

INTERFERENZA SUL SISTEMA IDROGEOLOGICO SUPERFICIALE DEL TUNNEL SUBLAGUNARE IN PROGETTO TRA L'AEROPORTO MARCO POLO E VENEZIA

THE EFFECT ON THE SHALLOW AQUIFER SYSTEM OF THE PLANNED UNDERSEA SUBWAY LINKING VENICE TO MARCO POLO AIRPORT (ITALY)

RENZO ANTONELLI(*), GIUSEPPE COLLESELLI(**) & MATTEO CULTRERA(*)

(*) Università degli Studi di Padova - Dipartimento di Geoscienze - Via Giotto, 1 - 35127 Padova, Italy
E-mail: renzo.antonelli@unipd.it; cultrera@geologiatecnica.com

(**) Studio Colleselli & P., Ingegneria Geotecnica - Via Vigonovese, 115 - 35127 Padova, Italy
E-mail: giuseppe.colleselli@colleselligeotecnica.it

RIASSUNTO

Il progetto preliminare di una galleria sotterranea congiungente l'aeroporto "Marco Polo" con la città di Venezia, ha richiesto ricerche più approfondite e specifiche allo scopo di valutare l'impatto sul sottosuolo lagunare. Le indagini geognostiche disponibili e le prove idrauliche hanno consentito di realizzare un soddisfacente inquadramento geologico e idrogeologico dell'area in esame. Un modello matematico tridimensionale agli elementi finiti è stato utilizzato per ottenere una simulazione del flusso idrico sotterraneo in corrispondenza del tratto più critico dell'opera prevista. I risultati del calcolo hanno proposto alcuni scenari di previsione sulla distribuzione delle pressioni idrauliche, assumendo al contorno condizioni più o meno favorevoli. Le analisi numeriche hanno complessivamente fornito dati incoraggianti; questi, infatti, risultano del tutto compatibili con i margini di sicurezza richiesti dall'opera di progetto e per la salvaguardia dell'ambiente naturale.

TERMINI CHIAVE: tunnel sublagunare, acquifero multifalda superficiale, Laguna di Venezia; modello numerico

INTRODUZIONE

Nel contesto di uno sviluppo sostenibile dell'area veneziana è stato realizzato un progetto ed uno studio di impatto ambientale per un collegamento sotterraneo (Sistema di Trasporto Sublagunare) tra l'aeroporto "Marco Polo" di Tessera e la città di Venezia. Il progetto preliminare fu sottoposto all'esame della Commissione Regionale per la Valutazione di Impatto Ambientale (VIA).

La Commissione Regionale a tale proposito richiede alcuni chiarimenti e integrazioni per l'avanzamento dell'istruttoria.

Il presente lavoro ha preso spunto in particolare dalla necessità di più approfondite indagini sull'assetto, spessori e proprietà idrauliche delle unità idrogeologiche coinvolte; inoltre per una previsione delle interferenze indotte dal tunnel sul deflusso idrico sotterraneo, lo studio ha provato l'attendibilità del metodo numerico.

I dati utilizzati derivano sia da indagini appositamente eseguite lungo il tracciato della galleria, sia da un archivio dati di numerose indagini sperimentali eseguite nell'intorno dell'area di interesse.

ABSTRACT

The design of the undersea subway named "Sublagunare" joining "Marco Polo" Airport to the city of Venice has required specific research in order to evaluate the environmental impact on the lagoon subsoil. Past geognostic investigations and hydraulic tests have provided a satisfactory geologic and hydrogeologic setting of the area. A finite element 3-D model has been applied to the most critical tract of the planned tunnel. The flow model results have provided a set of predictions about hydraulic head distribution imposing more or less favourable boundary conditions. The numerical analyses have been encouraging as they give evidence of compatibility with the margin of safety requested by the tunnel design and with the protection of the natural environment.

KEY WORDS: undersea tunnel, shallow aquifer system, Venice Lagoon, numerical modelling

INTRODUCTION

The underground tunnel joining "Marco Polo" Airport to the city of Venice is part of a series of sustainable development projects under consideration for the Venice area. A preliminary feasibility study was done and submitted to the Ministry of Environment (VIA Committee) to assess the environmental impact.

The Regional Committee required deeper analysis and elaboration in order to move forward. The present investigations focus on the shape, thickness and hydraulic properties of the main hydrogeologic units.

The study uses a numerical approach to simulate the interference caused by the tunnel on the natural groundwater flow.

The data comes from specific tests done along the proposed path of the tunnel and also from the results of several past experimental investigations executed around the area of interest.

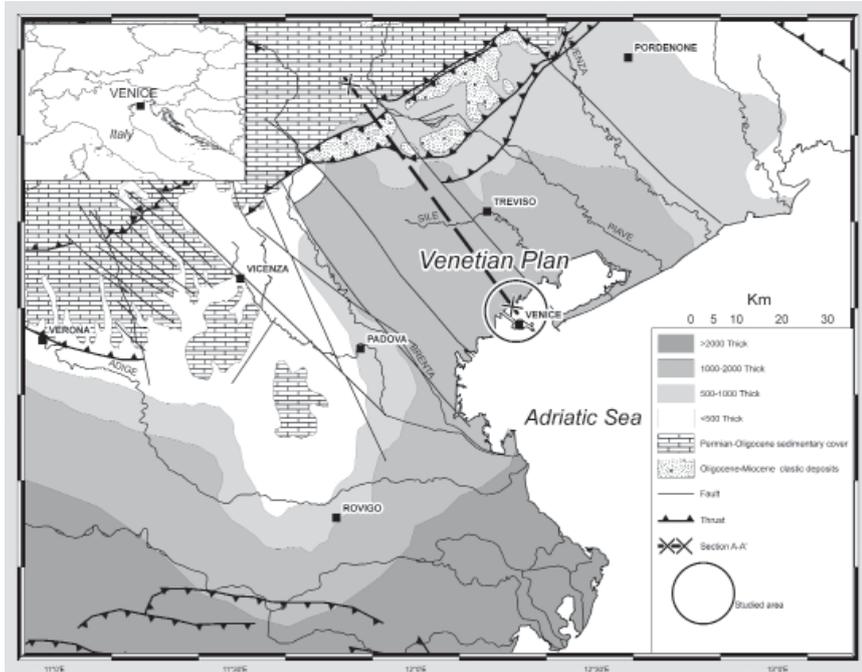


Fig. 1 - Inquadramento geologico e strutturale dell'Italia nord-orientale (modificato da AA.VV, Regione del Veneto, 1990)
 - Geological and structural setting of north-eastern Italy (modified from AA.VV, Regione del Veneto, 1990)

GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA DELLA PIANURA VENETA

La pianura veneta è localizzata nella parte settentrionale della costa adriatica, nel settore di avampaese tra il Sistema Appenninico con vergenza in direzione NE ed il Sistema Sudalpino frontale a vergenza SSE (Fig. 1).

