tra il regime e le caratteristiche degli acquiferi in pressione gardensi e quelli della pianura padano-veneta. Questi infatti si individuano a partire dalla differenziazione delle falde freatiche in digitazioni laterali che ad un certo punto iniziano a mettere in pressione l'acqua (condizioni litostratigrafiche);di conseguenza gli acquiferi in pressione della media pianura dell'Adige,Brenta e Piave sono soggetti,sia pur indirettamente,alla medesima ali-

mentazione delle falde libere,a cui sono geneticamente ed idraulicamente legati,e di cui hanno pertanto il medesimo regime (modalità di alimentazione) [3;14; 15;35] .

Tutto ciò induce a ritenere improbabile o quanto meno molto ridotto un contributo alle falde in pressione dell'anfiteatro morenico da parte dei due fiumi principali,Chiese e Mincio.

I diagrammi relativi al pozzo n° 72 ed al pozzo n° 91 mostrano,in corrispondenza al periodo estivo,delle notevoli e rapide variazioni della superficie piezometrica:esse sono dovute all'influenza di una intensa attività di emungimento dalle falde in pressione nelle aree circostanti,a scopo irriguo.

Il pozzo n° 22,ubicato a poca distanza dal F.Chiese,al limite estremo dell'anfiteatro morenico,è caratterizzato da un regime nettamente sfasato rispetto a quello degli altri pozzi considerati;le fasi di piena e di magra si collocano infatti in autunno-inverno ed in primavera-estate rispettivamente. In fig. 15 questo regime viene confrontato con l'andamento delle portate del F.Chiese registrate alla stazione idrome-

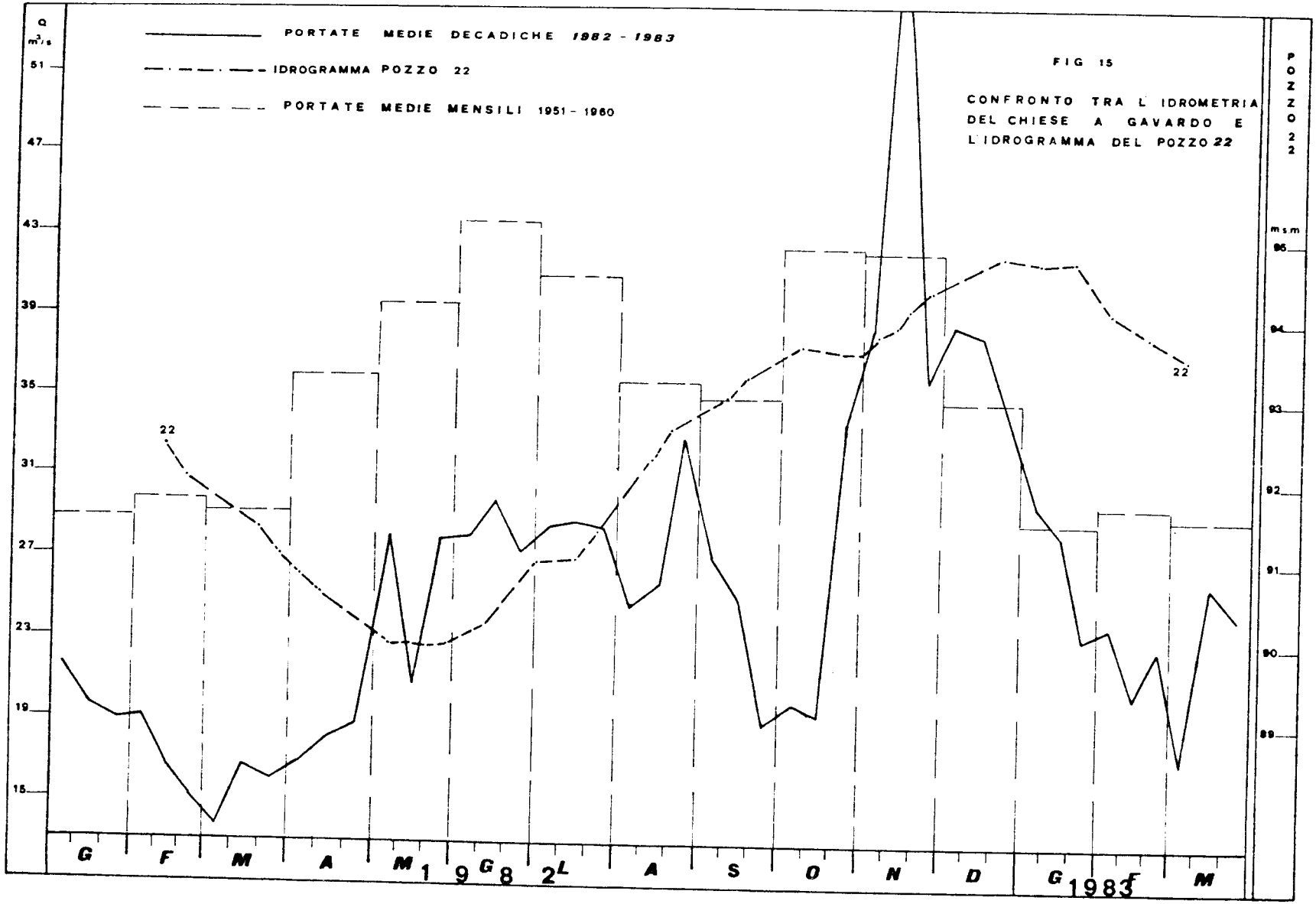


FIG 15

CONFRONTO TRA L' IDROMETRIA DEL CHIESE A GAVARDO E L'IDROGRAMMA DEL POZZO *22*

trica di Gavardo. In particolare, sono riportate in figura le portate idrometriche medie decadiche del fiume nel periodo di osservazione (gennaio 1982-marzo 1983), e le portate medie mensili nel decennio 1951--1960 .

Si può rilevare come non esista corrispondenza tra il regime tipicamente prealpino del Chiese, caratterizzato nel periodo di osservazione da due fasi di piena (in novembre la principale, in maggio-giugno la secondaria) e da due fasi di magra (in febbraio-marzo la più importante, in settembre-ottobre l'altra), ed il regime delle falde in pressione a cui attinge il pozzo n° 22 , che mostra un'unica fase di piena (dicembre-gennaio) e di magra (maggio-giugno).

D'altra parte, nell'idrogramma relativo al pozzo non si riscontra una evidente corrispondenza delle rapide e talora accentuate variazioni di portata che sono evidenziate dalla curva delle portate medie decadiche.

Si è constatato d'altro canto [14;15] che in alcune zone della pianura veneta le variazioni di portata dei fiumi con alveo disperdente sono immediatamente riscontrabili negli idrogrammi delle falde libere mo-

nostrato,rialimentate da questi corsi d'acqua. Anche nel caso delle falde in pressione delle stesse aree si è potuto verificare [14] una buona corrispondenza tra l'incremento piezometrico e quello dei deflussi in alveo,pur con una diversa evoluzione nel tempo del fenomeno,date le differenti modalità nel meccanismo di alimentazione (maggior distanza della zona di alimentazione,perdite di carico idraulico,ecc.).

Nel caso in esame si dovrà pertanto certamente escludere una connessione diretta tra gli acquiferi in pressione del pozzo n° 22 ed il tratto d'alveo compreso nell'area di ricerca.

I dati attualmente disponibili non consentono di prendere in considerazione la zona apicale del conoide del Chiese come possibile area di rialimentazione degli acquiferi profondi. In ogni caso è possibile constatare (fig.15) che,se tale connessione esiste,essa deve considerarsi nettamente subordinata ai meccanismi di alimentazione supposti per le falde confinate dello anfiteatro morenico.

Come ulteriore considerazione bisogna osservare che l'idrogramma del pozzo n° 22,pur se sfasato nel tempo,

mostra un andamento assai simile a quello degli altri pozzi tenuti sotto osservazione (cfr.tav. 7) . Considerando la posizione decentrata del pozzo in questione rispetto all'anfiteatro morenico e ricordando i rapporti stratigrafici intercorrenti tra questo e la pianura (si vedano i proff. 5 e 6),pare plausibile ammettere che il pozzo n° 22 subisca lo stesso processo di alimentazione degli altri,e che il relativo sfasamento temporale delle sue oscillazioni sia dovuto alla sua ubicazione ed alla presenza delle interdigitazioni tra materiali ghiaioso-sabbiosi degli acquiferi dell'anfiteatro ed i materiali pelitici della pianura.

6 .2 DEFLUSSO DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Le direzioni di deflusso delle acque sotterranee sono state definite ricostruendo l'andamento della superficie piezometrica per mezzo di carte ad isofreatiche per la falda freatica e di carte ad isopieziche per la falda in pressione (tavv. 8a ed 8b) .
Le carte sono state costruite a partire dai dati di profondità dei livelli di falda raccolti durante una campagna di misure effettuata dal 28/02/83 al 03/03/83; in tale periodo la falda in pressione aveva appena superato il colmo di piena (par. 6.1b). Purtroppo non è stato possibile misurare i livelli di falda di tutti i pozzi censiti,ed alcuni di quelli misurati hanno presentato valori anomali,attingendo in più falde,sia libere che in pressione. I livelli di falda sono stati misurati su 41 pozzi freatici e su 42 pozzi attingenti a falde in pressione. I valori di quota assoluta dei pozzi utilizzati per la stesura delle carte sono stati ricavati da carte tecniche comunali alla scala 1 : 5000 e 1 : 2000 per le aree di Castiglione,Desenzano,Lonato, Pozzolengo;da tavolette I.G.M. 1 / 25.000 per le restanti aree.

6.2a Deflusso delle falde freatiche

Nell'area di studio,come si è visto,la falda freatica è data da un insieme di piccole falde sospese e di lenti freatiche,di limitata estensione. Poichè non è stato possibile per tale motivo correlare tutti i dati raccolti nella campagna di misura,la carta ad isofreatiche di tav. 8a evidenzia chiaramente la indipendenza di queste falde le une dalle altre.
Si hanno più direzioni di deflusso che paiono strettamente collegate all'andamento dei bacini superficiali. Per esempio,in alcine zone è evidente una direzione di deflusso dal versante nord della cerchia morenica più interna verso il Garda;altrove dai versanti dei cordoni morenici verso le interposte vallecole:è facilmente presumibile che in quest'ultima situazione i corsi d'acqua minori di cui al par. 4 esercitino una azione drenante sulle falde freatiche.
Alcune delle falde libere hanno una direzione di deflusso verso l'alta pianura veronese e mantovana.
Ciò,data la scarsa potenzialità di queste falde,dovuta anche alla piccola estensione dei loro

bacini di alimentazione,non dovrebbe costituire un fatto rilevante dal punto di vista della ricarica e del bilancio idrologico delle falde libere della pianura;tuttavia è significativo,in quanto comporta il mescolamento di due diverse famiglie di acque ed una progressiva variazione di chimismo al passaggio tra anfiteatro morenico e pianura. Fenomeno,questo,che è stato riscontrato ai limiti dell'anfiteatro morenico gardense durante indagini idrochimiche condotte nella pianura veronese [5] .

La cadente piezometrica delle falde freatiche dell'anfiteatro gardense,sempre per l'influsso delle caratteristiche topografiche,è estremamente variabile : dal 3 % della falda presso Lonato allo 0.46 % della falda nella piana tra Sirmione e Peschiera, allo 0.17 % della falda presso Pozzolengo.
Questa situazione idrogeologica riguardante la falda freatica è circoscritta all'anfiteatro morenico:infatti da ricerche già svolte [3;5] e da indagini ancora in corso (‡) risulta che nella adiacente pia-

(‡) : Carlo Damiani:Tesi di laurea in preparazione presso l'Istituto di Geologia dell'Univ.di Padova

na mantovana e veronese la falda libera è unica e con direzioni di deflusso tra loro ben correlabili.
Una più dettagliata definizione delle direzioni di deflusso delle varie falde freatiche presenti nella zona di studio richiederebbe una capillare campagna di misura, previa l'individuazione di un sufficiente numero di pozzi, se esistenti ; una tale operazione avrebbe tuttavia un riscontro pratico molto relativo, per la scarsa importanza ricoperta da tali falde nell'economia idrica della regione.

6.2b Deflusso delle falde in pressione

La carta ad isopiezometriche di tav. 8b, ad equidistanza 1 m, evidenzia l'esistenza di due diverse strutture di deflusso, l'una occidentale, l'altra orientale, separate dal disturbo di cui al par.5 .
Nella zona occidentale la quota della piezometrica decresce con regolarità secondo una direzione principale di deflusso NW-SE; i valori della quota assoluta si mantengono sempre di almeno una ventina di m al di sopra della quota del lago di Garda (65 m.s.m.) .
Secondo la direzione NW-SE si individua un asse di

alimentazione principale. La cadente piezometrica,ricavata dalla carta stessa,è dello 0.18 % nel tratto Desenzano-Lonato,sale piuttosto bruscamente nella zona più centrale dell'anfiteatro,ad un valore dello 0.5 %, mentre nella zona di pianura tra Montichiari e Castiglione delle Stiviere si aggira su valori dello 0.13 %. Si tratta di valori piuttosto elevati,nettamente superiori a quelli che si riscontrano in genere nelle aree di pianura,che forse potrebbero trovare spiegazione nella breve distanza dell'area di ricarica delle falde. L'andamento delle isolinee in base ai dati disponibili non pare condizionato dalla presenza del F.Chiese, il che porterebbe ad escludere un collegamento delle falde in pressione con lo stesso,in accordo con quanto detto al par. 6.1b.

Nella parte orientale dell'anfiteatro la struttura di deflusso è nettamente diversa:si individua un marcato asse di drenaggio da N verso S , che sembra indicare una diretta relazione tra il Garda e le falde in pressione,la cui superficie piezometrica peraltro si mantiene in quest'area costantemente al di sotto della quota

del lago. A Sud di Pozzolengo l'asse di drenaggio devia leggermente verso Est.

Nella zona centrale di questa parte dell'anfiteatro il gradiente idraulico risulta dello 0.13 % . Anche in questa zona il corso d'acqua principale presente, il Mincio, non mostra particolari situazioni di rapporto con la struttura acquifera sotterranea.

6.3 ALIMENTAZIONE DELLE FALDE

La definizione dei processi di alimentazione di un corpo idrico costituisce uno degli aspetti più importanti di uno studio idrogeologico,in quanto la conoscenza dei meccanismi di ricarica dovrebbe consentire tra l'altro la formulazione di un piano di sfruttamento razionale e la prevenzione di eventuali inquinamenti.

Per ciò che riguarda l'anfiteatro morenico gardesano,che non è mai stato studiato organicamente sotto questo punto di vista,si è già individuato (cfr. par. 6.1a) nel processo di infiltrazione efficace degli afflussi meteorici il principale meccanismo di ricarica della falda freatica.

Per la falda in pressione,che abbiamo visto essere un corpo idrico di tipo multistrato,la definizione delle condizioni di ricarica costituisce un problema più complesso,soprattutto per la suddivisione,a più riprese sottolineata,in due subunità della struttura principale. Gli elementi di cui qui si dispone per avere indicazioni sulle modalità di ricarica delle fal-

de in pressione sono costituiti principalmente dalla carta dei deflussi delle acque sotterranee e dalle osservazioni sul regime delle falde,nonchè da alcune pratiche considerazioni.

Tra queste ultime,la principale è relativa alla grande potenzialità di queste falde,verificata mediante prove di pompaggio ed evidenziata dall'intenso sfruttamento cui esse sono soggette:l'area di rialimentazione di tali falde deve conseguentemente essere non solo molto prossima,ma anche avere dimensioni tali da poter fornire un adeguato supporto di ricarica;questo inoltre,da quanto detto nel par. 6.1b a proposito dell'andamento degli idrogrammi delle falde,deve essere caratterizzato da costanza e gradualità nel tempo,il che porterebbe ad escludere come eventuale fattore di rialimentazione l'apporto meteorico,i cui afflussi efficaci giungono in modo puntuale e frazionato.

Nello stesso paragrafo si è altresì mostrato come non sussista alcuna correlazione tra il regime del F.Chiese e quello delle falde in pressione,e come in ogni caso l'idrogramma relativo ai vari pozzi misurati non mostri le tipiche caratteristiche degli idrogrammi di

falde alimentate da deflussi di subalveo.
Trattando nel par.6.2b del deflusso delle falde in pressione si è inoltre visto come l'andamento delle isolinee non sembra manifestare una connessione evidente tra queste ed i fiumi Chiese e Mincio.
In base a tutti questi elementi di giudizio,che attendono certo un approfondimento ulteriore,si è portati quantomeno a considerare molto ridotta una eventuale influenza degli apporti meteorici e dei corsi d'acqua sulla ricarica degli acquiferi in pressione gardensi.

Resta da considerare il principale corpo idrico dell'area in esame,il lago di Garda,a cui a più riprese ci si è indirettamente richiamati nei paragrafi precedenti.
Esaminando le sezioni stratigrafiche del sottosuolo descritte nel par. 5 ,si può osservare che alcuni dei più importanti livelli ghiaioso-sabbiosi acquiferi si spingono sino al lago stesso. Ciò è particolarmente evidente per i livelli B e C dei proff. 8 e 9 , nella parte orientale dell'anfiteatro morenico.
Proprio per questa zona,il collegamento tra acquiferi in pressione e lago è chiaramente indicato anche dalla

carta dei deflussi di tav. 8b , in cui compare un marcato asse di drenaggio che pare prendere origine direttamente dal bacino benacense.

Per la zona occidentale dell'anfiteatro morenico la carta dei deflussi non sembra indicare un'altrettanto chiara connessione con il lago, sebbene anche per quest'area i profili litostratigrafici non evidenzino alcuna soluzione di continuità tra orizzonti acquiferi ed il Garda.

Per avere ulteriori informazioni si è cercato di confrontare il regime idrometrico del lago con quello delle falde in pressione. A questo scopo si sono riportate in tav. 7 le oscillazioni idrometriche del Garda(in cm sullo zero idrometrico)registrate per il periodo considerato alla stazione idrometrica di Peschiera.

L'idrogramma del Garda relativo al periodo in esame può essere comparato con la fig. 16, che riporta le medie delle quote idrometriche massime, medie e minime mensili per il ventennio 1951-1970 allo stesso idrometro; ne risulta uno sfasamento temporale della curva relativa al periodo considerato rispetto a quella dei valori medi mensili del detto ventennio,

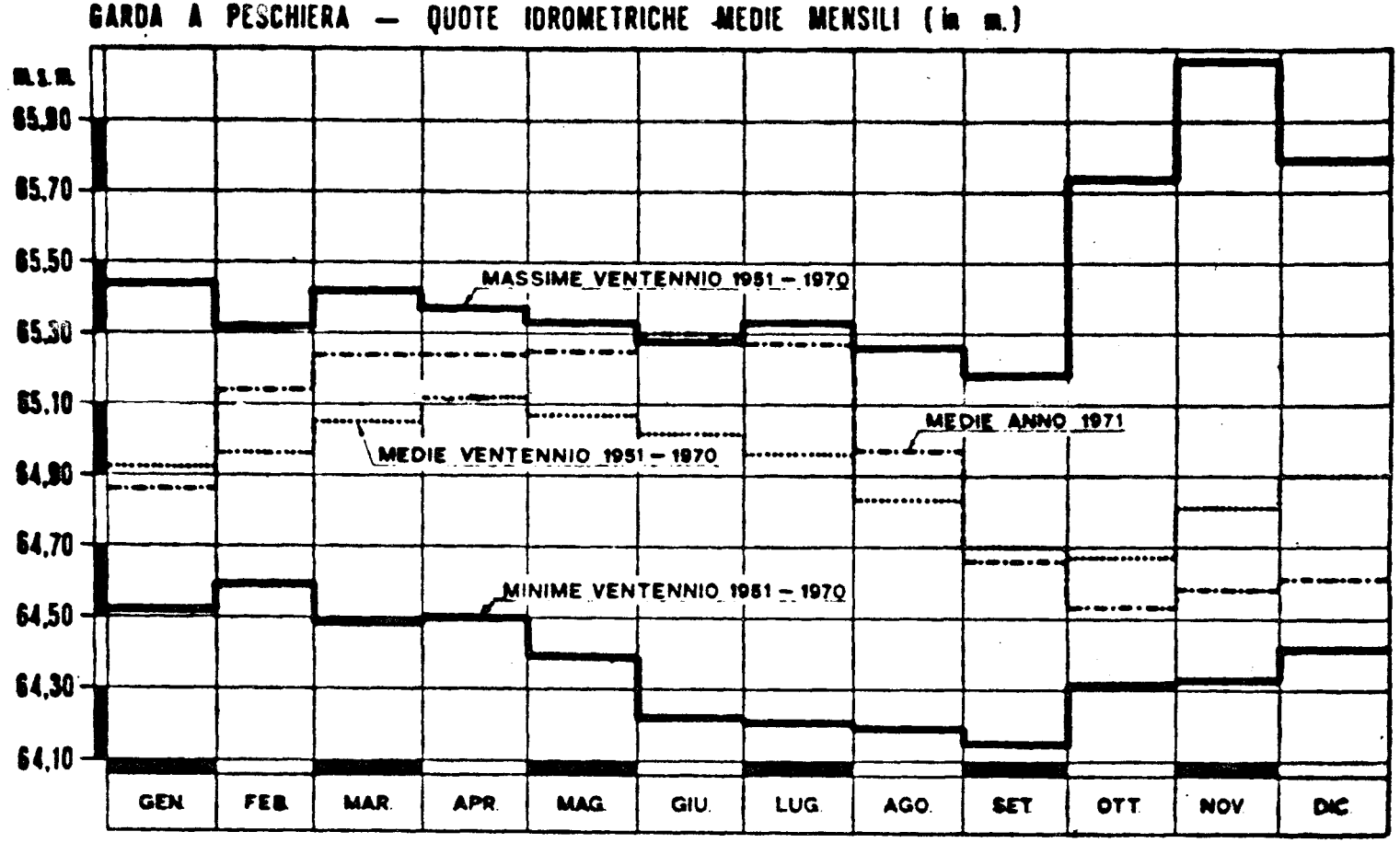

GARDA A PESCHIERA — QUOTE IDROMETRICHE MEDIE MENSILI (in m.)
m.s.m.
65,90
65,70
65,50
65,30
65,10
64,90
64,70
64,50
64,30
64,10
MASSIME VENTENNIO 1951 – 1970
MEDIE ANNO 1971
MEDIE VENTENNIO 1951 – 1970
MINIME VENTENNIO 1951 – 1970
GEN.
FEB.
MAR.
APR.
MAG.
GIU.
LUG.
AGO.
SET.
OTT.
NOV
DIC.

