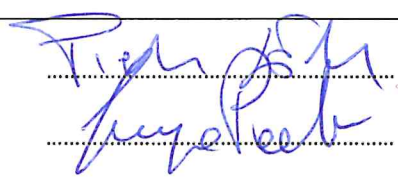


RO-E-1432 - Lavori urgenti per la costruzione di un diaframma plastico per il contrasto dei moti di filtrazione in prossimità dell'abitato di Cavanella Po fra gli stanti 521-523 in sinistra Po di Venezia in Comune di Adria (RO)

PROGETTO DEFINITIVO
RELAZIONE GEOLOGICA



Coordinatore Progettista	Dott. Geol. Pierpaolo Erbacci		ELABORATO N.
Collaboratore Progettista	Geom. Paolo Longo		
Collaboratore Progettista	Geom. Paolo Ronconi		
Collaboratore Progettista	Geom. Riccardo Bauce		
Collaboratore Progettista	Geom. Ottavio Borsetto		
Responsabile Procedimento	Dott. Ing. Marco Zorzan		
			2

REV.	DESCRIZIONE	DATA	Perizia n. 1567 27.04.2020

Progetto Definitivo

Relazione Geologica

1. Premessa

L'AIPO - Ufficio AIPO di Rovigo ha predisposto nel Febbraio 2019, il "Progetto di fattibilità tecnico-economica dei lavori urgenti per la costruzione di un diaframma plastico per il contrasto dei moti di filtrazione in prossimità dell'abitato di Cavanella Po fra gli st 521-523 in sinistra Po di Venezia in Comune di Adria (RO) – I stralcio" – dell'Importo di € 2.100.000,00.

Il progetto è stato approvato con determina dirigenziale n. 178 in data 20/02/2019.

Lo scrivente, in qualità di Progettista, è stato incaricato, avendone i requisiti, di predisporre la presente Relazione Geologica di accompagnamento alla fase di progetto definitivo.

2. Inquadramento territoriale

L'area interessata dal progetto è ubicata in Provincia di Rovigo, nel comune di Adria, nella parte più orientale del territorio comunale, in particolare nella frazione di Cavanella Po.



Fig. 1: Inquadramento territoriale interprovinciale dell'area interessata dall'intervento

In particolare l'area d'interesse è delimitata a Sud dall'alveo del ramo deltizio principale del Po, denominato Po di Venezia, ad Ovest dalla frazione rivierasca di Mazzorno sinistro (frazione facente parte sempre del comune di Adria), a Nord dal canale di bonifica denominato "Collettore Padano" che, a nord del centro abitato di Cavanella Po, confluisce nel navigabile "Canalbianco", infine ad est con il centro abitato di Cavanella.

L'area d'indagine si estende lungo l'arginatura maestra sinistra del Po di Venezia per un'estesa di circa 900 m.



Fig. 2: Inquadramento territoriale a livello comunale dell'area interessata dall'intervento



Fig. 3: Inquadramento territoriale locale - località Cavanella Po – Sinistra idraulica del Po di Venezia

3. Inquadramento normativo vigente e standard tecnici di riferimento

Le criticità che interessano l'arginatura e la fascia a campagna fronte argine in sinistra idraulica del Po di Venezia fra stanti 521-524, di seguito descritte, sono diretta conseguenza di fenomeni di sifonamento attraverso i terreni di fondazione arginale e di filtrazione attraverso le litologie più permeabili costituenti la

parte superiore del terrapieno arginale.

Per tali tipologie di problematiche le vigenti NTC 2018, al § 6.7.5, prescrivono di valutare *“i possibili stati limite ultimi di tipo idraulico prodotti ...omissis... da elevati gradienti idraulici nel caso di attraversamento di terreni suscettibili al sifonamento (HYD)”*. In particolare, il § 6.2.4.2 delle NTC stabilisce, nel caso di flusso prevalentemente verticale e di frontiera di efflusso libera, che *“la verifica a sifonamento si esegue controllando che il gradiente idraulico i risulti non superiore al gradiente idraulico critico i_c diviso per un coefficiente parziale $\gamma_r = 3$, se si assume come effetto delle azioni il gradiente idraulico medio”*.

Con riferimento alla problematica in esame, le NTC 2018, al § 7.11.3.4.2, impongono inoltre di effettuare la verifica alla liquefazione per la quale necessita definire la pericolosità sismica del sito in esame, argomento questo trattato nella presente relazione e ripreso in maniera più approfondita nella Relazione Geotecnica con specifico studio di Risposta Sismica Locale..

La tipologia della soluzione progettuale pensata consiste nella classica realizzazione, previa scavo, di una barriera verticale “impermeabile” di profondità tale da ridurre i gradienti idraulici all’interno del sistema argine-terre di fondazione a valori non critici.

Tale tipologia di intervento è comunemente usata nei lavori effettuati lungo tutta l’asta del fiume Po per fronteggiare le problematiche di sifonamento.

La presenza di una golena antistante la tratta arginale interessata dall’intervento permette di optare per una diaframmatrice di tipo “plastico” (miscela acqua-cemento-bentonite) non essendo necessaria alcuna funzione di carattere strutturale o di sostegno.

Sotto il profilo esecutivo la realizzazione del diaframma plastico avverrà tramite scavo e contestuale getto di una miscela fluida costituita, in ridotte percentuali, di acqua-cemento-bentonite; con la maturazione del getto (per diminuzione naturale del contenuto in acqua) la miscela, inizialmente fluida, raggiungerà una consistenza plastica con valori del coefficiente di permeabilità dell’ordine di $1 \cdot 10^{-9}$ m/s.

L’intervento di diaframmatrice vero e proprio non prevede quindi alcun elemento strutturale o di sostegno; pertanto non necessitano verifiche di tipo strutturale.

L’unico elemento in cemento armato previsto è costituito da un cordolo di ridotte dimensioni da realizzare in testa al diaframma con la sola funzione di copertura e protezione della testa dei setti plastici: non avendo funzione di sostegno anche per questo elemento non sono necessarie verifiche strutturali.

4. Evoluzione del quadro delle criticità e tipologia della soluzione progettuale

Il tratto dell’argine sinistro del Po di Venezia ubicato immediatamente a monte l’abitato di Cavanella Po nel Comune di Adria (RO), durante le piene del fiume è oggetto di particolare attenzione da parte del personale dell’A.I.PO preposto alle attività di sorveglianza a causa dell’elevata esposizione dell’opera idraulica ai fenomeni di filtrazione che caratterizzano sia l’arginatura che l’area a campagna, unitamente dall’attivazione di fontanazzi particolarmente pericolosi.

Tali problematiche interessano direttamente una fascia di circa 120-140 m di larghezza, immediatamente a monte dell'abitato di Cavanella Po a ridosso all'argine sinistro del Po di Venezia da stante 520 a 524, comprese le abitazioni, la viabilità locale, la rete fognaria, che presentano dissesti.

Ad ogni piena, oltre ai disagi connessi ai fenomeni di filtrazione nei cortili, orti e giardini e risalita dell'umidità nei muri, è necessario intervenire ripetutamente mediante la posa di centinaia di sacchi per contenere una serie di fontanazzi storici, ma anche di nuova formazione, affioranti in prossimità delle abitazioni.

Per la zona più critica fra st. 521-522 è stato anche realizzato, a seguito degli eventi di piena del 1994, un drenaggio sotto la fascia di rispetto arginale a campagna, con effetti inizialmente positivi poi progressivamente meno efficaci.

Dopo la piena del novembre 2014, in cui fenomeni di intensa filtrazione hanno messo in evidenza vari smottamenti arginali e fontanazzi, è stata disposta la ristrutturazione del drenaggio, completata nel 2018 e, contemporaneamente, è stato redatto un progetto preliminare (n. 1524 in data 23/06/2016) per la realizzazione di un diaframma plastico della lunghezza di circa 1000 m, quale intervento risolutivo per ridurre sostanzialmente la pericolosità idraulica dell'area per cedimento di tale tratto di argine in occasione di evento di piena del fiume Po.

In particolare l'area interessata dal conseguente rischio idraulico, di pianura e posta al di sotto del l.m.m., interesserebbe l'abitato di Adria ed i paesi limitrofi oltre che, nel caso peggiore, la maggior parte del territorio orientale della Provincia di Rovigo.

Fino ad oggi il progetto suddetto non ha trovato copertura finanziaria mentre la sua attuale riprogettazione per stralci di limitata estensione, con ripartizione dei costi spalmata in più annualità, permette di attuare un primo intervento.

Durante l'evento di piena del novembre 2018 è risultato evidente che il drenaggio, seppure ripristinato, ha esaurito la sua capacità di contenimento dei fenomeni di filtrazione infatti un fontanazzo particolarmente critico, già evidenziato in passato durante gli eventi del 2014 e 2016, si è riattivato con maggiore intensità rispetto ai casi precedenti, con un consistente trasporto di materiale sabbioso tale da determinare il parziale cedimento dell'adiacente banca arginale a campagna per un tratto di 4 – 5 m. Con tempestività si è provveduto al tamponamento con sacchi di sabbia della cavità ed al controllo del fontanazzo con una coronella rialzata progressivamente.

La Relazione Generale del Progetto di fattibilità tecnico-economica del Febbraio 2019 ha evidenziato le storiche criticità dell'area prospiciente l'intervento di diaframmatrice in progetto come riportate in fig. 4.



Fig. 4: località Cavanella Po - Quadro delle criticità post piena del Novembre 2018

Per quanto sopra, nell'estate del 2019, si è provveduto ad asportare il tratto di valle del drenaggio, per un'estesa di circa 25 m, in quanto non più funzionale, a tombare lo scavo e a realizzare un nuovo scarico, nell'adiacente canale di scolo, del tratto di monte del drenaggio esistente.

5. Quadro aggiornato delle criticità a seguito della piena di Novembre 2019

L'evento di piena di Novembre-Dicembre 2019, nell'area deltizia ha fatto registrare all'idrometro di Cavanella Po il livello idrometrico massimo di 4,89 m s.l.m.m. (superiore all'evento di piena di Novembre 2014) con un conseguente battente idraulico di circa 6 metri sopra il circostante piano campagna.

L'evento u.s. ha ulteriormente aggravato il quadro delle criticità come rappresentato nella planimetria delle criticità di seguito riportata.

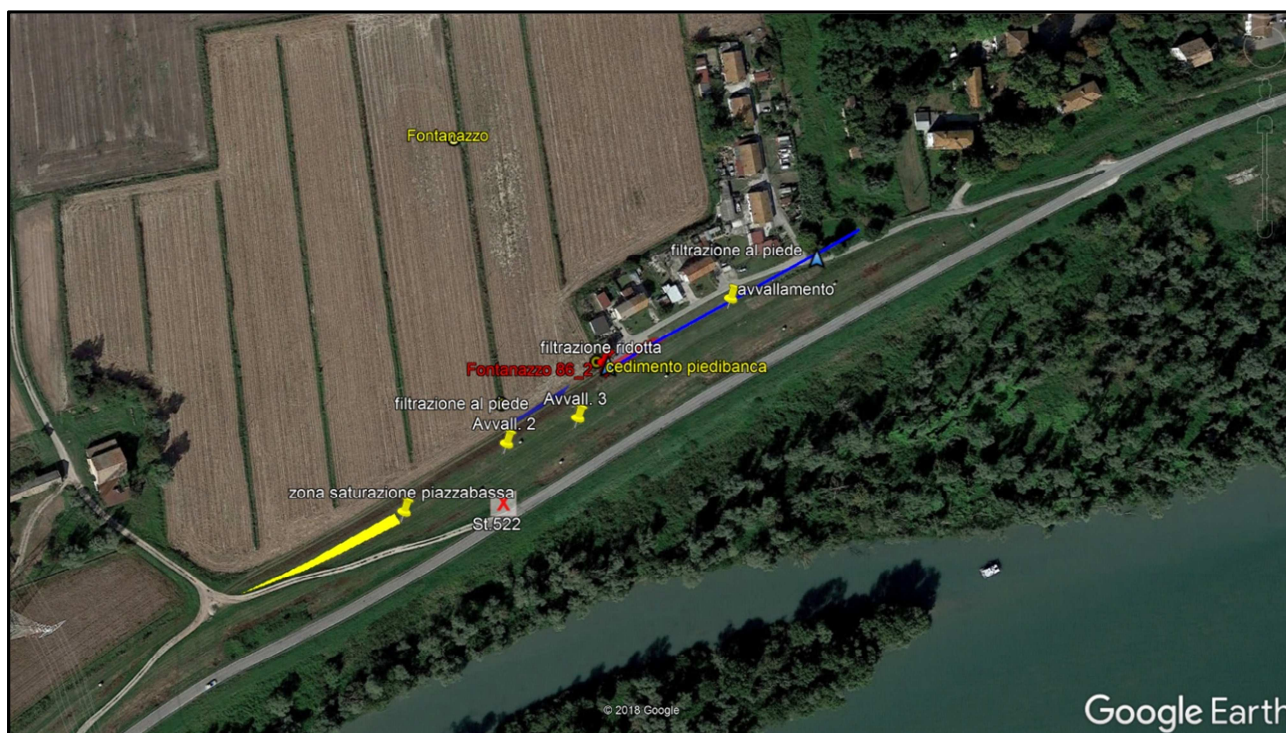


Fig. 5: località Cavarella Po - Quadro aggiornato delle criticità post piena novembre-dicembre 2019

L'ispezione dei diversi pozzetti posti lungo la locale trincea drenante realizzata a suo tempo all'unghia arginale ha evidenziato ancora una volta una continua e progressiva perdita di funzionalità del drenaggio nel tratto di valle; si presume pertanto una funzionalità residua del drenaggio per una estesa di 20 m circa. Sono state effettuate alcune misure di portata in corrispondenza dello scarico del drenaggio; in particolare in data 22 ottobre 2019 (ore 16), in condizioni idrometriche ordinarie (livello idrometrico pari a 0,88 m slmm), è stata misurata una portata liquida di circa 0,35 l/s; la misura è stata ripetuta in data 3 dicembre 2019 (ore 15) in condizioni idrometriche di criticità ordinaria (livello idrometrico pari a 3,52 m slmm) riscontrando una portata liquida di circa 4 l/s (vedi fig.4): si tratta di valori modesti se riferiti all'estesa originaria del drenaggio (circa 100 m) a conferma della perdita di funzionalità di alcuni tratti per progressivo intasamento del geotessuto di rivestimento.



Fig. 6: località Cavanella Po - in evidenza un esempio di cedimento del piano campagna verificatosi in corrispondenza della sottostante trincea drenante.



Figg. 7 e 8: Particolare del punto di uscita della tubazione di scarico del drenaggio e dello stramazzo a parete sottile o di Bazin realizzato per la misura di portata in data 03.12.2019 - località Cavanella Po.

Il confronto tra le mappe di criticità post-piena 2018 e 2019 evidenzia un aggravamento delle criticità sia lungo il terrapieno arginale, sia nella fascia di rispetto al piede dell'argine nel tratto a monte del drenaggio stesso: trattasi di cavità, avvallamenti e zone di saturazione sulla piazzabassa, di sempre più estese zone di filtrazione al piede dell'argine con riattivazione di fontanazzi storici sempre più caratterizzati da trasporto solido in sospensione.



Fig. 9: località Cavanella Po - fontanazzo storico emerso in prossimità di una scolina (26.11.2019)



Fig. 10: località Cavanella Po - in evidenza una delle zone di saturazione al piede dell'argine (29.11.2019)



Fig. 11: località Cavanella Po - In evidenza alcune delle zone di cedimento del piè di banca arginale (16.11.2019)



Fig. 12: località Cavanella Po - Rinfianco con posa di terra lungo un tratto del piè di banca arginale con problemi di saturazione (29.11.2019)

6. Inquadramento geologico

6.1 Inquadramento geologico, geomorfologico, litologico

L'area d'intervento è compresa nella Carta Geologica delle Tre Venezia (scala 1:100.000) - Foglio "Adria" (65) il cui stralcio è riportato nella Fig. 13.

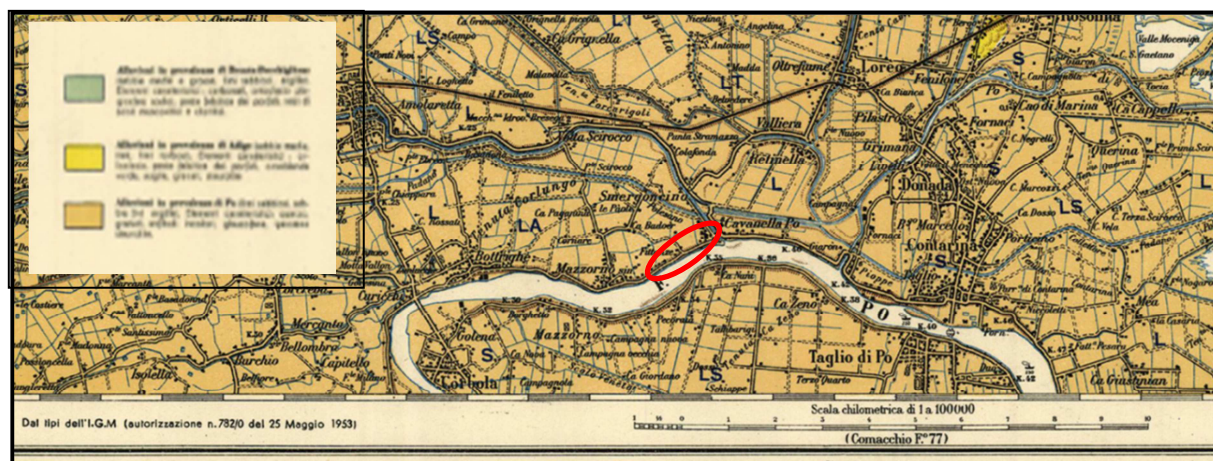


Fig. 13 - Estratto non in scala del foglio 65 (Adria) della Carta Geologica d'Italia 1:100.000

Nel Foglio è compresa la bassa pianura intersecata dai corsi inferiori dei fiumi Po, Adige, Bacchiglione, Brenta e dai canali da questi derivati, la parte meridionale della Laguna Veneta e la parte settentrionale delle Valli del delta Padano fino oltre la foce del Po di Maistra.