Il Sistema Sudalpino è il risultato di un'evoluzione polifasica attiva nel Terziario. Il sistema strutturale più antico corrisponde al Mesoalpino (Eocene) e le successive fasi compressive Neoalpine (Oligocene-Miocene), che hanno prodotto il Sistema Dinarico (NW + SE), denotano una direzione NE nel settore orientale delle Alpi (BARBIERI *et alii*, 2004; CASTELLARIN *et alii*, 2006).

La pianura veneta che include l'entroterra della laguna di Venezia, è costituita da grandi conoidi alluvionali (*megafan*) composti, policronologici o polifasici (depositi Plio-Quaternari), il loro spessore aumenta verso SSE (BONDESAN & MENEGHEL, 2004; FONTANA *et alii*, 2008). La parte distale dei megafan del fiume Brenta e del fiume Piave fornirono un sostanziale contributo alla formazione della laguna di Venezia (Olocene). Nelle zone di alta pianura questi megafan sono in prevalenza costituiti da ghiaie e sabbie (Fig. 2). Tali depositi costituiscono la sede dell'acquifero indifferenziato, il quale viene alimentato dalle rilevanti dispersioni di alta pianura dei due principali fiumi, Brenta e Piave (VORLICEK *et alii*, 2004).

Procedendo verso la costa adriatica e verso Sud i materiali alluvionali indifferenziati evolvono in un sistema multistrato dove si alternano sedimenti coesivi ed incoerenti. Da un sistema acquifero indifferenziato, quindi, si passa gradualmente ad un sistema acquifero stratificato di tipo confinato o semiconfinato (Fig. 2) (ANTONELLI & MARI, 2007).

GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL SETTING OF THE VENETIAN PLAIN

The Venetian plain is located at the Northern end of the Adriatic Sea, in a foreland setting between the NE-verging external Apenninic thrusts and the south-eastern Alpine SSE-verging frontal thrusts (Fig. 1).

The South Eastern Alps are the result of poly-phase compressional evolution during the Tertiary age. The oldest structural system corresponds to the Mesoalpine (Eocene) and early Neoalpine (Oligo-Miocene) compressional events, which originated the Dinaric system (NW – SE trending) at the NE side of the Southern Alps (BARBIERI *et alii*, 2004; CASTELLARIN *et alii*, 2006).

The Venetian plain, including the hinterland of the Venice lagoon, consists of several large alluvial fans (*megafans*) whose width (Plio-Quaternary deposits) increases towards the SSE (BONDESAN & MENEGHEL, 2004; FONTANA *et alii*, 2008).

The Brenta and Piave distal megafans contributed to set up the shallow alluvial sediments of the Venice lagoon (Holocene). In the high plain north of Venice, these megafans are mostly made up of gravels and sands (Fig. 2).

These sediments are the setting of an unconfined aquifer which is fed by the dispersion of the Brenta and Piave rivers in the high plain (VORLICEK *et alii*, 2004).

Towards the south and closer to the Adriatic sea, the alluvial sediments move into a multi-layered system where cohesive and incohesive sediments alternate. Thus, the unconfined aquifer gradually evolves into a system of stratified, confined or semi-confined aquifers (Fig. 2) (ANTONELLI & MARI, 2007).

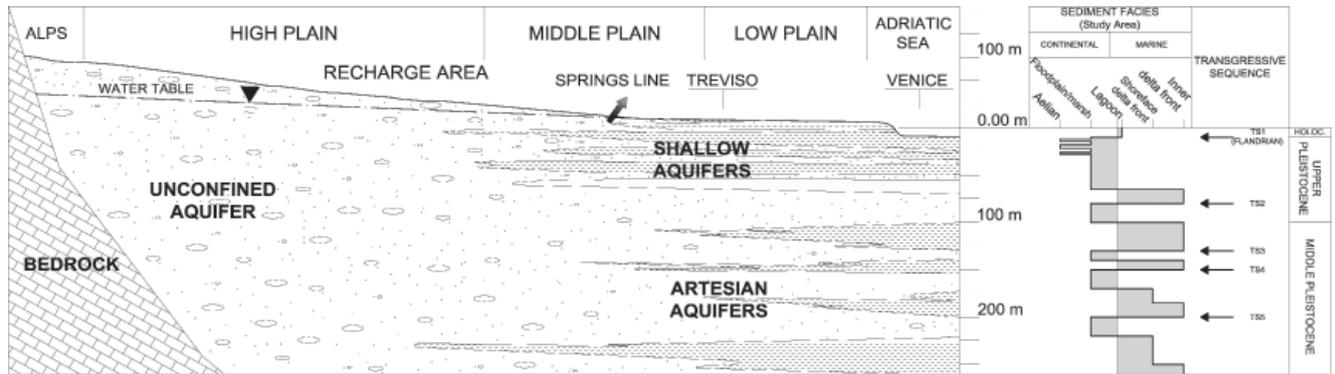
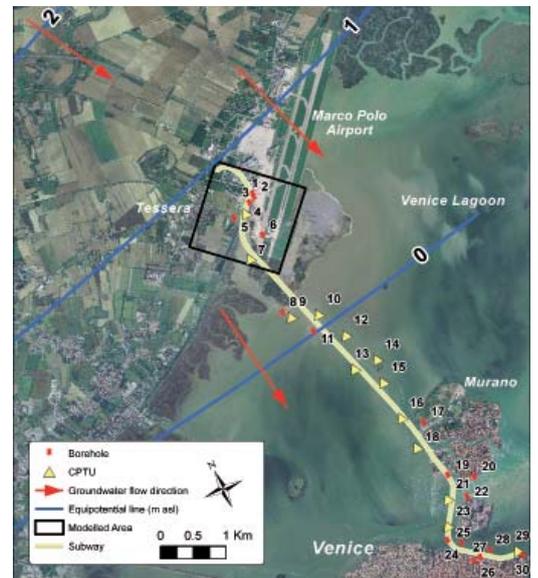


Fig. 2 - Sezione trasversale AA' di fig. 1. Sul lato destro associazioni di facies nelle sequenze trasgressive-regressive (modificato da ANTONELLI et alii, 1983, MASSARI et alii 2004)
 - Simplified hydrogeological cross section AA' of fig.1. At the right side the transgressive sequence and the sediment facies (modified from ANTONELLI et alii, 2007; MASSARI et alii, 2004)

Fig. 3 - Campo potenziometrico misurato (mod. da AA.VV., 1990; ANTONELLI & MARI, 2007; BOSCOLO & MION, 2008).e planimetria di progetto del tunnel con ubicazione delle prove CPTU e dei sondaggi
 - Measured potentiometric map (modified from AA.VV., 1990; ANTONELLI & MARI, 2007; BOSCOLO & MION, 2008) and tunnel layout and location of the drilling corings and CPTU



INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI STUDIO

Nell'area di indagine le sequenze acquifere possono essere divise in due parti: un settore multiacquifero superficiale fino a 50-70 m di profondità, dove prevalgono sedimenti di tipo continentale (Pleistocene superiore-Olocene), ed un sistema artesiano che si spinge fino a profondità superiori a 300 m (GATTO & CARBOGNIN, 1981).

