Finanziato dall'Unione europea NextGenerationEU

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

Italiadomani PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA

Regione Lombardia

PROVINCIA DI BERGAMO

COMUNE DI BERGAMO

Finanziato dall'Unione Europea - Next Generation EU - Trasporto rapido di massa - Misura M2C2 - 4.2 del PNRR

SOGGETTO ATTUATORE DI PRIMO LIVELLO

COMUNE DI BERGAMO

COMUNE DI BERGAMO

Piazza Giacomo Matteotti, 27 - 24122 Bergamo (BG)

SOGGETTO ATTUATORE DI SECONDO LIVELLO

ATB Mobilità S.p.A.

Via Gleno, 13 - 24125 Bergamo (BG)

REALIZZAZIONE DI UN SISTEMA E-BRT TRA I COMUNI DI BERGAMO, DALMINE E VERDELLINO

PROGETTO DEFINITIVO

CUP: H11B21006730001 - CIG: 9562909A25

APPALTATORE

Vitali S.p.A.

via Lombardia 2/A

20068 -Peschiera Borromeo (MI)

your construction partner

PROGETTISTI

Capogruppo/mandataria

Artelia Italia S.p.A. Piazza G. Marconi 25

00144 - Roma (RM)

Mandanti:

Artelia Sas
Rue Simone Veil 16
93400 Saint-Ouen-sur-Seine
(France)

ErreGi
Piazza del Viminale 14 00184 Roma (RM)

Studio Carrara
Via T. Tasso 89
24121 - Bergamo (BG)

Pide
Via Fosse 13
36063 Marostica (VI)

Pini
Via Cavour 2
22074 - Lomazzo (CO)

IL PROGETTISTA E RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE	IL DIRETTORE TECNICO	IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO
Ing. Marco Gonella		Ing. C. Rita Donato

REV	DATA	TIPO DI EMISSIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO/AUTORIZZATO
A	Novembre 2023	PRIMA EMISSIONE	D. Grandis	G. Lui	G. Lui

04_STUDI ED INDAGINI
4.1_STUDIO GEOLOGICO
RELAZIONE GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA ED IDROGEOLOGICA

IDENTIFICAZIONE ELABORATO

SCALA:

Commessa	Lotto	Fas	Tratto	Tipo	Disciplina / WBS 1-2	Progressivo doc	Revisione
B23D	00	D	00	RH	GEBRC0	008	A

DATA: NOVEMBRE 2023

Sommario

1 INTRODUZIONE 5

1.1 DESCRIZIONE DEL PROGETTO 5

2 DATI DISPONIBILI 7

3 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE DEL TRACCIATO 8

4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE 9

5 INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA DI PROGETTO 10

6 GEOMORFOLOGIA ED IDROGRAFIA DELL'AREA 12

6.1 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO 12
6.2 INQUADRAMENTO IDROGRAFICO 12

7 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO 15

7.1 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI PROGETTO 15
7.2 PROVE DI PERMEABILITÀ IN SITO 17

8 DISAMINA DEI VINCOLI ESISTENTI 19

8.1 VINCOLO IDROGEOLOGICO 19
8.2 PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (P.A.I.) 20
8.3 VINCOLI DI POLIZIA IDRAULICA 21
8.4 FATTIBILITÀ GEOLOGICA 29

9 SISMICITÀ 41

9.1 CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL TERRITORIO 41
9.2 AZIONE SISMICA SI BASE 43
9.2.1 Approccio normativo 44
9.2.2 Tempo di ritorno 44
9.2.3 Vita di riferimento e classe d'uso 45
9.3 RISPOSTA SISMICA LOCALE 45
9.3.1 Definizione della categoria topografica 54
9.3.2 Valori dei parametri dell'azione sismica di base 54
9.4 EFFETTI SISMICI LOCALI 59
9.5 ANALISI SISMICA DI II LIVELLO 61
9.6 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DEI FENOMENI DI LIQUEFAZIONE E CEDIMENTO 65