Alluvioni recenti ed attuali dei fiumi costituiscono i terreni di questi territori e sono rappresentati da depositi molto vari dal punto di vista granulometrico: si passa infatti dalle ghiaie deposte dal Piave e Brenta nell'alta pianura ai sabbioni grossolani che si rinvencono lungo gli alvei antichi ed attuali di Brenta e di Adige, alle sabbie medie e fini trasportate dal Po.

Questi depositi psammitici sono sempre intercalati ai limi ed argille che ricoprono talora aree molto estese. E' possibile constatare che fra i depositi di uno stesso fiume le variazioni di grana possono essere notevoli anche su brevi distanze; si nota tuttavia che le sabbie del Po sono ben più omogenee di quelle di Adige, Brenta e Piave, come è logico attendersi date le caratteristiche differenti dei loro corsi d'acqua.

La parte orientale della provincia di Rovigo è quasi interamente formata da aree interfluviali depresse, bonificate durante gli ultimi due secoli ed oggi in gran parte al di sotto del livello del mare, ad eccezione d'alcuni corpi allungati di paleo alveo e di più estesi cordoni costieri. Gran parte dell'area può essere perciò mantenuta asciutta solo per mezzo di grandi impianti di sollevamento delle acque gestiti dai locali Consorzi di Bonifica.

Il principale meccanismo dinamico che ha determinato l'attuale conformazione del territorio compreso fra Adige e Po è individuabile nelle divagazioni cui erano soggetti questi due fiumi prima che venisse effettuata la regolamentazione del loro corso; in generale nell'area si susseguono, su una stessa verticale, alternanze di depositi riferibili ai due fiumi e miscele in varie proporzioni di questi.

Il territorio comunale di Adria, estremamente pianeggiante, presenta lungo la fascia rivierasca al Po pendenze molto ridotte; le quota del piano campagna variano mediamente da $0 \div 2$ m l.m.m. nelle zone più prossime all'arginatura sino a $-1 \div -2$ m l.m.m. nelle parti del territorio più distanti dal corso d'acqua; inoltre il territorio ha un debole gradiente altimetrico da W verso E.

Gli unici elementi morfologici di spicco sul territorio sono costituiti dai terrapieni arginali che per il Po di Venezia hanno raggiunto dimensioni significative sia in termini di altezza (quota di sommità arginale posta a circa $8-9$ m l.m.m.) che di larghezza d'imposta (circa $50-60$ m).

Come si evince dalla Carta Geologica, disponibile unicamente alla scala 1:100.000, sotto il profilo della litologia dei sedimenti di superficie, tutta l'area compresa nei comuni di Papozze, Adria, Loreo e Porto Viro è interessata quasi esclusivamente dall'affioramento di depositi limosi (L) di chiara origine fluviale, in prevalenza di Po (limi sabbiosi, sabbie fini ed argille) come provato dalle numerose prove granulometriche e di composizione mineralogica effettuate sui campioni di superficie.

Dall'esame della Carta Geomorfologica informatizzata della Provincia di Rovigo (Consorzio per lo sviluppo Economico e Sociale del Polesine – anno 2001), non si hanno evidenze di strutture geomorfologiche di rilievo interferenti con la tratta arginale strettamente interessata dallo studio; rimane invece visibile, ad ovest dell'area d'intervento, un relitto di ansa fluviale del Fiume Po che staccandosi in loc. Mazzorno Sinistro (poco a monte), tocca le località Bosco, Brolo per terminare, poco a valle, in loc. Chiaviche.

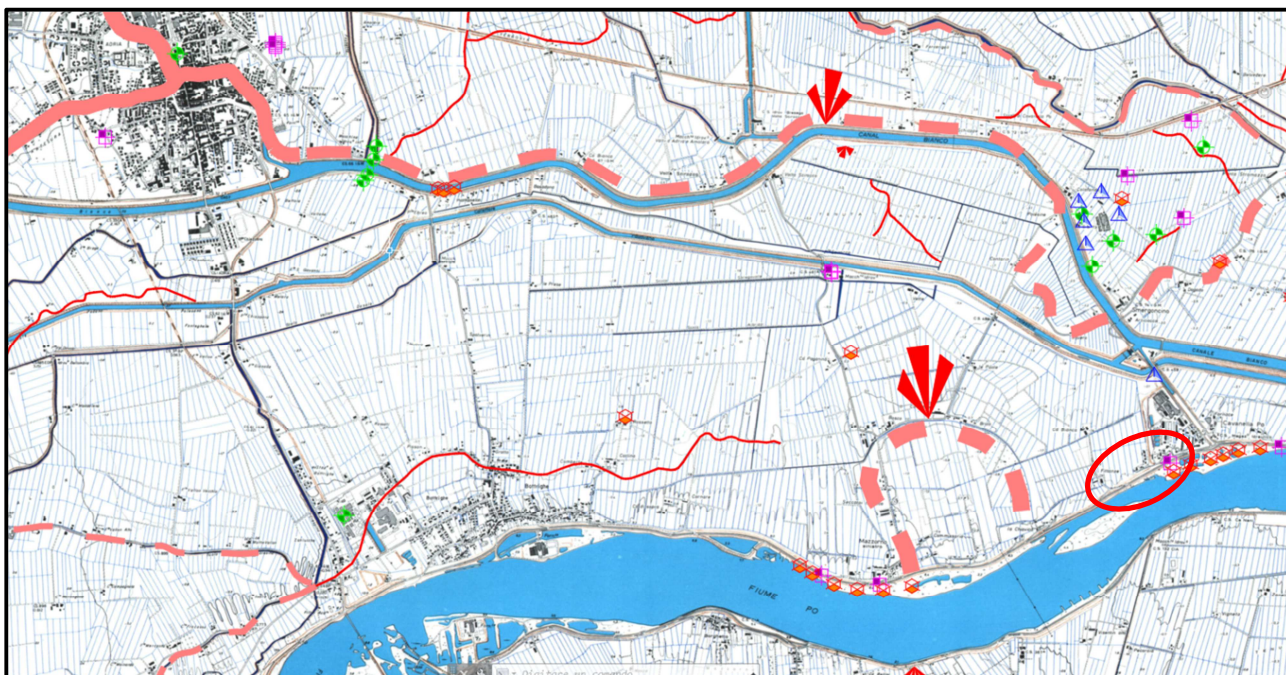


Fig. 14 - Estratto dalla Carta Geomorfologica della Provincia di Rovigo (anno 2001) – contornata in rosso l'area d'interesse

Diversamente da quanto rappresentato in Fig. 14, lo stralcio della Carta Geomorfologica estratta dal PAT del Comune di Adria, evidenzia la presenza di un meandro fluviale proprio in corrispondenza della zona d'intervento; tale informazione non trova riscontro a livello topografico in quanto l'area è stata interessata negli anni '70 da localizzati sbancamenti di materiale terroso a livello dell'originario piano campagna per il reperimento di materiale idoneo per i rialzi e ringrossi dell'antistante arginatura maestra.

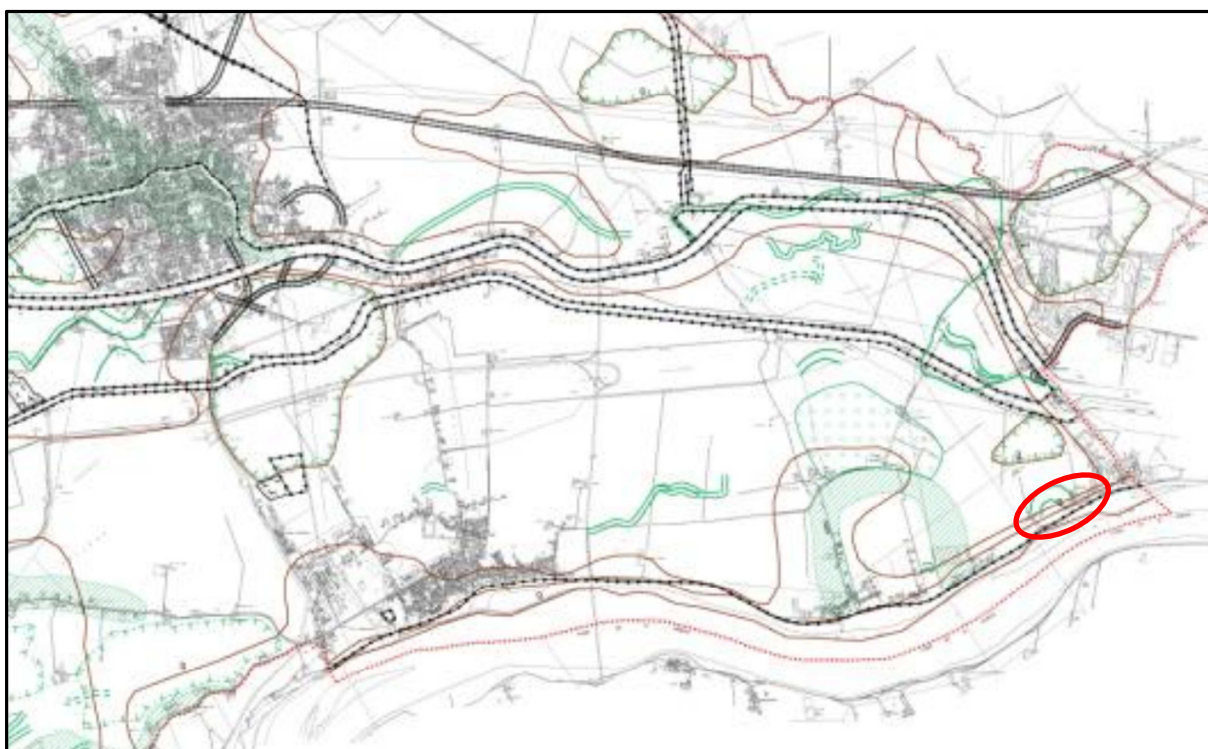


Fig. 15 – Estratto dalla Carta Geomorfologica del P.A.T. del Comune di Adria – contornata in rosso l'area d'interesse

La Carta Litologica di dettaglio allegata al P.A.T. del comune di Adria evidenzia, per la zona di studio, litologie superficiali a tessitura prevalentemente sabbiosa.

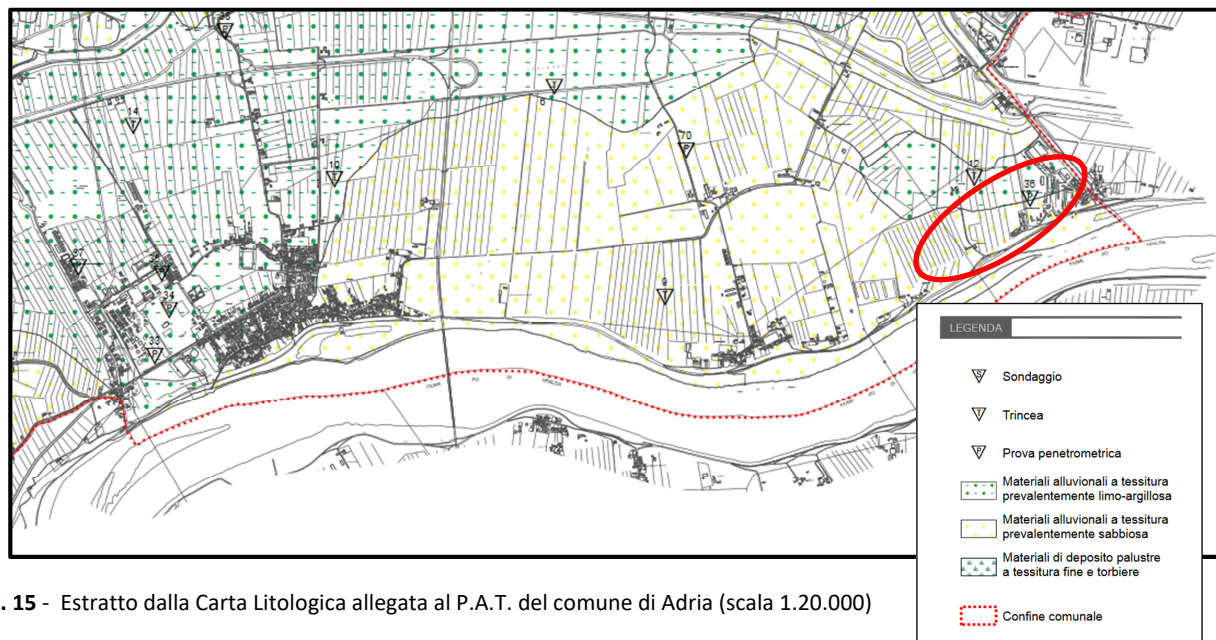


Fig. 15 - Estratto dalla Carta Litologica allegata al P.A.T. del comune di Adria (scala 1.20.000)

6.2 Modello stratigrafico-strutturale della bassa pianura Veneta

La zona in esame rientra nell'ambito della bassa pianura veneta caratterizzata da una successione di depositi marini, deltizi, lagunari, palustri e alluvionali plio-quaternari la cui potenza e distribuzione è condizionata dalle strutture geologiche profonde.

A causa della pluralità degli ambienti deposizionali in successione spaziale e temporale, il complesso sedimentario recente Plio-Quaternario è costituito da un'alternanza di strati a granulometria fine (limi, argille e frazioni intermedie), poco permeabili o impermeabili, con strati di sabbie a variabile percentuale di materiali più fini (sabbie limose, sabbie debolmente limose, limi sabbiosi, ecc.), sedi di falde idriche.

Nei singoli livelli si riscontrano frequentemente variazioni laterali di facies che talora portano ad una vera e propria lenticolarità.

Date le diverse articolazioni del substrato Pre-Quaternario, grazie all'azione combinata di tettonica e subsidenza, si hanno forti variazioni di spessore della coltre alluvionale: questi sono massimi nelle depressioni e minimi in corrispondenza delle strutture sepolte positive.

Gli spessori massimi si sono rilevati nel delta del Po (superiori a i 3.000 metri).

L'assetto spaziale dei singoli livelli alluvionali ricalca tendenzialmente l'assetto strutturale del substrato profondo, attenuandolo progressivamente dal basso verso l'alto.

6.3 Modello idrogeologico della bassa pianura Veneta

Nella bassa pianura esiste una falda freatica superficiale, di spessore limitato e con maggiore discontinuità laterale, al di sotto della quale si rinvencono delle falde semi-confinare e confinate sovrapposte; sia la falda libera che quelle confinate sono ospitate in acquiferi a granulometria sabbiosa, più o meno fine; alle maggiori profondità è possibile rinvenire orizzonti permeabili ghiaiosi.

Le falde in pressione di bassa pianura sono collegate idraulicamente agli acquiferi confinati della media pianura.

In prossimità dei corsi d'acqua gli acquiferi più superficiali, freatici o semi-confinati possono risentire variamente, oltre che degli apporti meteorici provenienti dalla superficie, di apporti idrici laterali (fluviali) in dipendenza di una serie di fattori sia naturali che artificiali quali il locale assetto litostratigrafico, la permeabilità dei terreni, la presenza di strutture sedimentarie (quali per esempio i paleoalvei, i con di rotta, ecc.), la realizzazione di interventi di impermeabilizzazione (setti, paratie, diaframmi), di drenaggi, ecc..

Allo stesso modo anche gli acquiferi confinati prossimi ai più importanti corsi d'acqua possono risentire degli apporti idrici fluviali.