La successione di quest'ultimo consiste in una serie di sequenze trasgressive-regressive dove si alternano depositi di origine marina, litorale, lagunare e fluviale (BRAMBATI et alii, 2003; KENT et alii, 2002; MASSARI et alii, 2004) (Fig. 2).

Nei sedimenti più superficiali, appartenenti all'ultimo massimo glaciale, dove dovrebbe essere posizionato il tunnel, prevalgono le sabbie fini e i limi argillosi in facies fluviale.

Il campo di flusso regionale, controllato dall'attività di ricarica e drenaggio dei bacini di Brenta e Piave, può essere considerato rappresentativo anche del sistema acquifero superficiale in oggetto (Fig. 3) (AA.VV., 1990; ANTONELLI & MARI, 2007; BOSCOLO & MION, 2008).

GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGIC SETTING OF THE STUDY AREA

In the area of interest, the aquifer sequences can be divided into two parts: the shallow multi-aquifer domain up to 50-70 m from ground level where continental sediment is prevalent (Late Pleistocene-Holocene) and a deep artesian aquifer with a depth greater than 300 m (GATTO & CARBOGNIN, 1981). The succession of the latter consists of an alternating series of marine, littoral, lagoon and fluvial deposits organised in a set of transgressive-regressive sequences which can be correlated with respective aquitards and aquifers (Fig. 2) (BRAMBATI et alii, 2003; KENT et alii, 2002; MASSARI et alii, 2004).

At the surface where the tunnel is being proposed, the sediment belongs to the Last Glacial Maximum and is composed mostly of fine sands and clayey silt found in fluvial facies.

The local pattern of ground water flow, which is determined by the recharging and drainage of the Brenta and Piave river basins, can also be considered as representative of the shallow multi-layered aquifer system. (Fig. 3) (AA.VV., 1990; ANTONELLI & MARI, 2007; BOSCOLO & MION, 2008).

MODELLO CONCETTUALE

Il progetto prevede lo scavo di un tunnel circolare mediante il metodo (TBM) di tipo Earth Pressure Balanced (EPB) (HERRENKNECHT, 1997; MELIS *et alii*, 2002). Il tunnel nel tratto indagato dovrebbe avere una lunghezza totale di circa 8.500 m e un diametro interno di 6,70 m.; il suo asse è previsto ad una profondità media di 13,5 m dal fondo lagunare, il suo arco inverso quindi si posiziona ad una profondità di 16,50-17,00 m. Il rivestimento definitivo del tunnel è costituito da conci in calcestruzzo prefabbricati e da miscela cementizia, al fine di garantire un'elevata resistenza meccanica ed idraulica (Fig. 4).

E' stata elaborata una sezione geologica coincidente con il tracciato della galleria dall'aeroporto Marco Polo all'Ospedale Civile di Venezia, utilizzando 17 perforazioni a carotaggio continuo e 13 CPTU posizionate a meno di 500 m dal suo asse (Fig.4). I valori di resistenza di punta e laterale nonché i valori di pressione desunti dalle prove CPTU hanno permesso di validare con buona precisione le sequenze stratigrafiche descritte nei carotaggi (FELLENUS & ESLAMI, 2000; LUNNE *et alii*, 1997; ROBERTSON, 1990).

La figura 5 riporta solo i primi 2300 m della sezione geologica del tracciato, in quanto in questo tratto iniziale si sono evidenziate le condizioni idrogeologiche più critiche: la galleria, infatti, in questo settore

CONCEPTUAL MODEL

The project has planned the digging of a circular tunnel by Tunnel Boring Machine method (TBM), Earth Pressure Balanced type (EPB) (HERRENKNECHT, 1997; MELIS *et alii*, 2002). The total length would be of about 8500 m with an internal diameter of 6.7 m.

The axis is planned at an average depth of 13.5m below the bed of the lagoon so that the inverted arch is 16.5-17.0 m deep.

The outer wall of the tunnel would be built by bringing in pre-cast concrete sections that are jacked into place as the TBM moves forward; meanwhile concrete is injected into the lining outer face to fill any voids.

A geological section coinciding with the whole path of the tunnel has been achieved using 17 drill core samples and 13 CPTU located within 500 m of the tunnel axis (Fig. 4).

The values of cone resistance, sleeve friction and water pressure, derived from the CPTU tests, have enabled us to identify the cored stratigraphic sequences more carefully (FELLENUS & ESLAMI, 2000; LUNNE *et alii*, 1997; ROBERTSON, 1990).

Figure 5 shows the first 2300m of the tunnel path's geological section as this initial part contains the domain's most critical hydrogeological conditions. In this section, the tunnel is almost completely

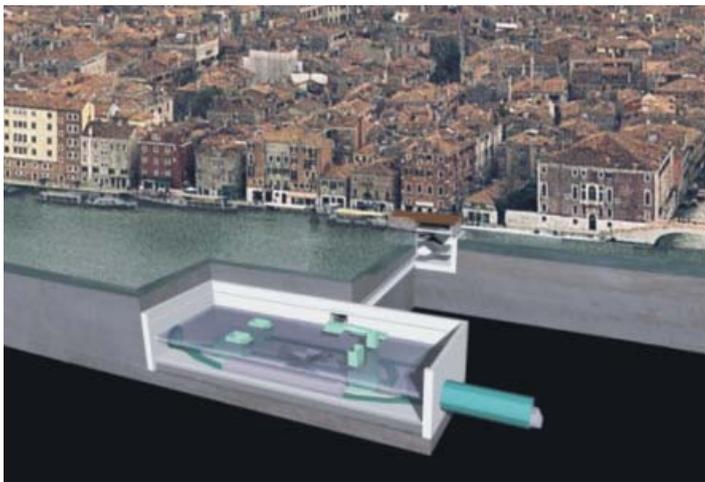
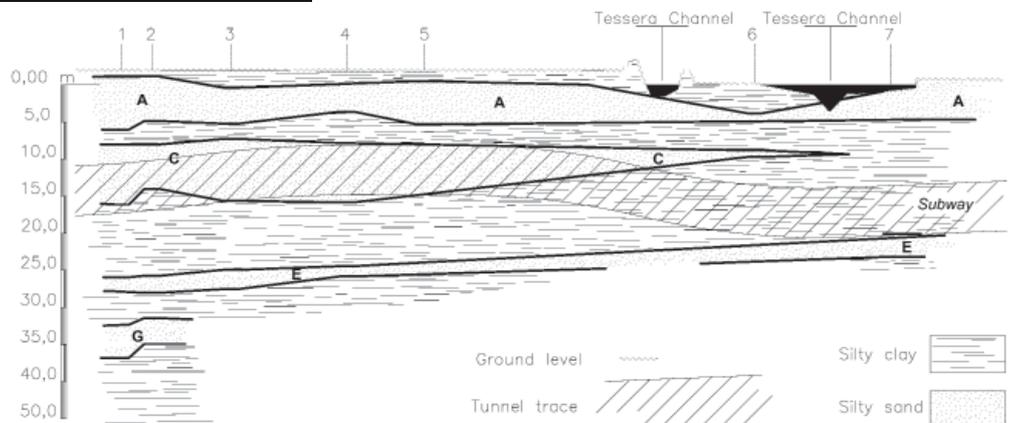