Indice delle Figure

FIGURA 1-1 – AEROFOTOGRAMMETRIA CON UBICAZIONE DEL TRACCIATO 6
FIGURA 3-1 – AEROFOTOGRAMMETRIA CON UBICAZIONE DEL TRACCIATO 8
FIGURA 4-1 – SCEMA TETTONICO DEI FOGLI 097 "VIMERCATE" E 098 "BERGAMO" DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA (IN ARANCIO L'UBICAZIONE INDICATIVA DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO) 9
FIGURA 5-1 – ESTRATTO DEI FOGLI 097 "VIMERCATE" E 098 "BERGAMO" DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA (IN ROSSO LA RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DEL TRACCIATO DELLA NUOVA LINEA E-BRT) 10
FIGURA 6-1 – BACINO DEL FIUME ADDA ESTRATTO DA "LINEE GENERALI DI ASSETTO IDROGEOLOGICO E QUADRO DEGLI INTERVENTI BACINO DELL'ADDA SOTTOLACUALE"; IN ROSSO LA POSIZIONE INDICATIVA DELL'AREA DI STUDIO 13
FIGURA 6-2 – IMMAGINE RAFFIGURANTE IL TRACCIATO DELLA NUOVA LINEA E-BRT (LINEA VERDE) ED IL RETICOLO IDROGRAFICO MINORE (RIM); COME SI VEDE DALL'IMMAGINE L'UNICA INTERFERENZA È CON LA ROGGIA COLLEONESCA (IN ROSSO) ED IL RELATIVO RAMO DI OSIO SOTTO (IN ARANCIO) 14
FIGURA 7-1 – SEZIONE SEMPLIFICATIVA DELL'ASSETTO IDROSTRATIGRAFICO DELLA PIANURA PADANA, IN ROSSO È INDICATA LA ZONA DI RICARICA ALLA BASE DELLA CATENA ALPINA, OVE SI SITUA L'AREA IN PROGETTO 15
FIGURA 8-1 – IMMAGINE ESTRATTA GEOPORTALE DELLA LOMBARDIA; IN BLU LE AREE A RISCHIO DI ALLUVIONE, IN VERDE IL TRACCIATO DELLA NUOVA LINEA E-BRT 20
FIGURA 8-2 – IMMAGINE ESTRATTA DAL DOCUMENTO GA02.A DEL PFTE; CARTA DEI VINCOLI DI NATURA GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA, IDRAULICA (SETTORE BERGAMO STAZIONE-BERGAMO SAN TOMMASO) 22
FIGURA 8-3 – IMMAGINE ESTRATTA DAL DOCUMENTO GA02.B DEL PFTE; CARTA DEI VINCOLI DI NATURA GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA, IDRAULICA (SETTORE BERGAMO SAN TOMMASO-LALLIO 10/11) 23
FIGURA 8-4 – IMMAGINE ESTRATTA DAL DOCUMENTO GA02.C DEL PFTE; CARTA DEI VINCOLI DI NATURA GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA, IDRAULICA (SETTORE LALLIO 10/11-DALMINE CENTRO COMMERCIALE) 24
FIGURA 8-5 – IMMAGINI ESTRATTE DAL DOCUMENTO GA02.D/E DEL PFTE; CARTA DEI VINCOLI DI NATURA GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA, IDRAULICA (SETTORE DALMINE CENTRO COMMERCIALE- OSIO SIAD) 26
FIGURA 8-6 – IMMAGINI ESTRATTE DAL DOCUMENTO GA02.E DEL PFTE; CARTA DEI VINCOLI DI NATURA GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA, IDRAULICA (SETTORE OSIO SIAD-OSIO ROTATORIA SULLA SP525 CON VIA G. MATTEOTTI) 27
FIGURA 8-7 – IMMAGINI ESTRATTE DAL DOCUMENTO GA02.F DEL PFTE; CARTA DEI VINCOLI DI NATURA GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA, IDRAULICA (SETTORE OSIO SOTTO ROTATORIA SULLA SP525 CON VIA G. MATTEOTTI-VIA VERDELLINO) 28
FIGURA 8-8 – IMMAGINI ESTRATTE DAL DOCUMENTO GA02.F DEL PFTE; CARTA DEI VINCOLI DI NATURA GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA, IDRAULICA (SETTORE VERDELLINO VIA VERDELLINO- CAPOLINEA) 29
FIGURA 8-9 – IMMAGINE ESTRATTA DAL DOCUMENTO SG14ABIS CARTA DELLA FATTIBILITÀ GEOLOGICA DELLE AZIONI DI PIANO (PGT BERGAMO 2011); IN ROSSO IL TRACCIATO DELLA NUOVA LINEA E-BRT 31
FIGURA 8-10 – IMMAGINE ESTRATTA DAL DOCUMENTO TAV.4B CARTA DELLA FATTIBILITÀ GEOLOGICA DELLE AZIONI DI PIANO (PGT LALLIO); IN ROSSO IL TRACCIATO DELLA NUOVA LINEA E-BRT 33
FIGURA 8-11 – IMMAGINE ESTRATTA DAL DOCUMENTO TAV.6E CARTA DELLA FATTIBILITÀ GEOLOGICA DELLE AZIONI DI PIANO (PGT DALMINE 2019); IN ROSSO IL TRACCIATO DELLA NUOVA LINEA E-BRT 34
FIGURA 8-12 – IMMAGINE ESTRATTA DAL DOCUMENTO TAV.10A CARTA DELLA FATTIBILITÀ GEOLOGICA DELLE AZIONI DI PIANO (PGT OSIO SOPRA 2009); IN ROSSO IL TRACCIATO DELLA NUOVA LINEA E-BRT 36
FIGURA 8-13 – IMMAGINE ESTRATTA DAL DOCUMENTO TAV.5/E CARTA DELLA FATTIBILITÀ GEOLOGICA DELLE AZIONI DI PIANO (PGT OSIO SOTTO 2008); IN ROSSO IL TRACCIATO DELLA NUOVA LINEA E-BRT 38
FIGURA 8-14 – IMMAGINE ESTRATTA DAL DOCUMENTO TAV.06/BIS CARTA DELLA FATTIBILITÀ GEOLOGICA DELLE AZIONI DI PIANO (PGT VERDELLINO 2017); IN ROSSO IL TRACCIATO DELLA NUOVA LINEA E-BRT 39
FIGURA 9-1 – CLASSIFICAZIONE SISMICA AL 31 MARZO 2022. ELLISSE VIOLA: AREA OGGETTO D'INTERVENTO 42
FIGURA 9-2 – CLASSIFICAZIONE SISMICA SECONDO D.G.R. 11 LUGLIO 2014 (FONTE: REGIONE LOMBARDIA). ELLISSE VIOLA: AREA OGGETTO D'INTERVENTO 43
FIGURA 9-3 – SINTESI DELLE CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL GRUPPO OMOGENEO A (INDAGINE DI RIFERIMENTO HVSR7 – BG_042) 48
FIGURA 9-4 – SINTESI DELLE CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL GRUPPO OMOGENEO B (INDAGINE DI RIFERIMENTO HVSR10 – BG_066) 49
FIGURA 9-5 – SINTESI DELLE CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL GRUPPO OMOGENEO C (INDAGINE DI RIFERIMENTO HVSR15 – DA_005) 50
FIGURA 9-6 – SINTESI DELLE CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL GRUPPO OMOGENEO D (INDAGINE DI RIFERIMENTO HVSR20 – DA_028) 51