Fig. 16

cfr. [40]

mentre è pressochè identica a quella dei valori minimi medi mensili. Si trae da ciò che il periodo di osservazione è coinciso con un periodo di magra relativa del Garda.

Per comparazione dell'idrogramma del lago con la curva delle oscillazioni della piezometrica delle falde in pressione per il medesimo periodo, si può osservare come il regime del lago di Garda sia sostanzialmente uguale a quello delle falde, senza apprezzabile sfasamento temporale. Infatti anche per il Garda si ha un'unica fase di colmo che nel periodo considerato si è protratta da novembre a marzo, ed una fase di magra nella stagione estiva, con un andamento molto regolare e graduale dell'idrogramma.

Questa identità di regime è un elemento fortemente indicativo a sostegno dell'ipotesi di collegamento tra acquiferi e bacino del Garda.

Quanto sopra esposto è un'ulteriore conferma della osservata connessione degli acquiferi della zona morenica orientale con il Garda. Per quanto concerne gli acquiferi della zona occidentale, essi sono caratterizzati dal medesimo regime: di conseguenza non si

vede come si possa escluderli dallo stesso processo di ricarica;si ricorda inoltre quanto si è già discusso su questa subunità idrogeologica a proposito delle sezioni litostratigrafiche,della potenzialità della falda,dell'indipendenza dal F.Chiese dei deflussi sotterranei. Tuttavia la scarsa o nulla correlabilità dei deflussi della zona occidentale con quelli della zona orientale e la costante sopraelevazione della piezometrica rispetto al livello del Garda rendono più complessa la questione;è comunque chiaro che la definizione dei meccanismi di rialimentazione della falda multistrato nella sua parte occidentale richiede un ulteriore studio,da condursi nella parte nordoccidentale dell'anfiteatro morenico:dalla zona distale della conoide del Chiese sino alla zona degli affioramenti in roccia di Moniga-Manerba.

Il riconoscimento del fatto che il Garda ha parte attiva nella rialimentazione delle falde in pressione (sospettato già da alcuni autori [5;27]),perlomeno nella parte orientale dei suoi margini meridionali,induce ad una serie di interessanti considerazioni :

- data la grande potenzialità che si è accertata per queste falde,le dispersioni dall'incile del lago hanno un valore certamente notevole. In conseguenza di ciò andrebbero rivisti i bilanci idrologici che sinora si sono effettuati relativamente al Garda stesso. In tali bilanci infatti il fenomeno della dispersione dal lago non è stato considerato [33] o è stato ritenuto ininfluente [17] . In base ai dati a disposizione,si accertava [33] un deficit degli afflussi nel bilancio idrologico del Garda pari a 7 m^3/ sec. : si ipotizzavano pertanto,per riequilibrare il bilancio,"fenomeni di infiltrazione e circolazione subalvea a monte del lago",dai monti circostanti. Il valore di 7 m^3/sec appare ora,per quanto sopra,sottostimato e l'ipotizzato afflusso al lago dal sottosuolo in altre parti del bacino,quanto mai verosimile,assume importanza ancora maggiore.

- viene indirettamente indicata la presenza di correnti nel lago stesso,correnti che impediscono l'intasamento,da parte delle particelle in sospensione nell'acqua,dei meati attraverso cui avviene l'alimentazione degli acquiferi. Proprio questo supposto

fenomeno di intasamento aveva in passato fatto ritenere [17] del tutto trascurabili i fenomeni di dispersione al bordo meridionale del lago.

- data la verificata connessione tra acquiferi dell'anfiteatro morenico ed acquiferi dell'alta pianura mantovana, il lago di Garda entra a far parte, in qualità di fattore alimentante, di unità idrogeologiche ben più vaste dell'anfiteatro morenico stesso.

E probabile, anche se resta da accertare, che una simile situazione si ripeta anche nella parte veronese della morena del Garda, nel tratto, qui non considerato, tra fiume Mincio e fiume Adige.

7. DETERMINAZIONE DI ALCUNI PARAMETRI IDRAULICI DELLE FALDE IN PRESSIONE MEDIANTE PROVE DI POMPAGGIO

I tests di pompaggio costituiscono uno degli strumenti più efficaci per la valutazione delle proprietà idrauliche degli acquiferi. Essi infatti forniscono risultati che sono arealmente rappresentativi, contrariamente alle prove di laboratorio su campioni, la cui validità oltre ad essere notevolmente condizionata dal disturbo provocato sullo stato di aggregazione, è limitata al punto di prelievo dei campioni stessi.

Mediante prove di pompaggio ed a seconda del metodo di analisi adottato è possibile stabilire il valore dei parametri idraulici di un acquifero: coefficiente di permeabilità k, trasmissività kD (o T), coefficiente di immagazzinamento S, raggio di azione del pompaggio.

Inoltre dai dati ottenuti si possono avere informa-

zione oggettiva di campagna o nelle modalità di esecuzione dei tests.

Per questo motivo si è ritenuto opportuno effettuare le analisi delle prove, eseguite in due diverse località, secondo più modelli, la cui formulazione analitica viene data qui di seguito, con un duplice scopo:

- disporre di un controllo incrociato dei risultati
- verificare le condizioni di validità dei singoli modelli e conseguentemente estrapolarne il significato in relazione alle caratteristiche dell'acquifero.

7.1 Tests di pompaggio : introduzione analitica

Modelli di regime stazionario

Questi modelli sono basati sulle assunzioni adottate da DUPUIT :

- il terreno è litologicamente omogeneo
- l'acqua ed il terreno sono incompressibili
- le superfici equipotenziali di carico idraulico possono essere assimilate a cilindri retti a generatrici verticali, ovvero la superficie di abbassamento è poco inclinata sulla verticale

- la portata emunta viene prelevata all'esterno della zona di azione del pompaggio, cioè si può agire come se la falda fosse alimentata da un fossato circolare con centro nel pozzo di pompaggio e di raggio pari al raggio di azione R
- la superficie di abbassamento non subisce discontinuità passando dal terreno al pozzo
- il flusso verso il pozzo è stazionario

In tali condizioni la velocità radiale di flusso lungo la linea E, traccia della superficie equipotenziale definita da un valore costante del carico idraulico,

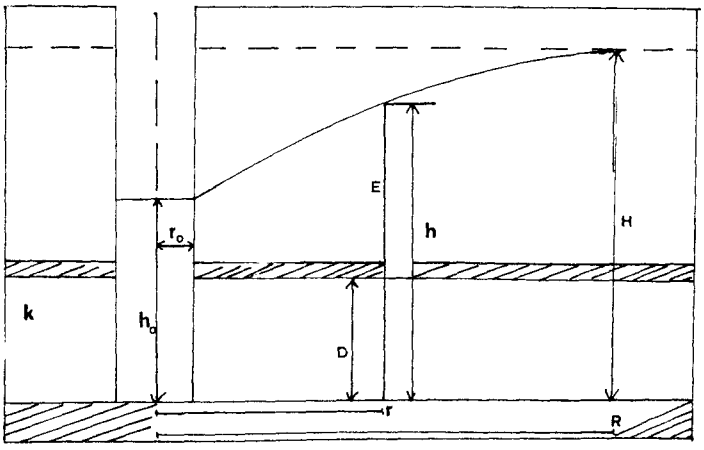


Fig. 17 : simbolismo utilizzato nella formula di Dupuit applicata alle falde in pressione (da [1], mod.).

è :

$$v = ki = \frac{dh}{dr} \qquad (1)$$

essendo h il carico idraulico ad una distanza r dall'asse del pozzo dopo un tempo t dall'inizio del pompaggio, k il coefficiente di permeabilità, i il gradiente idraulico.

La portata emunta è allora :

$$Q = 2\pi r k D \frac{dh}{dr} \qquad (2)$$

ove D rappresenta lo spessore della falda.

Considerando solo il caso di una falda in pressione, essendo le prove limitate a falde in pressione, avremo D = cost . Integrando la (2) :

$$Q \int_{r_0}^{R} \frac{dr}{r} = 2\pi k D \int_{h_0}^{H} dh$$

$$Q = \frac{2\pi k D (H - h_0)}{\ln \frac{R}{r_0}} = \frac{2{,}72\, k D (H - h_0)}{\log \frac{R}{r_0}} \qquad (3)$$

Metodo di THIEM (I)

Partendo dall'equazione (2), THIEM mostra che utilizzando due o più piezometri è possibile determinare la trasmissività di un acquifero, soddisfatte che siano le assunzioni poste da **DUPUIT** .

Infattila (2) si può scrivere:

$$Q = 2\pi kD \; r \; tg\,\alpha \qquad (4)$$

ove $$tg\,\alpha = \frac{dh}{dr} \qquad (5)$$

e rappresenta la pendenza della falda.

Tale pendenza può essere determinata misurando i livelli piezometrici entro due pozzi di osservazione .

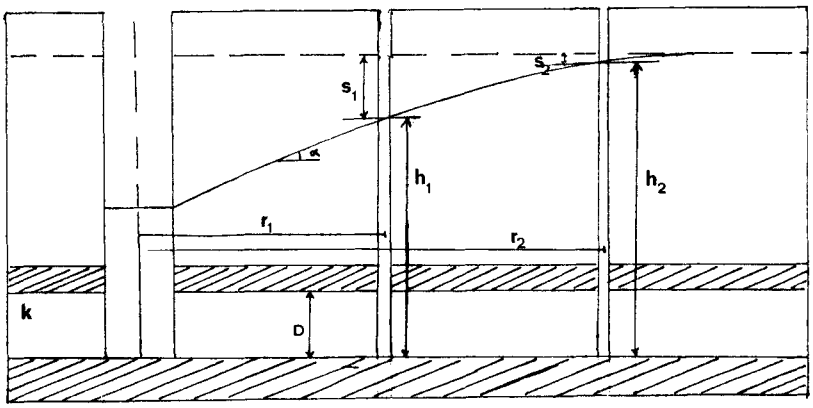


Fig. 18 : simbolismo utilizzato nella formula di THIEM

Siano S_1 ed S_2 gli abbassamenti a raggiunto flusso costante in ogni pozzo di osservazione; avremo:

$$tg\,\alpha = \frac{S_1 - S_2}{r_2 - r_1} \qquad (6)$$

Per un primo regime permanente :

$$Q = 2\pi\, kD\, r_1\, tg\,\alpha \qquad (7)$$

e per un pompaggio più spinto che crei un secondo regime permanente :

$$Q = 2\pi\, kD\, r_1'\, tg\,\alpha' \qquad (7')$$

Risolvendo il sistema formato dalle eqq. (6),(7),(7') si ottiene [7] :

$$Q = 2\pi\, kD\, \frac{S_1 - S_2}{\ln r_2/r_1} \qquad (8)$$

da cui :

$$kD = \frac{Q}{2\pi(S_1 - S_2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \qquad (9)$$

ricavando così la trasmissività dell'acquifero, che verrà espressa in m^2/giorno.

Metodo di THIEM (II)

Una seconda procedura proposta dal THIEM consiste nel diagrammare su scala semilogaritmica, sempre a raggiunto flusso costante, gli abbassamenti di ciascun piezometro contro la distanza dal pozzo di pompaggio, ponendo la distanza in scala logaritmica.
Il coefficiente angolare della retta interpolante, $s_1 - s_2 \,/\, \ln \frac{r_2}{r_1}$, è pari all'abbassamento massimo Δs_m valutato su un ciclo logaritmico di r .
Si ha allora :

$$kD = \frac{Q}{2\pi \, \Delta s_m} \cdot 2{,}30 \qquad (10)$$

ove il fattore 2.30 permette l'utilizzazione dei logaritmi decimali delle carte logaritmiche.
Il metodo viene applicato nelle figg. 25 e 31

Modelli di regime transitorio

Metodo di THEIS

Diversamente da DUPUIT, THEIS [37] , partendo dalla analogia con la propagazione del flusso di calore,

propone un'analisi secondo cui l'abbassamento della superficie piezometrica di una falda, sussistendo una portata di pompaggio costante Q si propaga indefinitamente con velocità decrescente. Per una falda in pressione valgono le seguenti condizioni :

- è applicabile la legge di Darcy
- l'acquifero è in pressione
- il flusso al pozzo è in regime transitorio
- la portata emunta è istantaneamente asportata con abbassamento della superficie piezometrica, ed è costante
- il diametro del pozzo è molto piccolo, ovvero non si ha immagazzinamento di acqua nel pozzo stesso
- il terreno è omogeneo
- le superfici equipotenziali possono essere assimilate a cilindri retti a generatrici verticali
- non vi è rialimentazione della falda .

Prima di proseguire con la formulazione proposta da THEIS, è necessario introdurre il concetto di coefficiente di immagazzinamento [1] .

Il coefficiente di immagazzinamento S (storage

coefficient) caratterizza l'attitudine del terreno a liberare l'acqua, e dipende dall'elasticità del materiale acquifero e del fluido [22] .

Un prisma di terreno di sezione unitaria e spessore pari a quello della falda, libera un volume di acqua ΔV quando la superficie piezometrica si abbassa di un livello Δh . Il coefficiente di immagazzinamento S è definito dalla relazione :

$$S = -\frac{d\sigma}{dh} \qquad (11)$$

Nel caso di una falda libera, essendo :

$$d\sigma = -dh \cdot n_e \qquad (12)$$

ove n_e è la porosità efficace del terreno, pari al rapporto volume di acqua libera / volume del terreno ; si ha :

$$S = n_e \qquad (13)$$

Nel caso di falda imprigionata il volume di acqua liberata risulta dalla somma di dv_1 dato dalla decompressione dell'acqua e di dv_2 che corrisponde alla dimi-

nuzione dei vuoti del terreno, cioè al costipamento conseguente al pompaggio.

Si ha :

$$\frac{d\sigma_1}{n_e \cdot D} = -\beta\, du \qquad (14)$$

ove:

D : spessore dell'acquifero

u : pressione dell'acqua

β : coefficiente di compressibilità dell'acqua

La (14), considerando il peso di volume γ_w dell'acqua, porta alla :

$$\frac{d\sigma_1}{n_e \cdot D} = -\beta\, \gamma_w\, dh \qquad (15)$$

Per il costipamento :

$$\frac{d\sigma_2}{D} = -m_v\, du \qquad (16)$$

con m_v coefficiente di compressibilità verticale del terreno. La (16) si può scrivere :

$$\frac{d\sigma_2}{D} = -m_v\, \gamma_w\, dh \qquad (17)$$

Poichè :

$$S = d\sigma_1 + d\sigma_2 \qquad (18)$$

dalla (15) e dalla (17) si ha :

$$S = D \gamma_w \left(n_e \beta + m_v \right) \qquad (19)$$

Nei terreni in genere $\beta \ll m_v$ e viene trascurato, per cui è possibile scrivere:

$$S = D \gamma_w m_v \qquad (20)$$

Per le falde in pressione in genere S varia da 10^{-4} a 10^{-6} ;è adimensionale.

I modelli di flusso non costante permettono di introdurre nell'analisi il fattore tempo ed il coefficiente di immagazzinamento.

Ritornando ora alle condizioni poste inizialmente, abbiamo che la differenza tra i volumi di acqua fluenti attraverso le equipotenziali E_r ed E_{r+dr} (si veda la fig. 19) nel tempo dt è data da :

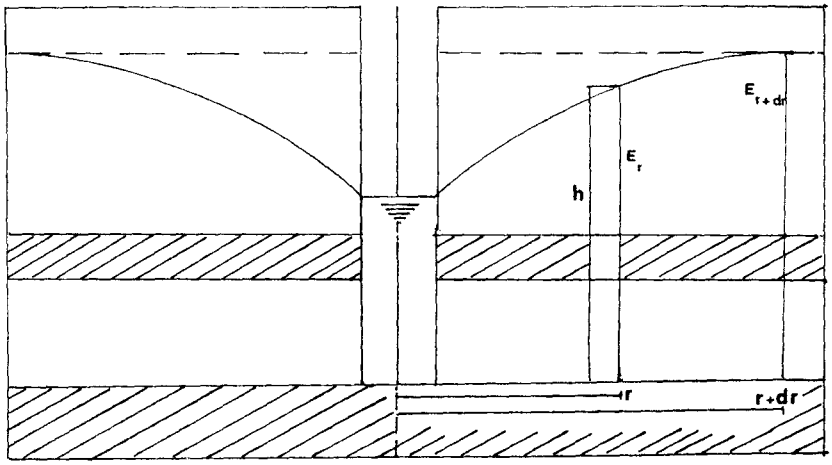


Fig. 19 :simbolismo utilizzato nella formulazione del metodo di THEIS

$$- \frac{\partial}{\partial r}\left(2\pi r k D \frac{\partial h}{\partial r}\right) dr \cdot dt \qquad (21)$$

Tale differenza è pari al volume di acqua liberato dall'abbassamento della superficie piezometrica nel tempo dt ,cioè :

$$- 2\pi r\, dr\, S \frac{\partial h}{\partial t} dt \qquad (22)$$

ove S rappresenta il coefficiente di immagazzinamento. Dall'eguaglianza tra la (21) e la (22) :

$$k \frac{\partial}{\partial r}\left(r D \frac{\partial h}{\partial r}\right) = S r \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (23)$$

che si può scrivere :

$$k\left(D \frac{\partial h}{\partial r} + r \frac{\partial h}{\partial r} \frac{\partial D}{\partial r} + r D \frac{\partial^2 h}{\partial r^2}\right) = S r \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (24)$$

Nel caso,come è il nostro,di acquifero imprigionato:

$$\frac{\partial D}{\partial r} = 0$$

e la (24) diviene :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{kD} \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (25)$$

mentre nel caso di falda libera,

$$\frac{\partial D}{\partial r} = \frac{\partial h}{\partial r}$$

e si ha :

$$k\left[D\frac{\partial h}{\partial r}+\pi\left(\frac{\partial h}{\partial r}\right)^2+\pi D\,\frac{\partial^2 h}{\partial r^2}\right]=S\,\pi\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (26)$$

Quando la superficie libera è poco inclinata sull'orizzontale il termine $(\partial h/\partial r)^2$ è trascurabile e la (26) diviene uguale alla (25), valida per le falde imprigionate.

L'integrazione della (25) porta [37] ad una espressione dell'abbassamento :

$$s = H - h = \frac{Q}{4\pi kD}\,W(u) \qquad (27)$$

con :

$$W(u) = \int_u^{+\infty}\frac{e^{-u}}{u}\,du \qquad (28)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4kD\,t} \qquad (29)$$

L'integrale esponenziale W(u) può essere espresso mediante uno sviluppo in serie [37] :

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2\cdot 2!} + \frac{u^3}{3\cdot 3!} - \ldots \qquad (30)$$

e viene indicato come "Theis well function".

I valori di W(u) al variare di u sono general-

mente tabulati (Appendice II)

Il metodo di analisi dei dati di pompaggio dovuto a THEIS è appunto basato sull'eq. (27)

Si procede preparando una cosiddetta "type curve" della "Theis well function" su carta doppio logaritmica, diagrammando i valori di W(u) contro i valori di u . Spesso si adotta, per convenienza, una "reversed type curve", che riporta i valori di W(u) contro 1/u . Tali curve sono riportate in tav.9 .

Un'altra carta doppio logaritmica dello stesso modulo viene utilizzata per diagrammare i valori degli abbassamenti s registrati ai vari piezometri contro i valori del tempo (dall'inizio del pompaggio) sul quadrato della distanza, t/r^2 .

Si traccia poi la curva interpolante tali valori: se la portata di emungimento è costante, tale curva avrà un andamento simile a quello W(u) - u . A questo diagramma viene sovrapposta la "type curve", mantenendo paralleli gli assi coordinati, e viene localizzata la posizione di migliore sovrapposizione delle due curve. Scelto infine un punto arbitrario nell'area di sovrapposizione dei due diagrammi, si determinano le coordi-

nate corrispondenti W(u), 1/u , t/r^2 .

Sostituendo gli opportuni valori prima nella (27) e poi nella (29) , si ottengono rispettivamente la trasmissività kD ed il coefficiente di immagazzinamento S .

Come esempio di applicazione del metodo si osservino le figg. 26 e 32 .

Metodo di JACOB (T)

Il modello proposto da JACOB [24] prende le mosse dall'eq. (27) suggerita da THEIS, che, mediante espansione in serie dell'integrale W(u), si può scrivere :

$$s = \left[\frac{Q}{4\pi kD}\left(-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2\cdot 2!} + \frac{u^3}{3\cdot 3!} - \dots\right]\right. \qquad (31)$$

Dalla (29) si nota che al decrescere di u aumenta il tempo di pompaggio t . Pertanto per grandi valori di t o per piccoli valori di r , i termini dell'espressione seriale oltre ln u possono essere trascurati, e la (31) diviene :

$$s = \frac{Q}{4\pi kD}\left(-0.5772 - \ln\frac{r^2 S}{4kDt}\right) \qquad (32)$$

che si può scrivere :

$$s = \frac{2.30\ Q}{4\pi kD} \log \frac{2.25\ kD\ t}{r^2 S} \qquad (33)$$

In base a quanto detto, per la validità del metodo devono essere osservate tutte le condizioni poste nella sua analisi dal THEIS; inoltre deve essere soddisfatta la condizione (condizione di approssimazione logaritmica) $u < 0.01$.