Fig. 4 - Sezione tipo di un'area di scambio della Sublagunare
- Sketch of subway station change

Fig. 5 - Sezione geologica dell'area modellata di fig. 3
- Simplified geological section of the modelled area of fig. 3



AQUIFER	k_{max}	k_{min}	i_{max}	i_{min}
A	1.00E-04	1.00E-06	na	na
C	1.02E-04	4.03E-05	0.0007	0.0003
E	9.78E-05	2.47E-05	na	na

Tab. 1 - Principali parametri idrogeologici desunti dalla letteratura
- Hydrogeological data available

del tracciato occupa quasi completamente il secondo livello acquifero (Fig. 5) e si colloca ortogonalmente alla direzione del flusso (Fig. 3).

Facies caratterizzate da livelli di argille, limi, e sabbie con intercalazioni di terreni organici si alternano lungo l'intero tracciato (CANALI *et alii*, 2007); la sezione geologica è stata elaborata fino ad una profondità media dal fondo lagunare di 25-30 m, fino ad una profondità massima esplorata di 50 m (Fig. 5).

Le osservazioni che seguono sono riferite al tratto modellato di fig. 5, ma si possono estendere all'intera traccia esaminata.

Il primo acquifero sabbioso, semiconfinato (definito con la lettera A), può affiorare localmente sul letto lagunare, mentre il suo limite inferiore è posizionato a 8-10 m di profondità. Talvolta la sua geometria diventa lenticolare con la tendenza ad un decremento di spessore e di granulometria in direzione SSE. Nelle aree prossime alla gronda lagunare questo acquifero risente dell'influenza mareale. Il secondo acquifero sabbioso (o primo acquifero confinato, lettera C) raggiunge uno spessore massimo di 7,0 m, è discretamente continuo con alcune brevi interruzioni; l'acquifero C è influenzato dalle oscillazioni tidali, a testimonianza di un probabile collegamento con il bacino lagunare. Il terzo acquifero (E) ha uno spessore massimo di 5,0 m, è continuo lungo tutta la sezione e si posiziona tra 20,0-27,0 al di sotto del livello del mare; non si registrano variazioni pressiometriche connesse con i cicli di marea. Indagini più approfondite hanno identificato un quarto acquifero (indicato come G) di alcuni metri di spessore e posizionato a circa 35 m di profondità.

I dati idrogeologici disponibili in letteratura consentono la parametrizzazione agli acquiferi A e C, mentre meno abbondanti sono le informazioni relative all'acquifero E; la maggior parte delle informazioni derivano da prove in foro di tipo lefranc, prove di pompaggio interpretate secondo i metodi di Theis e di Cooper-Jacob (MAV, 2007). In tavola 1 sono riportati gli intervalli di variazione di alcuni parametri idrogeologici (BASSAN & VITTURI, 2003; BOSCOLO & MION, 2008; DAL PRA *et alii*, 2000; MAV, 2007; VITTURI *et alii*, 2008; ZANGHERI & AURIGHI, 2001).

Per quanto concerne i parametri idrogeologici pertinenti ai livelli coesivi, si ricordano specifici lavori rivolti a evidenziare i caratteri di conducibilità idraulica e geotecnici in aree limitrofe a quella di studio, nei quali indagini dirette e di laboratorio consentono di definire la permeabilità di tali livelli in un range compreso tra 10^{-7} e 10^{-10} m/s (CRITTO *et alii*, 2004; RICCIERI *et alii*, 2002).

Lo scavo del tunnel coinvolge essenzialmente l'acquifero C, mentre nella parte più a sud del dominio di indagine l'acquifero E è quello maggiormente coinvolto (n. 19 e n. 27) (Fig. 3)

IL MODELLO DI SIMULAZIONE DEL FLUSSO SOTTERRANEO

L'interferenza tra il tunnel di progetto e il flusso idrico sotterraneo è stata simulata per mezzo di un modello matematico agli elementi finiti in 3D assumendo condizioni di flusso permanente in un mezzo poroso saturo di acqua dolce (Feflow code) (DIERSCH, 2007); trattandosi di un modello di flusso di tipo interpretativo non è richiesta necessariamente la calibrazione (ANDERSON & WOESSNER, 2002).

within the second level aquifer (Fig. 5) and is perpendicular to the flow of water (Fig. 3).

Facies made up of layers of clay, peat, sand and organic silt alternate along the entire tunnel path (CANALI *et alii*, 2007); the geological survey was done at an average depth of 25-30 m below sea level, up to a maximum depth of 50 m (Fig. 5).

The following observations concern the modelled tract of the tunnel represented in fig. 5, but can be extended to the entire geological section.

The first semi-confined sandy aquifer (defined by letter A) can emerge locally on the lagoon bed while its lower boundary lies 8-10 m deep. Sometimes its geometry becomes lenticular with a decreasing thickness and grain size towards SSE. In the areas close to the edge of the lagoon, the aquifer is affected by the sea tides.

The second sandy aquifer, (or first confined aquifer - letter C), reaches a maximum thickness of 7 m. It is fairly continuous but has some small interruptions. This aquifer is affected by the tides which shows a possible link with lagoon basin.

The third aquifer (E) is located 20-27 m below sea level, has a maximum thickness of 5m and is continuous along the entire section. In this aquifer there are no variations of pressure connected to the tide cycles.

Some deeper investigations have identified a fourth aquifer (G) which is a few meters thick, lying about 35 m deep.