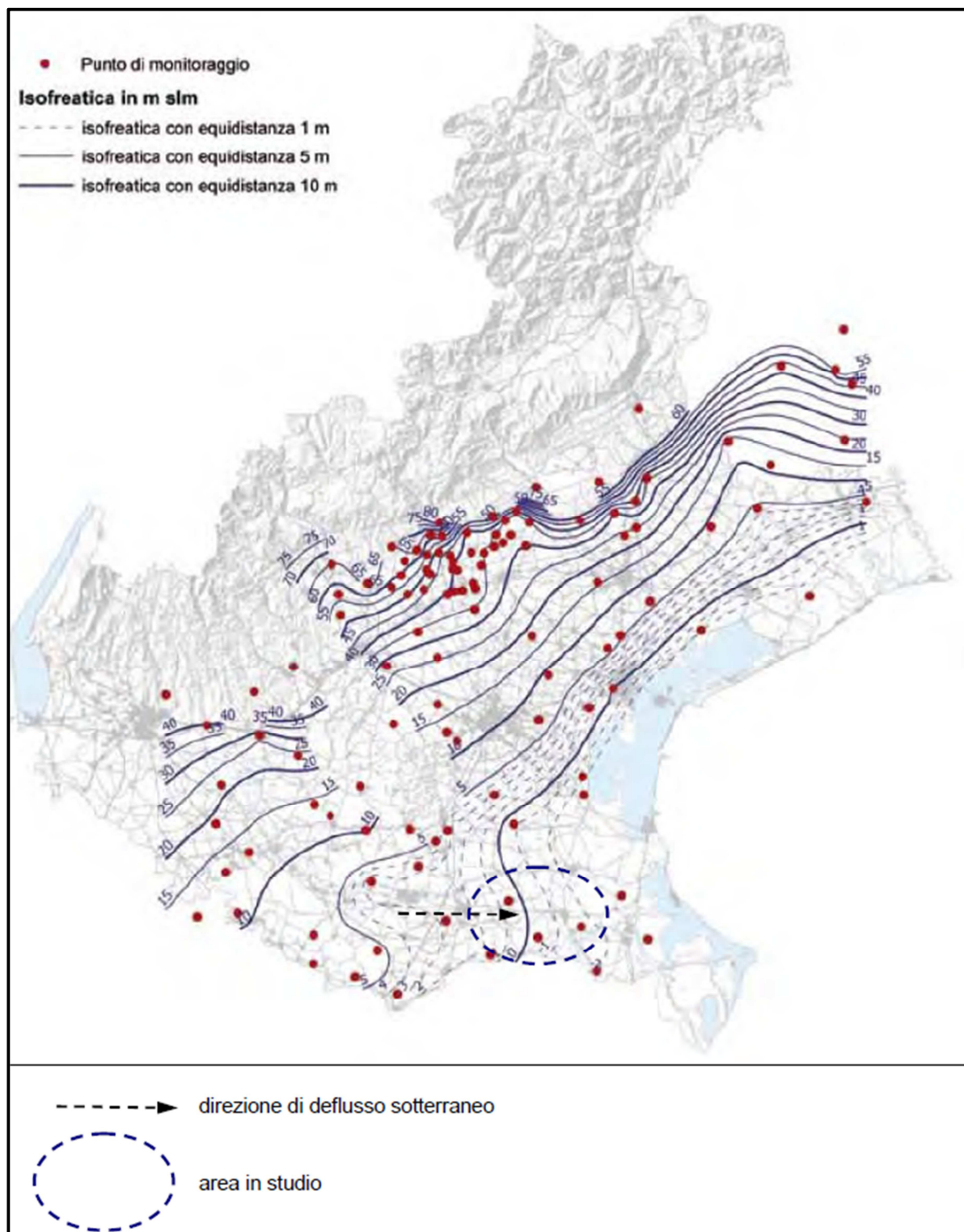


Fig. 16 - Carta delle isofreatiche del Veneto – campagna di Maggio 2003 – estratto da ARPAV 2008 modif.

6.4 Modello idrogeologico a livello comunale

Da un punto di vista idrogeologico l'area del comune di Adria appartiene al sistema multiacquifero differenziato, cioè un sistema multifalde in cui quella più superficiale è libera (freatica), mentre le sottostanti sono in pressione (saliente o artesiane). Tale sistema è dovuto all'alternanza tra terreni sabbiosi, che fungono da livelli acquiferi, e terreni argillosi che rappresentano i livelli impermeabili.

L'alternanza tra livelli sabbiosi e livelli argillosi che caratterizza il sottosuolo del territorio comunale dà origine ad un complesso sistema di falde acquifere sovrapposte.

Il livello di falda freatica è poco profondo ($0.5 \div 3$ m) con gradiente idraulico molto basso e generale deflusso verso Est.

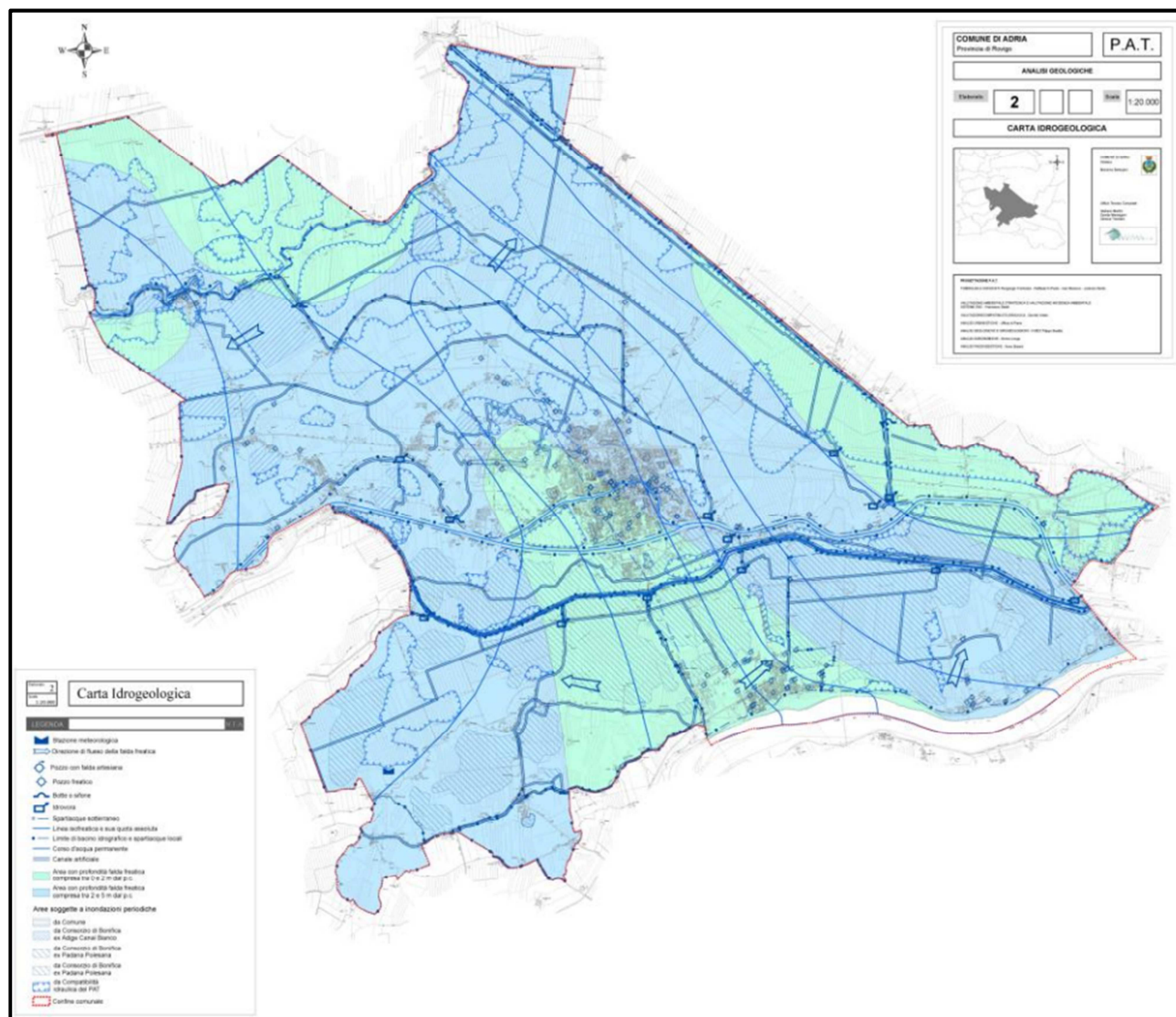


Fig. 17 - Carta Idrogeologica – Carta delle isofreatiche e delle isobate – Rilevo dell'autunno 2008 - Estratta dal P.A.T. del comune di Adria.

L'acquifero è in diretta comunicazione con la superficie attraverso la porzione non satura del terreno e trae alimentazione sia dal deflusso sotterraneo che proviene dalle zone a monte, sia dall'infiltrazione diretta delle acque superficiali (precipitazioni, dispersione dai canali d'irrigazione) attraverso la soprastante superficie topografica, sia da localizzate dispersioni di subalveo. In realtà ciò è localizzato dove in superficie compaiono terreni incoerenti. Poiché la superficie comunale presenta terreni coesivi e impermeabili per poco più del 50% del territorio, essi spesso confinano parzialmente la superficie della prima falda, conferendogli carattere di acquifero semiconfinato con vari gradi di continuità.

Il livello freatico risente del regime delle precipitazioni, per cui le sue oscillazioni seguono la distribuzione annuale delle piogge. Sono, di norma, attesi livelli massimi della superficie freatica nei primi due trimestri annuali, mentre i minimi si registrano negli ultimi due.

L'oscillazione stagionale del livello freatico, considerando i rilevamenti disponibili per l'area di Adria, varia da zona a zona con ordine di oscillazione tra circa 0.5 m a circa 1.5 m.

Scendendo in profondità le falde assumono carattere saliente o artesiano ed una maggiore continuità spaziale. Esse hanno, di norma, un gradiente basso ($\sim 0.02\%$) e un deflusso orizzontale, generalmente verso E. Essendo isolate dalla superficie dai livelli argillosi, traggono alimentazione dalle acque sotterranee che provengono da monte idrografico.

Anche queste falde, in prossimità del fiume Po, possono risentire, come nel caso di specie, di apporti idrici fluviali in relazione ad una serie di fattori sia naturali che artificiali quali il locale assetto litostratigrafico, la permeabilità dei terreni, la realizzazione di interventi di impermeabilizzazione (setti, paratie, diaframmi), di drenaggi, ecc..

Dall'esame della carta idrogeologica riferita all'acquifero freatico, si rileva, per l'area oggetto d'indagine (tra Mazzorno sinistro e Cavanella Po), una zona di criticità idraulica caratterizzata da "inondazioni periodiche o allagamenti" per le particolari condizioni geologiche, idrauliche, topografiche; tale area riprende ed estende verso campagna la mappa delle criticità idrauliche rilevate lungo la fascia al piede delle arginature nella zona in esame.

7. Inquadramento pianificatorio

7.1 Inquadramento pianificatorio a livello regionale

L'area in esame si pone al confine amministrativo tra il Bacino Idrografico del Fiume Po e quello del Fissero Tartaro Canalbianco.

Quanto previsto nella pianificazione (PAI) relativa al Bacino Idrografico del fiume Po, che per la località in esame è il PAI Delta del Po, si è detto nella relazione generale di progetto.

Di seguito si vuole integrare gli elementi conoscitivi dell'area con riferimento al PAI del Bacino del Fissero-Tartaro -Canalbianco il cui territorio si estende nel territorio delle Regioni Lombardia e Veneto (provincia di Mantova, Verona e Rovigo più un comune della provincia di Venezia), sommariamente circoscritto dal corso del fiume Adige a nord e dal fiume Po a sud e compreso tra l'area di Mantova a ovest, ed il Mare Adriatico a est.

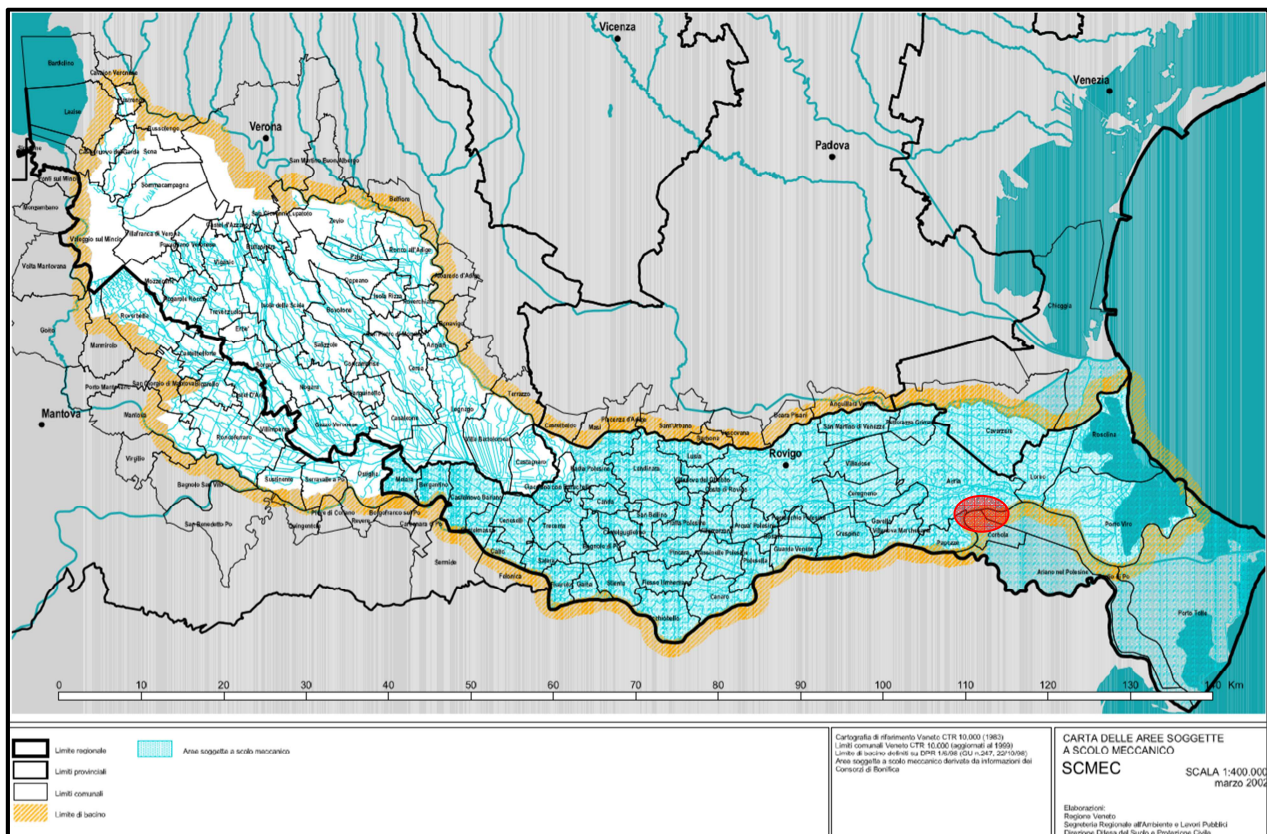


Fig. 18 - Autorità di Bacino del Fiume Fissero-Tartaro-Canalbianco - Progetto di Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (2002) – in evidenza i limiti di bacino e l'area polesana soggetta a scolo meccanico (con retinatura in azzurro).

Il bacino ha un'estensione complessiva di circa 2885 km² (di cui approssimativamente il 10% nella Regione Lombardia e il 90% nella Regione del Veneto).

Si tratta di un bacino, interessato da cospicue opere artificiali di canalizzazione. Il bacino è attraversato da ovest ad est dal corso d'acqua denominato Tartaro-Canalbianco-Po di Levante.

Le fondamentali caratteristiche fisiche del bacino possono essere sintetizzate come di seguito:

- 1) territorio pressoché pianeggiante, con ampie zone poste a quota inferiore ai livelli di piena dei fiumi Adige e Po;
- 2) presenza di una fitta rete di canali di irrigazione alimentati in prevalenza dalle acque del Lago di Garda e del Fiume Adige. Parte della rete irrigua ha anche funzione di bonifica, allontanando in Canalbianco le acque di piena.

Dal punto di vista idraulico la funzione del Canalbianco è legata all'allontanamento delle acque di piena dei laghi di Mantova e allo scolo e al recapito al mare delle acque del vasto comprensorio in sinistra Po. Tale comprensorio soggiace alle piene del Po che è completamente arginato a valle della confluenza col Fiume Mincio.

Le condizioni dell'assetto idrogeologico del bacino del fiume Fissero-Tartaro-Canalbianco sono grandemente influenzate dai grandi fiumi, Adige e Po, che per lungo tratto ne costituiscono i confini settentrionale e meridionale.

Le portate di piena proprie del Fissero-Tartaro-Canalbianco non sono certamente tali da creare situazioni paragonabili a quelle conseguenti alle piene di questi grandi fiumi.

Le analisi effettuate hanno analizzato, in via prioritaria, questi fattori esogeni al bacino e considerato le conseguenze che questi possono procurare; si sono quindi verificati gli studi e le valutazioni effettuate al riguardo dalle competenti Autorità di bacino dell'Adige e del Po.

Nell'ambito del Piano stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico per il fiume Adige (adottato nell'anno 2001) si sono effettuati le modellazioni delle piene per tempi di ritorno di 30, 100 e 200 anni, tenendo anche conto della presenza della galleria Adige Garda (detta anche Mori Torbole), che ha l'importante funzione di scolmare i picchi di piena provenienti da Trento per la messa in sicurezza della città di Verona e dei territori limitrofi.

Per quanto attiene il tratto del fiume compreso tra Verona e la foce, il Piano evidenzia come le strutture arginali del fiume Adige siano in grado di contenere la piena bicentenaria.

Anche per il fiume Po il Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico, approvato con D.P.C.M. 24/05/2001, fornisce risultati confortanti per la sicurezza idraulica del bacino del Fissero Tartaro Canabianco come si riporta di seguito:

“La relazione tra portate e livelli idrici lungo l'asta del Po è stata definita attraverso l'applicazione di un modello idraulico, esteso dalla confluenza del Tanaro al Delta, in modalità di moto quasi-bidimensionale, comprensivo della simulazione del funzionamento artificiale delle golene chiuse.”