FIGURA 9-7 – SINTESI DELLE CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL GRUPPO OMOGENEO E (INDAGINE DI RIFERIMENTO HVSR26 – OT_012) 52
FIGURA 9-8 – PARAMETRI SISMICI PRIMO TRATTO 55
FIGURA 9-9 – PARAMETRI SISMICI SECONDO TRATTO..... 56
FIGURA 9-10 – PARAMETRI SISMICI TERZO TRATTO 57
FIGURA 9-11 – PARAMETRI SISMICI QUARTO TRATTO 58
FIGURA 9-12 – DIAGRAMMA DI FLUSSO DEI DATI NECESSARI E DEI PERCORSI DA SEGUIRE NEI TRE LIVELLI DI INDAGINE (DA D.G.R. IX/2616) 59
FIGURA 9-13 – SCHEDA DI VALUTAZIONE DI RIFERIMENTO PER LE LITOLOGIE PREVALENTEMENTE GHIAIOSE (ALLEGATO 5, DELLA D.G.R. IX/2616) 64

1 INTRODUZIONE

L'impresa VITALI S.p.A. **"l'Appaltatore"** ha conferito al Raggruppamento Temporaneo di Progettisti (RTP) **"il "Contraente" o "Progettista"** costituito dalle società ARTELIA Italia S.p.A. (mandataria), ARTELIA SAS, Erregi group Srl, Pini Swiss Srl, Pide Energy e Studio Carrara l'incarico professionale per l'affidamento congiunto della progettazione definitiva ed esecutiva e servizi tecnici di ingegneria per la fase esecutiva (Opzionale) per la realizzazione di un sistema E-BRT tra i comuni di Bergamo, Dalmine e Verdellino. L'affidamento di progettazione ricade nella procedura di appalto integrato indetto da ATB azienda trasporti Bergamo **"La Stazione appaltante".**

Il presente elaborato è stato redatto nell'ambito della redazione del Progetto Definitivo della nuova linea del sistema E-BTR che verrà realizzata a supporto della circolazione tra la città di Bergamo e il comune di Verdellino (BG).

1.1 DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'E-BRT si sviluppa lungo l'asse della Strada Provinciale SP525, la partenza sarà dalla stazione di Verdellino Dalmine, attraversa il comune di Osio Sopra, di Dalmine, il territorio di Lallio, i quartieri di Grumellina e Villaggio Sposi della città di Bergamo, arriva a Bergamo in Largo Tironi e finisce al capolinea del polo multimodale della stazione di Bergamo.

Il percorso di andata è lungo circa 14,85 km e conta n. 21 fermate, mentre il percorso di ritorno è lungo circa 15,08 km con n. 21 fermate. I due capolinea sono localizzati uno a Bergamo, in corrispondenza della stazione FS in Piazza Marconi mentre l'altro è a Verdellino, in Via Guglielmo Marconi, nei pressi del sottopasso della Stazione FS Verdello-Dalmine.

In generale, nella porzione di tracciato che va da Bergamo via Moroni fino ad Osio Sotto il tracciato della nuova linea E-BRT lungo la direttrice della SP 525 corre parallelamente alla Roggia Colleonesca; per realizzare le due corsie preferenziali dedicate al E-BRT, sarà necessario, da un lato, tombare la Roggia Colleonesca esistente ed allargare la carreggiata della strada dall'altro, recuperando in tal modo lo spazio necessario per garantire un migliore e adeguato livello di servizio del sistema di trasporto

In Figura 1-1 si riporta la raffigurazione planimetrica del tracciato nel suo complesso.