Operativamente, si diagrammano su carta semilogaritmica gli abbassamenti s registrati ai vari piezometri contro il tempo dall'inizio del pompaggio: i punti si disporranno lungo una retta che interseca l'asse delle ascisse in un punto di coordinate $s = 0$ e $t = t_o$; sostituendo tali valori nella (33) si ottiene :

$$\frac{2.30\ Q}{4\pi kD} \log \frac{2.25\ kD\ t_o}{r^2 S} = 0 \qquad (34)$$

e poichè la pendenza della retta è :

$$\frac{2.30\ Q}{4\pi kD} \neq 0$$

deve essere :

$$\frac{2.25\ kD\ t_o}{r^2 S} = 1$$

cioè :

$$S = \frac{2.25\, kD\, t_o}{r^2} \qquad (35)$$

Considerando un intervallo di tempo pari ad un ciclo logaritmico, si calcola l'abbassamento Δs_m relativo.

Δs_m rappresenta la pendenza della retta; pertanto:

$$kD = \frac{2.30\, Q}{4\pi\, \Delta s_m} \qquad (36)$$

Ricavati quindi graficamente Δs_m e t_o, si possono ottenere kD ed S applicando la (36) e la (35) rispettivamente.

I valori ottenuti vanno poi verificati nella (29) per la condizione $u < 0.01$

Metodo di JACOB (II)

Su scala semilogaritmica si diagrammano gli abbassamenti s contro la distanza dei piezometri dal pozzo di pompaggio, r, (r in scala logaritmica) per un tempo t costante. Si traccia una retta interpolante che viene estesa sino ad intersecare l'asse delle ascisse nel punto di coordinate $s = 0$, $r = r_o$.

r_o rappresenta il raggio di influenza del pompaggio

al momento scelto. Per la medesima logica di ragionamento della procedura I si ha :

$$kD = \frac{2.30\ Q}{2\pi\ \Delta s_m} \qquad (37)$$

e

$$S = \frac{2.25\ kD\ t}{r_o^2} \qquad (38)$$

I valori di r_o e Δs_m sono ricavati graficamente. L'operazione va ripetuta per diversi valori di t :i valori ricavati di kD e di S dovrebbero essere tra loro simili:si adotta altrimenti un valor medio.

Esempio di applicazione del metodo in **tab.** 9

Metodo di JACOB (III)

Su scala semilogaritmica vengono riportati i valori, ricavati per ciascun piezometro disponibile,di s contro t/r^2 ,quest'ultimo in scala semilogaritmica. Una retta interpolante i punti plottati per ogni piezometro intersecherà l'asse delle ascisse t/r^2 nel punto di coordinate s = 0 , $t/r^2 = (t/r^2)_o$.

Analogamente ai procedimenti suesposti,si ottengono le:

$$kD = \frac{2.30\ Q}{4\pi\ \Delta s} \qquad (39)$$

$$S = 2.25\ kD\ (t/r^2)_o \qquad (40)$$

I valori di $(t/r^2)_o$ e Δs sono ricavati graficamente. I risultanti valori di trasmissività e del coefficiente di immagazzinamento vanno verificati per la condizione di approssimazione logaritmica.

Metodo di CHOW

Anche il metodo di CHOW [10] è basato sul modello di THEIS, e richiede che siano soddisfatte le medesime condizioni. Per trovare i valori di W(u) ed u corrispondenti all'abbassamento s misurato dopo un tempo t dall'inizio del pompaggio, CHOW introdusse la funzione :

$$F(u) = \frac{W(u)\ e^u}{2.30} \qquad (41)$$

La relazione fra F(u), W(u) ed u è generalmente tabulata, e viene riportata in Appendice II .

Operativamente, si tracciano su scala semilogaritmica i valori degli abbassamenti s contro il tempo t corrispondente (t su scala logaritmica). Scelto un

arbitrario punto A sulla curva che interpola i punti diagrammati, si traccia la tangente a questo punto, e se ne determina la pendenza, che corrisponde alla differenza di abbassamento per un ciclo logaritmico, Δs_A. Dal diagramma si ricava s_A, ordinata corrispondente al punto A, e t_A, ascissa dello stesso.

Da CHOW [10]:

$$F(u) = \frac{s_A}{\Delta s_A} \qquad (42)$$

Conoscendo così F(u), dai tabulati si ricavano i valori corrispondenti di W(u) e u; questi, insieme con s_A e t_A vengono sostituiti nelle segg. eqq., ricavate dalla (27) e dalla (29) di THEIS:

$$kD = \frac{Q}{4\pi s_A} W(u)_A \qquad (43)$$

$$S = \frac{4 u_A kD}{r^2} t_A \qquad (44)$$

L'operazione va ripetuta per tutti i piezometri disponibili, al fine di ottenere un valor medio.

Il vantaggio di questo metodo consiste nel fatto di evitare la sovrapposizione di curve, come il metodo di THEIS, e di non porre, come in JACOB, condizioni restrit-

tive. È inoltre utilizzabile per prove di breve durata. Un difetto notevole sta comunque nella soggettività della scelta del punto A sulla curva interpolante. L'esperienza di chi scrive suggerisce di scegliere tale punto nel tratto mediano più rettilineo di detta curva.

Metodi di risalita. Theis .

Alla cessazione del pompaggio il livello dell'acqua nel pozzo e nei piezometri risale verso il livello statico originario. Si può effettuare uno studio delle modalità di risalita della falda nel caso in cui:
- ci si trova in condizione di applicare il principio cosiddetto di sovrapposizione dei deflussi. Infatti al momento dell'arresto del pompaggio si può assumere che la pompa continui a funzionare, iniettando nel pozzo una portata pari a quella precedentemente emunta. Il principio di sovrapposizione dei deflussi permette di considerare l'abbassamento registrato (rispetto all'originario livello statico) pari alla somma degli abbassamenti dovuti rispettivamente al pompaggio ed all'iniezione. Ciò è possibile nel caso

in cui gli abbassamenti siano modesti

- ci si trova nelle condizioni di validità della approssimazione logaritmica.

Un dato da considerare è inoltre che applicando i metodi di risalita vengono eliminate eventuali incertezze relative alla costanza della portata emunta: infatti durante la risalita della falda la portata Q è costante e pari alla portata media di emungimento durante la fase di pompaggio.

Operativamente, viene tabulato il cosiddetto abbassamento residuo s" ,inteso come differenza tra l'ori-

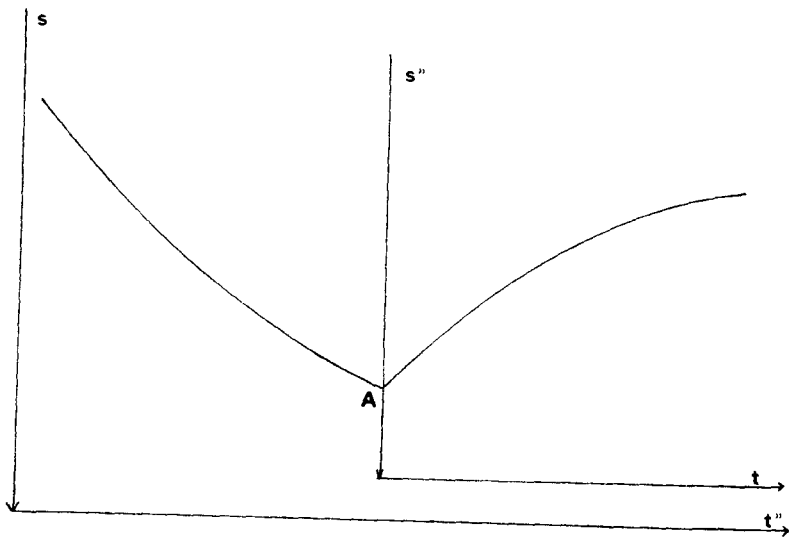


Fig. 20 :schema delle relazioni tempo abbassamenti prima e dopo la cessazione del pompaggio (A).

ginario livello statico ed il livello misurato ad un certo istante t" dalla cessazione del pompaggio.

Viene qui utilizzata la procedura proposta da THEIS.

Valgono le condizioni sopra enunciate e tutte le condizioni poste dallo stesso Autore per le prove di emungimento.

L'abbassamento residuo durante la risalita è dato da:

$$s'' = \frac{Q}{4\pi kD}\left(\ln\frac{4kDt}{r^2 S} - \ln\frac{4kDt''}{r^2 S''}\right) \qquad (45)$$

ove, oltre alla notazione già utilizzata :

s" = abbassamento residuo

S" = coefficiente di immagazzinamento durante la risalita

t" = tempo computato a partire dall'arresto del pompaggio

t = tempo computato a partire dall'inizio del pompaggio

Quando S ed S" sono uguali e costanti, l'equazione scritta diviene :

$$s'' = \frac{2.30\ Q}{4\pi kD}\log\frac{t}{t''} \qquad (46)$$

Su scala semilogaritmica che riporti s" contro t/t" (in scala logaritmica), la (46) rappresenta l'equazione della retta interpolante i punti diagrammati per ogni istante, di pendenza :

$$\Delta s'' = \frac{2.30\ Q}{4\pi kD} \qquad (47)$$

ove $\Delta s''$, differenza di abbassamento sulla retta per un ciclo logaritmico, e pari alla pendenza della retta stessa, è ricavata graficamente, permettendo così il calcolo della trasmissività kD .

Il metodo non consente di ricavare il valore del coefficiente di immagazzinamento, S; purtuttavia si può notare che quando S ed S" sono costanti, ma non eguali, la retta interpolante i dati diagrammati interseca l'asse delle ascisse con intercetta $t/t'' = \left(t/t'' \right)_0$ e con $s'' = 0$.

L'equazione (45) diviene allora, passando ai logaritmi decimali :

$$0 = \frac{2.30\,Q}{4\pi kD}\left[\log\left(\frac{t}{t''}\right)_0 - \log\frac{S}{S''}\right] \qquad (48)$$

Poichè :

$$\frac{2.30\ Q}{4\pi kD} \neq 0$$

deve essere :

$$\log \left(\frac{t}{t''}\right)_0 - \log \frac{s}{s''} = 0 \qquad (49)$$

da cui :

$$\left(\frac{t}{t''}\right)_0 = \frac{s}{s''} \qquad (50)$$

che determina la variazione relativa di S ,ricavabile graficamente. La conoscenza del valore del rapporto S/S" è importante per la definizione qualitativa delle falda. Infatti [9] :

per S/S" = 1 la falda è normale

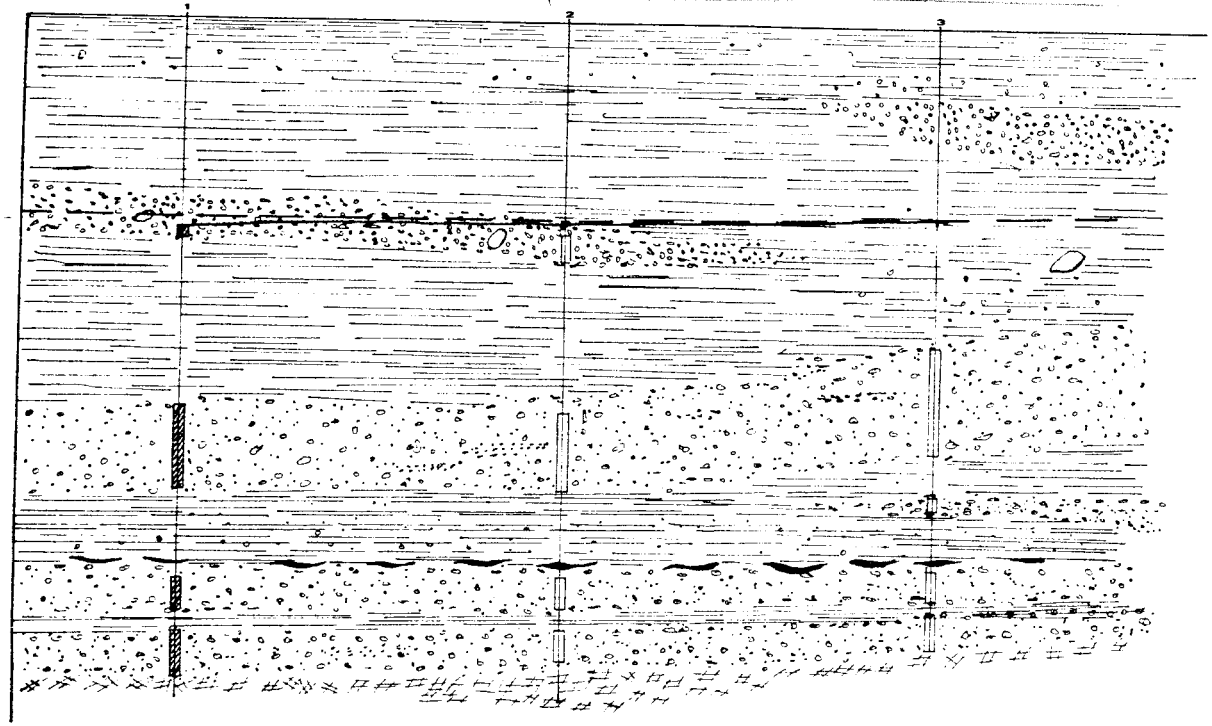
per S/S" < 1 la falda è limitata

per S/S" > 1 la falda ha una ricarica .

7.2 Tests di pompaggio in località La Sacca

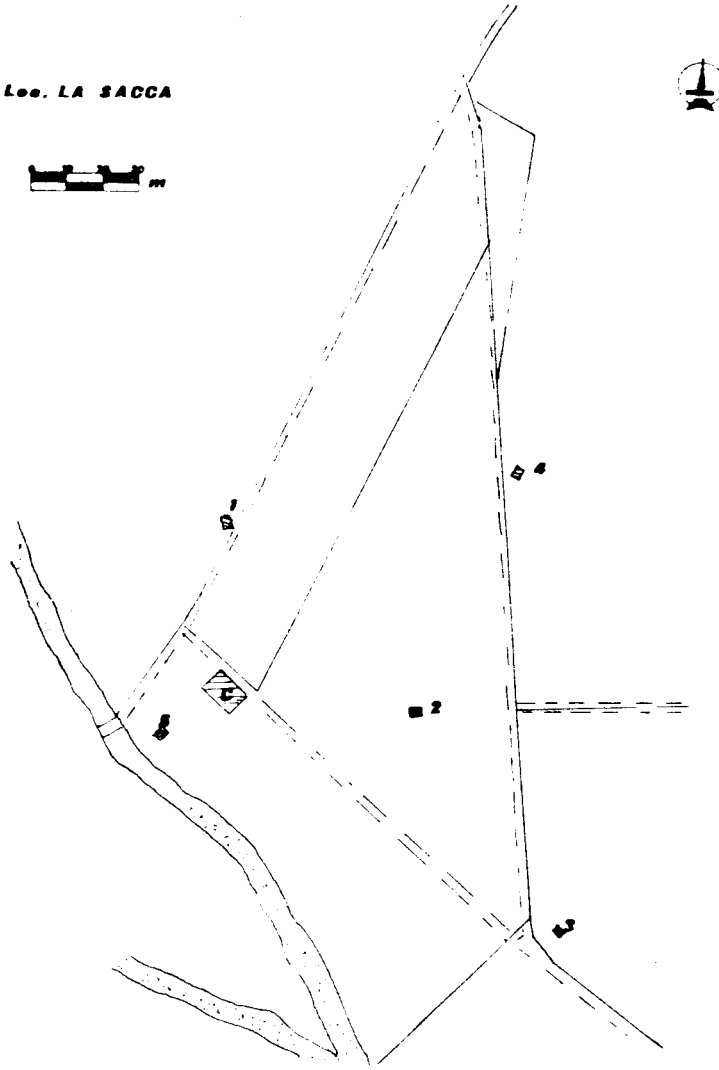
In data 28/05/1982 sono state eseguite delle prove di pompaggio in loc. La Sacca, presso Pozzolengo, BS, utilizzando gli impianti del Consorzio Alto Mincio, costituiti da una batteria di 5 pozzi. Le operazioni di misura sono state effettuate in modo continuo su tre di essi. Ad eccezione del pozzo 5, sono note le stratigrafie di tutti i pozzi, riportate in Appendice I (con n° progressivo da 89 a 92). Come pozzo di pompaggio è stato utilizzato il pozzo n°1, come piezometri i pozzi n°2, n°3 e n°4. La strumentazione di misura era costituita da freatimetri centimetrati e da cronometri; la portata di pompaggio è stata determinata mediante venturimetro.

In fig. 21 sono mostrate la composizione litostratigrafica del sottosuolo, la posizione delle fenestrature, la superficie piezometrica e l'andamento del cono di depressione a presunta stabilizzazione. Si hanno due principali orizzonti acquiferi, entrambi in pressione, separati da circa 15 m di argille, e con potenza media di acquifero di 35 m circa. In tutti i pozzi l'acqua è risalien-



GHIAIA
SABBIA
ARGILLA
TORBA
CONGLOMERATO
FILTRO
IN POMPAGGIO
10 20 m

FIG. 21 *Loc.* LA SACCA



te sino a circa 33 m dal p.c.

Entrambi i livelli acquiferi sono costituiti da ghiaia con sabbia : si tratta,si fa notare,dei due importanti orizzonti indicati con le lettere B e C nelle sezioni litostratigrafiche delle tavv.4a e 4b .

Durante le prove di pompaggio non è stato possibile isolare i singoli filtri ed emungere pertanto dai singoli acquiferi. Pertanto i parametri ottenuti dalle prove rappresentano un valore medio,fortunatamente non inficiato da diversità di composizione litologica tra i due acquiferi.

Nel corso delle prove si è mantenuta una portata costante di pompaggio Q = 80 l/sec pari a Q = 6912 m^3/ /giorno .

Nelle tabb. 1,2,3,4 sono riportati,per ogni pozzo misurato,i valori ottenuti durante le prove:il tempo dall'inizio del pompaggio,gli abbassamenti registrati, il rapporto tempo/quadrato della distanza dei piezometri dal pozzo di pompaggio.

Le figg. 22,23,24 visualizzano l'andamento della prova nel tempo,riportando in scala logaritmica i valori registrati degli abbassamenti contro il tempo.

TABELLA 1

Loc. La Sacca . Dati relativi al pozzo 1

Livello statico al p.c. prima della prova : 38.90 m

Portata di pompaggio : Q = 6912 m^3/giorno

tempi t (min)	abbassamenti s (m)	t/r^2 (min/m^2)
0	0	=
1	2.29	=
2	2.20	=
3	2.20	=
4	2.20	=
5	2.20	=
6	2.20	=
7	2.I5	=
8	2.20	=
9	2.20	=
10	2.20	=
11	2.I5	=
12	2.I5	=
13	2.I5	=
I4	2.I5	=
I5	2.25	=
I6	2.20	=
I7	2.20	=
I8	2.20	=
2I	2.25	=
22	2.20	=

tempi t	abbassamenti s	t/r^2
24	2.20	=
27	2.20	=
29	2.20	=
32	2.20	=

Al termine del pompaggio il livello della superficie di falda era posto a 4I.IO m dal p.c. , con un abbassamento di m 2.20 .

TABELLA 2

Loc. La Sacca . Dati relativi al pozzo 2

Livello statico al p.c. prima della prova: 39.52 m

Portata di pompaggio : Q = 6912 m^3/giorno

tempi t (min)	abbassamenti s (m)	t/r^2 (min/m^2)
0	0	=
0.25	0.11	4.8 (10^{-5})
0.50	0.19	9.6 (10^{-5})
0.75	0.25	1.4 (10^{-4})
1.00	0.30	1.93 (")
1.25	0.34	2.41 (")
1.50	0.36	2.89 (")
1.75	0.39	3.38 (")
2.00	0.41	3.86 (")
2.25	0.42	4.34 (")
2.50	0.44	4.82 (")
2.75	0.45	5.30 (")
3.00	0.46	5.79 (")
3.25	0.48	6.27 (")
3.50	0.48	6.75 (")
3.75	0.49	7.23 (")
4.00	0.50	7.72 (")
4.25	0.51	8.20 (")
4.50	0.52	8.68 (")
5.00	0.53	9.65 (")
5.25	0.53	1.01 (10^{-3})

tempi t	abbassamenti s	t/r^2
5.50	0.54	I.06(10^{-3})
6.00	0.55	I.I6
6.50	0.56	I.25
7.00	0.57	I.35
8.00	0.60	I.74
9.00	0.60	I.74
I0.00	0.6I	I.93
II.00	0.62	2.I2
I2.00	0.62	2.3I
I3.00	0.63	2.5I
I4.00	0.64	2.70
I5.00	0.64	2.89
I6.00	0.65	3.09
I7.00	0.65	3.28
I8.00	0.66	3.47
I9.00	0.66	3.67
20.00	0.66	3.87
2I.00	0.66	4.05
22.00	0.67	4.24
25.00	0.67	4.82
29.00	0.67	5.59
30.00	0.68	5.79
3I.00	0.68	5.98

Al termine della prova il livello era posto a 40.20 m dal p.c., con un abbassamento di 0.68 m

Distanza dal pozzo di pompaggio : 72 m.l.

TABELLA 3

Loc. La Sacca . Dati relativi al pozzo 3

Livello statico al p.c. prima della prova: 38.86 m

Portata di pompaggio: Q = 6912 m^3/giorno

tempi t (min)	abbassamenti s (m)	t/r^2 (min/m^2)
0.00	0.00	=
0.50	0.02	$2.45(10^{-5})$
1.00	0.04	4.89(")
1.50	0.06	7.34(")
2.00	0.10	9.78(")
2.50	0.18	$1.22(10^{-4})$
4.50	0.24	2.20(")
5.00	0.20	2.45(")
5.50	0.20	2.69(")
6.00	0.22	2.93(")
6.50	0.22	3.18(")
7.00	0.23	3.42(")
7.50	0.24	3.67(")
8.00	0.24	3.91(")
8.50	0.25	4.16(")
9.00	0.25	4.40(")
9.50	0.25	4.65(")
10.00	0.27	4.89(")
11.00	0.27	5.38(")
12.00	0.28	5.87(")
13.00	0.29	6.36(")

tempi t	abbassamenti s	t/r^2
I4.00	0.29	$6.85(I0^{-4})$
I5.00	0.29	7.34(")
I6.00	0.30	7.82(")
I7.00	0.30	8.3I(")
I8.00	0.30	8.80(")
I9.00	0.30	9.39(")
20.00	0.3I	9.78(")
22.00	0.32	$I.08(I0^{-3})$
25.00	0.32	I.22(")
28.00	0.32	I.37(")
30.00	0.32	I.47(")
3I.00	0.32	I.52(")

Al termine della prova il livello era posto a m 39.I8 dal p.c.,con un abbassamento di 0I32 m .
Distanza dal pozzo di pompaggio : I43 m.l.