“Lo scenario idrologico di verifica assunto è stato costruito sulla base dell'osservazione del comportamento del bacino idrografico nel corso delle due piene più gravose degli ultimi 50 anni, Tale piena teorica presenta un colmo confrontabile nelle sezioni strumentate con il valore di portata al colmo definito per tempo di ritorno di 200 anni.”

.....

“a) l'asta fluviale del Po, suddivisa nel Po piemontese (dalle sorgenti alla confluenza del Tanaro) e nel medio-basso Po di pianura (dalla confluenza del Tanaro all'incile del Po di Goro), quale sistema principale anche per le condizioni di rischio idraulico il tronco alto manifesta fenomeni di esondazione in tratti non arginati, erosioni e modificazioni della morfologia dell'alveo; nel tronco medio-basso il rischio è esclusivamente legato ai fenomeni di cedimento per rotta dei rilevati arginali;”

Nonostante quanto sopra, pur escludendo in generale situazioni derivanti da allagamenti causati dall'Adige o dal Po, non si può escludere una pericolosità residuale conseguenti a fenomeni di rotta per cedimento dei rilevati arginali.

La documentazione cartografica riportata nel PAI del bacino del Fissero-Tartaro-Canabianco riporta gli eventi di allagamento causati dall'esondazione dei collettori principali del bacino sul periodo più recente, sia le aree allagabili per l'insufficienza della rete di drenaggio secondaria.

In particolare nella Fig. 19 sono delimitate le aree allagate in occasione di recenti eventi di esondazione relativamente al Consorzio di Bonifica Fossa di Pozzolo, al Consorzio di Bonifica Valli Grandi e Medio Veronese, al Consorzio di Bonifica Padana Polesana.

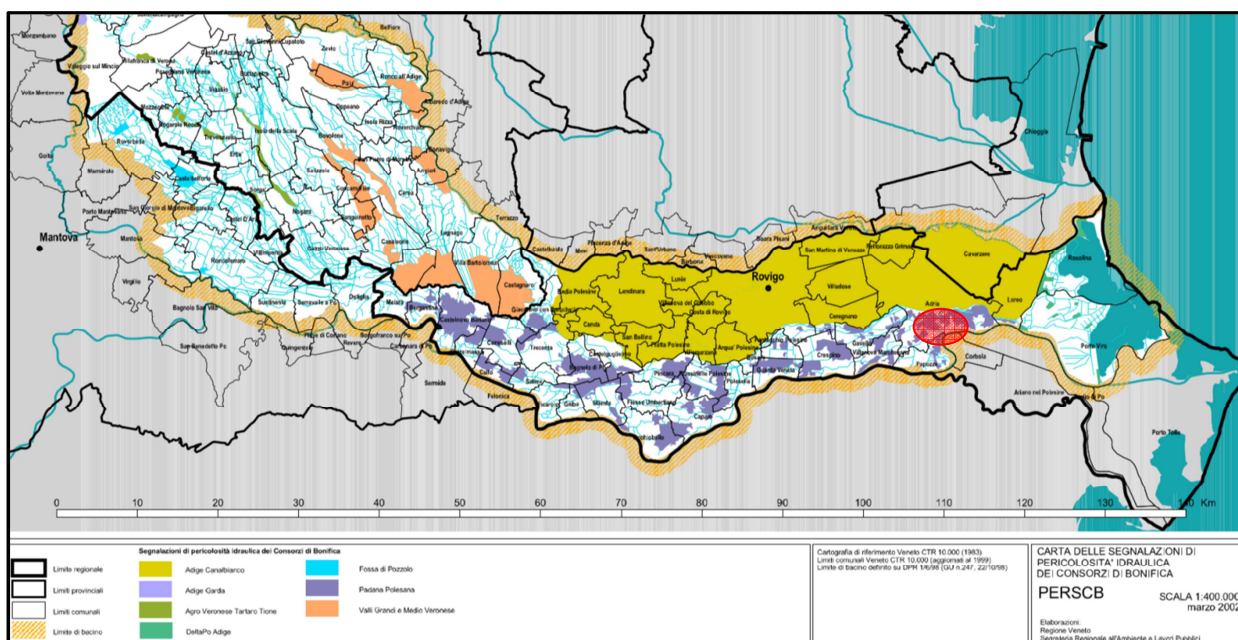


Fig. 19 - Autorità di Bacino del Fiume Fissero-Tartaro-Canalbianco - Progetto di Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (2002) – Carta delle segnalazioni di pericolosità idraulica dei Consorzi di Bonifica (non in scala).

Nella Fig. 20 è rappresentata la Carta del Rischio Idraulico, a cura di: Regione del Veneto – Unione Veneta Bonifiche, Irrigazioni e Miglioramenti Fondiari, 1999; in tale carta vengono riportate le aree “a rischio di allagamento” (aree allagate almeno una volta negli ultimi 20 anni) e le aree “ad alto rischio di allagamento”, aree soggette ad alta probabilità di allagamento (tempo di ritorno 2-5 anni).

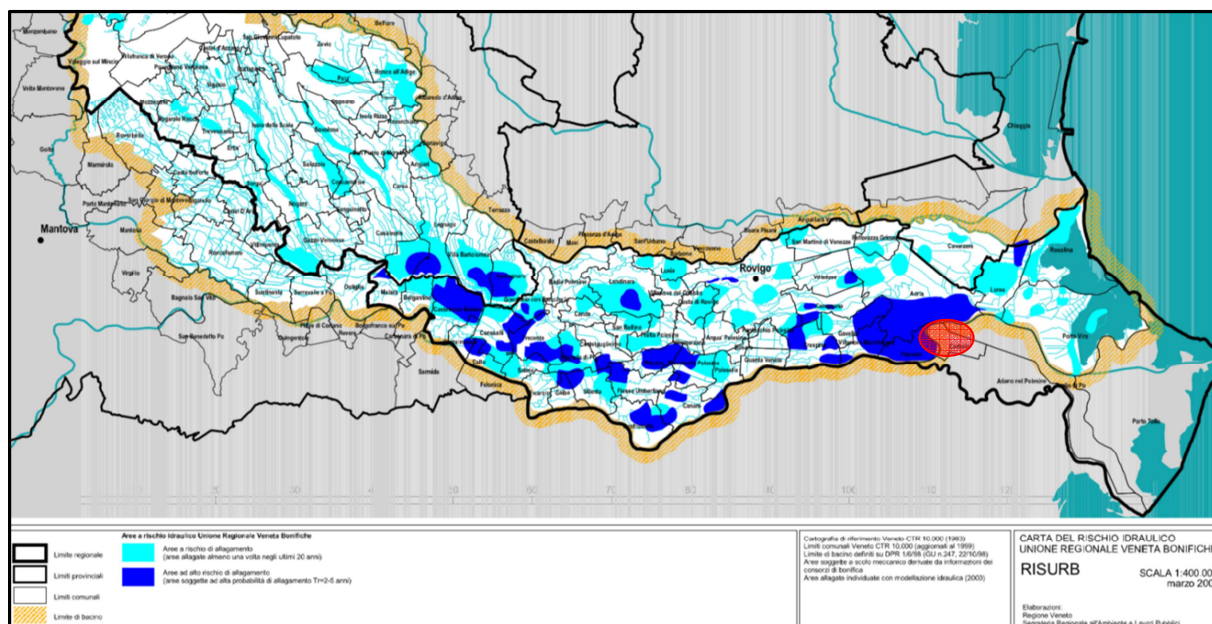


Fig. 20 - Autorità di Bacino del Fiume Fissero-Tartaro-Canalbianco - Progetto di Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (2002) – Carta del Rischio idraulico elaborata dall’Unione Regionale Veneta Bonifiche (non in scala).

Si sono poi estese le informazioni sul comportamento idraulico dell’ambito territoriale considerato tramite una modellazione matematica dei fenomeni idrologici ed idraulici.

Con questi obiettivi è stato realizzato un modello idrologico in grado di simulare eventi di piena sintetici partendo dalle precipitazioni di diversa durata e con assegnato tempo di ritorno probabile.

Le piene generate in modo sintetico con il modello idrologico sono state quindi utilizzate per esaminare la loro propagazione nella rete idrografica, utilizzando un modello matematico in grado di simulare la propagazione delle piene e valutare anche le situazioni in cui, per insufficienza degli alvei o per crollo del rilevato arginale (causa vetustà o cattivo stato di manutenzione), queste tendono ad esondare, allagando il territorio circostante.

I parametri che si sono considerati nel determinare la pericolosità di un fenomeno di allagamento sono stati l'altezza dell'acqua e la probabilità di accadimento (tempo di ritorno) secondo lo schema sintetico di seguito riportato:

LIVELLI DI PERICOLOSITÀ IDRAULICA PER ESONDAZIONE		
PERICOLOSITÀ		
ELEVATA	MEDIA	MODERATA
Tr = 50 anni $h > 1 \text{ m}$	Tr = 50 anni $1 \text{ m} > h > 0$	Tr = 100 anni $h > 0$

Con questo metodo si è fatto riferimento a tempi di ritorno di 50 e 100 anni che sono ancora percepibili dall'opinione pubblica e confrontabili con scelte di tipo pianificatorio.

Il tempo di ritorno di 50 anni è stato scelto poiché ha consentito di individuare aree ove è possibile ipotizzare interventi strutturali giustificabili a livello economico. Per questo tempo di ritorno la distinzione tra altezze dell'acqua maggiori e minori di 1 metro è il limite che, in relazione anche alle incertezze intrinseche del modello dovute soprattutto alla quantità e qualità dei dati utilizzati, distingue due zone nelle quali il danno è accettabile o meno, fatte salve le considerazioni su alcune opere pubbliche.

Per quanto riguarda le zone a pericolosità moderata il tempo di ritorno di 100 anni ha consentito di individuare un'area nella quale oltre ad una scelta di tipo strutturale diventa possibile anche una politica di interventi non strutturali che preveda vincoli e indicazioni sulle modalità di uso del territorio.

In Fig. 21 è riportata la Carta della Pericolosità idraulica per inondazione.

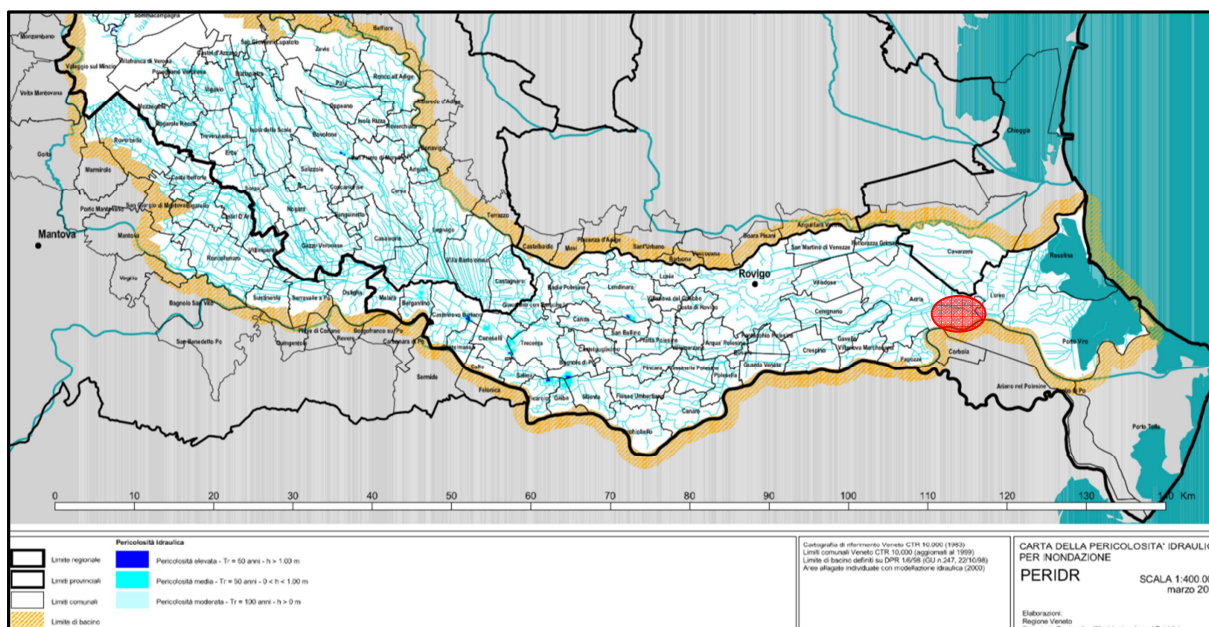


Fig. 21 - Autorità di Bacino del Fiume Fissero-Tartaro-Canalbianco - Progetto di Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (2002) – Carta della Pericolosità idraulica per inondazione a seguito di modellazione numerica (non in scala).

La definizione della pericolosità idraulica deve essere completata con alcune considerazioni. In particolare deve essere posta attenzione sui territori di bonifica che, per loro natura, sono caratterizzati da una condizione di potenziale pericolo. Infatti la rete di bonifica è, di norma, dimensionata per un tempo di ritorno di $20 \div 30$ anni ed inoltre spesso soggiace a impianti idrovori. Non infrequente poi è l'eventualità che, in occasione delle piene maggiori, l'Autorità idraulica imponga di interrompere il recapito delle acque di bonifica nei corsi d'acqua ricettori al fine di non aggravare le condizioni di questi.

Per le considerazioni precedentemente svolte si ritiene di considerare tutto il territorio soggetto a bonifica con scolo meccanico o misto come avente un grado di pericolosità pari a P1 (moderata).

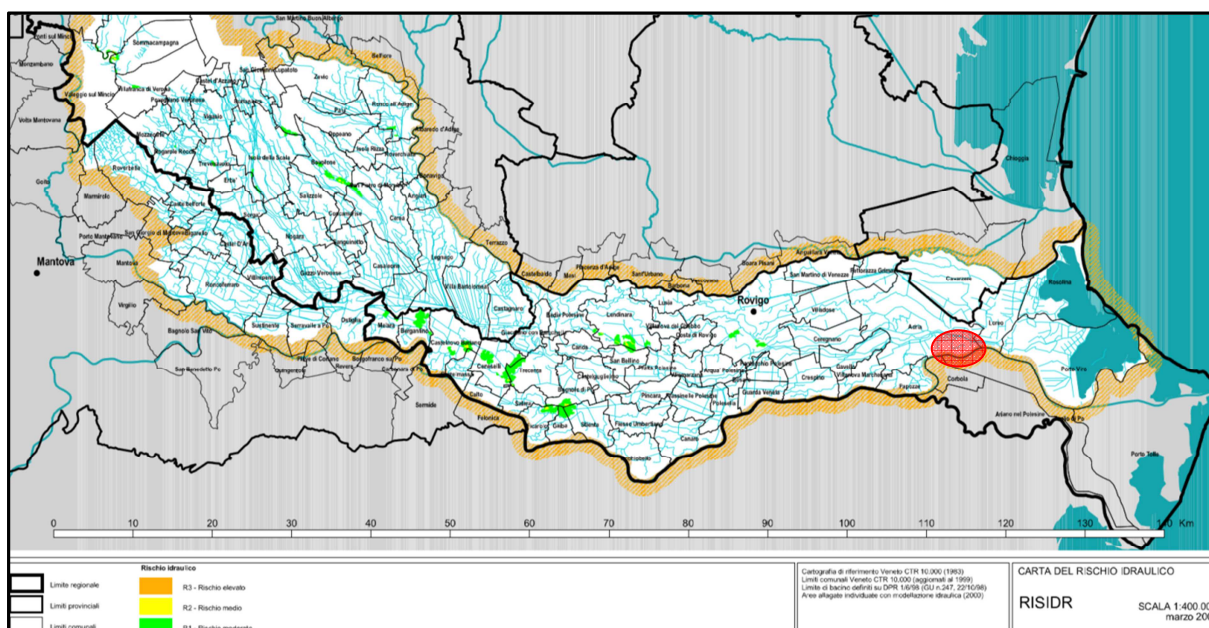


Fig. 22 - Autorità di Bacino del Fiume Fissero-Tartaro-Canalbianco - Progetto di Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (2002) – Carta del Rischio Idraulico per inondazione (non in scala).

7.2 Inquadramento pianificatorio a livello comunale

Nell'ambito della redazione del PAT del comune di Adria, per quel che riguarda la componente geologica, sulla scorta delle analisi tematiche precedentemente illustrate (litologia, geomorfologia, idrogeologia), è stata predisposta la carta della compatibilità geologica; quest'ultima, sintesi delle diverse componenti geologiche, contiene una valutazione della idoneità dei terreni alla urbanizzazione delle varie parti del territorio comunale secondo la L.R. Veneto n. 11/2004 e mette in evidenza le eventuali criticità derivanti da fattori ed elementi di origine naturale (es. ristagni idrici dovuti a terreni poco permeabili oppure zone periodicamente allagate) o di origine antropica (es. ex cave, discariche, etc).

Tale documento, seguendo le normative vigenti, mette in evidenza le zone in condizioni di pericolosità o rischio geologico o idrogeologico per gli insediamenti e le infrastrutture esistenti; tale carta è di fondamentale importanza, quasi uno "spartiacque" tra l'azione pianificatoria concertata con l'Amministrazione e la "sensibilità" del territorio dove si intende operare.