LEGENDA	
	NUOVO TRACCIATO BRT - PERCORSO BERGAMO - VERDELLINO
	NUOVO TRACCIATO BRT - PERCORSO VERDELLINO - BERGAMO
	PERCORSO IN DIREZIONE DEL KM ROSSO
	CONFINI COMUNALI

Figura 1-1 – Aerofotogrammetria con ubicazione del tracciato

2 DATI DISPONIBILI

I dati utili per la redazione della presente Relazione Geologica-geomorfologica sono:

- Documentazione geologica del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica (PFTE); nel dettaglio:
    - GR02: Raccolta delle indagini geognostiche;
    - GR01: Relazione geologica, idrogeologica, idrologica, geotecnica, sismica;
    - GA09: Carta delle tipologie di indagine per la caratterizzazione geologica e tecnica;
    - GP01-03: Profilo longitudinale con stratigrafie indagini;
    - GP04-06: Profilo geologico - geotecnico interpretativo;
    - GP07: Profilo longitudinale con indicazione delle indagini sismiche e classi di sottosuolo;
    - GA01: Carta del dissesto con legenda uniformata P.A.I. e P.G.R.A.;
    - GA02: Carta dei Vincoli di natura geologica, idrogeologica, idraulica;
    - GA03: Carta della Fattibilità Geologica;
    - GA04: Carta Geologica;
    - GA05: Carta Geomorfologica;
    - GA06: Carta Idrogeologica;
    - GA10: Carta della Pericolosità Sismica Locale - I Livello;

- Banche dati disponibili sui portali della Regione Lombardia (https://www.geoportale.regione.lombardia.it/ ; https://www.multiplan.servizirl.it/pgtwebn);
- Livelli informativi della piattaforma IdroGEO ISPRA (Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio; Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia – IFFI. https://www.progettoiffi.isprambiente.it/; https://idrogeo.isprambiente.it/app/);

3 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE DEL TRACCIATO

Il tracciato della nuova linea E-BRT si snoderà entro un territorio ad elevata urbanizzazione e sempre in sovrapposizione o in parallelo alla viabilità pubblica esistente. Il contesto geografico è quello pianeggiante della medio – alta pianura bergamasca, senza interessare i rilievi collinari della città di Bergamo o altri salti morfologici rappresentati dalle scarpate dei terrazzi fluviali.

La quota massima del progetto, pari a circa 250 m s.l.m., è raggiunta nei pressi della stazione di Bergamo FS, mentre la quota minore, pari a circa 175 m s.l.m., si raggiunge nel comune di Verdellino. Il dislivello massimo, dunque, è pari a circa 75 m su un tracciato di lunghezza di circa 13 km per il solo tratto di andata Bergamo - Verdellino (gradiente topografico pari a circa il 0.6%).

Il tracciato si snoda, come premesso, entro un contesto di pianura urbanizzata ed intercetta il grande polo industriale di Dalmine ed i comparti artigianali e terziari di Lallio e Dalmine. In Bergamo il tracciato attraversa un'area prettamente residenziale che dalla stazione FS porta verso Lallio. Tra i comuni di Verdellino e Osio Sotto, infine, esso segue la viabilità di collegamento tra i due comuni, la quale attraversa un settore a destinazione prevalentemente agricola.

Oltra alla direttrice principale Bergamo – Verdellino, sono inoltre parte del progetto due direttrici secondarie; la prima si stacca dalla rotatoria di Via Madonna dei Campi – SP25 in comune di Bergamo e va a servire, verso Stezzano, il polo industriale/produttivo del Kilometro Rosso tra i comuni di Bergamo e Stezzano; la seconda nasce come ramo laterale del tracciato principale in comune di Dalmine e segue viale Locatelli sino all'Antenna di Dalmine.

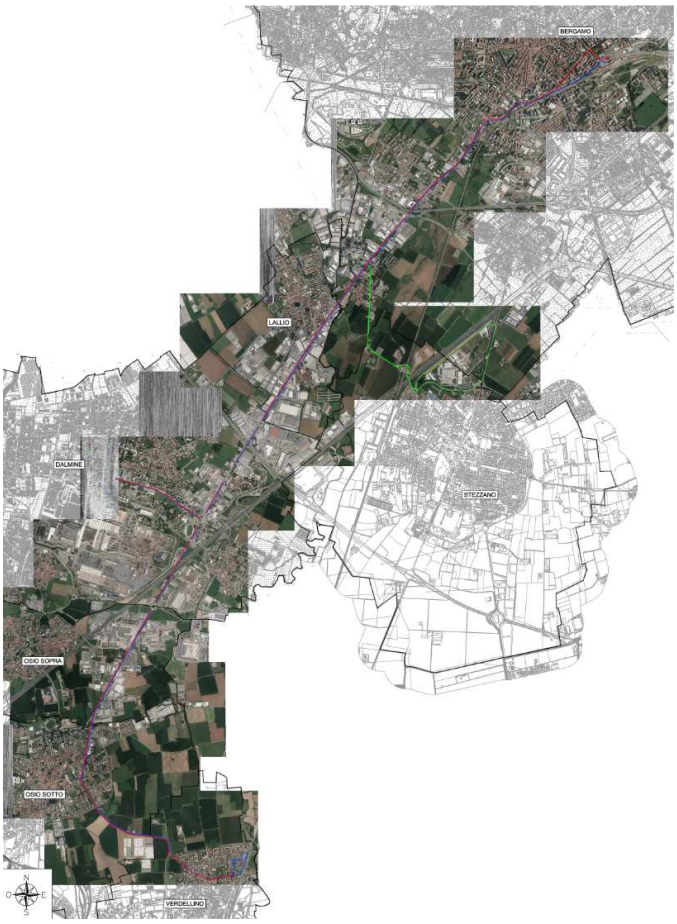


Figura 3-1 – Aerofotogrammetria con ubicazione del tracciato

4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE

L'area in esame è situata all'interno della fascia territoriale a cavallo tra la pianura Padana, a sud, ed i primi rilievi collinari prealpini della catena orobica bergamasca, a nord, facenti parte del settore strutturale delle Alpi meridionali.