The available hydrogeological data found in scientific literature relates mostly to aquifers A and C. On the other hand, there is not much available information pertaining to aquifer E. Nearly all hydraulic data has been retrieved by aquifer tests, interpreted by Theis and Cooper-Jacob methods, or by slug tests.

Table 1 shows the variation range of some of the hydrogeological parameters (BASSAN & VITTURI, 2003; BOSCOLO & MION, 2008; DAL PRA *et alii*, 2000; MAV, 2007; VITTURI *et alii*, 2008; ZANGHERI & AURIGHI, 2001).

As far as the hydraulic characters of the cohesive levels, we refer to some specific hydrogeological and geotechnical studies performed in the surrounding areas, where a conductivity range of 10^{-7} - 10^{-10} m/s has been estimated (CRITTO *et alii*, 2004; RICCIERI *et alii*, 2002).

The tunnel excavation mainly involves the aquifer C, while in the South-eastern part of the domain the aquifer E is intercepted (n. 19 and n. 27) (Fig. 3).

GROUNDWATER FLOW MODEL

The interference between the planned subway and the groundwater flow has been calculated by a 3D finite element mathematical model, assuming steady state flow conditions and porous media saturated by fresh water (Feflow code) (DIERSCH, 2007).

This interpretative flow model type does not necessarily require calibration (ANDERSON & WOESSNER, 2002).

In order to underline the maximum hydrogeologic impact only

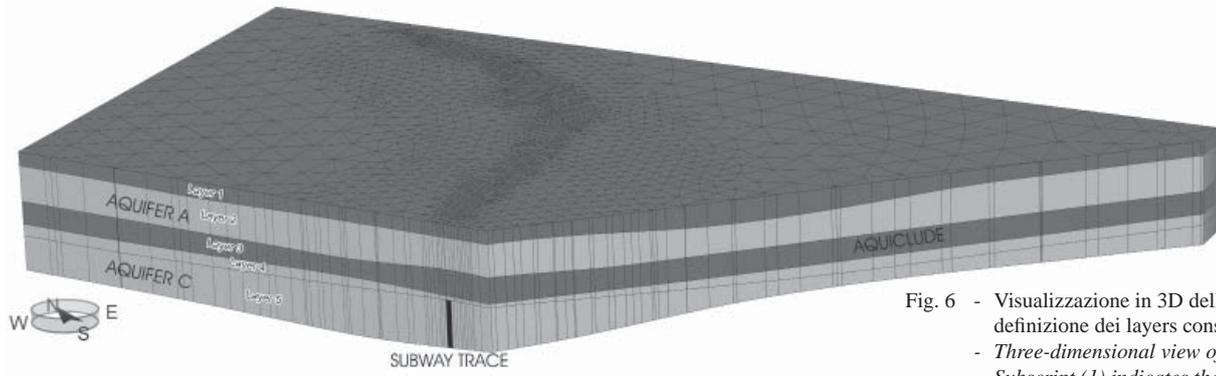
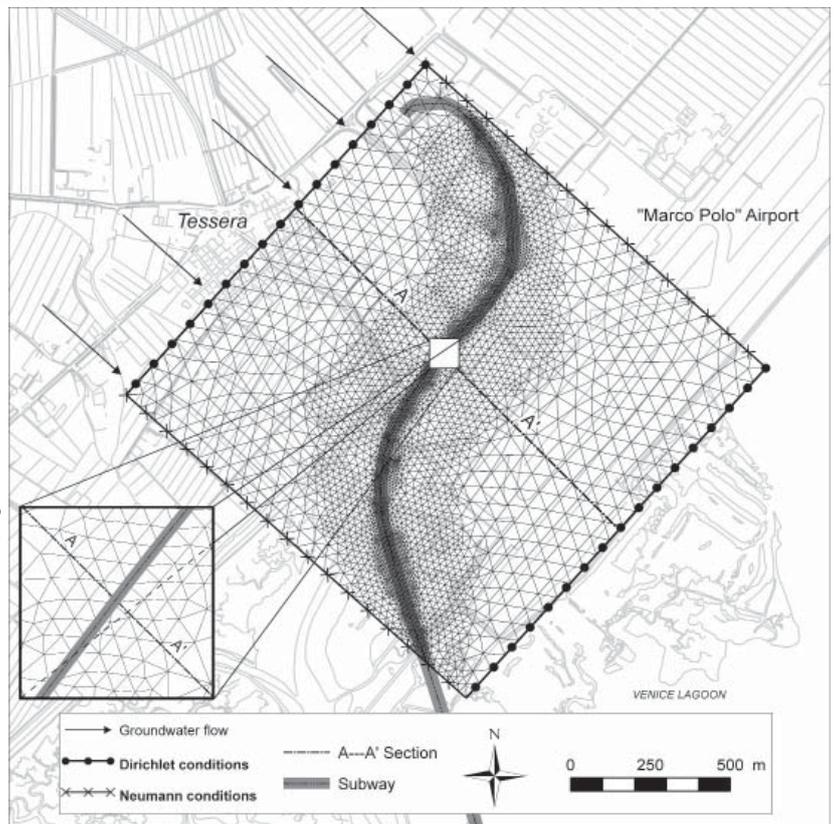


Fig. 6 - Visualizzazione in 3D delle mesh di calcolo, con definizione dei layers considerati
 - Three-dimensional view of the calculation mesh.
 Subscript (1) indicates the considered layers

Fig. 7 - Mesh di calcolo e definizione delle condizioni al contorno
 - Discretization of the area of interest and boundary conditions



Con lo scopo di mettere nella massima evidenza l’impatto idrogeologico prodotto dall’opera in progetto è stata presa in considerazione solo la parte iniziale del tunnel, in prossimità dell’aeroporto “Marco Polo”, in corrispondenza di questo tratto, infatti, le condizioni di interferenza con il flusso sotterraneo sono decisamente sfavorevoli (flusso ortogonale all’opera e acquifero C quasi completamente occluso). Se si esclude questo settore la direzione prevalente del flusso può essere assunta parallela all’opera in sottterraneo con interferenze trascurabili.

La realizzazione di un modello in 3D della regione di interesse con gli assi x-y di 1500 x 1500 m ha richiesto le seguenti assunzioni:

the initial part of the tunnel subway near Marco Polo airport has been considered. In this tract the interference with groundwater flow is very unfavourable: the subway almost completely blocks the second sandy aquifer (Fig. 5) and it is almost perpendicular to the main flow direction (Fig. 3). Excluding this sector, the groundwater flow can be assumed parallel to the subway with negligible levels of interference.