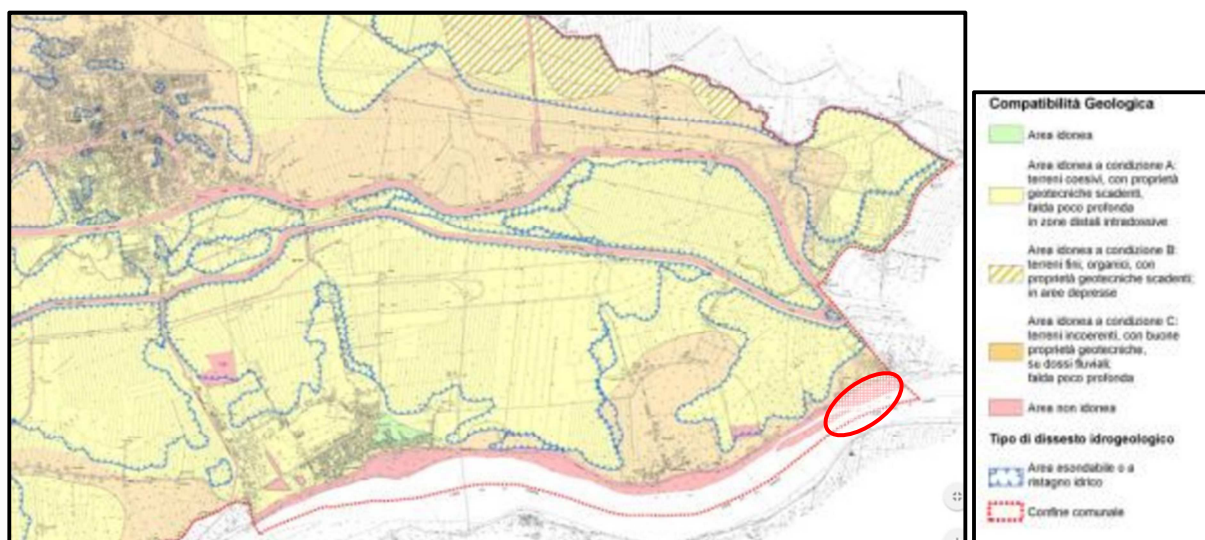


Fig. 23 - Carta della Compatibilità Geologica - zonazione dell'edificabilità dei terreni e del rischio geologico e idrogeologico; circoscritta in rosso l'area d'intervento.

L'area interessata dall'intervento di diaframmatrice in progetto è posizionata sulla sommità del petto arginale (lato fiume) nella tratta evidenziata in rosso nella carta sopra riportata; nella medesima cartografia si evince come l'arginatura maestra del fiume Po di Venezia costituisca spartiacque tra le aree golenali, non edificabili, e le aree poste lato campagna a vincolo di edificabilità condizionato (condizione C2), in relazione alle caratteristiche litologiche, geomorfologiche ed idrauliche locali.

Si riporta di seguito, per completezza, il contenuto dell'art. 21 "Compatibilità geologica", contenuto nelle Norme Tecniche del PAT del comune di Adria.

"Rif. Legislativo: artt.13, 40 L.R. 11/04, L. 64/1974, D.M. 11.03.1988 Circ. Reg. n°9 del 05/04/2000, D.M. 14.09.2005, D.M. 14.01.2008, TITOLO III P.T.C.P.

Contenuto

Il P.A.T. suddivide il territorio comunale in aree contraddistinte da differente grado di rischio geologico-idraulico e differente idoneità ad essere utilizzate per l'edificazione, per le caratteristiche geologico-tecnico e idrogeologico-idrauliche, distinguendo tra:

a. aree idonee dove non sussistono condizioni geologiche penalizzanti tali da impedire l'edificabilità.

Di norma, si tratta di aree con condizioni geomorfologiche favorevoli, con falda relativamente più profonda e con drenaggio buono. In esse le caratteristiche geomeccaniche e geotecniche dei terreni possono essere classificate buone, per la presenza di litologie con grado di addensamento medio ed elevate percentuali di materiali granulari.

***b. aree idonee a condizione:** in questa classe ricadono i terreni con litologia e proprietà geomeccaniche variabili e con diversa profondità della tavola d'acqua nonché aree con criticità idrauliche per ristagno idrico e per esondazione con classificazione PAI e non. Si suddividono in:*

*• **condizione A:** si tratta di terreni che caratterizzano gran parte del territorio di Adria. Le litologie sono costituite da depositi alluvionali spesso a granulometria variabile, ma prevalentemente medio-fini (limi, argille e componenti intermedi in differenti percentuali). Possono essere presenti, in profondità, lenti e livelli sabbiosi o torbosi con differente spessore. Caratterizzano le zone distali delle varie fasi esondative fluviali, quindi i terreni qui trasportati e depositati caratterizzano velocità ed energie medio-basse e basse. Si rinvencono spazialmente alternate alle aree di alta energia deposizionale (vedasi Condizione C). Sono terreni generalmente comprimibili, dove si possono innescare pressioni neutre, data la presenza di falda con modesta soggiacenza. Tali terreni hanno caratteristiche geotecniche da scarse a mediocri.*

*• **condizione B:** sono aree caratterizzate da terreni fini ricchi di materiale organico (torbe) sia in superficie che in profondità.....Si tratta di aree topograficamente depresse e soggette a fenomeni di subsidenza significativa (>5 mm/anno). Sono terreni molto comprimibili, dove si possono innescare importanti cedimenti del suolo e dei manufatti presenti. La falda ha una bassa soggiacenza. Tali terreni hanno caratteristiche geotecniche molto scarse.*

*• **condizione C:** si tratta di aree legate alle divagazioni fluviali nella loro fase più dinamica e di elevata energia di trasporto. La granulometria è prevalentemente sabbiosa e sabbioso-limosa, almeno nei primi metri. La distribuzione di tali materiali hanno una significativa variabilità non solo verticale, ma anche laterale in relazione all'energia deposizionale della fase di rotta e divagazione. Queste aree caratterizzano le zone storicamente antropizzate ed urbanizzate e presentano mediamente quote topografiche rilevate rispetto alle zone limitrofe distali...omissis..... Si riscontranoomissis.....lungo la fascia perimetrale al Fiume Po tra Bottrighe e Cavanella Po.... omissis.*

***c. aree non idonee** costituite da:*

• aree localizzate lungo gli alvei dei fiumi Po, Canalbianco, Naviglio Adigetto e degli scoli consorziali principali sino all'unghia esterna degli argini;

• aree di cave attive/dismesse e sino alla loro scarpate di scavo;

• aree di discariche dimesse;

• aree di sbancamento in genere.

Prescrizioni

.....omissis..... Nelle aree non idonee è preclusa l'edificabilità, salvo gli interventi:

- di cui ai commi a), b), c), d) comma 1 dell'Art. 3 del D.P.R. 380/2001 quindi interventi di manutenzione ordinaria, straordinaria, restauro, risanamento conservativo e ristrutturazione senza ricavo di nuove unità abitative;
 - interventi di ampliamento per adeguamento a scopo igienico sanitario o per ricavo di locali accessori (legnaie, impianti tecnologici, box auto ecc.);
 - di realizzazione o ampliamento di infrastrutture viarie o rete tecnologiche di interesse pubblico non ubicabili in altro sito, ma accompagnate da elaborazioni geologico-tecniche, finalizzate a definire le modalità di realizzazione delle opere per garantire le condizioni di sicurezza delle opere stesse, nonché dell'edificato e delle infrastrutture adiacenti;
 - per la messa in sicurezza, salvaguardia e valorizzazione delle aree di interesse storico, ambientale ed artistico;
 - atti al miglioramento del sistema naturalistico ambientale e della sicurezza idrogeologica (percorsi naturalistici, bacini di laminazione, etc.);
 - di sistemazione e mitigazione del dissesto geologico e idrogeologico;
 - interventi di miglioramento fondiario pertinenti all'attività agricola o forestale e l'edificabilità di annessi rustici di modeste dimensioni (< 8 mq).....omissis..... Per le fasce fluviali le competenze della sicurezza e del mantenimento dell'efficienza idraulica appartengono agli enti sovra comunali ai quali si rimanda.”
-omissis..... Nelle aree idonee a condizione "C" generica deve essere definito il modello geologico e geotecnico sulla base di adeguati studi geologici di superficie e di apposite indagini geognostiche ed idrogeologiche seguendo quanto disposto dalla normativa vigente elencata per le aree idonee.... ..omissisInoltre, saranno condotte adeguate indagini idrogeologiche per valutare le possibili interferenze tra la falda e l'opera in progetto con riferimento alla vulnerabilità dell'acquifero.....Questo, soprattutto nelle fasce perimetrali ai corsi d'acqua, nelle zone a prevalente componente sabbiosa e dove la soggiacenza della falda libera è minima.

8. Indagine conoscitiva geofisica-geognostica-geotecnica a livello di dettaglio

Per quanto relazionato circa i danneggiamenti occorsi all'arginatura nel corso delle recenti piene, risulta evidente la necessità di porre in atto, in tempi rapidi, un intervento risolutivo per la messa in sicurezza della zona.

Attraverso una preventiva campagna d'indagine e di prove in sito (avviata a fine 2018) si è potuto ricostruire il modello idrogeologico di dettaglio dell'area e si sono potuti determinare i parametri caratteristici d'interesse (permeabilità) relativi alle diverse litologie schematizzate utili ai fini dello svolgimento delle verifiche di filtrazione previste da normativa.

I risultati delle verifiche di filtrazione saranno quindi fondamentali per stabilire la quota di approfondimento del diaframma necessaria all'abbattimento dei gradienti idraulici a valori non critici nell'ambito di un primo intervento urgente di diaframmatrice (I stralcio) limitato al tratto più critico in relazione ai finanziamenti disponibili.

Al fine di completare le conoscenze disponibili si è proceduto, di recente (2019), all' affidamento di ulteriori indagini geofisiche e geognostico-geotecniche mirate a definire sia le caratteristiche "ambientali" ai fini della normativa in materia di "terre e rocce di scavo" (del diaframma) e dell'area di riporto del materiale terroso, sia al fine di acquisire informazioni specifiche circa un'anomalia magnetica estesa (circa 50 m) rilevata in occasione delle attività preliminari di bonifica da ordigni bellici inesplosi e localizzata in prossimità dello stante 523 (vedi Fig. 24 sotto riportata).

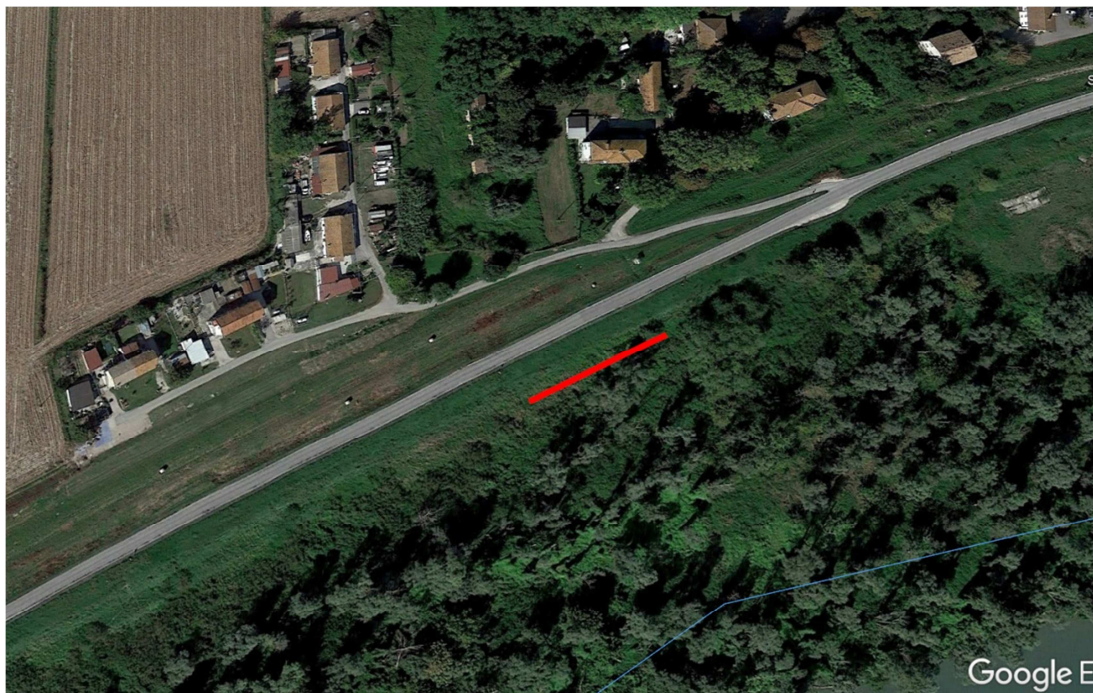


Fig. 24 - Zona interessata da anomalia magnetica a seguito indagine BOB

La tipologia delle indagini effettuate è la seguente:

- Tomografia elettrica verticale lungo vari profili sia longitudinali che trasversali all'arginatura sia nella zona di realizzazione del diaframma plastico che nell'area di deposito del materiale di risulta dallo scavo del diaframma in sinistra Po di Venezia in località Pioppa nel Comune di Porto Viro (RO);
- Sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo con effettuazione di prove in sito (prove Lefranc, SPT) e prelievo di campioni rimaneggiati, indisturbati e campioni ambientali;
- Installazione di piezometri del tipo "a tubo aperto" e del tipo "Casagrande" al fine di monitorare i livelli di falda;
- Prove di laboratorio sui campioni rimaneggiati ed indisturbati finalizzate alla definizione dei valori del coefficiente di permeabilità delle terre investigate;
- Prove di laboratorio sui campioni ambientali ai fini dell'accertamento del superamento o meno dei valori delle concentrazioni soglia di contaminazione di cui alle colonne A e B della tabella 1 dell'allegato 5 alla parte IV del D. Lgs. n. 152/2006, con riferimento alle caratteristiche delle matrici ambientali e alla destinazione d'uso urbanistica DPR 120/2017 artt. 20-22;
- prove penetrometriche CPTU e SCPTU ed esecuzione di prove di dissipazione nelle litologie sature coesive per la determinazione del coefficiente di permeabilità (K).

Il quadro delle indagini di campagna e di laboratorio eseguite, i relativi risultati, la modellazione numerica bidimensionale dei processi di filtrazioni nelle diverse ipotesi progettuali sono riportati nella Relazione Geotecnica e nei relativi allegati.

Tutta la documentazione è raggruppata nei seguenti fascicoli:

- Relazione geotecnica a cura di IND.A.G.O. s.n.c. – Rovigo (RO) - (gennaio 2019) e successivo aggiornamento (dicembre 2019)
- Appendice alla Relazione geotecnica : Studio di risposta sismica locale a cura di A.T.A. - Studio associato di Geologia Tecnica e Geofisica – Rovigo (RO) - (dicembre 2019);
- Report relativo a “Esecuzione di indagini tomografiche di dettaglio nonché di portanza e caratterizzazione dei terreni con riguardo i lavori urgenti per la costruzione di un diaframma plastico per il contrasto dei moti di filtrazione in prossimità dell’abitato di Cavanella Po fra gli stanti 521 - 523 in sinistra del Po di Venezia in comune di Adria (RO) - Rif. RO-E- 1432” a cura di GeoExploration s.r.l. – Forlì (FC) - (Febbraio 2020);
- Report relativo a “Lavori urgenti per la costruzione di un diaframma plastico per il contrasto dei moti di filtrazione in prossimità dell' abitato di Cavanella Po fra stanti 521-523 in sinistra del Po di Venezia in Comune di Adria (RO)” a cura di PARMAGEO s.r.l. – Basilicanova (PR) – (Marzo 2020).

Nella Relazione Geotecnica è definito il modello idrogeologico e sismico del sito con particolare riferimento alle verifiche a sifonamento e liquefazione; in particolare è stata sviluppata un’analisi numerica dei processi di filtrazione su sezione critica individuata dai Professionisti, pre/post intervento. Nel corso delle verifiche sismiche è emersa una criticità legata ad un potenziale fenomeno di liquefazione cui sarebbe soggetto il banco sabbioso presente nei terreni di fondazione dell’arginatura. Si è quindi deciso di approfondire la problematica tramite uno Studio di risposta sismica locale affidato ad A.T.A. - Studio associato di Geologia Tecnica e Geofisica – Rovigo (RO).

La campagna d’indagine affidata a Parmageo s.r.l. ha permesso di attribuire all’ anomalia magnetica individuata lungo il petto arginale in occasione della BOB (Bonifica Ordigni Bellici), una chiara origine antropica legata ad attività edilizie pregresse (anni '50): in particolare nel corso del Sondaggio S2 ubicato lungo la sommità del petto a fiume, in posizione di mezzeria, alla profondità di 3,10 m (base argine), è stato perforato un manufatto in c.a. dello spessore di m 0,80 avente, secondo le informazioni raccolte in loco, funzione di fondazione di un vecchio impianto di pompaggio a servizio dello storico zuccherificio di Cavanella Po.



Fig. 25 - Sondaggio S2 (Parmageo s.r.l.) - Cassetta catalogatrice da 0 a 5 m – nell'intervallo 3,10 – 4,0 la carota è costituita da c.a.