Queste ultime si sono formate in seguito alla collisione tra placca europea e placca adriatica, appartenente alla placca africana, e rappresentano il risultato dei processi di sottoscorrimento della crosta continentale africana sotto il margine alpino. Le Alpi meridionali non comprendono esclusivamente la parte affiorante della catena ma continuano verso sud in profondità sotto i depositi della pianura padana fino all'altezza di Milano. L'area di progetto in particolare è situata in corrispondenza delle strutture sepolte del margine Sudalpino all'interno dei sedimenti plio-quaternari della pianura padana.

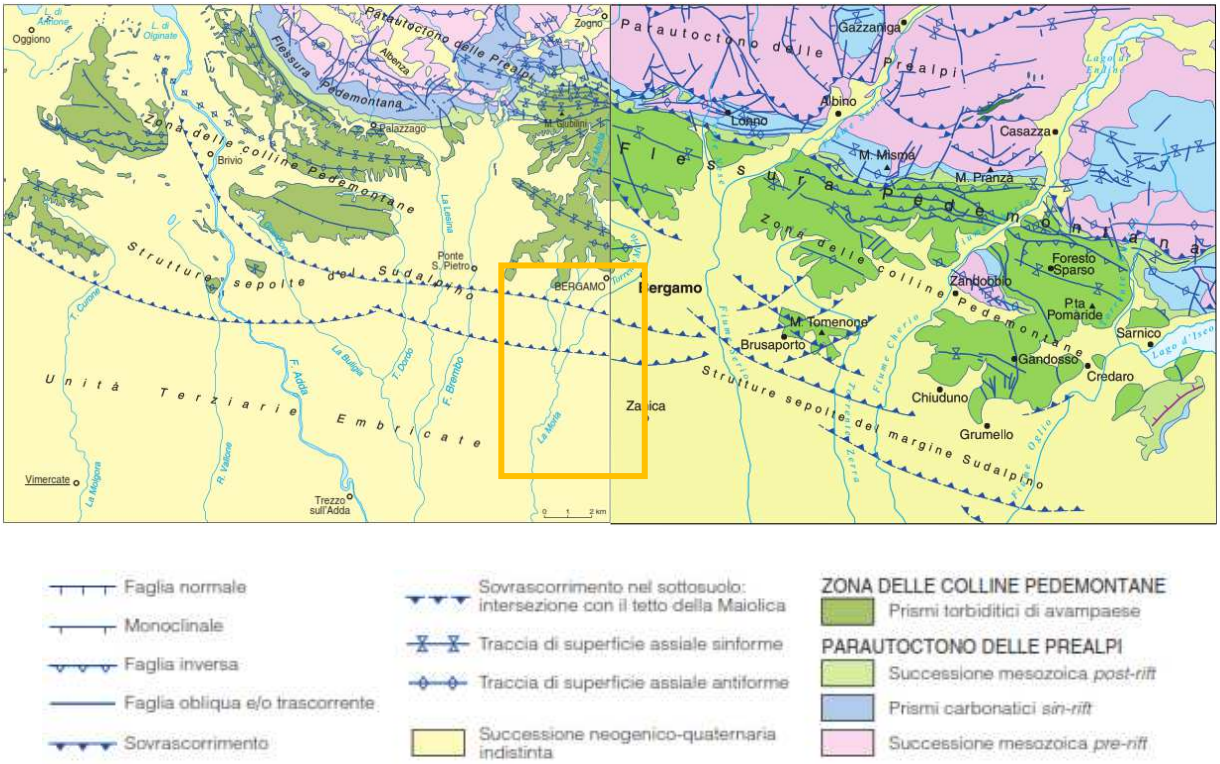


Figura 4-1 – Scema Tettonico dei fogli 097 "Vimercate" e 098 "Bergamo" della Carta Geologica d'Italia (in arancio l'ubicazione indicativa dell'area oggetto di studio)

5 INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA DI PROGETTO

Come anticipato nel capitolo precedente l'area oggetto di studio ricade all'interno dei depositi quaternari ed in particolare il tracciato si sviluppa interamente entro i depositi alluvionali e fluvioglaciali appartenenti al Supersintema della Morla (OR). Si tratta di terreni di età Pleistocene Medio – Olocene (fino al XVI secolo) costituiti, sulla base di quanto riportato nella cartografia geologica, da "*Ghiaie a ciottoli arrotondati con prevalenti clasti della successione cretacica e di poco subordinati silicoclasti con evidenze di alterazione, intercalazioni sabbiose (depositi alluvionali); argille, limi e sabbie (depositi lacustri). Profilo di alterazione di spessore variabile; morfologie conservate*".

In corrispondenza dell'abitato di Osio Sotto il tracciato lambirà la parte marginale dell'Unità di Ponte San Pietro (BPO); si tratta di depositi di età Pleistocene medio-superiore descritti nella legenda della carta Geologica come *"Ghiaie a supporto clastico con matrice sabbiosa e sabbioso limosa, carbonatica; ciottoli arrotondati, spesso discoidali, in prevalenza carbonatici; limi di esondazione a tetto: depositi fluvioglaciali. Profili d'alterazione relativamente poco evoluti, che raggiungono spessori compresi tra 1,4 e 2 m"*.