TABELLA 4

Loc. La Sacca . Dati relativi al pozzo 4

Livello statico all'inizio delle prove : 39.82 m dal p.c.

Portata di pompaggio : Q = 6912 m^3/giorno

Livello al termine delle prove : 40.85 m dal p.c.

Abbassamento al termine delle prove : 1.03 m

Distanza dal pozzo di pompaggio : 80 m.l.

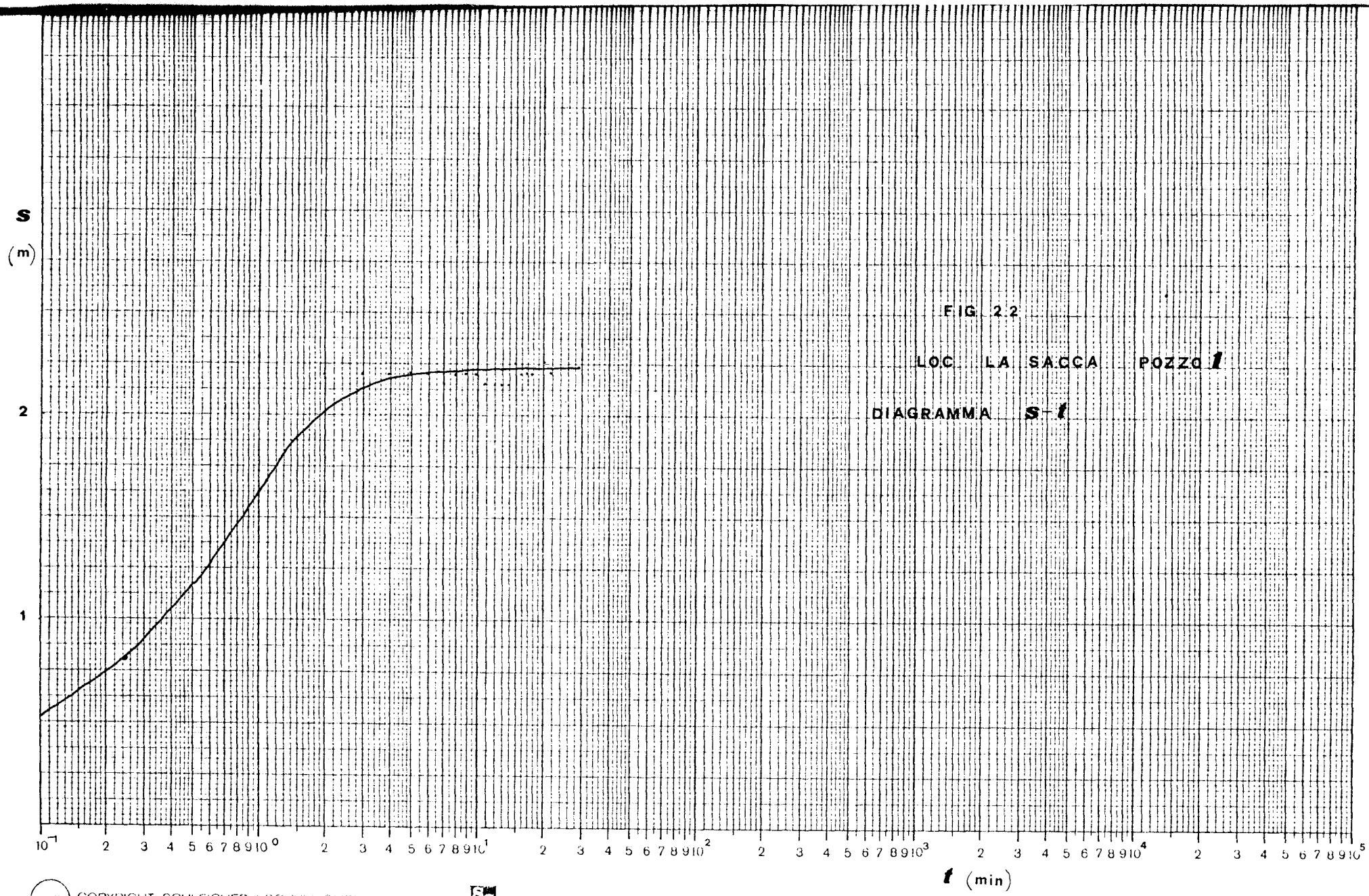


FIG 22

LOC LA SACCA POZZO 1

DIAGRAMMA S-t

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHUELL GMBH, 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667051, Nr. 442 A 4 MADE IN GERMANY

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000000, Einheit 42,5 mm, die andere in mm

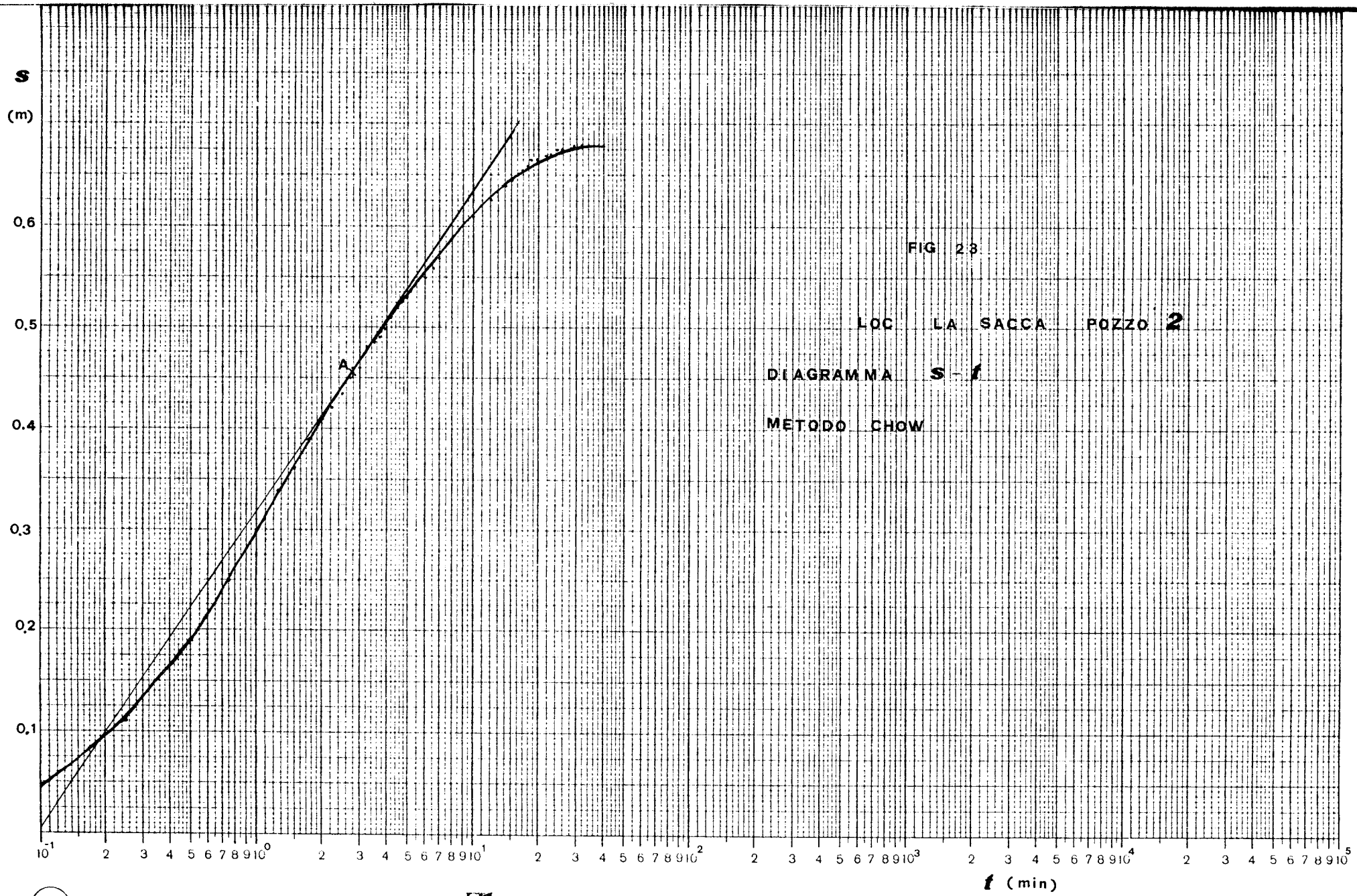


FIG 2.3

LOC LA SACCA POZZO 2

DIAGRAMMA S - t

METODO CHOW

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHUELL GMBH, 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667051, Nr. 442 ½ A 4 MADE IN GERMANY

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000000, Einheit 42,5 mm, die andere in mm

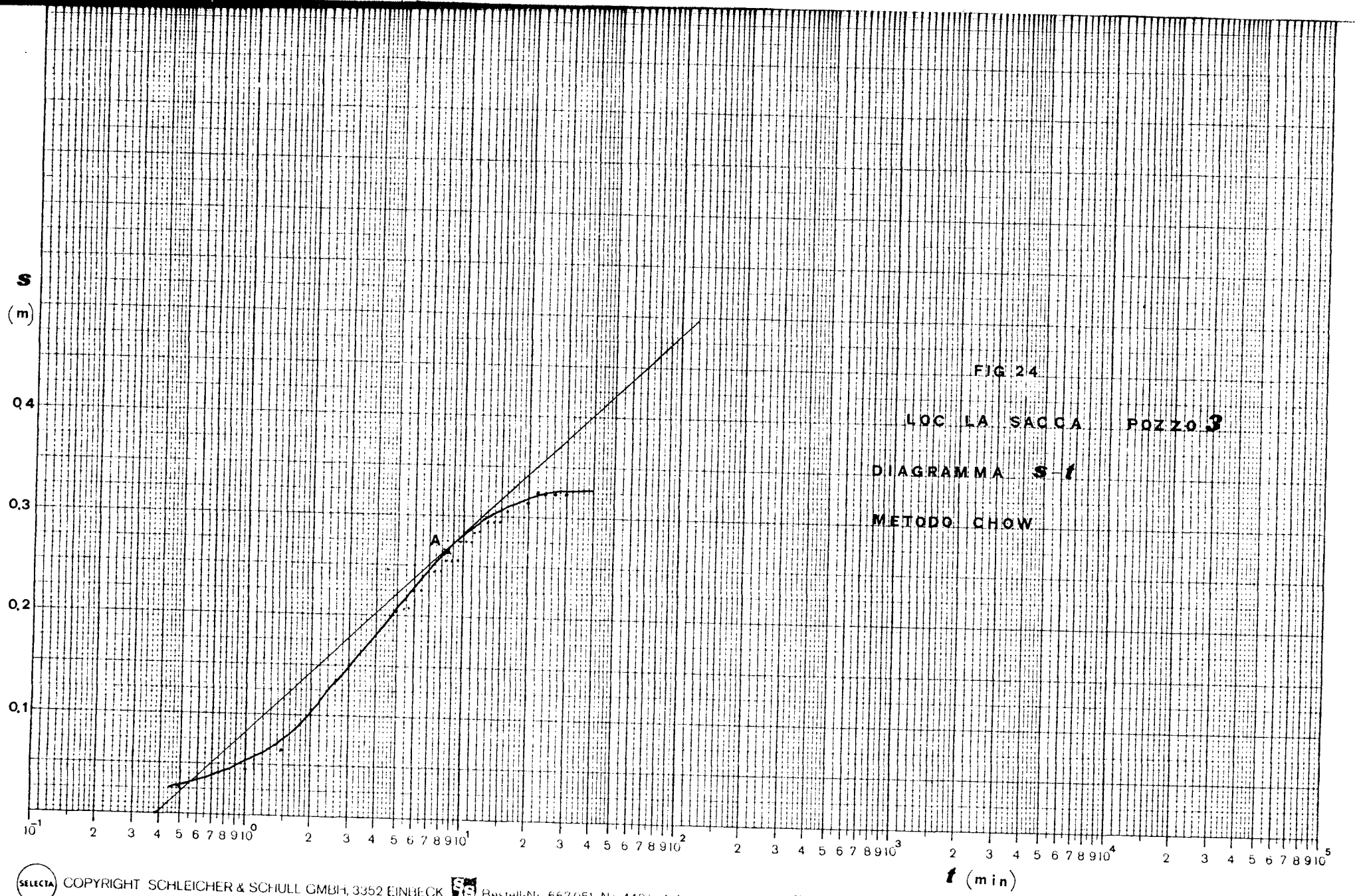


FIG 24

LOC LA SACCA POZZO 3

DIAGRAMMA s-t

METODO CHOW

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHULL GMBH, 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667051, Nr. 442 1/2 A 4 MADE IN GERMANY

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000000, Einheit 42,5 mm, die andere in mm

ELABORAZIONE DEI DATI

Modelli di regime costante

Metodo di THIEM (I) (cfr.pag. 71)

Dalle tabb. 1,2,3,4 si desumono i valori dell'abbassamento registrato nei piezometri al raggiungimento (presunto) del flusso costante e vengono sostituiti nella (9) insieme con i valori della distanza dei piezometri dal pozzo di pompaggio :

$$kD = \frac{Q}{2\pi (s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$kD = \frac{6912 \cdot \ln 143/72}{2 \cdot 3.14 (0.68-0.32)} = 2096 \text{ m}^2/\text{giorno}$$

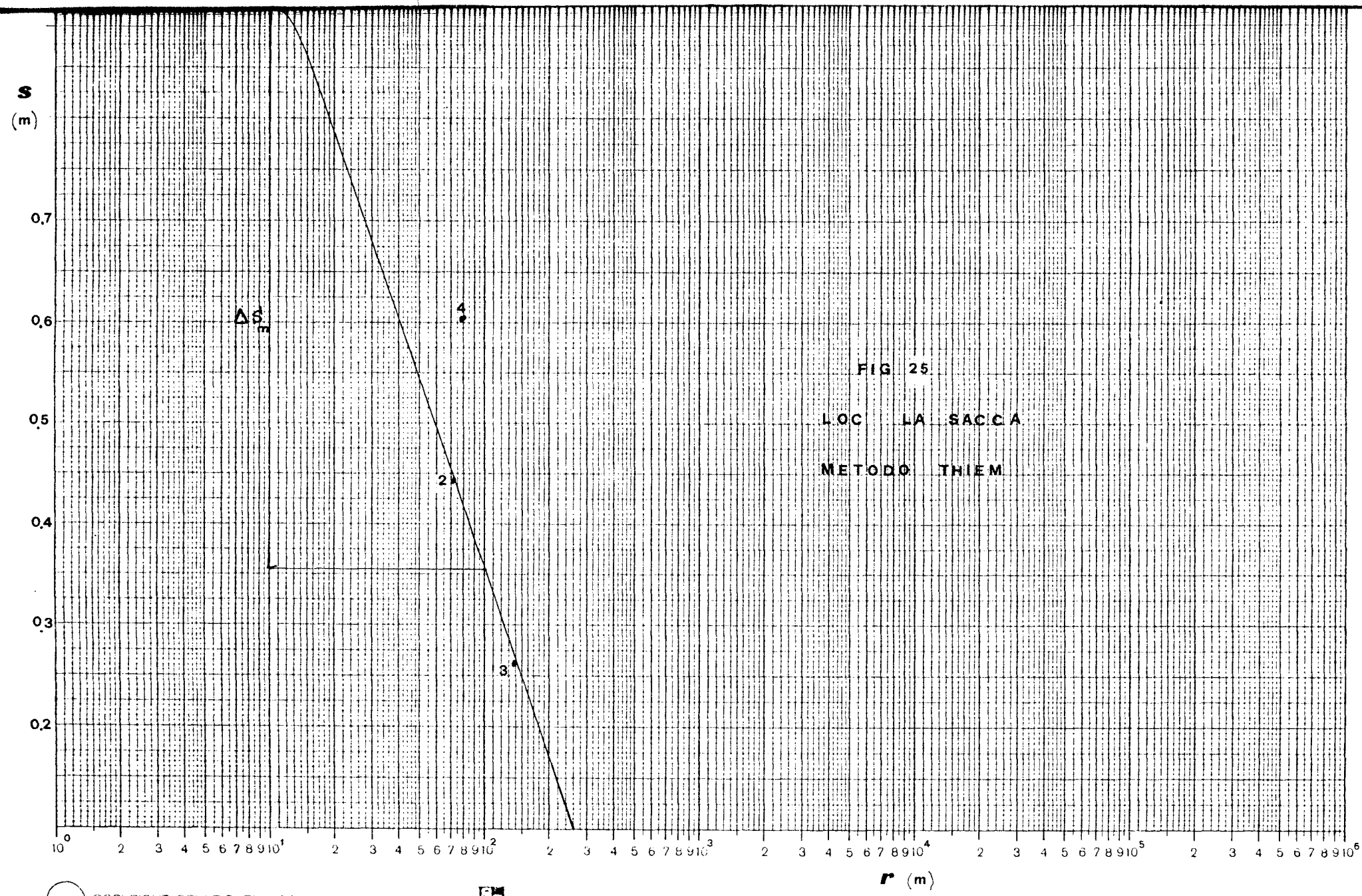
Metodo di THIEM (II) (cfr. pag.73)

In fig.25 la pendenza della retta interpolante i valori diagrammati, calcolata per un ciclo logaritmico, è $\Delta s = 1.24$ m . Sostituendo tale valore nella (10):

$$kD = \frac{2.30\ Q}{2\pi\ \Delta s}$$

si ha :

$$kD = \frac{2.30 \cdot 6912}{2\pi \cdot 1.24} = 2040 \text{ m}^2/\text{giorno}$$



SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHUELL GMBH, 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667 051, Nr. 442 1/2 A 4 MADE IN GERMANY

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000 000, Einheit 42,5 mm, die andere in mm

Modelli di regime transitorio

Metodo di THEIS (cfr.pag. 73)

I dati degli abbassamenti registrati ai piezometri n°2 e n°3 ed i corrispondenti valori di t/r^2 ,ricavati dalle tabb. 2 e 3,sono diagrammati in fig. 26

La curva che li interpola viene confrontata con la "reversed type curve di THEIS, W(u) - 1/u.

Ricercata la posizione di miglior coincidenza tra le due curve,viene scelto,per comodità di calcolo,il punto A di coordinate W(u) = 1 , 1/u = 10 ,cui corrispondono nel diagramma sperimentale i valori:

$(t/r^2)_A = 5.2 \cdot 10^{-4}$ min/m^2

$s_A = 1.09 \cdot 10^{-1}$ m

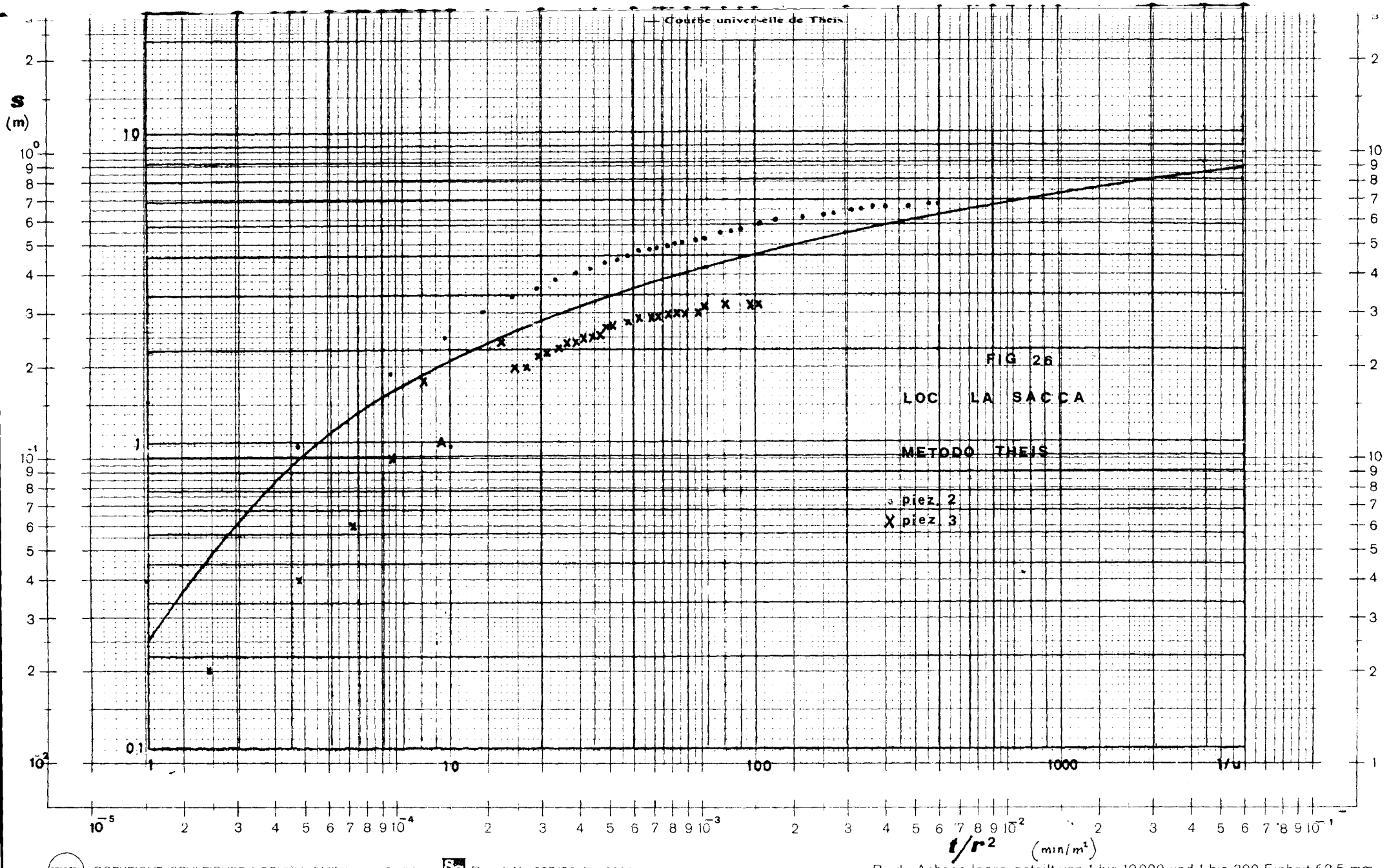
Sostituendo gli opportuni valori nella (27) :

$$kD = \frac{Q \cdot W(u)}{4\pi \, s_A} \qquad (27)$$

$$kD = \frac{6912 \cdot 1}{4\pi \cdot 1.09 \cdot 10^{-1}} = 5046.23 \text{ m}^2/\text{giorno}$$

Analogamente,dalla (29)

$$S = \frac{4 kD (t/r^2)_A}{\frac{1}{u}} \qquad (29)$$



SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHÜLL GMBH. 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667152. Nr. 369

Beide Achsen logar. geteilt von 1 bis 10000 und 1 bis 300 Einheit 62.5 mm

ove u è sostituito da 1/u della "reversed curve",

$$S = \frac{4 \cdot 5046.23 \cdot 5.2 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 1440} = 7.29 \cdot 10^{-4}$$

ove il fattore 1/1440 è fattore di conversione per il passaggio da minuti a giorni.