Le problematiche che si sono riscontrate durante questa perforazione hanno costretto ad un nuovo posizionamento della sonda, distante circa 1 m dal precedente, verso l'unghia della scarpata arginale sul petto; in corrispondenza di questo nuovo posizionamento non si è intercettata la fondazione in parola, come del resto accaduto in occasione delle perforazioni a scopo BOB.



Fig. 26 - Sondaggio S2 (Parmageo s.r.l.) – In evidenza i due posizionamenti

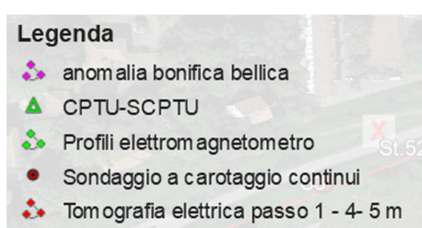


Fig. 27. Planimetria con ubicazione dei punti d'indagine in località Cavanella Po

Quindi, ai fini delle problematiche in esame, l'indagine svolta ha permesso di individuare i seguenti due gruppi stratigrafici per il sito in esame:

- A) Terre di riporto costituenti il corpo arginale;
- B) Terre costituenti la fondazione dell'arginatura.

Le terre di riporto costituenti l'arginatura (A), procedendo dall'alto verso il basso, si suddividono come segue:

- riporto A1): parte superiore del terrapieno arginale (circa da quota 8,3 a quota 4,3 m s.l.m.m.), di spessore massimo 4 m dalla sommità arginale, presenta litologie limoso-sabbiose di medio-bassa permeabilità: a tale settore arginale è stato attribuito nelle verifiche di filtrazione un valore del coefficiente di permeabilità dell'ordine di 10^{-6} m/sec;
- riporto A2): parte inferiore del terrapieno arginale (da quota 4,3 m a quota variabile 2,5/-0,5 m s.l.m.m.) costituito da litologie limo-argillose di bassa permeabilità (10^{-8} m/sec).

In particolare la componente di riporto costituita da sabbie e limi-sabbiosi costituisce non solamente la parte sommitale dell'arginatura ma anche la parte più esterna della sagoma arginale interessata, a più riprese, da interventi di rialzo e ringrosso arginale anche tramite l'utilizzo di terre provenienti dal dragaggio con alluvioni d'alveo.

Le terre in posto costituenti la fondazione dell'arginatura (B), procedendo dall'alto verso il basso, si susseguono come segue:

- strato B1 di spessore estremamente variabile (da quota variabile 2.5/-0,5 m s.l.m.m. a quota -3.2/-10,0 m s.l.m.m.) costituito prevalentemente da litologie limo-argillose di bassa permeabilità (10^{-8} m/sec); localmente sono presenti intercalazioni decimetriche di sabbie e sabbie limose sede di falda freatica;
- strato B2 (da quota -3.2/-10,0 m s.l.m.m. a quota -19,7/-21,7 m s.l.m.m.) costituito da un potente e continuo banco sabbioso sub-orizzontale di medio-elevata permeabilità (valori massimi da prova Lefranc dell'ordine di 10^{-4} m/sec) sede del primo acquifero confinato; tale banco sabbioso raggiunge lo spessore massimo di 19 m circa nel tratto compreso tra i punti d'indagine S1 - CPTU 1 per poi ridursi, ai margini dell'area indagata, in corrispondenza di CPTU 0 e S3, a valori rispettivamente di 11 e 9 m di spessore;
- strato B3 (al di sotto di quota variabile da -19,7 a -21.7 m s.l.m.m.), costituito da uno strato continuo di argilla-limosa/limo-argilloso a bassa permeabilità (10^{-9} m/sec), di spessore variabile da un minimo di 1,2 a 7,0 m; al di sotto di questo strato si sono rinvenute ancora litologie costituite da sabbie fini debolmente limose sino alla massima profondità indagata (quota - 30.0 m s.l.m.m.).

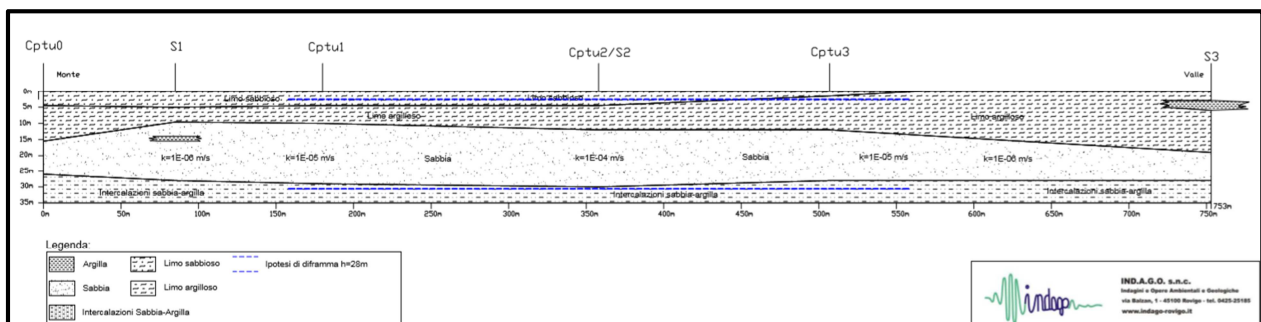


Fig. 28 Profilo litostratigrafico longitudinale all'argine maestro in sinistra Po di Venezia tra stanti 520-524 – estesa profilo 750 m

Dall'esame del profilo longitudinale emerge chiaramente la continuità areale ed il notevole spessore dell'acquifero sabbioso di medio-elevata permeabilità (strato B2) posto nei terreni di fondazione arginale.

9. Modello Idrogeologico di dettaglio

La definizione del modello è basata sia sull'identificazione delle unità idrogeologiche che sul loro assetto spaziale (strutture idrogeologiche).

9.1 Unità idrogeologiche

Analizzando le proprietà idrologiche dei vari litotipi costituenti la successione stratigrafica dei primi 35 m si giunge ad identificare la seguente serie di unità idrogeologiche, dalla più superficiale alla più profonda:

1° Unità: si tratta dell'acquitard costituito dalle terre costituenti lo strato B1 a prevalente litologia fine; la variabilità litologica dello strato B1, che localmente lascia il posto a litologie sabbioso-limose, conferisce all'unità puntuale carattere freatico;

2° Unità: definita dall'acquifero confinato sabbioso coincidente con lo strato B2; il tetto dell'acquifero confinato è costituito dallo strato B1 mentre il letto è costituito dallo strato B3.

9.2 Strutture idrogeologiche

Lo schema dei rapporti stratigrafici tra le varie unità idrogeologiche permette di definire la struttura idrogeologica locale.

Essa è identificabile in un sistema multiacquifero sabbioso separato da acquitard e acquiclude (miscele di limi ed argille in varie proporzioni); la 1° unità idrogeologica acquista localmente carattere freatico o semi-confinato laddove, a causa dell'eterogeneità spaziale, i sedimenti sono permeabili.

La struttura confinata è localizzata in corrispondenza della 2° unità idrogeologica la quale risente rapidamente della ricarica esercitata dal fiume del Po di Venezia che costituisce limite idrogeologico a potenziale imposto.

Questa 2° unità costituisce via preferenziale ai fenomeni di filtrazione.

In occasione delle piene, l'intensificarsi dei fenomeni di filtrazione innesca, localmente, elevati gradienti idraulici tali da superare, nei materiali sciolti, il valore critico; tale circostanza causa importanti fenomeni di sifonamento con asporto di notevoli quantità di materiale (sabbie limose) dai terreni di fondazione arginale; di seguito si riporta l'analisi granulometrica effettuata su un campione di terra prelevato nel cono di deposito di un locale fontanazzo (scheda 86 censimento AIPO).

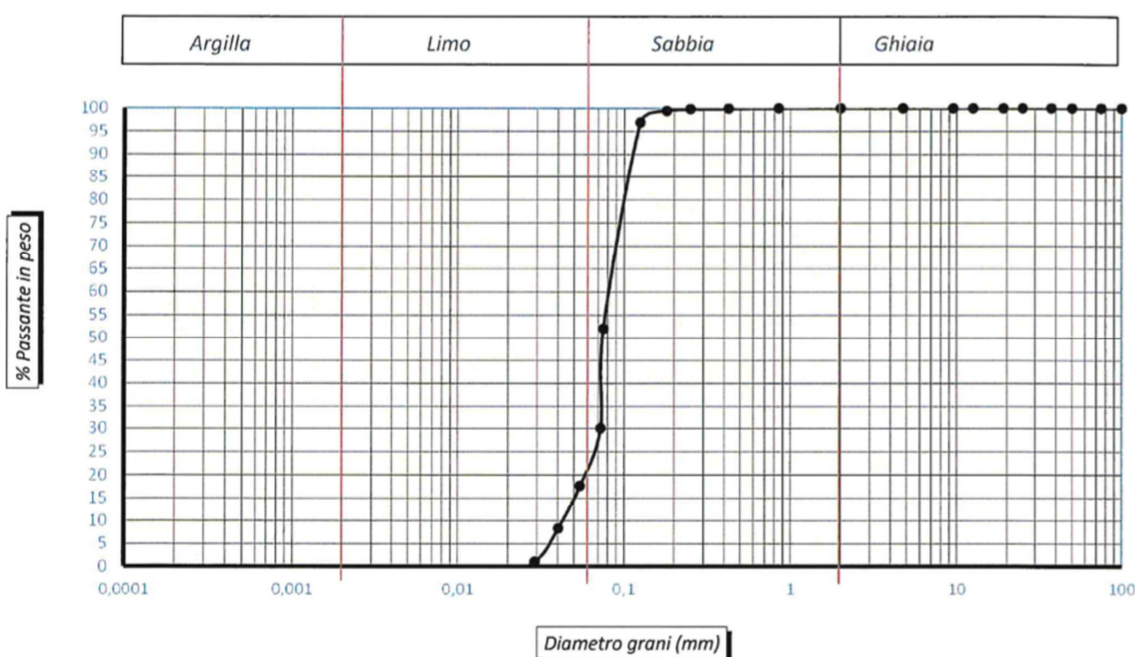


Fig. 29 - Analisi granulometrica sedimento raccolto in corrispondenza del fontanazzo storico n. 86 – il sedimento campionato (sabbia limosa) contiene un 22 % circa di componente limosa.

9.3 Misure piezometriche in fase progettuale

Le misure dei livelli di falda effettuate nel periodo Ottobre-Dicembre 2019 nel piezometro installato sulla sommità arginale (in corrispondenza del sondaggio S2), il cui filtro è posto in corrispondenza dello strato sabbioso B2 costituente la 2° unità idrogeologica), confermano innanzitutto che il maggior fattore

condizionante la falda monitorata è dato dalla presenza del fiume che esercita un'azione alimentante nei confronti dell' acquifero adiacente sia in fase di piena che in fase di magra.

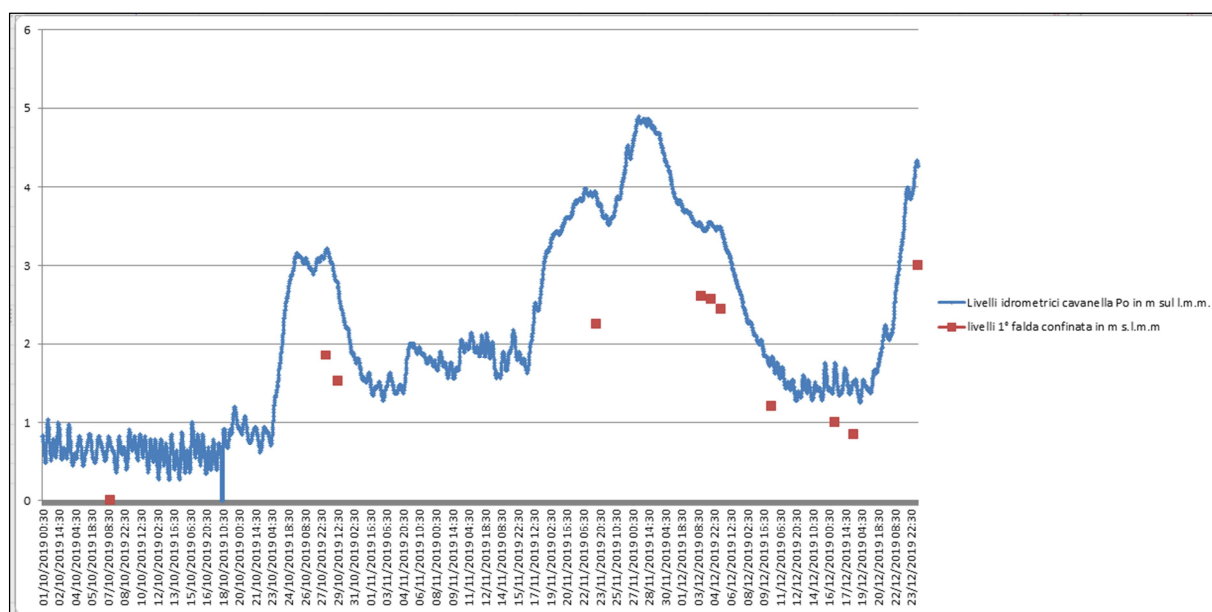


Fig. 30 Monitoraggio della falda corrispondente alla seconda unità idrogeologica – Piezometro installato in corrispondenza del Sondaggio S2 in sommità arginale.

Dall'osservazione delle quote di falda (Fig. 29) misurate nel tempo emerge come queste siano superiori al tetto dell'acquifero che le racchiude, elemento questo che contraddistingue le falde confinate con carattere saliente.

Altra informazione di interesse riguarda il fatto che le quote del livello di falda rilevate nel periodo di magra del fiume (falda avente quota 0 m sul l.m.m.m) risultano superiori anche al livello del piano campagna adiacente l'arginatura, caratteristica questa che conferisce alla falda monitorata carattere artesiano.

Nonostante non si abbiano a disposizione registrazioni in continuo dei livelli di falda comunque è possibile osservare come le perdite di carico idraulico registrate nella falda in parola siano minime in ogni condizione idrometrica.

Si ribadisce quindi come i fenomeni di filtrazione sia in condizioni idrometriche ordinarie che in situazioni "di piena" avvengono principalmente attraverso le sabbie costituenti lo strato B2.

10. Modellazione sismica

Il Comune di Adria, secondo la classificazione sismica di cui all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n° 3274/2003 seguita dalla delibera del Consiglio Regionale del Veneto n. 67 del 3/12/2003, ha fatto proprio e approvato l'elenco dei comuni sismici del Veneto e la località di Cavanella Po, in Comune di Adria, è stata classificata in Zona Sismica 4, ovvero la zona meno pericolosa, dove le probabilità di danni sismici sono basse.

La D.G.R. Veneto suddetta prescrive che "per i comuni del Veneto ricadenti in zona 4, non vi è obbligo di progettazione antisismica, salvo che per gli edifici di interesse strategico e delle opere infrastrutturali la cui funzionalità, durante gli eventi sismici, assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile nonché per gli edifici e le opere infrastrutturali che possono assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso".

A seguito dell'entrata in vigore delle NTC2008 e del DGRV n. 71/2008, viene approvata la nuova "Mappa di pericolosità sismica del territorio Nazionale" espressa in termini di accelerazione massima al suolo (a_g max) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (tempo di ritorno 475 anni) riferita a suoli rigidi ($V_s > 800$ m/sec). Il valore di a_g , per la località di Cavanella Po, come si può vedere dalla fig. 30, varia da $0.05 \leq a_g \leq 0.075$

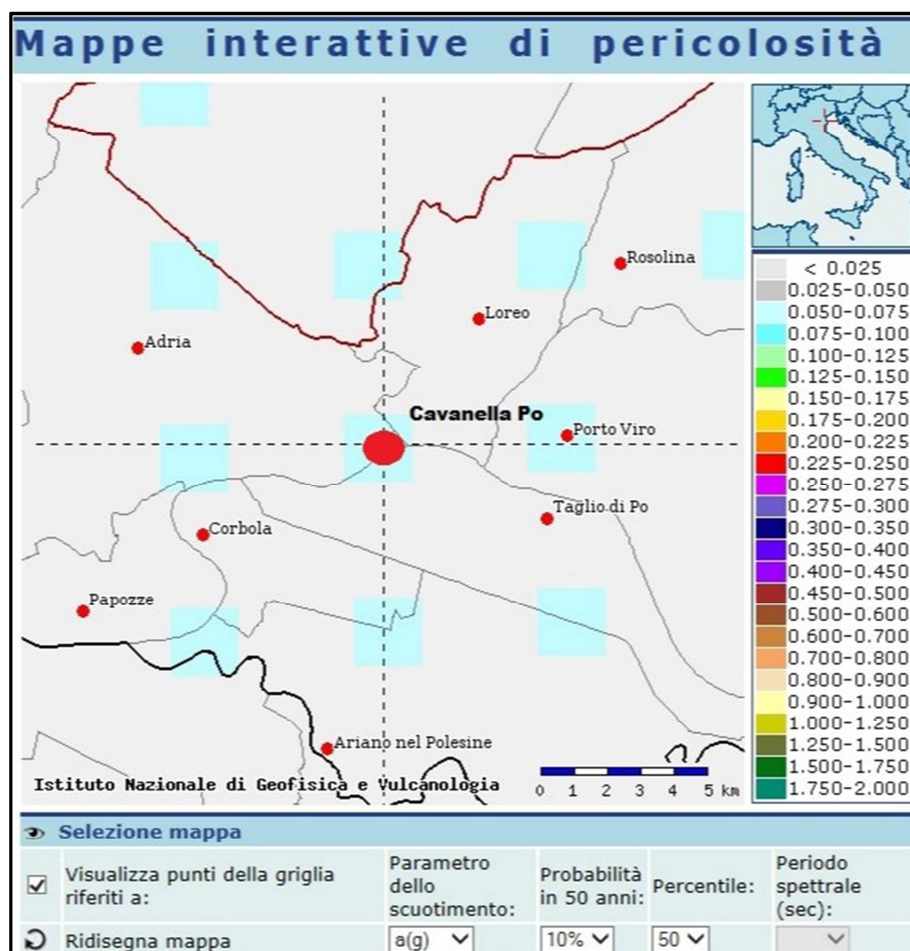


Fig. 31 - Mappa della pericolosità sismica dell'area – I quadrati indicano il nodo con espressi i valori di accelerazione (Fonte – Mappe interattive dell'Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia - <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>)

I parametri per la valutazione dell'azione sismica in ambito locale, in funzione del singolo intervento sul territorio, sono ricavati, in ogni caso, dalle procedure dettate dalla normativa statale vigente ed, in particolare, dal D.M. 17/01/2018 "Norme tecniche per le costruzioni" e dalla Circolare Ministero Infrastrutture e Trasporti 21/01/2019 n. 7 "Istruzioni per l'applicazione dell' "Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17 gennaio 2018.