Da un punto di vista litologico non si evidenziano differenze significative tra le due unità sopradescritte.

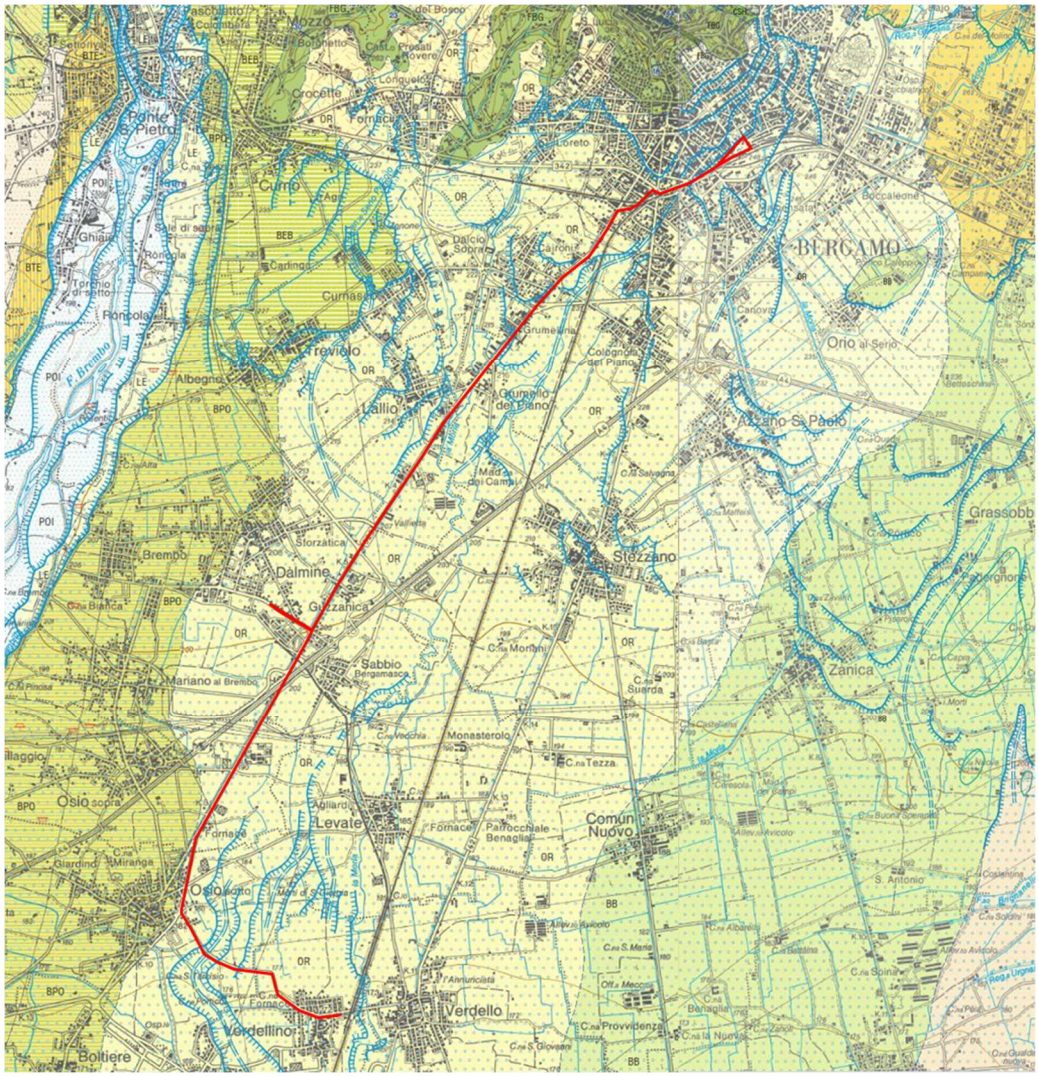


Figura 5-1 – Estratto dei fogli 097 "Vimercate" e 098 "Bergamo" della Carta Geologica d'Italia (in rosso la rappresentazione schematica del tracciato della nuova linea E-BRT)

IL Modello Geologico dell'area di progetto è stato definito partendo dai dati geologici disponibili. Occorre sottolineare che questi ultimi sono rappresentati da una serie di indagini geognostiche già esistenti realizzate per la progettazione di altre opere localizzate in prossimità del sito di intervento della nuova linea E-BRT; non si tratta quindi di indagini realizzate appositamente a supporto della progettazione dell'opera in oggetto. Solamente una minima parte delle indagini disponibili è stata realizzata appositamente lungo il tracciato dell'opera a supporto del PFTE (2 sondaggi a carotaggio, 12 prove penetrometriche tipo DPSH, 30 prove geofisiche tipo HVSR).