Metodo di CHOW (cfr.pag. 85)

Viene applicato nelle figg. 23 e 24 .

Per il piezometro 2 :

$s_A = 0.45 \qquad \Delta s_A = 0.31 \qquad t_A = 2.6$ min

$$F(u) = \frac{s_A}{\Delta s_A} = 1.45$$

Dalle tavole di Appendice II, per F(u) = 1.49(approssimato) si ottiene W(u) = 3.35 e $u = 2 \cdot 10^{-2}$.

Sostituendo questi valori nella (43):

$$kD = \frac{Q \cdot (W(u))_A}{4\pi s_A} \qquad (43)$$

$$kD = \frac{6912 \cdot 3.35}{4\pi \cdot 0.45} = 4094.74 \text{ m}^2/\text{giorno}$$

e nella (44)

$$S = \frac{4 u_A \, kD \, t_A}{r^2} \qquad (44)$$

$$S = \frac{4 \quad 4094.8 \quad 2.6 \quad 2\cdot10^{-2}}{(72)^2 \cdot \quad 1440} = 1.14\cdot10^{-4}$$

Per il piezometro 3 :

$s_A = 0.26 \qquad \Delta s_A = 0.2 \qquad t_A = 8.5 \text{ min}$

$$F(u) = \frac{0.26}{0.2} = 1.3$$

Dalle tavole di App.II :

$W(u) = 2.96 \qquad u = 3\cdot10^{-2}$

e :

$$kD = \frac{6912 \cdot 2.96}{4\pi \cdot 0.26} = 6262 \text{ m}^2/\text{giorno}$$

$$S = \frac{4 \cdot 3\,10^{-2}}{(143)^2} \quad \frac{6262 \cdot 8.5}{1440} = 2.17\cdot10^{-4}$$

Ai dati sperimentali è stato applicato il metodo di JACOB, ma i valori di kD ed S ottenuti, sottoposti alla verifica per $u < 0.01$, condizione necessaria per l'applicazione del metodo, non sono risultati accetta-

bili. Il metodo di Jacob non è applicabile in nessuna delle sue procedure ai dati in esame.

In tabella V vengono riassunti i risultati ottenuti con l'applicazione dei vari metodi .

TABELLA V

Metodo	kD (m^2/giorno)	S	k (cm/sec)
THIEM I	2096	-	$6.9\ 10^{-2}$
THIEM II	2040	-	$6.8\ 10^{-2}$
THEIS	5046.23	$7.29\ 10^{-4}$	$1.7\ 10^{-1}$
CHOW (2)	4094.74	$1.14\ 10^{-4}$	$1.4\ 10^{-1}$
CHOW (3)	6262	$2.17\ 10^{-4}$	$2.1\ 10^{-1}$
JACOB	condizioni non verificate		

Osservando la tabella si nota un marcato contrasto tra i risultati ottenuti utilizzando i metodi basati sul modello di regime stazionario ed i metodi basati sul modello di regime transitorio. Ciò è probabilmente dovuto al limitato tempo di esecuzione del test,

che non ha consentito di raggiungere la stabilizzazione della falda, condizione indispensabile per la applicazione dei metodi di THIEM.

Prove effettuate a circa 3 Km di distanza sulla stessa struttura acquifera (cfr.par. 7.3) hanno fornito per contro risultati molto omogenei (kD = 5000 m^2/ /giorno), conferendo, grazie ad un pompaggio più prolungato, maggior validità ai metodi del regime permanente. Sulla scorta di queste considerazioni si è preferito scegliere per loc. La Sacca un valore di trasmissività e del coefficiente di immagazzinamento vicino a quello indicato dall'applicazione del metodo di THEIS: kD = 4700 m^2/giorno , S = $7.00 \cdot 10^{-4}$;

cui corrisponde, per uno spessor medio di acquifero di 35 m, un coefficiente di permeabilità k = 1.6 10^{-1} cm/sec

Ricordando che i valori di k desunti dalla comune bibliografia per terreni con buon drenaggio, quali agglomerati di ghiaia e sabbia pulita, vanno da 1 a 10^{-3} cm/sec , osserviamo che l'acquifero in esame ha un grado di permeabilità decisamente buono .

Dal raffronto dei livelli statici misurati e conoscendo la distanza tra i vari pozzi, si è ricavato per l'area interessata dalle prove un gradiente idraulico medio $i = 0.011 = 1.1\ \%$

La portata di flusso unitaria della falda viene definita [7] come la portata scorrente per unità di superficie o di larghezza attraverso una sezione trasversale dell'acquifero nell'unità di tempo :

$$q = kD\ i \qquad (51)$$

Risulta pertanto per l'acquifero in esame :

$q = 51.7\ m^2/giorno$.

Come applicazione della (35), derivata da THEIS, è possibile stabilire il valore del raggio di influenza del pompaggio dopo un certo tempo t dall'inizio dello stesso, dato da [6] :

$$r = \sqrt{\frac{2.25\ kD\ t}{S}} \qquad (52)$$

ove r è dato in m e kD in m^2/sec

Nel nostro caso, dopo un'ora di pompaggio, avremo

$$r = \sqrt{\frac{2.25 \cdot 4700 \cdot 3600}{7 \cdot 10^{-4} \cdot 86400}} \simeq 790\ m$$

Il valore risultante è piuttosto elevato ed addirittura eccessivo se non si presuppone una rialimentazione degli acquiferi. In ogni caso il valore ottenuto è in buon accordo con l'elevata trasmissività dei materiali. Compiendo una stima approssimata e basata sui dati della comune bibliografia si può cercare di fornire un valore della velocità effettiva della falda, secondo la:

$$v_e = \frac{k\,i}{n_e} \qquad (53)$$

ove n_e rappresenta la porosità efficace dei terreni. Stimando che nei terreni sottoposti al test il valore di n_e sia variabile dal 15% al 20% si ottiene rispettivamente per la velocità effettiva :

$v_e = 1.17 \;\; 10^{-2}$ cm/sec e $v_e = 7.04 \;\; 10^{-3}$ cm/sec

7.3 Tests di pompaggio in località P.te Cantone

In data 31/09/1982 sono state eseguite prove di pompaggio in località P.te Cantone, presso Pozzolengo, BS, utilizzando gli impianti del Consorzio Alto Mincio, analoghi a quelli di loc.La Sacca (cfr.par.7.2) per quel che concerne caratteristiche tecniche e strumentazione. Sono note le stratigrafie di 4 dei 5 pozzi che costituiscono la centrale di pompaggio. Durante le prove venne utilizzato in pompaggio il pozzo n°3 (n°86 nella numerazione progressiva).
La planimetria della località è riportata in fig. 27 . ove viene mostrata la struttura stratigrafica del sottosuolo, la posizione delle fenestrature, l'andamento del cono di depressione misurato a presunta stabilizzazione. Ai due principali orizzonti acquiferi, separati da uno strato argilloso di 10 m di potenza va assegnato lo spessore complessivo di 63 m . I due livelli corrispondono agli orizzonti B e C delle sezioni stratigrafiche del par. 5. L'impossibilità di isolamento delle singole fenestrature durante le prove porta alla determina-

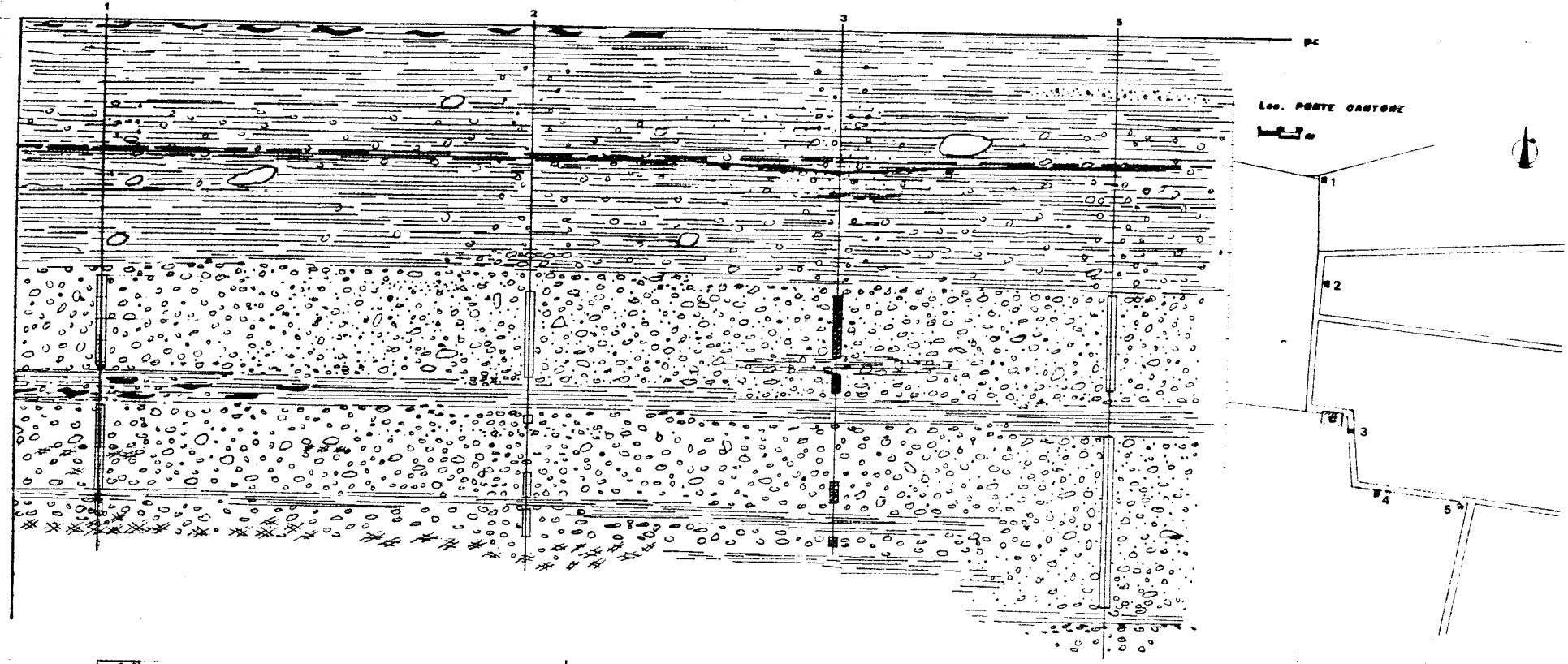


FIG. 27 *Loc. P.te CANTONE*

zione di un valore medio rappresentativo dei parametri idrodinamici dei due orizzonti acquiferi, peraltro caratterizzati da una certa omogeneità litologica (ghiaia e sabbia, con alcune intercalazioni argillose). In tutti i pozzi di misura l'acqua è risaliente sino a circa 30 m dal p.c.

ELABORAZIONE DEI DATI

Nelle tabb. 6,7,8 sono riportati i dati ottenuti durante le prove, come per loc. La Sacca.
E stato utilizzato in pompaggio il pozzo n°3, con una portata costante Q = 85 l/sec, pari a Q = 7344 m^3/giorno. Si deve rilevare che in questo test non si è raggiunta la stabilizzazione in tutti i piezometri (cfr. figg. 28,29,30). Ciononostante si è proceduto egualmente all'applicazione dei metodi di THIEM, a titolo di verifica.

Modelli di regime costante

Metodo di THIEM (I) (cfr. pag. 7I)

L'analisi secondo il modello di THIEM (I) , eseguita utilizzando i valori di abbassamento a flusso stabiliz-

TABELLA 6

Loc. Ponte Cantone . Dati relativi al pozzo 1

Livello statico prima della prova : 30.39 m dal p.c.

Portata di pompaggio : Q = 7344 m^3/giorno

tempi t (min)	abbassamenti s (m)	t/r^2 (min/m^2)
0.00	0.00	=
0.50	0.02	3.47(10^{-5})
I.00	0.I7	6.94(")
I.50	0.23	I.04($I0^{-4}$)
2.00	0.3I	I.38(")
2.50	0.35	I.73(")
3.00	0.38	2.08(")
3.50	0.39	2.43(")
4.00	0.40	2.77(")
4.50	0.4I	3.I2(")
5.00	0.42	3.47(")
5.50	0.43	3.8I(")
6.00	0.44	4.I6(")
6.50	0.45	4.5I(")
7.00	0.46	4.86(")
7.50	0.46	5.20(")
8.00	0.47	5.55(")
8.50	0.47	5.90(")
9.00	0.48	6.25(")
I0.00	0.49	6.94(")

tempi t	abbassamenti s	t/r^2
11.00	0.50	$7.63(10^{-4})$
12.00	0.50	8.33(")
13.00	0.51	9.03(")
14.00	0.52	9.72(")
15.00	0.53	$1.04(10^{-3})$
16.00	0.53	1.11(")
17.00	0.54	1.18(")
18 .00	0.55	1.25(")
19.00	0.55	1.31(")
20.00	0.56	1.38(")
22.00	0.57	1.52(")
24.00	0.58	1.66(")
28.00	0.60	1.94(")
32.00	0.62	2.22(")
36.00	0.63	2.50(")
42.00	0.64	2.91(")
48.00	0.65	3.33(")
56.00	0.66	3.88(")
68.00	0.68	4.72(")
76.00	0.69	5.27 (")
80.00	0.69	5.50(")
90.00	0.70	6.25(")

Distanza dal pozzo di pompaggio : 120 m.l.

TABELLA 7

Loc. Ponte Cantone . Dati relativi al pozzo 2

tempi t (min)	abbassamenti s (m)	t/r^2 (min/m^2)
0.00	0.00	=
0.50	0.I6	$9.92(I0^{-5})$
I.00	0.25	$I.98(I0^{-4})$
I.50	0.27	2.97(")
2.00	0.32	3.96(")
2.50	0.33	4.95(")
3.00	0.35	5.9I(")
3.50	0.38	6.94(")
4.00	0.40	7.93(")
4.50	0.4I	8.92(")
5.00	0.4I	9.9I(")
5.50	0.42	$I.09(I0^{-3})$
6.00	0.42	I.I9(")
7.00	0.43	I.38(")
8.00	0.46	I.58(")
9.00	0.47	I.78(")
I0.00	0.47	I.88(")
II.00	0.48	2.08(")
I2.00	0.50	2.38(")
I4.00	0.52	2.77(")
I9.00	0.53	3.76(")
2I.00	0.55	4.I6(")
25.00	0.57	4.95(")
29.00	0.59	5.75(")

tempi t	abbassamenti s	t/r^2
33.00	0.63	$6.54(I0^{-3})$
37.00	0.64	7.33(")
43.00	0.66	8.53(")
49.00	0.66	9.72(")
59.00	0.67	$I.I7(I0^{-2})$
69.00	0.70	I.36(")
79.00	0.7I	I.56(")
8I.00	0.72	I.60(")
89.00	0.73	I.76(")

Livello statico prima delle prove : 29.37 m dal p.c.

Distanza dal pozzo di pompaggio : 71 m.l.

TABELLA 8

Loc. Ponte Cantone . Dati relativi al pozzo 5

Livello statico prima delle prove : 30.72 m dal p.c.

tempi t (min)	abbassamenti s (m)	t/r^2 (min/m^2)
0.00	0.00	=
0.50	0.22	$I.I8(I0^{-4})$
I.00	0.3I	2.36(")
I.50	0.36	3.55(")
2.00	0.39	4.73(")
2.50	0.4I	5.9I(")
3.00	0.44	7.I0(")

tempi t	abbassamenti s	t/r^2
3.50	0.44	$8.28(I0^{-4})$
4.00	0.47	9.46(")
4.50	0.48	$I.06(I0^{-3})$
5.00	0.50	I.I8(")
6.00	0.5I	I.42(")
7.00	0.53	I.65(")
9.00	0.54	2.I3(")
I0.00	0.55	2.36(")
I2.00	0.57	2.84(")
I4.00	0.58	3.3I(")
I6.00	0.60	3.78(")
I8.00	0.6I	4.26(")
20.00	0.63	4.73(")
22.00	0.64	5.20(")
24.00	0.66	5.68(")
28.00	0.68	6.62(")
32.50	0.70	7.69(")
36.50	0.72	8.63(")
40.50	0.73	9.58(")
45.50	0.73	$I.07(I0^{-2})$
53.50	0.73	I.26(")
87.00	0.75	2.05 (")

Distanza dal pozzo di pompaggio : 65 m.l.

==========

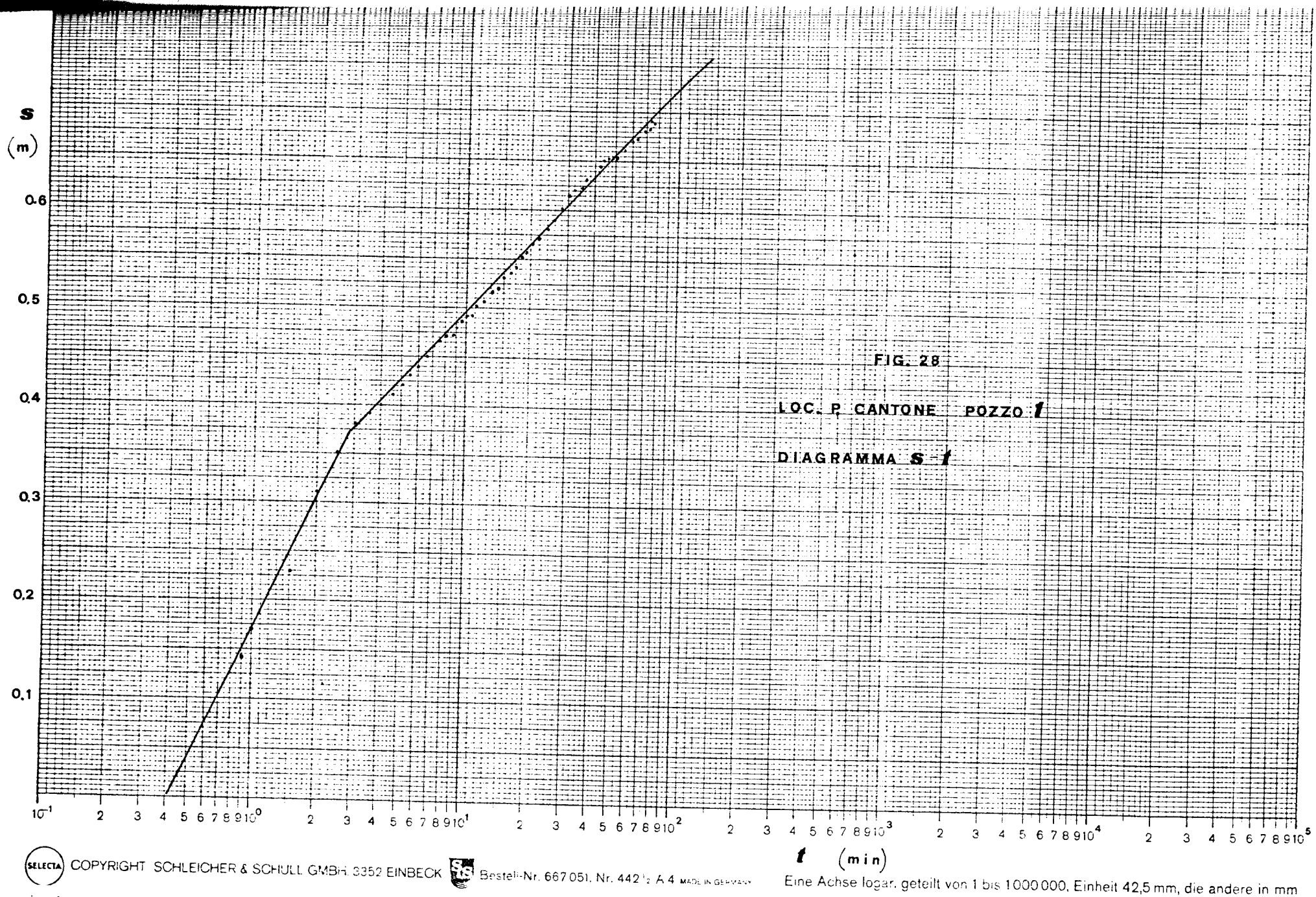


FIG. 28

LOC. P. CANTONE POZZO 1

DIAGRAMMA s - t

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHULL GMBH 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667051, Nr. 442 1/2 A 4 MADE IN GERMANY

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000000, Einheit 42,5 mm, die andere in mm