Trattandosi in questo caso di un argine fluviale, si è considerata una classe d'uso III e si è fatto riferimento alle grandi opere. Ne consegue un coeff. d'uso $C_u = 1.5$, con vita nominale $V_n = 100$ anni e un tempo di ritorno T_r di 1424 anni per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

I parametri sismici a cui fare riferimento, sono riportati nella tab. che segue.

Stato Limite	TR [anni]	ag [g]	Fo	Tc* [s]
SLO	90	0.037	2.535	0.289
SLD	151	0.044	2.564	0.318
SLV	1424	0.076	2.860	0.393
SLC	2475	0.085	2.913	0.418

Vita di riferimento V_r per l'azione sismica = 150

Per la caratterizzazione sismica del sito, è stata effettuata un'indagine SCTPU 04, dalla quale risulta un suolo tipo D con un valore di $V_{s30} = 162$ m/s.

Ne consegue la seguente tabella sintetica classificativa:

CLASSIFICAZIONE DEL SITO NTC 2018

Data: Giugno 2012

Località: Cavanella Po (RO)

Metodo di indagine: SCPTU (misura V_s)

Strumentazione utilizzata: Cono sismico Techno Penta

Metodo di energizzazione: massa battente

Geometria sfondimento: nessuna

Coordinate UTM WGS84

Latitudine	Longitudine
46.03	12.16

RISPOSTA SISMICA LOCALE
(si vedano le tabelle sottostanti per ricavare i valori dei coeff. C_c e dei coeff. amplificazione D)

Categorie di suolo di fondazione:

	S_k	C_e	$S \cdot S_k \cdot S_r$
A <small>Forme rocciose effluviali o terreni molto rigidi caratterizzati da valori delle onde di taglio superiori a 800 m/s, essenzialmente comprendenti in superficie di caratteristiche meccaniche più scadenti, con spessore massimo pari a 3 m.</small>	1,00	1,00	1,00
B <small>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</small>	1,2	1,33	1,20
C <small>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</small>	1,6	1,43	1,50
D <small>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</small>	1,8	1,89	1,80
E <small>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</small>	1,8	1,87	1,60

I parametri a_{lg} , F_3 e T_c vengono forniti dalla normativa

Categorie Topografiche:

	S_t	
T1 Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $\leq 15^\circ$	1	
T2 Pendii con inclinazione media $\geq 15^\circ$	1,2	valore alla sommità del pendio
T3 Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media 15° e $\leq 30^\circ$	1,2	valore della cresta del rilievo
T4 Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $\geq 30^\circ$	1,4	valore della cresta del rilievo

Le sovraespresse categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

Nonché gli spettri di risposta elastici riportati in Fig. 23.

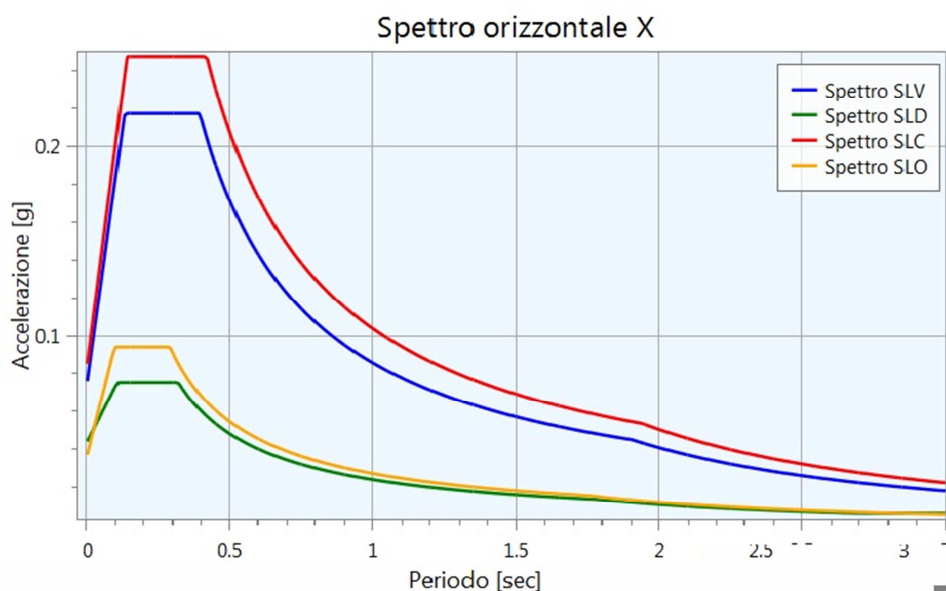


Fig. 32 – Spettri di risposta elastici orizzontali

Per la Località di Cavanella Po, è stata inoltre effettuata l'analisi di disaggregazione della pericolosità sismica, che consente di determinare il contributo di varie sorgenti sismo-genetiche alla pericolosità sismica del sito in esame. Per questo tale analisi viene condotta in termini di magnitudo (M) e distanza (R).

Come si può osservare dal grafico e dalla tabella riportati sotto, il contributo maggiore alla pericolosità sismica dell'area, che per altro non si trova in zona sismogenetica, è da attribuirsi a terremoti con ipocentro ad almeno 40 km di distanza e con magnitudo attesa tra 4.5 e 5.5.

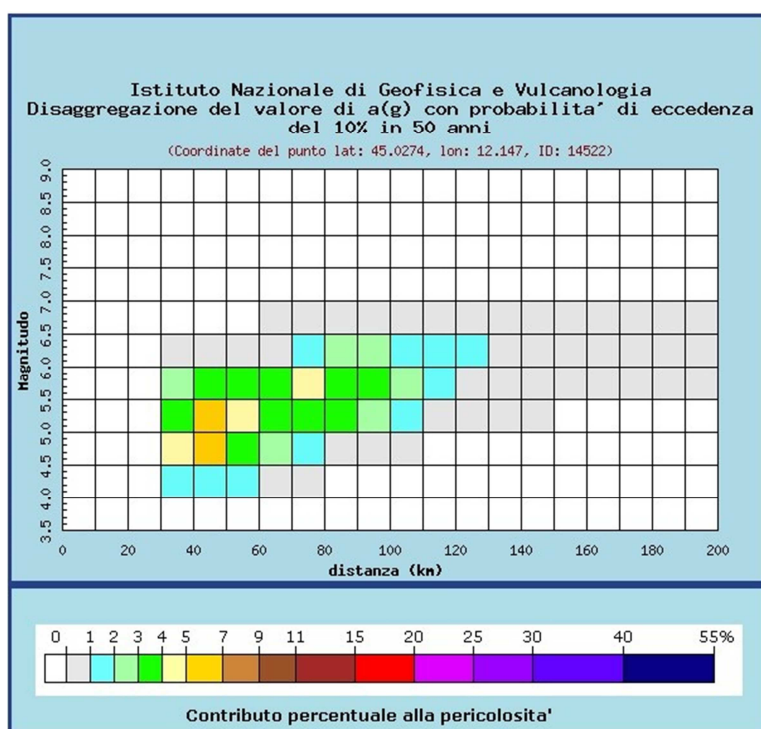


Fig. 33 - Analisi di disaggregazione del sito in esame (SLV)

Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilit� di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 45.0274, lon: 12.147, ID: 14522)										
	Magnitudo										
	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0
0-10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	1.670	4.130	3.310	2.110	0.289	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	1.940	5.550	5.220	3.830	0.568	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50-60	0.000	1.050	3.740	4.230	3.580	0.579	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60-70	0.000	0.389	2.230	3.110	3.010	0.584	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000
70-80	0.000	0.057	1.860	3.840	4.170	1.860	0.244	0.000	0.000	0.000	0.000
80-90	0.000	0.000	0.791	3.170	3.990	2.270	0.361	0.000	0.000	0.000	0.000
90-100	0.000	0.000	0.209	2.090	3.270	2.190	0.378	0.000	0.000	0.000	0.000
100-110	0.000	0.000	0.022	1.180	2.480	1.940	0.355	0.000	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.499	1.640	1.530	0.291	0.000	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.166	0.985	1.220	0.239	0.000	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.046	0.582	0.949	0.193	0.000	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.008	0.392	0.807	0.172	0.000	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.253	0.675	0.153	0.000	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.122	0.448	0.107	0.000	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.298	0.077	0.000	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.138	0.037	0.000	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.040	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000

Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
5.460	73.300	1.740

Fig. 34 - Tab. relativa alla disaggregazione (SLV)

Il valore di Magnitudo determinato   quindi utilizzato ai fini delle verifiche a liquefazione di cui al paragrafo che segue.

10.1 Verifica a liquefazione

Per il sito in esame   stata condotta la verifica alla liquefazione, come previsto dalle NTC 2018 (§ 7.11.3.4.2), nel livello sabbioso compreso tra 6.0 m da p.c. fino ad una profondit  di 20 m, essendo il valore di a_g atteso in superficie maggiore di 0.1g.

La verifica   stata eseguita utilizzando le velocit  V_s ottenute dalla prova con cono sismico e supponendo la presenza di una percentuale di limo e/o argilla compresa tra il 5% e il 35%, nonch  una magnitudo di riferimento $M = 4.5$ (non trattandosi di zona sismogenetica).

Viene quindi calcolato il coefficiente di sicurezza alla liquefazione (previa una "normalizzazione" dei dati ottenuti per riportarli alla magnitudo di riferimento) come segue:

$$F_s = CRR_{7.5} / CSR_{7.5}$$

dove:

$CRR_{7.5}$ = rapporto di resistenza ciclica (per $M=7.5$)

$CSR_{7.5}$ = rapporto di tensione ciclica (per $M=7.5$)

I risultati ottenuti (riportati in Fig. 34) indicano per questo strato, fino a 16 m di profondità da p.c., un reale rischio di liquefazione.

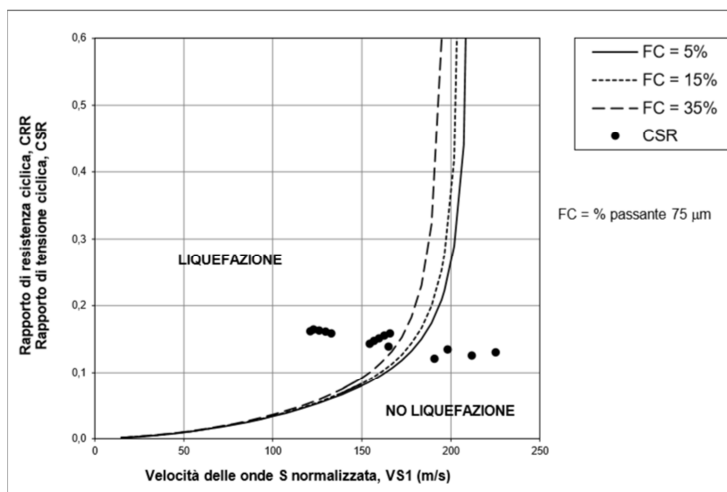


Fig. 35: Risultati della verifica a liquefazione nello strato sabbioso a differenti profondità secondo l'approccio semplificato.

Si fa notare che gli elevati valori di CSR ottenuti sono principalmente dovuti al fatto che si tratta di un'opera che, pur ricadente in area con Classe sismica IV, è stata considerata in questa fase appartenente alla classe d'uso III (grandi opere).

In base a quanto prescritto dalla normativa vigente, si è proceduto ad effettuare uno Studio di Risposta Sismica Locale riportato, quale allegato, alla Relazione Geotecnica alla quale si rimanda per i dettagli.

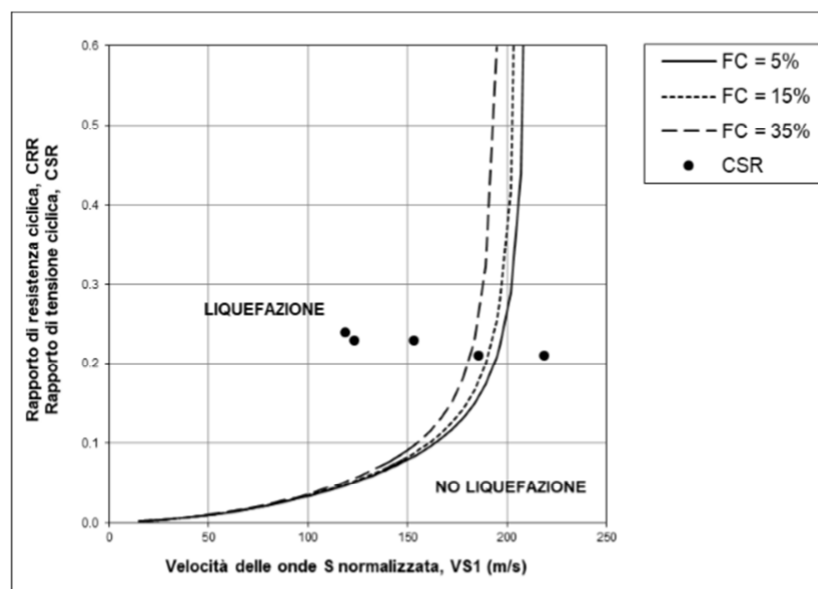


Fig. 36: Risultati della verifica a liquefazione nello strato sabbioso a differenti profondità secondo lo studio di RSL.

Lo studio di Riposta simica locale, effettuato in condizioni più serve attribuendo all'arginatura maestra del Po di Venezia la classe d'uso IV (opera strategica), conferma i risultati emersi nelle verifiche di liquefazione condotte secondo l'approccio semplificato.

11. Modellazione Geotecnica finalizzata alle verifiche di filtrazione

Permeabilità dei terreni

Al fine di effettuare le previste verifiche di filtrazione secondo modello numerico, dopo aver preliminarmente ricostruito lo schema di modello idrogeologico del sito, è necessario assegnare ai vari i valori dei coefficienti di permeabilità risultanti dalle prove in sito e di laboratorio; in particolare il coefficiente di permeabilità è stato determinato mediante l'esecuzione di prove Lefranc (in foro di sondaggio) principalmente in strati sciolti, prove di dissipazione eseguite in strati saturi coesivi nel corso delle prove penetrometriche del tipo SCPTU-CPTU, infine prove di laboratorio in cella triassiale su campioni indisturbati.

Alcune prove di dissipazione non sono andate a buon fine principalmente per il verificarsi di sovrappressioni anomale all'inizio della prova e pertanto non sono state inserite nello schema sotto riportato che raccoglie i risultati delle diverse tipologie di prove effettuate nelle diverse campagne d'indagine.

Avendo certi requisiti granulometrici, sono utilizzabili anche i risultati delle analisi granulometriche complete (per setacciatura ed aerometria al fine di determinare la permeabilità degli strati sabbiosi con ridotta percentuale di componente fine.

Nella seguente tabella sono riassunti i valori di permeabilità determinati.