Nella maggior parte dei casi i sondaggi hanno fornito esclusivamente informazioni di carattere lito-stratigrafico (descrizioni straftigrafiche non accompagnate da foto delle cassette), soprattutto nelle serie di indagini recuperate dal geoportale della regione Lombardia (in cui non sono riportate, ad esempio, prove eseguite in foro o altre tipologie di analisi ed indagini geognostiche). Solo per alcuni sondaggi, ovvero quelli recuperati da precedenti lavori di Studio GEA e quelli eseguiti in fase di PFTE, è stato possibile ottenere anche informazioni di carattere geotecnico (quali risultati di prove SPT eseguite in foro) o idrogeologico (quali prove di permeabilità tipo Lefranc in foro). Al fine di colmare tali lacune di informazione, in questa fase di progettazione definitiva sono stati redatti appositi piani di indagine comprendenti prove penetrometriche dinamiche e sondaggi carotati con prove in foro (SPT e Lefranc) e prelievo di campioni di terreno per le prove di laboratorio, i cui risultati non sono tuttavia al momento disponibili. Il modello geologico, idrogeologico e geotecnico del sito viene pertanto definito in tale fase sulla base dei dati disponibili e del modello definito in fase di PFTE. Tale modello sarà aggiornato ed implementato una volta disponibili i risultati delle indagini integrative, presumibilmente in fase di progettazione esecutiva.

Le indagini attualmente disponibili sono state raccolte nel Report delle indagini geognostiche e prove in situ; esse sono costituite da:

- Prove penetrometriche dinamiche (147 prove penetrometriche, di cui 12 eseguite in fase di PFTE);
- Sondaggi a carotaggio continuo (56 sondaggi, di cui 2 eseguiti in fase di PFTE);
- Stratigrafie di pozzi per acqua esistenti (49 pozzi);
- Pozzetti esplorativi (5 scavi);
- Indagini sismiche (30 prove HVSR).

Dall'analisi dei dati disponibili e dall'analisi dei documenti di PFTE (doc GR01 e GR02) emerge che il supersistema della Morla è un'Unità caratterizzata da un profilo di alterazione di spessore variabile (localmente alcuni metri), pedogenizzato e rimaneggiato dall'attività antropica mediamente nel suo primo metro. Nel PFTE si segnala che ove è stato possibile osservare direttamente la stratigrafia superficiale, come in corrispondenza di scavi edilizi, tale sistema si caratterizza per un'alterazione nettamente maggiore dei clasti silicatici provenienti dall'alta Valle Seriana rispetto a quelli marnosi o calcareo marnosi della successione cretacica locale, immersi in una matrice fine di tipo limoso argilloso. Nella parte più superficiale della sequenza sono stati anche osservati (località Longuelo) livelli di potenza significativa di depositi di bassa energia e lacustri costituiti da limi, limi argillosi, limi sabbiosi e sabbie che venivano cavati anticamente (località Fornaci).

Tali depositi fini limoso-argillosi contenenti clasti alterati sono diffusi pressoché lungo tutto il tracciato, come evidenziano le stratigrafie dei sondaggi e dei pozzi disponibili e possono raggiungere spessori localmente importanti (superiori ai 5 m). Al di sotto di questi depositi fini e d'alterazione si trovano le ghiaie a supporto clastico e matrice sabbiosa, con clasti arrotondati, ben selezionati, calcareo-marnosi e arenacei prevalenti e subordinati calcari e silicoclasti alterati di provenienza seriana. All'interno dei depositi ghiaiosi, a profondità generalmente superiori ai 10 m, sono presenti livelli e lenti di conglomerati fluvioglaciali da poco cementati ed alterati a semi-litoidi. Spesso i conglomerati costituiscono delle lenti di limitata dimensione entro il livello ghiaioso, oppure costituiscono la base dello stesso. Proseguendo in profondità, il conglomerato diventa prevalente con intercalazioni di livelli argilloso–limosi. I depositi grossolani conglomeratici hanno una potenza dell'ordine di parecchie decine di metri (superiori ai 270 m) come si evince dalle stratigrafie dei pozzi per acqua profondi contenute nel Report delle indagini geognostiche e prove in situ.

6 GEOMORFOLOGIA ED IDROGRAFIA DELL'AREA

6.1 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

L'intero tracciato si snoda all'interno della pianura bergamasca, la quale risulta blandamente inclinata verso sud, variando tra i 270 m s.l.m. ai circa 100 in corrispondenza dei comuni più meridionali della provincia. Si tratta di un'area caratterizzata da una sostanziale uniformità morfologica, legata prettamente alle dinamiche fluviali relitte ed obliterate dall'azione antropica, che risulta prevalente su tutto il settore studiato.

Nella Carta Geomorfologica del PFTE (doc. GA05) e nella Carta Geologica in scala 1:50.000 (foglio 097 "Vimercate"; si veda anche la Figura 5-1) si segnala la presenza di strutture lineari rappresentate da orli di terrazzo di origine paleo-fluviale attribuibili presumibilmente al paleoalveo del torrente Morla, che emergono nel territorio comunale di Bergamo e più a sud tra Osio e Verdellino. Si tratta di strutture poco evidenti a causa dell'elevata antropizzazione con conseguente omogeneizzazione del paesaggio morfologico della pianura.

In conclusione, il contesto non spicca per evidenze morfologiche di rilievo, risultando totalmente, o quasi, privo di elementi di rilievo. L'occupazione antropica delle aree, tra l'altro, porta oltremodo ad una obliterazione sia spaziale che visiva delle morfologie, per cui se ne perde quasi totalmente la percettività nel contesto locale.