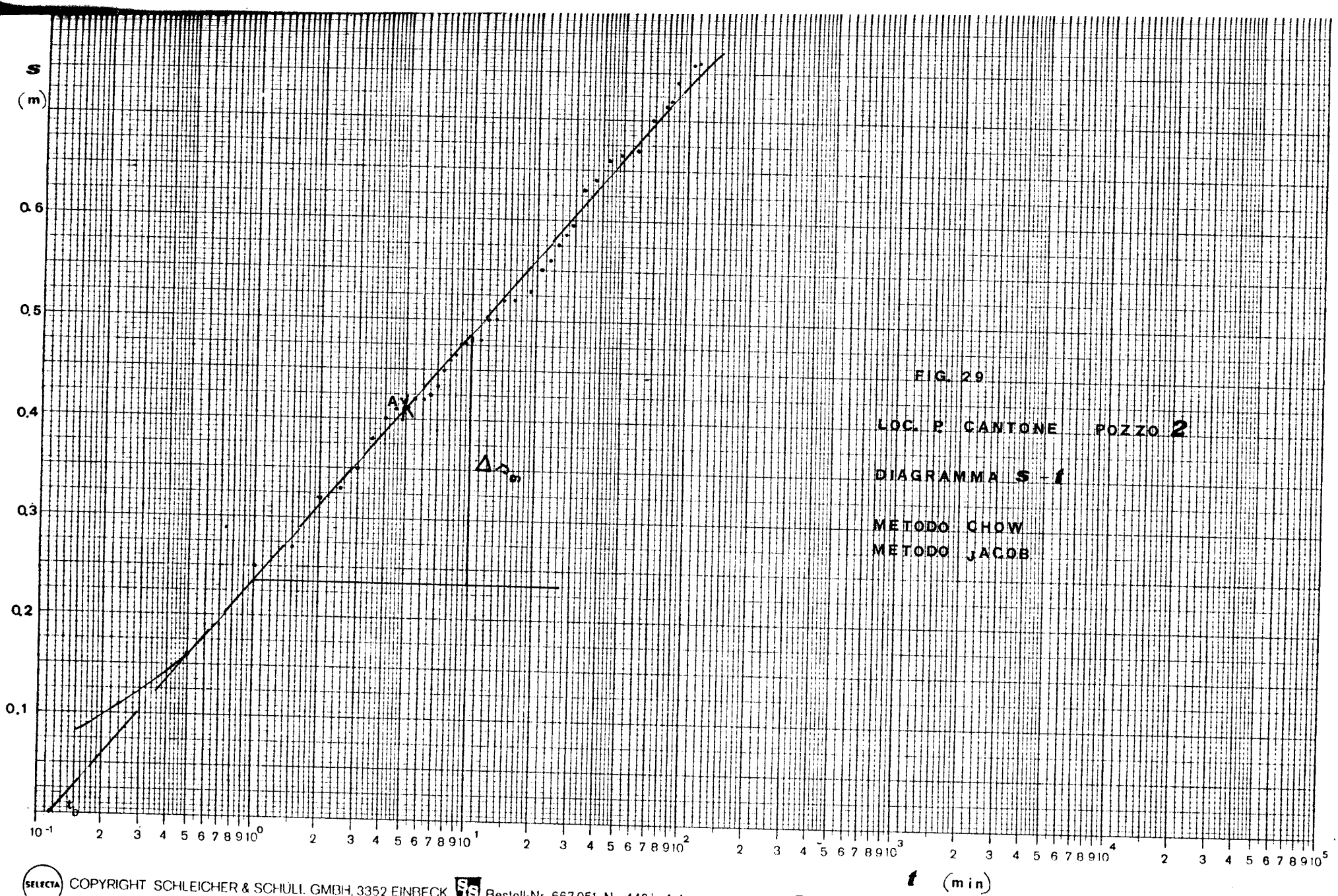


FIG. 29

LOC. P. CANTONE POZZO 2

DIAGRAMMA s - t

METODO CHOW

METODO JACOB

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHULL GMBH, 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667051, Nr. 442 ½ A 4 MADE IN GERMANY

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000000, Einheit 42,5 mm, die andere in mm

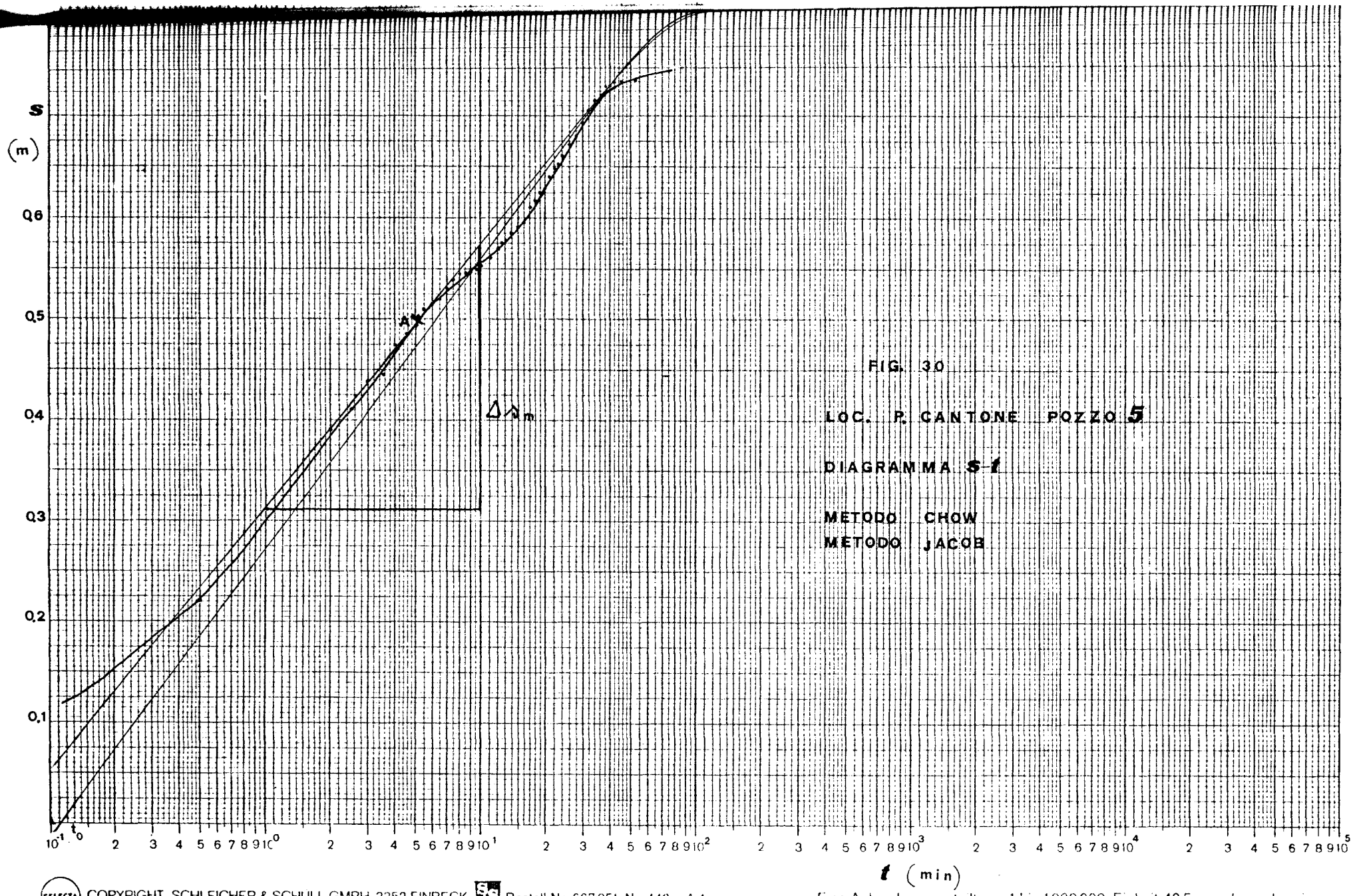


FIG. 30

LOC. P. CANTONE POZZO 5

DIAGRAMMA s-t

METODO CHOW
METODO JACOB

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHULL GMBH, 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667051, Nr. 442 - A4

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000000, Einheit 42,5 mm, die andere in mm

zato (presunto) tratti dalle tabb. 6,7,8 ed applicando la (9), porta ai seguenti valori di trasmissività:

per i piezometri 2 e 5 :

$$kD = \frac{Q}{2\pi (s_1 - s_2)} \ln \frac{r_2}{r_5} \qquad (9)$$

$$kD = \frac{7344}{2\ (0.75-0.73)} \ln \frac{71}{65} = 5162 \text{ m}^2/\text{giorno}$$

per i piezometri 1 e 2 :

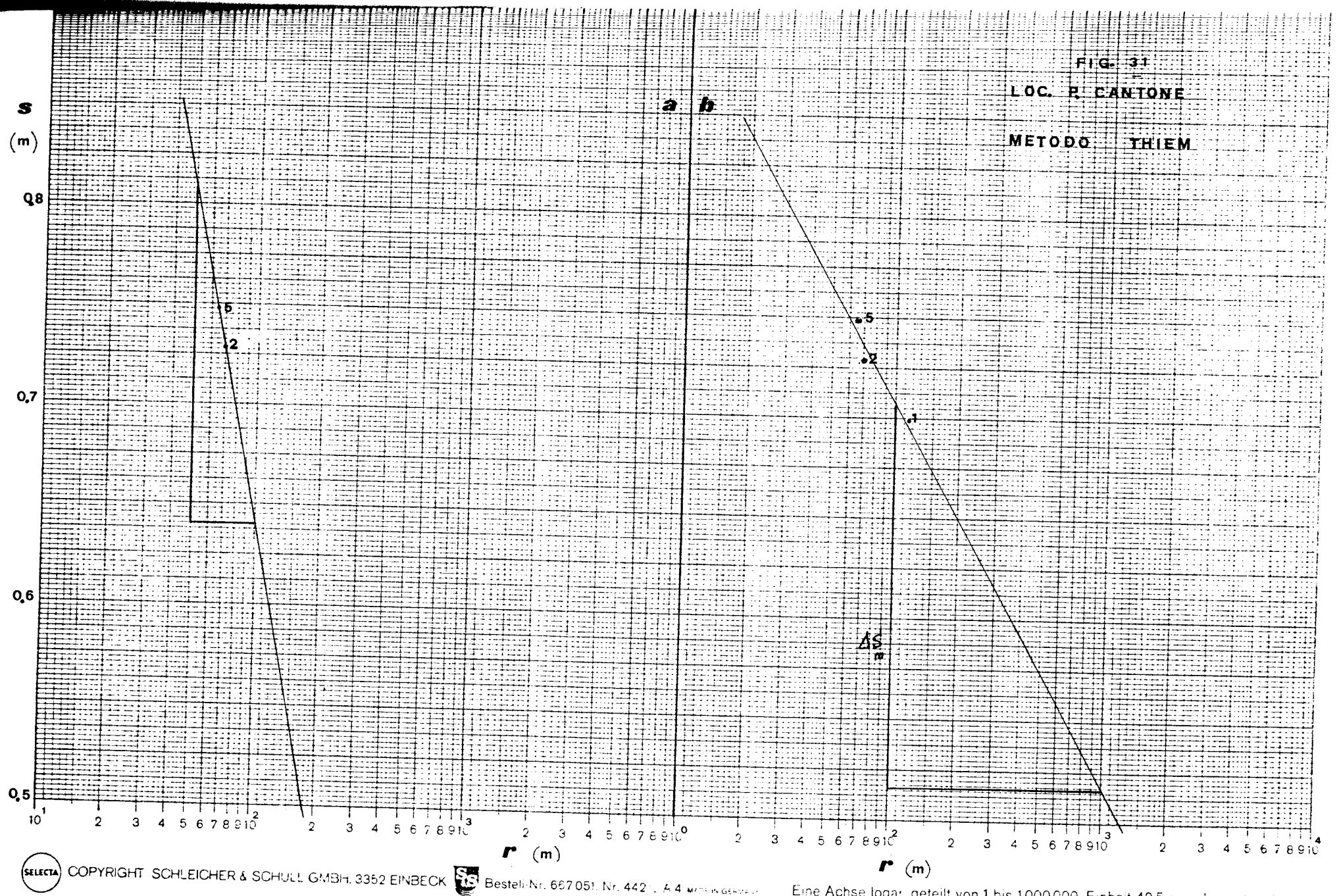
$$kD = \frac{7344}{2\ (0.73-0.70)} \ln \frac{120}{71} = 20457 \text{ m}^2/\text{giorno}$$

Metodo di THIEM (II)

Viene applicato, sulla scorta dei dati a disposizione, nella fig. 31 a) e 31 b). Utilizzando i dati relativi ai piezometri n°2 e n°5, in fig. 31 a) per un ciclo logaritmico si ottiene una pendenza della retta pari a $\Delta S_m = 0.52$, che inserita nella (10) dà un valore di trasmissività :

$$kD = \frac{2.30\ Q}{2\pi\ \Delta S_m} \qquad (10)$$

$$kD = \frac{2.30\ 7344}{2\ 0.52} = 5134 \text{ m}^2/\text{giorno}$$



SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHUELL GMBH, 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667051, Nr. 442 , A 4

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000000, Einheit 42,5 mm, die andere in mm

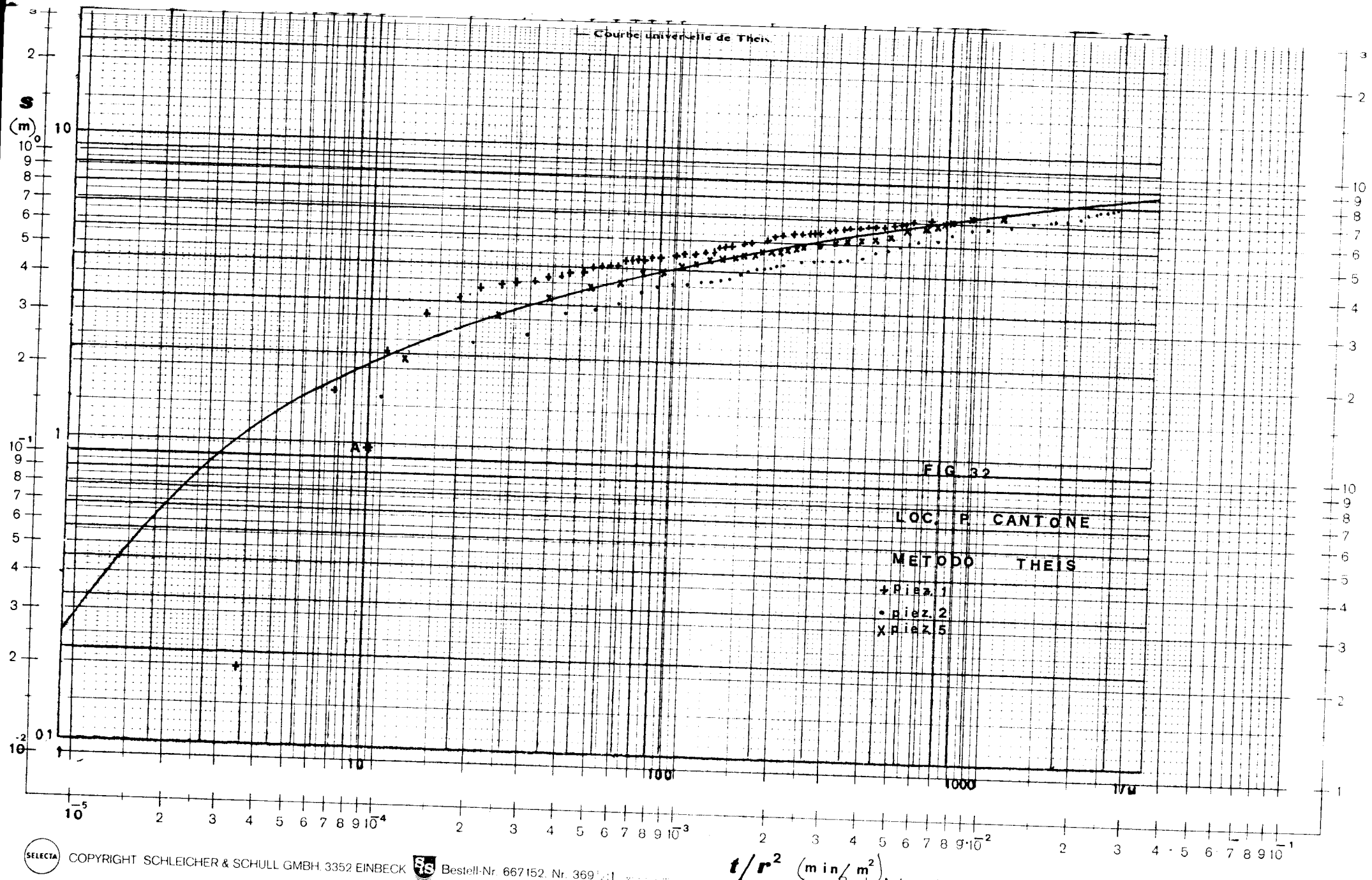
Utilizzando i dati relativi a tutti i piezometri in fig. 31 b), per un ciclo logaritmico la miglior retta interpolante risulta avere pendenza $\Delta S_m = 0.2$ cui corrisponde, sempre applicando la (10), una trasmissività kD = I3448 m^2/giorno.

Indubbiamente i risultati ottenuti sono piuttosto discordi e tali da rendere il metodo inapplicabile (si confrontino le curve caratteristiche dei pozzi, figg. 28,29,30); tuttavia i valori ottenuti con i piezometri 2 e 5 sembrano confermare, come si vedrà, il valore medio di trasmissività ottenuto con altre elaborazioni. Il particolare andamento della curva relativa al piezometro n°1 , fig. 28, ha sconsigliato comunque l'utilizzazione dei dati relativi allo stesso in alcuni dei metodi successivamente applicati.

Modelli di regime transitorio

Metodo di THEIS (cfr. pag. 73)

Dalle tabb. 6,7,8 vengono ricavati i valori degli abbassamenti registrati ai piezometri ed i corrispondenti valori di t/r^2. Tali valori sono riportati nella fig. 32 in scala doppio logaritmica. Il con-



SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHULL GMBH 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667152. Nr. 369

Beide Achsen logar. geteilt von 1 bis 10000 und 1 bis 300 Einheit 62.5 mm

fronto della curva interpolante con la curva tipo di THEIS porta, scelta la posizione di miglior fitting delle curve mantenendo paralleli gli assi coordinati, nel punto di coordinate $W(u) = 1$ e $1/u = 10$, ai corrispondenti valori nel diagramma sperimentale :

$t/r^2 = 9\ 10^{-4}$ min $/m^2$; $s = 0.113$ m

Sostituendo i valori noti nella (27) :

$$kD = \frac{7344 \cdot 1}{4\pi \cdot 0.113} = 5171.83 \text{ m}^2/\text{giorno}$$

e nella (29) :

$$S = \frac{4 \cdot 5171 \cdot 9 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 1440} = 1.29 \cdot 10^{-3}$$

Metodo di CHOW (cfr. pag. 85)

Viene applicato direttamente in figg. 29,30 ;

in fig. 29 per il piezometro 2 si ha :

$s_A = 0.41$ m $\quad t_A = 5$ min $\quad s_A = 0.25$

$$F(u) = \frac{s_A}{s_A} = \frac{0.41}{0.25} = 1.64$$

Dalle tavv. di Appendice II si ottiene :

$u_A = 1.4\ 10^{-2} \quad W(u)_A = 3.70$

che sostituiti nella (43) danno la trasmissività

$$kD = \frac{Q \; W(u)_A}{4\pi \; s_A} \qquad (43)$$

$$kD = \frac{7344 \cdot 3.70}{4\pi \cdot 0.41} = 5274 \text{ m}^2/\text{giorno}$$

e nella (44) il coefficiente di immagazzinamento :

$$S = \frac{4 u_A \; kD \; t_A}{r^2} \qquad (44)$$

$$S = \frac{4 \cdot 5274 \cdot 1.4 \cdot 10^{-2} \cdot 5}{1440 \cdot 5041} = 2.035 \cdot 10^{-4}$$

Analogamente per il piezometro n°5 ,fig. 30 si ha :

t_A = 5 min $\quad s_A$ = 0.5 m $\quad s_A$ = 0.265

F(u) = 1.88

Dalle tabulazioni si ottiene :

$u_A = 7.7 \; 10^{-3} \quad W(u)_A = 4.28$

Con le opportune sostituzioni :

$$kD = \frac{7344 \cdot 4.28}{4\pi \cdot 0.5} = 5002 \text{ m}^2/\text{giorno}$$

$$S = \frac{4 \cdot 5002 \cdot 7.7 \cdot 10^{-3} \cdot 5}{4225 \cdot 1440} = 1.26 \cdot 10^{-4}$$

Si noti che rispetto al metodo di Theis i valori calcolati per kD sono pressochè eguali, mentre i valori calcolati per S differiscono di un fattore 10^{-1}.

Metodo di JACOB (I) (cfr.pag. 8I)

Basandosi sulla retta interpolante tratteggiata nella fig. 29 , per il piezometro n°2 si ricava :

$t_o = 1.7\ 10^{-1}$ min $\qquad \Delta s_m = 0.25$

Sostituendo nella (36) :

$$kD = \frac{2.30\ Q}{4\pi\ \Delta s_m} \qquad (36)$$

$$kD = \frac{2.30 \cdot 7344}{4\pi \cdot 0.25} = 5376.63\ m^2/\text{giorno}$$

e nella (35) :

$$S = \frac{2.25\ kD\ t_o}{r^2} \qquad (35)$$

$$S = \frac{2.25 \cdot 5376 \cdot 1.7 \cdot 10^{-1}}{5041 \cdot 1440} = 2.8 \cdot 10^{-4}$$

Dalla fig. 30 , per il piezometro n°5 si ottiene:

$t_o = 1.2\ 10^{-1}$ min $\qquad\qquad \Delta s_m = 0.285$

e analogamente a quanto sopra :

$$kD = \frac{2.30 \cdot 7344}{4\pi \cdot 0.285} = 4716.3\ m^2/giorno$$

$$S = \frac{2.25 \cdot 4716.3 \cdot 1.2 \cdot 10^{-1}}{4225 \cdot 1440} = 2.09 \cdot 10^{-4}$$

È stata applicata la verifica per $u < 0.01$,che ha portato a definire un tempo teorico minimo di pompaggio $>$ 10 minuti per il piezometro n°2,contro un tempo reale di 89 min,e di un tempo teorico minimo $>$ 7 min contro un tempo reale di 87 min per il piezometro n°5 . Poichè entrambi i piezometri soddisfano la condizione $u < 0.01$,i valori di kD e di S ottenuti sono accettabili .