<i>prova o sondaggio</i>	<i>Tipo di prova</i>	<i>strato</i>	<i>Quota [m l.m.m.]</i>	<i>descrizione</i>	<i>K [m/sec]</i>
CPTU1-D1	Dissip. 1	lente argillosa compreso in B2	-7,20	argilla limosa	$5,99 \cdot 10^{-8}$
CPTU2-D1	Dissip. 1	B1	2,00	Limo argilloso	$6,04 \cdot 10^{-9}$
S1-B	Permeab. In cella triassiale flusso ascend.	B1>>B2	-4.30/-4.90	limo argilloso deb. sabbioso	$2,26 \cdot 10^{-9}$
S1-1	Prova Lefranc	B2	-4,70/-5,20	Sabbia con limo	$1,51 \cdot 10^{-5}$
S1-C	Permeab. In cella triassiale flusso ascend.	B1	-7.20/-7.80	Limo e argilla	$1,43 \cdot 10^{-9}$
S1-2	Prova Lefranc	B2	-12,70/-13,20	Sabbia deb limosa	$1,80 \cdot 10^{-5}$
S1-3	Prova Lefranc	B2	-17,20/-17,70	Sabbia deb limosa	$1,34 \cdot 10^{-5}$
S1-R4	Analisi granul. Formula Hazen	B2	-17,20/-17,70	Sabbia medio-fine deb. limosa	$1,00 \cdot 10^{-4}$
S2-A	Permeab. In cella triassiale flusso ascend.	B1	-0,70/-1,20	Limo argilloso deb. sabbioso	$4,01 \cdot 10^{-9}$
S2-1	Prova Lefranc	B2	-3,70/-4,20	Sabbia limosa	$1,65 \cdot 10^{-5}$
S2-2	Prova Lefranc	B2	-6,20/-6,70	Sabbia limosa	$4,55 \cdot 10^{-5}$
S2-3	Prova Lefranc	B2	-10,70/-11,20	Sabbia limosa	$2,71 \cdot 10^{-5}$
S2-R6	Analisi granul.	B2	-11,20/-11,70	Sabbia medio-	$3,60 \cdot 10^{-5}$

	<i>Formula Hazen</i>			<i>fine limosa</i>	
<i>S2-4</i>	<i>Prova Lefranc</i>	<i>B2</i>	<i>-19,70/-11,20</i>	<i>Sabbia limosa</i>	<i>1,22*10⁻⁵</i>
<i>S3-B</i>	<i>Permeab. In cella triassiale flusso ascend.</i>	<i>B1</i>	<i>-3,70/-4,30</i>	<i>Limo e argilla sabbioso</i>	<i>6,25*10⁻⁹</i>
<i>S3-1</i>	<i>Prova Lefranc</i>	<i>B2</i>	<i>-3,70/-4,30</i>	<i>Limo sabbioso</i>	<i>6,60*10⁻⁶</i>
<i>S3-2</i>	<i>Prova Lefranc</i>	<i>B2</i>	<i>-12,70/-13,70</i>	<i>Sabbia media</i>	<i>2,11*10⁻⁵</i>
<i>S3-3</i>	<i>Prova Lefranc</i>	<i>B2</i>	<i>-18,70/-19,20</i>	<i>Sabbia media</i>	<i>3,93*10⁻⁵</i>
<i>S3-R3</i>	<i>Analisi granul. Formula Hazen</i>	<i>B2</i>	<i>-18,70/-19,20</i>	<i>Sabbia fine limosa</i>	<i>3,60*10⁻⁵</i>
<i>S4-1</i>	<i>Prova Lefranc</i>	<i>B2</i>	<i>-6,00/-6,50</i>	<i>Sabbia deb. limosa</i>	<i>1,74*10⁻⁴</i>
<i>S4-R2</i>	<i>Analisi granul. Formula Hazen</i>	<i>B2</i>	<i>-6,00/-6,50</i>	<i>Sabbia fine deb. limosa</i>	<i>5,60*10⁻⁵</i>
<i>S4-2</i>	<i>Prova Lefranc</i>	<i>B2</i>	<i>-9,00/-9,50</i>	<i>Sabbia deb. limosa</i>	<i>1,02*10⁻⁴</i>
<i>S4-3</i>	<i>Prova Lefranc</i>	<i>B2</i>	<i>-12,00/-12,50</i>	<i>Sabbia deb. limosa</i>	<i>3,05*10⁻⁵</i>
<i>S4-R4</i>	<i>Analisi granul. Formula Hazen</i>	<i>B2</i>	<i>-12,00/-12,50</i>	<i>Sabbia fine deb. limosa</i>	<i>6,40*10⁻⁵</i>
<i>S4-4</i>	<i>Prova Lefranc</i>	<i>B2</i>	<i>-15,00/-15,50</i>	<i>Sabbia medio-grossa deb. limosa</i>	<i>4,90*10⁻⁵</i>
<i>S4-R6</i>	<i>Permeab. In cella triassiale flusso ascend.</i>	<i>B3</i>	<i>-22,60/-22,90</i>	<i>Limo e argilla</i>	<i>3,58*10⁻¹⁰</i>
<i>S5-1(A)</i>	<i>Prova Lefranc</i>	<i>B2</i>	<i>-15,50/-16,00</i>	<i>Sabbia. limosa</i>	<i>2,32*10⁻⁵</i>
<i>S5-2(B)</i>	<i>Prova Lefranc</i>	<i>B3</i>	<i>-21,50/-22,00</i>	<i>Limo arg. organico</i>	<i>7,97*10⁻⁷</i>
<i>SA - Parmageo</i>	<i>Prova Lefranc</i>	<i>B1</i>	<i>-0,80/-1,30</i>	<i>Limo argilloso</i>	<i>9,55*10⁻⁷</i>
<i>SC CR 2G</i>	<i>Analisi granul. Formula Hazen</i>	<i>B2</i>	<i>-8,40/-8,80</i>	<i>Sabbia medio-grossa</i>	<i>1,00*10⁻⁴</i>

Fig. 37: Quadro di raffronto dei risultati delle diverse tipologia di prove di permeabilità effettuate – evidenziate in giallo le prove relative allo strato sabbioso B2.

Come si può notare i valori più frequenti del coefficiente di permeabilità del sedimento costituente lo strato B2 sono dell'ordine di $1 \cdot 10^{-4}$ / $1 \cdot 10^{-5}$ m/s; in particolare i valori maggiori si registrano in corrispondenza dei sondaggi S2 ed S4 mentre i valori minori ($1 \cdot 10^{-5}$ ma anche $1 \cdot 10^{-6}$ m/s) in corrispondenza dei sondaggi S1 ed S3.

Di seguito si riporta una tabella di sintesi delle caratteristiche geotecniche e idrauliche utilizzate dal Professionista incaricato anche per la costruzione del modello di filtrazione lungo la sezione arginale di verifica. I valori utilizzati sono dedotti sia dalle prove Lefranc condotte nei fori di sondaggio, sia dalle permeabilità misurate in cella triassiale.

n. Strato	Descrizione	K (m/s)	n (-)
Strato A1 (1)	Sabbia limosa (argine)	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,6
Strato A2 (2)	Limo argilloso (argine)	$2,3 \cdot 10^{-8}$	0,8-0,7
Strato B1 (3)	Limo argilloso	$2,3 \cdot 10^{-8}$	0,8
Strato B2 (4)	Sabbia	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0,6-0,7
Strato B3 (5)	Argilla limosa	$1,5 \cdot 10^{-9}$	0,8-0,9

Fig. 38: Tabella di sintesi delle caratteristiche idrauliche e geotecniche delle terre utilizzato nelle verifiche di filtrazione (tra parentesi il numero identificativo dello strato utilizzato nella relazione geotecnica).

12. Conclusioni

Il tratto dell'argine sinistro del Po di Venezia ubicato immediatamente a monte l'abitato di Cavanella Po nel Comune di Adria (RO), durante le piene del fiume è oggetto di particolare attenzione da parte del personale dell'A.I.PO preposto alle attività di sorveglianza a causa dell'elevata esposizione ai fenomeni di filtrazione arginali e sub-arginali e conseguenti dissesti interessanti sia il terrapieno che l'antistante area a campagna, il tutto accompagnato dall'attivazione di fontanazzi particolarmente pericolosi.

In particolare tali problematiche interessano direttamente una fascia di circa 120-140 m di larghezza, a ridosso all'argine sinistro del Po di Venezia da stante 520 a 524, comprese le abitazioni, la viabilità locale, la rete fognaria; il peggioramento della criticità evidenziato nel susseguirsi delle recenti piene comporta sempre maggiori interventi di messa in sicurezza e ripristino dei danni causati all'arginatura con notevole incremento dei relativi costi.

Il presente Progetto intende porre rimedio alle suddette criticità tramite la realizzazione di un diaframma costituito da una miscela autoindurente acqua-cemento-bentonite che con la maturazione assumerà carattere plastico e consistenza (resistenza a compressione con espansione laterale libera), almeno superiore ai 0,5 Kg/cm², con coefficiente di permeabilità atteso di $1 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Il diaframma dovrà essere approfondito sino a raggiungere una quota idonea a ridurre i fenomeni di filtrazione del sistema argine-terre di fondazione, qui alimentati dal fiume, a valori non critici.

Le indagini effettuate hanno permesso di evidenziare come il terrapieno arginale sia costituito nella sua parte più elevata e lungo il profilo più esterno della sagoma arginale (sia a fiume che a campagna) da litologie del tipo "sabbie e dei limi sabbiosi" (A1) la cui origine è da attribuire agli interventi di rialzo e ringrosso arginale effettuati nel secolo scorso con materiale proveniente da cave in loco o di dragaggio dall'alveo del fiume.

Tale materiale di riporto rende questi settori dell'arginatura permeabili ai fenomeni di filtrazione per gli eventi di piena con quote idrometriche superiori a circa 4 m sul l.m.m., che così interessano la parte più alta della scarpata arginale a fiume.

Altro principale elemento di criticità sotto il profilo idrogeologico è rappresentato dalle terre in posto costituenti il banco di sabbie da limose a debolmente limose (acquifero corrispondente allo strato B2) posto nei terreni di fondazione arginale.

L'acquifero responsabile delle criticità idrauliche presenta valori del coefficiente di permeabilità variabili da massimi dell'ordine di $1 \cdot 10^{-4}$ m/s in corrispondenza dei sondaggi S2 ed S4 a valori minimi dell'ordine di $1 \cdot 10^{-5}$ / $1 \cdot 10^{-6}$ m/s in corrispondenza dei sondaggi S1 ed S3.

Il banco sabbioso (B2), di notevole estensione e spessore, costituisce via preferenziale di filtrazione delle acque di falda alimentate dall'adiacente fiume Po di Venezia sia in condizioni

idrometriche ordinarie che durante gli eventi di piena; il fiume rappresenta quindi un limite a potenziale imposto che condiziona l'acquifero in ogni situazione idrometrica.

Le quote piezometriche misurate hanno permesso di determinare valori superiori al p.c. stesso, anche in condizioni di magra; questa circostanza permette di attribuire carattere artesiano all'acquifero studiato.

Questa situazione idrogeologica è naturalmente favorita dalle condizioni topografiche dell'area deltizia, caratterizzata da quote poste al di sotto del l.m.m..

Al di sotto dell'acquifero sabbioso, a partire da quota - 19,7/-21,7 m s.l.m.m. è presente un livello poco permeabile argilloso-limoso, localmente sabbioso (strato B3), continuo ma di spessore variabile da un minimo di 1,20/1,60 m ad un massimo di 6,5 m; in tale strato si prevede di "incastrare" il diaframma plastico in progetto.

La profondità del diaframma è pertanto quantificata in m 29 a partire dalla sommità del petto arginale a fiume (quota 5,00 m s.l.m.m.) per giungere in definitiva a quota - 24 m s.l.m.m..

L'opera in progetto permetterà una lunghezza d'incastro variabile del diaframma stesso nello strato profondo poco permeabile (B2), questo a maggior garanzia dell'efficacia dell'intervento volta a minimizzare i carichi idraulici, quindi i gradienti idraulici, lungo l'interfaccia tra gli strati B1/B2 che si sviluppa a poca profondità sia alla base dell'arginatura che a campagna.

A conferma della bontà progettuale sono state effettuate le opportune verifiche di filtrazione con modello numerico agli elementi finiti per sezioni 2D (vedi Relazione Geotecnica allegata al progetto) in condizioni di moto transitorio simulando l'evento di piena occorso nell'anno 2000 normalizzato al valore della Massima Piena di Progetto stabilita dall'ADBPO (quota pari a 6,95 m s.l.m.m.) .

Le verifiche hanno confermato l'abbattimento dei gradienti idraulici sia all'interno del corpo arginale che nelle terre di fondazione a valori inferiori al valore critico, di garanzia nei confronti del pericolo di sifonamento.

L'estesa del diaframma, stabilita in questo primo stralcio pari a 500 m, è di fatto condizionata dalle risorse economiche al momento disponibili; certamente la realizzazione di questo primo tratto di diaframma andrà a coprire la situazione più critica sotto il profilo idrogeologico, in particolare la zona in cui lo strato sabbioso B2 presenta i valori più elevati del coefficiente di permeabilità. Il secondo stralcio dovrà prevedere il prolungamento del diaframma prioritariamente verso monte.

Data la limitata estesa del diaframma (500 m) e l'assetto litostratigrafico che non permette immorsature laterali, le aree marginali ad diaframma potranno risentire parzialmente del beneficio idraulico conseguente alla realizzazione dell'opera per possibili fenomeni di

aggiramento laterale da parte del flusso di filtrazione; comunque, come già detto, in tali settori i valori del coefficiente di permeabilità delle sabbie dello strato B2 sono inferiori (sino a 100 volte) rispetto alle zone centrali del fronte d'intervento.

E' comunque messa al riparo dai dissesti registrati nella zona centrale al diaframma a livello del piano campagna: la realizzazione dell'opera, allungando i percorsi di filtrazione preferenziali nello strato B2 (per vie laterali) necessari a raggiungere la zona critica centrale, dovrebbe qui determinare un ritardo (ed uno smorzamento) nella risposta idraulica dell'acquifero da evitare riattivazioni di fontanazzi e/o nuovi inneschi.

Anche la parte superiore dell'arginatura (per quote superiori a 4 m s.l.m.m.) è costituita da terre di riporto di media permeabilità ed è esposta, nel corso delle piene, a problematiche di filtrazione e di saturazione del piedibanca: sulla scorta della tempistica ricavabile dal confronto dei dati idrometrici e la comparsa della criticità sulla banca arginale si può stimare, seppur in modo approssimativo, un valore locale del coefficiente di permeabilità dell'ordine di 10^{-4} m/s.

Per non vanificare l'efficacia dell'intervento è quindi indispensabile anche una adeguata impermeabilizzazione della scarpata arginale a fiume, sino alla quota di Massima Piena di Progetto.

L'impermeabilizzazione della scarpata arginale nel tratto individuato permette di chiudere la filtrazione attraverso tali terre di riporto arginali nell'estremo di valle dell'impermeabilizzazione ma non in quello di monte.

Non si può escludere il ripresentarsi di problematiche di filtrazione e saturazione lungo le banche arginali più basse per aggiramento del diaframma lungo il lato di monte dell'intervento attraverso il settore più elevato del corpo arginale.

Non potendo escludere la riattivazione delle criticità nelle aree marginali si rimanda ad un secondo stralcio la prosecuzione della diaframmatrice e la risoluzione definitiva delle problematiche in tali zone.

Lo studio di Riposta sismica locale conferma i risultati emersi nelle verifiche di liquefazione condotte in prima battuta secondo l'approccio semplificato; il rischio di liquefazione per lo strato sabbioso B2 è confermato in relazione alla notevole accelerazione sismica conseguente all'aver attribuito all'argine maestro la classe d'uso IV (opera strategica).

La diaframmatrice in progetto, costituita in fase di scavo da una miscela inizialmente fluida di acqua-cemento-bentonite, a maturazione, dopo l'indurimento, raggiungerà una consistenza plastica, coesiva, dotata di buona deformabilità e quindi in grado di subire spostamenti senza fessurarsi.

Tale opera sarà in grado di sopportare anche l'azione dinamica esercitata dal sisma di progetto; pertanto l'inserimento del diaframma nel banco sabbioso non può che migliorare seppur

localmente, la risposta all'accelerazione sismica di progetto del sistema argine-diaframma-terre di fondazione.

Un ultimo aspetto riguarda il chimismo delle acque di falda e di fiume che verranno a contatto con l'opera al fine di caratterizzarne l'eventuale aggressività nei confronti della miscela cemento-bentonite con cui sarà realizzato il diaframma.

Le analisi dei campionamenti d'acqua grezza prelevati nel corso della campagna di misure per verificare la risalita del cuneo salino lungo i diversi rami del Delta (luglio 2017 – contributo di Arpa, Arpa Veneto, CNR ISMAR di Venezia, Consorzio di Bonifica Delta del Po e Genio Civile della Regione del Veneto) mostrano che il valore massimo di intrusione, lungo il ramo del Po di Pila, è dell'ordine di 12-15 chilometri dalla foce, in condizioni di alta marea.

Considerato che il diaframma è posto a 33 Km circa dalla foce del Po di Pila si esclude di poter attribuire alle acque fluviali carattere salmastro che potrebbe avere, a lungo termine, influenze sul chimismo delle acque di falda con conseguenti effetti negativi sulla componente cementizia della miscela impiegata.



Fig. 39: Risalita del cuneo salino lungo i rami deltizi – Campagna di misure del Luglio 2017 (Arpa) – la zona d'intervento è posta diversi chilometri più a monte.

I risultati delle analisi effettuate sui campioni dell'acqua di falda rilevano bassi contenuti in cloruri, solfati, anidride carbonica, magnesio ed azoto ammoniacale, infine un valore di PH pari a 7,20,

elementi questi che permettono di scongiurare un' azione chimica aggressiva della falda nei confronti della componente cementizia.

Il Progettista
Dott. Geol. Pierpaolo Erbacci



Allegati:

- 1) Fascicolo indagini Parmageo s.r.l.
- 2) Fascicolo indagini GeoExploration s.r.l.