The construction of a 3D model for the interest region with x-y axis 1500 x 1500 m has required the following conditions: the ground level has been assumed constant and fixed at 1.96 m a.s.l.; the numbered scheme of the layers derived from geognostic investigations has

Tab. 2 - Dati di input assegnati per definire gli scenari possibili
- *Scenarios for various input data assigned to the aquifer C*

CASE	Upper Head (m asl)	Lower Head (m asl)	Gradient i	Aquifer Conductivity k m/s	Aquiclude Conductivity k m/s	Tunnel Conductivity k m/s
I	0.20	0.00	0.00013	1.00E-04	1.00E-08	1.00E-09
II	2.00	0.00	0.0013	1.00E-04	1.00E-08	1.00E-09
III	0.20	0.00	0.00013	1.00E-05	1.00E-08	1.00E-09
IV	2.00	0.00	0.0013	1.00E-05	1.00E-08	1.00E-09

il livello topografico si è considerato costante a +1,96 m s.l.m.; la mesh di calcolo dei 5 livelli desunti dalle indagini geognostiche è stata ottenuta attraverso l'interpolazione del kriging ordinario (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989). Si noti che l'acquifero C è stato suddiviso in due livelli n. 4 e n. 5 rispettivamente libero e occupato dal tunnel (Fig. 6).

La figura 7 meglio evidenzia la discretizzazione del sistema mediante una griglia di 26.052 nodi e 42.845 elementi su 6 piani e 5 livelli, la direzione del gradiente idraulico è ortogonale al confine di NW e parallela a quelli di NE e SW (confini di flusso nullo).

Imponendo un potenziale idraulico variabile da NW verso SE tra 2,00/0,00 m e 0,20/0,00 m s.l.m sono stati analizzati quattro ipotetici scenari in condizioni di flusso stazionario (Tab. 2): i dati di input sono desunti dai parametri idrogeologici disponibili e prendono in considerazione valori superiori ed inferiori rispetto a quelli disponibili in letteratura.

RISULTATI

Per tutte le condizioni imposte, gli effetti indotti dalla prevista galleria sul deflusso sotterraneo sono risultati modesti.

Se si considera il II scenario di tabella 2, dove si assumono le condizioni idrogeologiche più sfavorevoli, si può osservare come le perturbazioni indotte sul campo piezometrico dalla presenza del tunnel, denotano a monte dell'opera un incremento del potenziale idraulico di 0,15 m; un uguale decremento è registrato a valle del tunnel (Fig. 8).

Spostandosi verso il margine di NE dell'area considerata, si osserva una spaziatura tendenzialmente più ridotta delle isopiezometriche, che si deve attribuire ad un graduale decremento di spessore dell'acquifero C (Figg. 5 e 6).

La sezione S-S di figura 9, la cui traccia è riportata in figura 8, mette in evidenza la massima variazione di potenziale attraverso la zona di impatto con l'opera di progetto.

La distribuzione delle velocità di flusso mette ancora una volta in evidenza i moderati effetti indotti dal tunnel sul deflusso naturale dell'acquifero C (Fig. 10).

Il campo delle velocità varia da 0.03 m/g a 0.2 m/g. L'ampio ed evidente incremento che si segnala all'estremità destra del campo di flusso può essere attribuito al già citato decremento di spessore dell'acquifero C.

CONCLUSIONI

Il progetto preliminare del tunnel sotterraneo che dovrebbe collegare l'aeroporto Marco Polo con la città di Venezia, è stato sottoposto ad un'analisi di valutazione degli effetti provocati dall'opera sul de-

been obtained by the ordinary kriging interpolation (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989); the C aquifer has been subdivided in two layers: n. 4 and n. 5 respectively free and occupied by the tunnel (Fig. 6).

Figure 7 shows the discretization of the three-dimensional system by a grid of 26,052 nodes and 42,845 elements on 6 slices and 5 layers.

The hydraulic gradient direction is orthogonal to the NW boundary and parallel to NEE and SW sides (no flow boundary).

Imposing a hydraulic head varying between 2.00/0.00 m and 0.20/0.00 m a.s.l. from NW to SE sides of the computational mesh, 4 hypothetical scenarios have been considered in steady state flow condition (Tab. 2): the input data derive from available hydrogeologic parameters and they regard lower and upper hypothetical values.

RESULTS

For all assigned conditions the effects induced by the planned subway on groundwater flow field turn out to be low.

If one considers the second scenario of table 2, which assumes more unfavourable hydrogeological conditions, the increase of hydraulic head is highly localized with a magnitude of about +0.15 m upstream and -0.15 m downstream (Fig. 8).

Further North-East of the modelled area the calculated contour lines of figure 8 also show a closer space. This can be attributed to a gradual thickness decrease of aquifer C (Figg. 5 and 6).

The cross section of figure 9 draws the head-spacing interval variation through the subway simulation. The velocity distribution field underlines once more the moderate impact on the natural flow regime of aquifer C by the tunnel (Fig. 10).

The velocity field changes between 0.03 m/d a 0.2 m/d. A wider and evident increase at the right end can partly be due to the decreasing thickness of aquifer C.

CONCLUSIONS

The preliminary underground tunnel project linking Marco Polo airport and the city of Venice has been submitted to an analysis of the effects that the tunnel will have on the natural flow of underground