Metodo di JACOB (II)

Dall'applicazione analitica della procedura,in quanto quella grafica non era effettuabile,si è ricavata la tabella 9 ,ove vengono riportati i tempi scelti per l'applicazione del metodo,gli abbassamenti registrati ai piezometri 2 e 5,il valore di r_o (raggio di influenza del pompaggio al tempo t) e di s ,pendenza della

TABELLA 9

Metodo di JACOB - Risultati

	t (min)	s_2 (m)	s_5 (m)	r_o (m)	s (m)	kD m^2/giorno	S
a)	3	0.350	0.440	99.7	2.37	II34.3	5.34 $I0^{-4}$
b)	6	0.420	0.5I5	I07.4	2.50	I075.3	9.23 $I0^{-4}$
c)	I0	0.480	0.555	I24.2	I.97	I364.6	I.38 $I0^{-3}$
d)	I5	0.5I5	0.590	I29.4	I.97	I364.6	I.9I $I0^{-3}$
e)	25	0.575	0.667	I22.6	2.42	III0.8	2.88 $I0^{-3}$
f)	43	0.660	0.735	I53.2	I.97	III0.8	3.I7 $I0^{-3}$
g)	85	0.725	0.750	897.4	0.65	409I.8	6.74 $I0^{-4}$

TABELLA 10

Verifica per $u < 0.01$ dei risultati di tab. 9

	tempo teorico di pompaggio (min)		tempo reale (min)
	piezometro 2	piezometro 5	
a)	85	7I	3
b)	I56	I30	6
c)	I83	I53	I0
d)	254	2I2	I5
e)	470	394	25
f)	5I9	435	43
g)	30	25	85

retta interpolante, i corrispondenti valori di kD e di S , determinati mediante la (37) e la (38) rispettivamente.

Sottoponendo alla verifica $u < 0.01$ i valori ottenuti si ottiene la tabella 10 ove per ogni piezometro viene riportato il tempo teorico minimo di pompaggio calcolato, contro il tempo reale utilizzato per il calcolo di kD e S . Si può notare in questa tabella che il caso g) è l'unico per cui la condizione $u < 0.01$ viene soddisfatta . Pertanto vengono considerati validi ed accettabili solo i valori corrispondenti, kD = 4091.8 m^2/giorno e $S = 6.7 \cdot 10^{-4}$. Il raggio di influenza ricavato per questo caso è di 897 m .

Metodo di JACOB (III)

Viene applicato in fig. 33 . L'intercetta sull'asse delle ascisse della retta di interpolazione fornisce un $(t/r^2)_o = 1.7 \cdot 10^{-5}$ con una pendenza, calcolata su un ciclo logaritmico, $\Delta s = 0.255$.

Applicando la (39) si ottiene la trasmissività :

$$kD = \frac{2.30 \; Q}{4\pi \; \Delta s} \qquad (39)$$

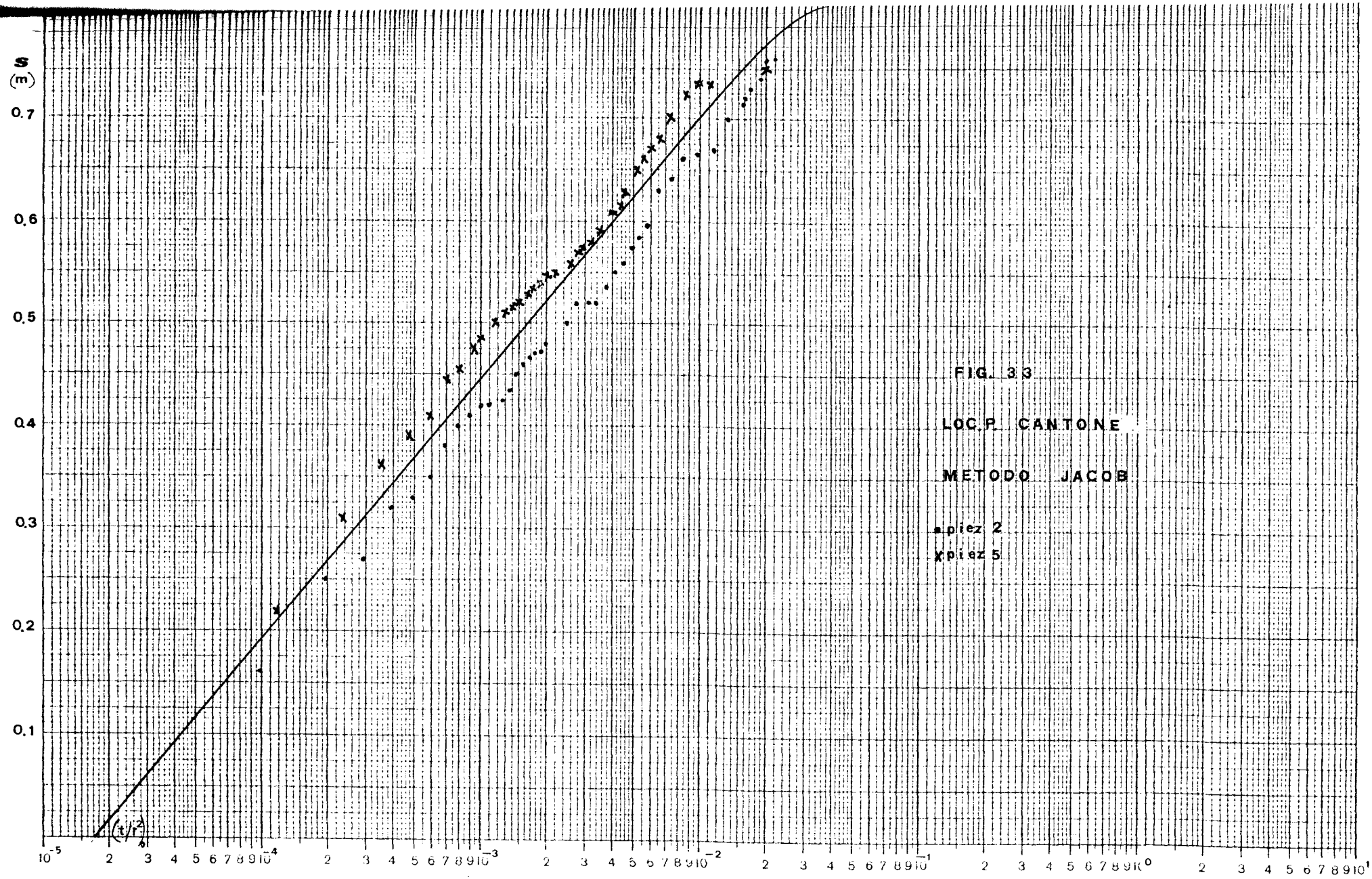


FIG. 33

LOC. P. CANTONE

METODO JACOB

● piez 2

X piez 5

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHÜLL GMBH, 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667051, Nr. 442 ½ A 4 MADE IN GERMANY

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000000, Einheit 42,5 mm, die andere in mm

$$kD = \frac{2.30 \cdot 7344}{4\pi \cdot 0.255} = 5271.21 \ m^2/giorno$$

e con la (40) il coefficiente di immagazzinamento:

$$S = \frac{2.25\ kD\ (t/r^2)_0}{1440} \qquad (40)$$

$$S = \frac{2.25\ 5271.21\ 1.7\ 10^{-5}}{1440} = 1.46\ 10^{-4}$$

Sottoposti a verifica per $u < 0.01$ questi valori sono risultati accettabili.

Metodi di risalita (cfr. pag. 87)

Sono state effettuate, ad avvenuta cessazione del pompaggio, delle misure in risalita nei piezometri n°2 e n°5 . Nelle tabb. 11 e 12 vengono riportati i valori registrati dell'innalzamento del livello statico s" ed i tempi dalla cessazione del pompaggio t" e dall'inizio del pompaggio t , insieme con il rapporto t/t" . Tali valori sono stati diagrammati per ottenere la retta interpolante secondo la metodologia di analisi di THEIS, descritta a pag. 89 .

TABELLA 11

Misure di risalita - Dati relativi al piez.2

t" (min)	t (min)	s" (m)	t/t"
7	II5	0.35	I6.43
9	II7	0.33	I3.00
I0	II8	0.3I	II.80
II	II9	0.29	I0.82
I4	I22	0.28	8.7I
I5	I23	0.26	8.20
I6	I24	0.25	7.75
I7	I25	0.25	7.35
I9	I27	0.23	6.68
2I	I29	0.22	6.I4
23	I3I	0.2I	5.70
25	I33	0.20	5.32
27	I35	0.I9	5.00
29	I37	0.I8	4.72
3I	I39	0.I8	4.48
33	I4I	0.I7	4.27
35	I43	0.I6	4.09
37	I45	0.I6	3.92

Livello stabilizzato a t = 90 min : 30.0I m dal p.c.

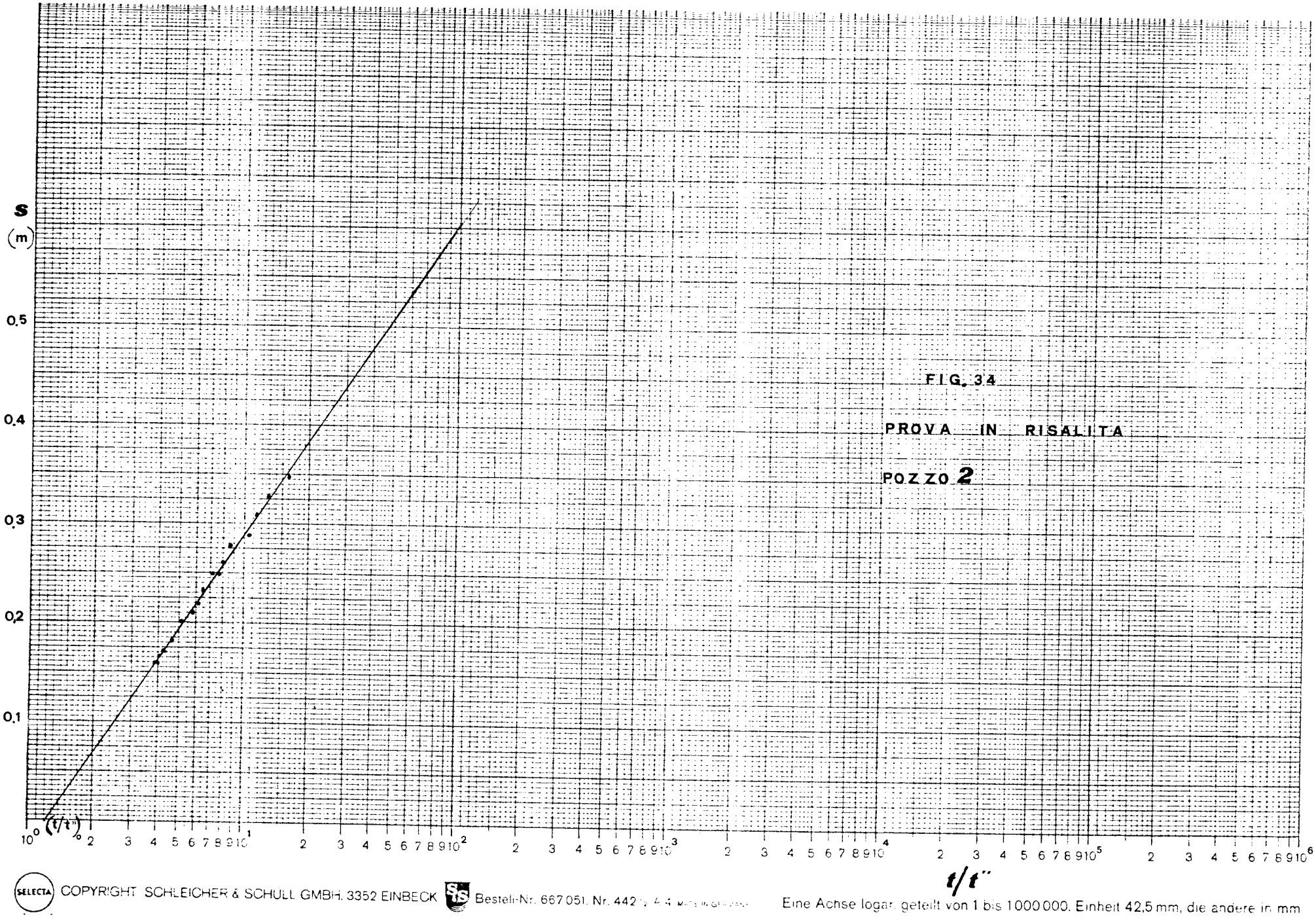


FIG. 34

PROVA IN RISALITA

POZZO 2

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHULL GMBH. 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667051. Nr. 442

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000000. Einheit 42,5 mm, die andere in mm

TABELLA 12

Misure di risalita - Dati relativi al piez. 5

t" (min)	t (min)	s" (m)	t/t"
I.5	I09.5	0.5I	73.00
4.8	II2.8	0.3I	23.50
6.8	II4.8	0.26	I6.88
8.5	II6.5	0.23	I3.7I
I0.7	II8.7	0.20	II.09
I3.7	I2I.7	0.I7	8.88
I6.5	I24.5	0.I5	7.55
I9.5	I27.5	0.I3	6.54
23.3	I3I.3	0.II	5.64
28.2	I36.2	0.09	4.83
34.2	I42.2	0.07	4.I6

Livello stabilizzato a t = 87 min : 30.72 m dal p.c.

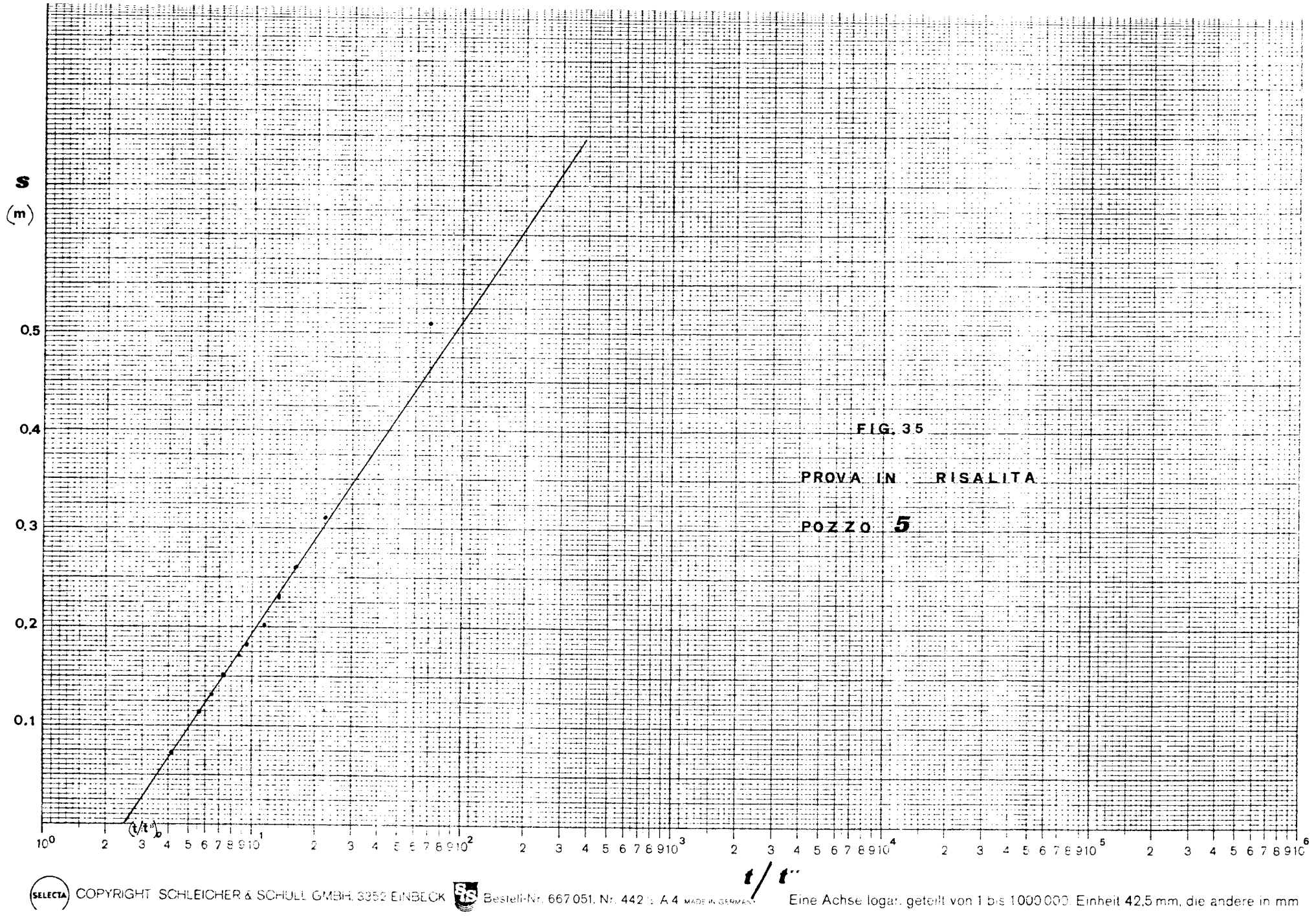


FIG. 35

PROVA IN RISALITA

POZZO 5

SELECTA COPYRIGHT SCHLEICHER & SCHÜLL GMBH. 3352 EINBECK Bestell-Nr. 667051. Nr. 442 1 A 4 MADE IN GERMANY

Eine Achse logar. geteilt von 1 bis 1000000 Einheit 42,5 mm, die andere in mm

Per il piezometro n°2 si ha, dalla fig. 34 che $\Delta s'' = 0.315$. Applicando la (47), la trasmissività è pari a:

$$kD = \frac{2.30\ Q}{4\pi\ \Delta s''} \qquad (47)$$

$$kD = \frac{2.30 \cdot 7344}{4\pi \cdot 0.315} = 4267.17\ m^2/giorno$$

mentre per il piezometro n°5, dalla fig. 35 , $s'' = 0.32$; da cui:

$$kD = \frac{2.30 \cdot 7344}{4\pi \cdot 0.32} = 4200.5\ m^2/giorno$$

La variazione relativa del coefficiente di immagazzinamento tra la fase di pompaggio e la fase di risalita è stata calcolata utilizzando la (50) :

$$(t/t'')_o = \frac{S}{S''} \qquad (50)$$

Per il piezometro n°2 risulta $S/S'' = 1.3$; per il piezometro n°5, $S/S'' = 2.4$. Pertanto, secondo quanto detto nel paragrafo 7.1, l'acquifero sarebbe soggetto ad una rialimentazione.

Nella seguente tabella 13 vengono riassunti e confrontati i valori della trasmissività e del coefficiente di immagazzinamento ottenuti mediante la applicazione delle varie metodologie di analisi .

TABELLA 13

Metodo	kD (m^2/giorno)	S	k cm/sec	S/S"
THIEM I	5162.59	-	$9.5 \cdot 10^{-2}$	-
THIEM II	5134.10	-	$9.5 \cdot 10^{-2}$	-
THEIS	5171.83	$1.29 \cdot 10^{-3}$	$9.5 \cdot 10^{-2}$	-
CHOW (2)	5274	$2.03 \cdot 10^{-4}$	$9.7 \cdot 10^{-2}$	-
CHOW (5)	5002.6I	$1.26 \cdot 10^{-4}$	$9.2 \cdot 10^{-2}$	-
JACOB I	5376.63	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$9.9 \cdot 10^{-2}$	-
JACOB II	409I.8	$6.74 \cdot 10^{-4}$	$7.6 \cdot 10^{-2}$	-
JACOB III	5271.21	$1.46 \cdot 10^{-4}$	$9.7 \cdot 10^{-2}$	-
RECOVERY (2)	4267.17	-	$7.8 \cdot 10^{-2}$	1.3
RECOVERY (5)	4200.5	-	$7.7 \cdot 10^{-2}$	2.4

È da notare la spiccata omogeneità di valori ottenuti, soprattutto per ciò che concerne la trasmissività, nei metodi basati sul modello di regime transitorio. Il valore medio di trasmissività è di circa 5000 m^2/giorno. Assegnando all'acquifero uno spessore globale di 63 m si ottiene per il coefficiente di permeabilità il valore di $9 \cdot 10^{-2}$ cm/sec, cui corrisponde un grado di permeabilità piuttosto elevato.

Minore omogeneità si ha invece per i valori del coefficiente di immagazzinamento: nell'analisi secondo il metodo di THEIS esso è di un ordine di grandezza superiore ai valori ricavati secondo gli altri metodi, che per contro risultano tra loro abbastanza uniformi.

Dal raffronto tra i livelli statici delle quote dei piezometri si è ricavato un gradiente idraulico medio $i = 0.0046 = 4.6$ ‰. Applicando la (51), la portata di flusso unitaria viene ad essere, per l'acquifero in esame : $q = 23$ m^2/giorno .

Adottando per un calcolo approssimato della velocità di flusso effettiva della falda le stesse stime di po-

rosità efficace del par. 7.2 si ottiene :

per una porosità efficace n_e = 15 % ,la velocità effettiva v_e ,secondo la (53), è di $2.76 \cdot 10^{-3}$ cm/sec ;

per una porosità efficace n_e = 20 % , v_e = 2.07 cm/sec .

7.4 Considerazioni riassuntive.

Come già accennato nei paragrafi precedenti,i tests hanno interessato,in due diverse località,due dei principali orizzonti acquiferi della parte orientale dell'anfiteatro morenico. Si tratta specificatamente degli orizzonti B e C ,individuati nelle sezioni litostratigrafiche (cfr.par.5). I valori di permeabilità ottenuti per le due località sono molto simili,a conferma della omogeneità laterale di questi acquiferi evidenziata nelle sezioni: $k = 1.6\ 10^{-1}$ cm/sec in loc. La Sacca e $k = 9\ 10^{-2}$ cm/sec in loc. P.te Cantone. Si tratta di valori piuttosto elevati,così come sono elevati in genere gli altri parametri idrodinamici:trasmissività,coefficiente di immagazzinamento,portata di flusso unitaria. Tutto ciò indica una buona potenzialità della falda dal punto di vista del-

lo sfruttamento.