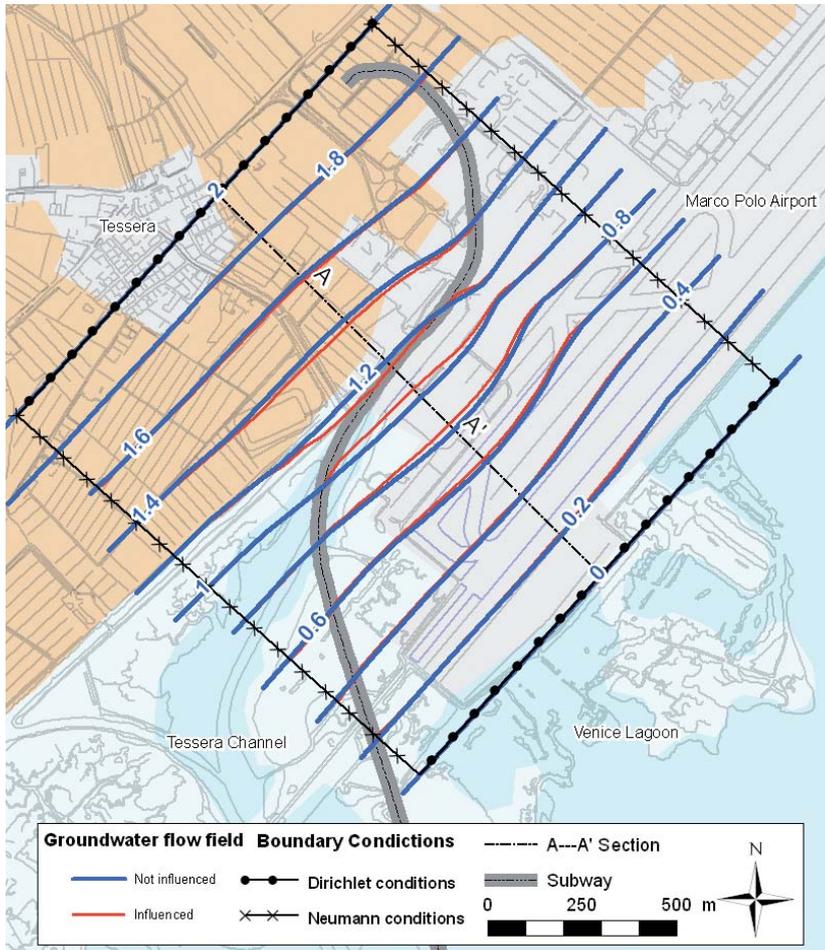


Fig. 8 - Carta della distribuzione dei potenziali idraulici nell'acquifero C (caso II di tab.2)
 - Map of simulated distribution of hydraulic head in the aquifer C (case II of Tab.2)

flusso delle acque sotterranee negli acquiferi intercettati dalla struttura stessa. A tale scopo è stato sviluppato un modello numerico tridimensionale con il codice di calcolo agli elementi finiti (Feflow). Il modello è stato realizzato in base ad un discreto numero di carotaggi spinti fino alla profondità di 50 m e a numerose prove di pompaggio eseguite nel territorio limitrofo in corrispondenza del primo acquifero confinato. Questo infatti risulta più volte intercettato dalla galleria.

Adottando un criterio cautelativo sono stati assunti per il calcolo i valori più elevati di conduttività idraulica e di gradiente tra quelli disponibili, compresi rispettivamente in un range di 10^{-4} - 5×10^{-6} m/s e 0,1-1,1‰.

Si è infine presa in considerazione la più sfavorevole tra le condizioni di interferenza tra l'opera da realizzare e il sistema idrogeologico lagunare, con asse della galleria quasi normale alla direzione del deflusso sotterraneo.

Il modello evidenzia un incremento del potenziale piezometrico di alcuni centimetri immediatamente a monte del tunnel ed un decremento dello stesso ordine di grandezza a valle.

A tale riguardo si deve far presente che le oscillazioni piezometriche dell'acquifero intercettato, registrate sia lungo la costa la-

water in the aquifers concerned.

To this end, a 3D mathematical model has been created using finite element code (Feflow). The model is based on a discrete number of core drill samples taken up to a depth of 50 m and numerous hydraulic tests conducted around the edge of the first confined aquifer. This aquifer is interrupted the most by the tunnel.

In order to take a cautious approach, the highest hydraulic conductivity and gradient values were used for the calculations, comprising a range of 10^{-4} - 5×10^{-6} m/s e 0.1-1.1‰.

Moreover, the most unfavourable conditions of interference between the tunnel and the hydrogeological system of the lagoon with the tunnel axis perpendicular to the underground water flow has been assumed.

The model shows an incremental increase of the hydraulic head of a few centimetres immediately upstream from the tunnel and a decrease of the same size immediately downstream. In this regard we can show that the variation of hydraulic head in the affected aquifer, both along the coast of the lagoon and within the lagoon itself, is within a maximum interval of -0.15/0.50 m a.s.l. (aquifer C); these variations are essentially determined by tidal fluctuations.

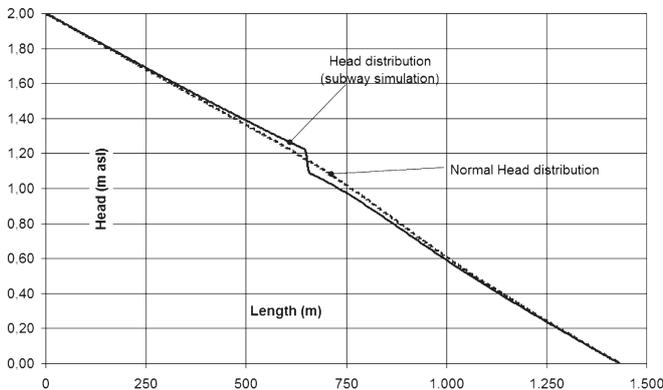


Fig. 9 - Sezione della distribuzione dei potenziali simulati
- Graph of head - space distribution across the tunnel

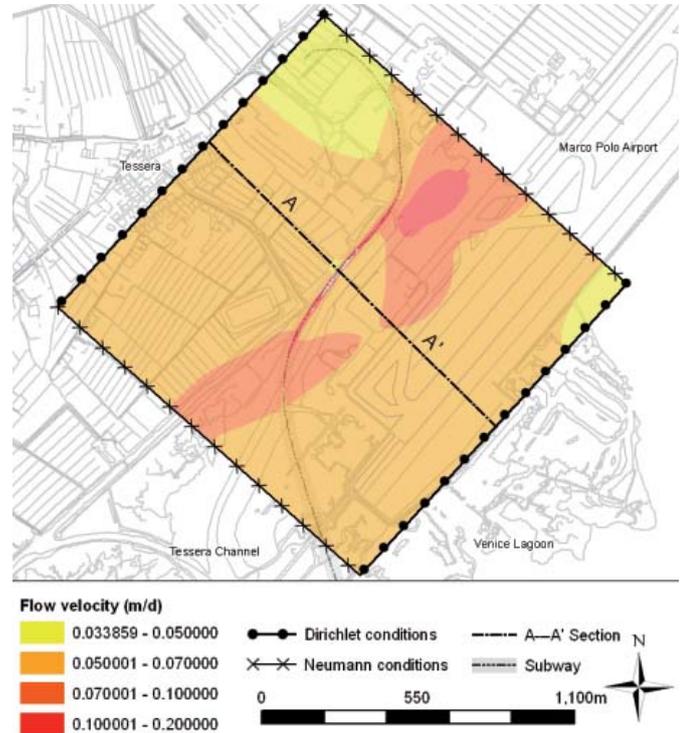


Fig. 10 - Campo delle velocità delle acque sotterranee nell'acquifero C
- Groundwater flow velocity field of aquifer C

gunare che nella laguna stessa, variano in un intervallo massimo di -0,15/0,50 m s.l.m. (acquifero C); queste variazioni sono controllate essenzialmente dalle fluttuazioni di marea.

I risultati delle analisi numeriche ottenuti in base alle conoscenze finora disponibili, anche se forniscono un quadro essenzialmente interpretativo e non predittivo, sembrano essere compatibili con l'equilibrio idrogeologico delle idrostrutture sub-lagunari e con i margini di sicurezza richiesti dall'opera in progetto.