Inoltre,un dato importante e significativo emerso dai tests di pompaggio,in particolare quelli effettuati in loc. P.te Cantone,è costituito dall'indicazione, fornita dal rapporto tra i coefficienti di immagazzinamento S ed S"(in fase di depressione e di risalita della falda rispettivamente),che gli acquiferi sono soggetti a rialimentazione. È questa un'ulteriore conferma della osservata connessione tra acquiferi in pressione della zona orientale ed il lago di Garda; purtroppo,per la brevità dei tempi di prova,non è stato possibile definire mediante opportuni metodi analitici la posizione del confine di ricarica e fornire così una rigorosa conferma del detto collegamento idrogeologico.

Altre prove di pompaggio,eseguite ai limiti esterni dell'anfiteatro morenico,verso la pianura mantovana (+),

(+) : Carlo Damiani,Tesi di laurea in preparazione presso l'Istituto di Geologia dell'Univ. di Padova

hanno evidenziato che le caratteristiche idrauliche di questi orizzonti si mantengono pressochè costanti anche più a Sud. Per ciò che riguarda la parte occidentale dell'anfiteatro morenico,non è stato possibile,almeno sinora,compiere tests di pompaggio in condizioni di campagna tali da poter fornire risultati certamente affidabili. Dai dati che si è potuto raccogliere risulta comunque che indicativamente gli acquiferi della parte occidentale della morena del Garda sono caratterizzati da parametri idraulici con ordine di grandezza comparabile a quelli della parte orientale.

8. UTILIZZAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE

Lo sfruttamento delle risorse idriche nell'area considerata è intenso e rivolto a più scopi:uso irriguo,uso industriale,uso civile.

Il periodo di massima utilizzazione delle risorse idriche è quello estivo,principalmente per due motivi:

- le aumentate esigenze di irrigazione dei terreni agricoli
- il notevole incremento della popolazione residente durante la stagione estiva,soprattutto nella fascia dei cinque Km dalla costa del lago di Garda.

Il prelievo delle acque è diversificato su più fonti :

1 Lago di Garda

Gli enti comunali rivieraschi del Garda prelevano parte delle portate globali di cui necessitano,soprattutto per uso civile,mediante prese a lago,che garantiscono un abbondante e continuo rifornimento,ed i

cui costi di impianto e manutenzione sono relativamente bassi.

2 F.Chiese e F.Mincio

Nelle fasce di territorio adiacenti a questi due corsi d'acqua,l'acqua viene prelevata per uso agricolo mediante canalizzazioni di derivazione,di cui si è accennato trattando dell'idrografia superficiale.
Non è stato possibile stimare,per la molteplicità dei punti di prelievo,la quantità globale di acqua derivata da ciascuno dei due fiumi.

3 Acquiferi in pressione

Le falde in pressione forniscono i maggiori volumi idrici prelevati nell'area in esame.
Tutti i comuni,in particolar modo quelli interni allo anfiteatro,cui non è possibile attingere al bacino del Garda,possiedono pozzi attingenti a queste falde.
Ai pozzi degli acquedotti comunali si aggiungono i numerosi pozzi privati,da cui l'acqua viene emunta ad uso domestico,industriale e soprattutto irriguo: da aprile ad ottobre i terreni agricoli vengono continuamente irrigati,se si escludono i brevi periodi di

apporto meteorico.

In Appendice I vengono fornite le portate dei pozzi in cui esse sono note. Sulla base dei dati a disposizione è stata costruita la tabella 14 .

TABELLA 14

Pozzi attingenti alle falde in pressione - Portate

	n° di pozzi	portata totale (l/sec)	portata media unitaria (l/sec)
Pozzi privati ad uso irriguo	29	I903	65.6
Pozzi privati ad uso industriale	8	I56	I9.5
Pozzi privati ad uso domestico	1	25	25
Pozzi di enti comunali	27	555	20.5
Totali	65	2639	--------

L'informazione quantitativa che da essa si può trarre ha un valore relativo,essendo i dati utilizzati sola-

mente parziali,ma si può notare che :

- l'utenza privata è notevolmente superiore a quella pubblica,e ciò è ancor più evidente se si considera che,grazie alla collaborazione dei vari servizi acquedotto,sono stati censiti tutti i pozzi di enti comunali,mentre quelli privati lo sono stati solo in parte.
- la portata media unitaria dei pozzi indica che i pozzi per uso irriguo sono dimensionati per emungimenti di molto superiori a quelli per uso industriale e civile
- i pozzi ad uso domestico sono rari,e ciò è dovuto alla capillare rete di distribuzione degli acquedotti comunali.

Tenendo presente che il numero di pozzi che si è riusciti a censire è considerevolmente inferiore a quello reale,si può comprendere quanto siano notevoli le portate emunte dalle falde in pressione,soprattutto, si ripete,durante la stagione estiva. Si può altresì comprendere come queste falde costituiscano una vera e propria ricchezza naturale per il territorio gardesano,ricchezza di cui le amministrazioni locali non si sono ancora ben rese conto,ed il cui sfruttamento

andrebbe,a nostro parere,sottoposto a verifica,allo scopo di una più razionale gestione.

4 Acquiferi liberi

Le falde libere sono state sfruttate sino agli anni Cinquanta con una certa continuità. Attualmente i pozzi freatici sono quasi tutti inutilizzati o addirittura smantellati,in quanto non più in grado di soddisfare quantitativamente e qualitativamente le esigenze idriche locali.

Le portate un tempo emunte,a quanto appreso dai proprietari,erano in genere piuttosto scarse e provocavano abbassamenti anche notevoli del livello di falda.

Quasi tutte le vecchie cascine possiedono,o possedevano,un pozzo freatico,dato questo che dovrebbe facilitare un'eventuale operazione di censimento di questi pozzi.

5 Sorgenti

Nel territorio in esame sono presenti delle sorgenti, cartografate in tav. 2 . Più propriamente si tratterebbe di fontanili,in quanto dovute ad emergenza di falde freatiche,siti al di fuori dell'abituale contesto

di pianura.

Tutti sono caratterizzati da scarse portate,che non superano i 3 l/sec ; alcuni di essi sono utilizzati a scopo vario (alimentazione di fontane,allevamento di trote,ecc.) .

Le acque che in vario modo vengono utilizzate sono in parte restituite al lago di Garda,previa depurazione,in parte per infiltrazione efficace rialimentano le sole falde freatiche nei periodi irrigui,in parte infine vanno perdute per i processi di evapotraspirazione.

Un bilancio quantitativo dell'utilizzazione delle risorse idriche nell'area considerata risulta per il momento non affidabile,neppure a livello di stima,per la carenza di dati al riguardo.

9. CONCLUSIONI

Le indagini condotte hanno permesso di definire le caratteristiche litostratigrafiche ed idrogeologiche generali dell'anfiteatro morenico del lago di Garda e di chiarirne alcuni aspetti salienti.
Attraverso l'analisi dei dati stratigrafici disponibili si è potuto appurare che al di sotto della copertura morenica s.s., estremamente omogenea e con struttura caotica, si possono individuare degli orizzonti molto più omogenei, dotati di una geometria abbastanza regolare. Tali orizzonti si individuano sino alla profondità massima raggiunta dalle terebrazioni, 200 m. Verso N essi paiono intersecare la superficie dei fondali del lago di Garda, mentre, ai margini dell'anfiteatro morenico, si ricollegano con gli analoghi livelli della pianura mantovana e bresciana. Tale raccordo avviene per digitazione dei vari orizzonti nella parte superiore della copertura; a maggior profondità, a quanto si è potuto desumere dai dati a disposizione, è invece più continuo.
Alcuni elementi inducono a pensare che esistano delle relazioni di carattere litostratigrafico ed idrogeolo-

gico tra il sistema deposizionale del fiume Chiese e l'anfiteatro morenico,la cui definizione richiede la acquisizione di ulteriori dati nelle aree limitrofe a quella esaminata.

Uno degli aspetti più interessanti emersi dallo studio delle caratteristiche litostratigrafiche dello anfiteatro morenico è la suddivisione dello stesso in due zone ben distinte,secondo una direzione circa N-S, a partire da una certa profondità. Le due aree sono separate da un disturbo di natura presumibilmente strutturale. Tale disturbo,che non viene rilevato nella parte più superficiale della copertura,esercita a maggiori profondità una notevole influenza sull'assetto idrogeologico delle falde in pressione,assumendo così notevole importanza nell'ambito dell'inquadramento idrogeologico dell'anfiteatro.

Per ciò che concerne l'idrogeologia dell'area in esame,si è distinta la presenza di un acquifero superficiale libero e di un sistema acquifero in pressione più in profondità,senza significative connessioni tra di loro.

La falda freatica,impostata nei materiali morenici s.s. sino ad una profondità massima di 35 m,è costituita da un insieme di piccole falde tra di loro indipendenti.

Queste falde costituiscono un sistema acquifero freatico strettamente legato,per geometria,caratteristiche ed alimentazione,alle particolari condizioni litostratigrafiche,topografiche e pluviometriche locali,che lo rendono nettamente distinto dai sistemi a falde libere della pianura padana,che hanno del resto ben altra rilevanza dal punto di vista dello sfruttamento.

Per ciò che concerne il sistema acquifero in pressione,di tipo multistrato,un dato caratterizzante e piuttosto singolare è la sua suddivisione,da parte del detto disturbo strutturale,in due subunità. Le indagini effettuate hanno mostrato che queste subunità mostrano caratteristiche idrauliche molto simili,tali da farle considerare per l'appunto appartenenti ad un unico sistema. In particolare si è evidenziata,mediante prove in campagna,la loro grande potenzialità e la loro ottima trasmissività,di circa 4500 m^2/giorno.
Altre indagini sperimentali hanno consentito di definire l'andamento dei deflussi delle falde in pressione nelle due subunità:nella parte occidentale si è evidenziata l'esistenza di un asse di alimentazione principale con direzione prevalente NW-SE;nella parte, o subunità,orientale è stato individuato un marcato

asse di drenaggio di direzione N-S, indicante una chiara situazione di rapporto con il lago di Garda.
Si è inoltre definito il regime, durante il periodo di studio, delle oscillazioni della superficie piezometrica delle falde in pressione: queste hanno una unica fase di piena, autunnale-invernale, ed un'unica fase di magra, estiva, con un andamento dell'idrogramma molto simile a quello del lago di Garda.
Proprio l'analisi delle caratteristiche del regime e dei deflussi delle falde in pressione ha costituito un elemento determinante nella verifica di una connessione idrogeologica, almeno parziale, tra falde in pressione e lago di Garda. È questo un risultato di notevole interesse, in quanto una simile situazione idrogeologica viene osservata piuttosto raramente con la rilevanza che il processo presumibilmente assume nel caso esaminato, e sebbene la bibliografia generale consideri frequentemente il caso teorico della dispersione in falda da bacini lacustri.
Le prove dell'esistenza di questo fenomeno nel bacino del Garda portano ad interrogarsi sulla eventualità che che esso sia presente anche in altri bacini lacustri prealpini contornati al margine meridionale da un an-

fiteatro morenico.

L'acquifero in pressione gardesano è risultato inoltre in connessione con le falde confinate della pianura mantovana antistante l'anfiteatro morenico. Il bacino del Garda verrebbe così, tramite tali acquiferi, a far parte del bilancio idrogeologico di questa parte della pianura padana.

R I N G R A Z I A M E N T I

Voglio qui ringraziare tutti coloro che hanno contribuito con la loro cortese collaborazione alla realizzazione di questo lavoro. In particolare voglio ringraziare :

- tutti i tecnici degli enti comunali compresi nella area di ricerca
- il geom. Gandini ed il sig. Giubelli del Consorzio Alto Mincio
- il sig. Maltini della Maltini Pozzi per Acqua
- il sig. Zeni del Servizio Acquedotto di Desenzano
- il sig. Conter del Servizio Acquedotto di Calcinato
- il prof. A. Zanferrari ed il dr. R. Zambrano della Università di Padova per le interessanti discussioni.

B I B L I O G R A F I A

1) AA VV ,I968 . Hydraulique des sols . Bullettin des Laboratoires routiers. Laboratoire centrale des ponts et des chaussèes. PARIS

2) AMMINISTRAZIONE Brov.Mantova , I980 . Studio geologico dell'anfiteatro morenico del Garda . MA TOVA

3) ANTONELLI R. , DAL PRA A. , I977 . Ricerche idrogeologiche e litostratigrafiche nell'alta pianura alluvionale del fiume Adige. Quad. Ist. Ric. Acque 34 (5) ROMA

4) ANTONELLI R. , DAL PRA A. , I980 . Hydrogèologie de la plaine du Po . 26ème Congrès Gèologique Internationale,Section S I5 . PARIS

5) ANTONELLI R. , STEFANINI S. , I982 . Nuovi contributi idrogeologici ed idrochimici sugli acquiferi dell'alta pianura veronese. Memorie Ist. Geol. Miner. Univ. Padova,vol XXXV,pp.35-67,6 tabb.,22 figg. PADOVA

6) BREMOND R. , I963 . Contribution à l'interpretation des mesures de debit et de rabattement dans les nappes souterraines. Ed. Gauthiers-Villars . PARIS

7) CASTANY G. , I963 . Traitè pratique des eaux souterraines . pp. 653 Ed. Dunod . PARIS

8) CHIESA G. , I977 . Manuale di geoidrologia . Associazione Nazionale Imprese Pozzi per Acqua. MILANO

9) CHIESA G. , I982 . Potenzialità idrica delle falde . Associazione Nazionale Imprese Pozzi per Acqua . MILANO

10) CHOW V.T. , I952 . On the determination of transmissivity and storage coefficients from pumping tests data . Am. Geophys. Union Trans. vol 33,pp. 397-404 WASHINGTON,D.C.

11) COZZAGLIO A. , I933 . Note illustrative della carta geologica delle Tre Venezie. Fogli Peschiera e Mantova. Parte I e II . Reg. Mag. Acque Venezia,Sez. Geologica. VENEZIA

12) COZZAGLIO A. , I934 (a) . Carta Geologica delle Tre Venezie. Foglio Peschiera. Reg. Mag.Acque Venezia. VENEZIA

13) COZZAGLIO A. , I934 (b) . Carta geologica delle Tre Venezie. Foglio Mantova . Reg. Mag. Acque Venezia. VENEZIA

14) DAL PRA A. , D'ALPAOS L. , I976 . Ricerche idrologiche per il previsto serbatoio di Falzè sul fiume Piave . Relaz. inedita al Ministero Agr. e Foreste. ROMA

15) DAL PRA A. , VERONESE F. , I972 . Caratteristiche degli acquiferi nell'alta pianura alluvionale del Brenta e loro rapporti con il corso d'acqua. Rap. Ist. Veneto SS.LL.AA.,5 . VENEZIA

16) DAVIES J.L. , I969 . Landforms of cold climates . Ed. M.I.T. Press CAMBRIDGE

17) DE MARCHI G. , I9I9 . Il regime idraulico del lago di Garda . Ufficio Reg. Mag. Acque Venezia .Pubbl. nº 88 VENEZIA

18) DUPUIT J. , I863 . Etudes théoretiques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux dècouverts et à travers les terrains perméables . Ed. Dunod PARIS

19) FINCH P.G. , I978 . Are the southern alpine lakes former Messinian canyons? Geophysical evidence for preglacial erosion in the southern alpine lakes. Marine Geology vol 27 pp. 289-302.

20) HABBE K.A. , I969 . Die Wurmzeitliche Vergletscherung der Gardasee-Gebietes. Freiburger Geog. Arb. vol`3 254 pp. ,6 figg. 11 tavv. FREIBURG

21) HUISMAN L. , I972 . Groundwater recovery. 336 pp. Ed. MacMillan LONDON

22) KRUSENMANN G.P.,DE RIDDER N.A. , I970 . Analysis and evaluation of pumping tests data. International Inst. for land reclamation and improvement,Bull.11 WAGENINGEN

23) JACOB C.E. , I940 . On the flow of water in an elastic artesian acquifer. Am. Geophys. Union Trans. vol.32,II,pp. 574-586. WASHINGTON,D.C.

24) JACOB C.E. , COOPER H.H. , I946 . A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. Am.Geophys. Union Trans. vol.27,pp. 526-534 ; WASHINGTON,D.C.

25) ISTITUTO DI RICERCA SULLE ACQUE, GRUPPO DI STUDIO SULLE FALDE ACQUIFERE PROFONDE DELLA PIANURA PADANA I979 . Lineamenti idrogeologici della pianura padana. Quad.Ist.Ric. Acque 28 (2) ROMA

26) ISTITUTO DI RICERCA SULLE ACQUE , I980 . Indagini sulla qualità delle acque lacustri italiane. Quad. Ist.Ric.Acque , 43 . ROMA.

27) ISTITUTO DI RICERCA SULLE ACQUE.GRUPPO DI STUDIO SULLE FALDE ACQUIFERE PROFONDE DELLA PIANURA PADANA. I98I . Indagine sulle falde acquifere profonde della pianura padana.Quad. Ist. Ric. Acque, 5I (3). ROMA

28) NICOLIS E. , I898 . Sugli antichi corsi del fiume Adige.Contribuzioni alla conoscenza della pianura veneta. Boll.Soc.Geol. It. vol. XVII,pp. 75 ,ROMA

29) NICOLIS E. , I899 . Triplice estensione glaciale ad oriente del lago di Garda. Atti Reg.Ist.Ven. SS. LL. AA. , vol LVIII,pp. 3I6-3I9. VENEZIA

30) NICOLIS E. , I90I . Successione stratigrafica nella porzione orientale dell'anfiteatro morenico del lago di Garda. Boll. Soc.Geol.It.,vol XX ,4 . ROMA

3I) PENCK A., BRUCKNER E. , I909 . Die Alpen im Eiszeitalter. Vol. III LEIPZIG

32) PIERI M. , GROPPI S. , I976 . Subsurface Geological Structure of the Po Plain . CNR,Prog. Fin. Geodinamica,pubbl. 4I4. ROMA

33) PULSELLI U. , I968 . Elaborazione dei dati idrologici dei bacini del Sarca-Garda,del Chiese,del Brembo e del Serio. L'Energia Elettrica,vol. XLV,n° 5 pp. 305-329 . ROMA

34) SACCO F. , I924 . Geoidrologia dei pozzi profondi della pianura Padana . Ufficio Idrografico del Pò . PARMA

35) SOTTANI N. , PRETTO L. , CUPOLO V. , BAGGIO P. , MARCOLONGO B. ,I976 . Il bilancio idrogeologico degli acquiferi della pianura a Nord di Vicenza. Quad. A.I.M. Vicenza e C.N.R. Padova.

36) TECHNITAL , I98I . Studio idrogeologico del comprensorio della Comunità del Garda . VERONA

37) THEIS C.V. , I935 . The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate of duration of discharge of a well using groundwater storage . Am.Geophys. Union Trans.,Reports,pp.5I9-524 WASHINGTON,D.C.

38) THIEM G. , I906 . Hydrologische methoden . Gebhardt Ed. , LEIPZIG

39) TODD D.K. , I959 . Groundwater hydrology . Ed. John Wiley and Sons, NEW YORK

40) TONINI R. , I976 . Indagini sul lago di Garda . Quad. Ist. Ric. Acque, I8 . ROMA

4I) TRUPIN G. , I964 . Manuel pratique d'essais de pompage. Rapport B.R.G.M. DS 64 A 60. PARIS

42) VECCHIA O. , I957 . Significato del fascio tettonico giudicario-atesino . Boll.Soc.Geol.It. vol 26 , I ROMA

43) VENZO S. , I957 . Rilevamento geologico dell'anfiteatro morenico del Garda. Parte I : tratto Gardone - - Desenzano. Mem.Soc.It. Sc.Nat. ,vol XII,2 . MILANO

44) VENZO S. , I96I . Rilevamento geologico dell'anfiteatro morenico del Garda. Parte II : tratto orientale Garda-Adige e anfiteatro atesino di Rivoli. Mem.Soc. It.Sc.Nat. vol XIII,1 . MILANO

45) VENZO S. , I965 . Rilevamento geologico dell'anfiteatro morenico frontale del Garda dal Chiese all'Adige. Mem.Soc.It.Sc.Nat. vol XIV,1 . MILANO

46) ZANFERRARI A. et alii , I982 . Evoluzione neotettonica dell'Italia Nord Orientale . Mem. Scienze Geologiche dell'Università di Padova,vol XXXV,pp. 355-376. PADOVA

Carte geologiche : CARRARO F.,MALARODA R.,PICCOLI G., STURANI C.,VENZO S. : Carta geologica d'Italia alla scala 1 : 100.000, Foglio 48 Peschiera,con note illustrative . Servizio Geologico d'Italia I969 .

A P P E N D I C E I

Vengono elencate le stratigrafie dei pozzi presenti nell'area di ricerca. Per ogni pozzo vengono inoltre fornite le coordinate,la quota,il nome del proprietario e ,quando note,le caratteristiche idrauliche.
Nella compilazione delle schede,effettuata in tempi diversi,si è utilizzata una numerazione progressiva dei pozzi diversa da quella adottata in seguito nella stesura di questo lavoro. Per una consultazione chiara e rapida viene fornita di seguito una tabella che riporta entrambe le numerazioni progressive.
Le stratigrafie riportate sono quelle originali di perforazione,e possono pertanto contenere alcune definizioni litologiche improprie.
Per i pozzi contrassegnati con un asterisco,la stratigrafia è tratta da: [36] .

Numerazioni progressive

testo e tavv.	Appendice	testo	app.
2	3	38	27
3	I	39	65
4	2	40	63
5	III	4I	82
6	II2	42	64
7	4	44	II4
I0	I05	45	69
II	II0	49	68
I2	28	52	67
I3	7	53	66
I4	8	55	II5
I5	5	56	43
I6	6	58	77
I8	I0	60	76
I9	9	65	74
2I	I06	64	75
22	I07	68	73
23	II	70	32
25	I8	7I	34
28	I2	72	33
29	I3	78	35
30	I4	79	36
3I	20	82	37
33	I7	83	38
34	30	84	39
35	3I	85	40
36	I6	86	4I
37	I9	87	42

testo e tavv.	appendice
89	44
90	45
9I	46
92	47
93	II3
97	60
98	57
I02	56