RINGRAZIAMENTI

Per la realizzazione del presente lavoro si ringrazia il gruppo di aziende che partecipa alla progettazione, con particolare riferimento all'ing. G.Zoletto dell'Impresa di Costruzioni Ing. E. Mantovani S.p.A.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- AA.VV. (1990) - *Carta geologica del Veneto, scala 1:250,000*. Regione del Veneto, Segreteria Regionale per il Territorio, Venezia.
- ANDERSON M. P. & WOESSNER W. W. (2002) - *Applied groundwater modeling*. Academic press, San Diego. 381 pp.
- ANTONELLI R. & MARI G.M. (2007) - *Lo sfruttamento di acqua potabile nel dominio idrogeologico centrale della pianura alluvionale veneta. Proposte e prospettive per una rete di monitoraggio avanzata. The exploitation of drinkable groundwater in the central Venetian alluvial plain. Some suggestions and perspectives for an advanced monitoring project*. *Giornale di Geologia Applicata* 5(1): 75-87.
- BARBIERI C., BERTOTTI G., DI GIULIO A., FANTONI R. & ZOETEMEIJER R. (2004) - *Flexural response of the Venetian foreland to the Southalpine tectonics along the TRANSALP profile*. *Terra Nova* 16(5): 273-280.
- BASSAN V. & VITTURI A. (2003) - *Studio Geoambientale del territorio provinciale di Venezia - Parte Centrale*. Provincia di Venezia, Padova.
- BONDESAN A. & MENEGHEL M. (2004) - *Geomorfologia della provincia di Venezia (ed. I. m. e. l. s. maggiore)*, pp. 513. Esedra, Padova.
- BOSCOLO C. & MION F. (2008) - *Le acque sotterranee della pianura veneta - I risultati del Progetto SAMPAS*. Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto.

Even if the results of the numerical analyses obtained using the latest available methods are largely interpretive rather than predictive, they seem to be compatible with the hydrogeological equilibrium of the sub-structure of the lagoon and with the safety parameters of the tunnel project.

ACKNOWLEDGEMENTS

To realize this work we thank the projecting group, especially Mr. G. Zoletto of Impresa di Costruzioni Ing. E. Mantovani S.p.A..

- BRAMBATI A., CARBOGNIN L., QUATAIA T., TEATINI P. & TOSI L. (2003) - *The Lagoon of Venice: geological setting, evolution and land subsidence*. pp. 5.
- CANALI G., CAPRARO L., DONNICI S., RIZZETTO F., SERANDREI-BARBERO R. & TOSI L. (2007) - *Vegetational and environmental changes in the eastern Venetian coastal plain (Northern Italy) over the past 80,000 years*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **253**(3-4): 300-316.
- CASTELLARIN A., NICOLICH R., FANTONI R., CANTELLI L., SELLA M. & SELLI L. (2006) - *Structure of the lithosphere beneath the Eastern Alps (southern sector of the TRANSALP transect)*. *Tectonophysics* **414**: 259-282.
- CRITTO A., ZUPPI G., CARLON C. & MARCOMINI A. (2004) - *Effect of a Contaminated Site (The San Giuliano Landfill, Venice, Italy) on the Interaction between Water Bodies in a Coastal Aquifer System*. *Annali di Chimica* **94**(4): 303-314, 10.1002/adic.200490035.
- DAL PRA A., GOBBO L., VITTURI A. & ZANGHERI P. (2000) - *Indagine idrogeologica del territorio provinciale di Venezia*. Provincia di Venezia, Venezia. pp. 127.
- DIERSCH H.-J. G. (2007) - *Feflow, Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System- Reference Manual* (ed. W. GmbH), pp. Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System. Institute for Water Resources Planning and System Research, Berlin, German.
- FELLENIEUS B. H. & ESLAMI A. (2000) - *Soil profile interpreted from CPTu data. In Year 2000 Geotechnics*. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- FONTANA A., MOZZI P. & BONDESAN A. (2008) - *Alluvial megafans in the Venetian-Friulian Plain (north-eastern Italy): Evidence of sedimentary and erosive phases during Late Pleistocene and Holocene*. *Quaternary International* **189**(1): 71-90.
- GATTO P. & CARBOGNIN L. (1981) - *The Lagoon of Venice: natural environmental trend and man-induced modification* *Hydrological Sciences-Bulletin des Sciences Hydrologiques* **26**(4): 379-391.
- HERRENKNECHT M. (1997) - *Latest modern tunnelling methods*. *Tunnels-and-Tunnelling* **29**(11): 46.
- ISAAKS E.H. & SRIVASTAVA R.M. (1989) - *An introduction to applied geostatistics* New York ; Oxford : Oxford University Press.
- KENT D. V., RIO D., MASSARI F., KUKLA G. & LANCI L. (2002) - *Emergence of Venice during the Pleistocene*. *Quaternary Science Reviews* **21**(14-15): 1719-1727.
- LUNNE T., ROBERTSON P.K. & POWELL J.J.M. (1997) - *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. pp. 312.
- MASSARI F., RIO D., SERANDREI BARBERO R., ASIOLI A., CAPRARO L., FORNACIARI E. & VERGERIO P.P. (2004) - *The environment of Venice area in the past two million years*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **202**(3-4): 273-308.
- MAV (2007) - *Modello interpretativo della dinamica degli acquiferi nella zona di Porto Marghera (VE)*. In Nuovi interventi per la salvaguardia di Venezia, pp. 106. Magistrate alle Acque di Venezia - Ministero delle Infrastrutture.
- MELIS M., MEDINA L. & RODRÍGUEZ J. M. (2002) - *Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunnelling in the Madrid Metro extension*. *Canadian Geotechnical Journal* **39**(6): 14.
- RICCERI G., SIMONINI P. & COLA S. (2002) - *Applicability of piezocone and dilatometer to characterize the soils of the Venice Lagoon*. *Geotechnical and Geological Engineering* **20**(2): 89-121.
- ROBERTSON P.K. (1990) - *Soil classification using the cone penetration test*. *Canadian Geotechnical Journal* **7**(1): 7.
- VITTURI A., GIANDON P., BASSAN V. & RAGAZZI F. (2008) - *I suoli della provincia di Venezia*. Provincia di Venezia - ARPAV.
- VORLICEK P.A., ANTONELLI R., FABBRI P. & RAUSCH R. (2004) - *Quantitative hydrogeological studies of the Treviso alluvial plain, NE Italy*. *The Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* **37**(1): 23-29.
- ZANGHERI P. & AURIGHI M. (2001) - *Rete di monitoraggio delle acque sotterranee in Provincia di Venezia*. Regione Veneto - Provincia di Venezia, Venezia.

Received March 2009- Accepted October 2009