6.2 INQUADRAMENTO IDROGRAFICO

L'area interessata dalla realizzazione della nuova linea E-BRT si pone all'interno del bacino dell'Adda; Il bacino dell'Adda ha una superficie complessiva di circa 7.927 km^2, per il 94% circa in territorio italiano e per il rimanente 6% in territorio svizzero. Complessivamente il bacino si trova per il 79% in ambito montano e per il 21% in pianura; la parte italiana del bacino si trova per l'81% in ambito montano e per il 19% in pianura.

Il bacino imbrifero dell'Adda si compone dei seguenti sottobacini:

- Adda sopralacuale (Valtellina e Valchiavenna);
- lago di Como;
- Adda sottolacuale;
- Brembo;
- Serio.

L'Adda sottolacuale, oltre a ricevere il Brembo e il Serio, è alimentato da un bacino di pianura incerta definizione, in relazione alla fitta rete di canali e corsi d'acqua minori fittamente sviluppati che determinano interscambi con i bacini limitrofi; a tale sottobacino appartiene l'ambito di competenza del torrente Morla. Tale ramo, separato da quello principale dell'Adda, risulta intercluso tra i bacini del Serio (ad est) e del Brembo (ad Ovest), ambedue immissari dell'Adda.

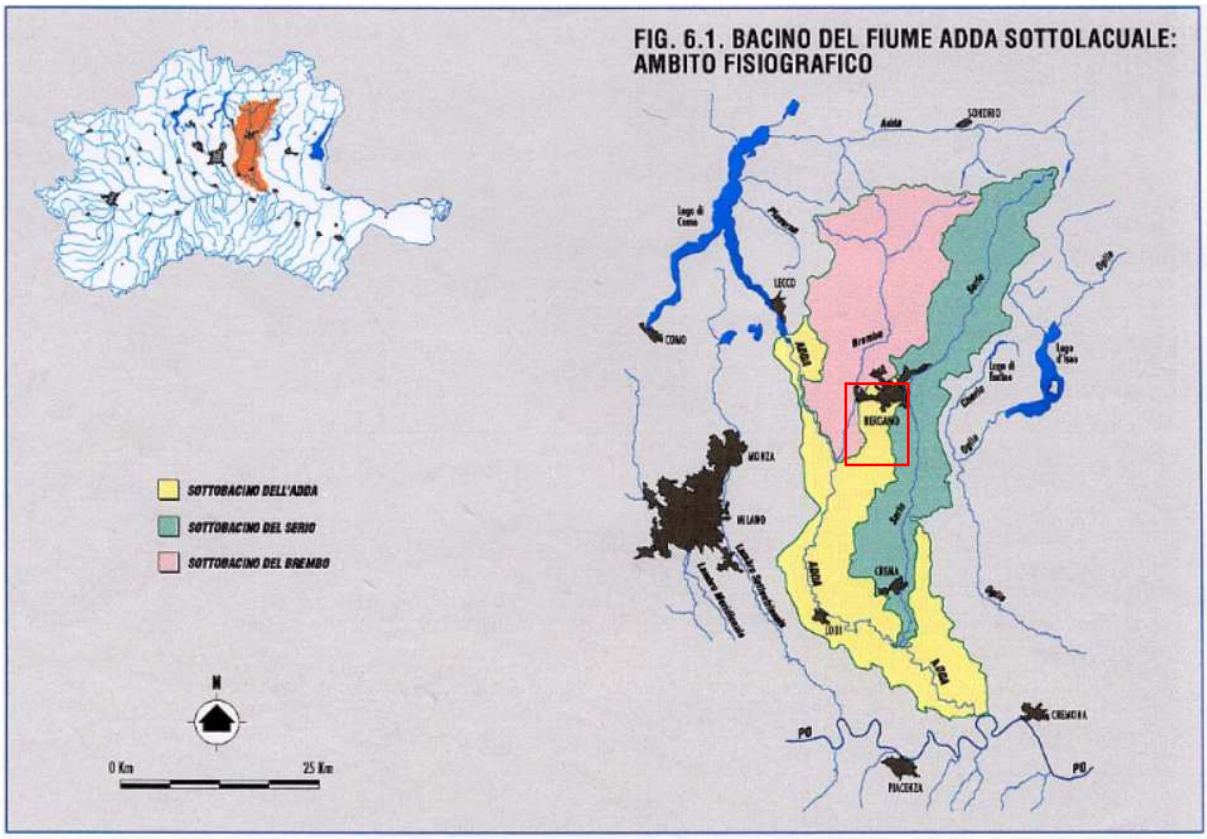


Figura 6-1 – Bacino del fiume Adda estratto da "Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi bacino dell'Adda sottolacuale"; in rosso la posizione indicativa dell'area di studio.

Dal punto di vista idrologico, la progettualità non interseca corsi d'acqua di rilievo provinciale o regionale, rimanendo a distanza rispetto ai fiume Brembo e Serio e non entrando mai in interferenza con il torrente Morla. Le uniche interferenze effettive sono con i vari canali e rogge che costituiscono il reticolo idrico minore e consortile. L'unico canale che viene interessato direttamente dalle opere in progetto è la Roggia Colleonesca, mentre gli altri reticoli vedono solamente il passaggio del tracciato, in sede promiscua, ma senza diretta interferenza in quanto sono già presenti le viabilità di passaggio dei mezzi.

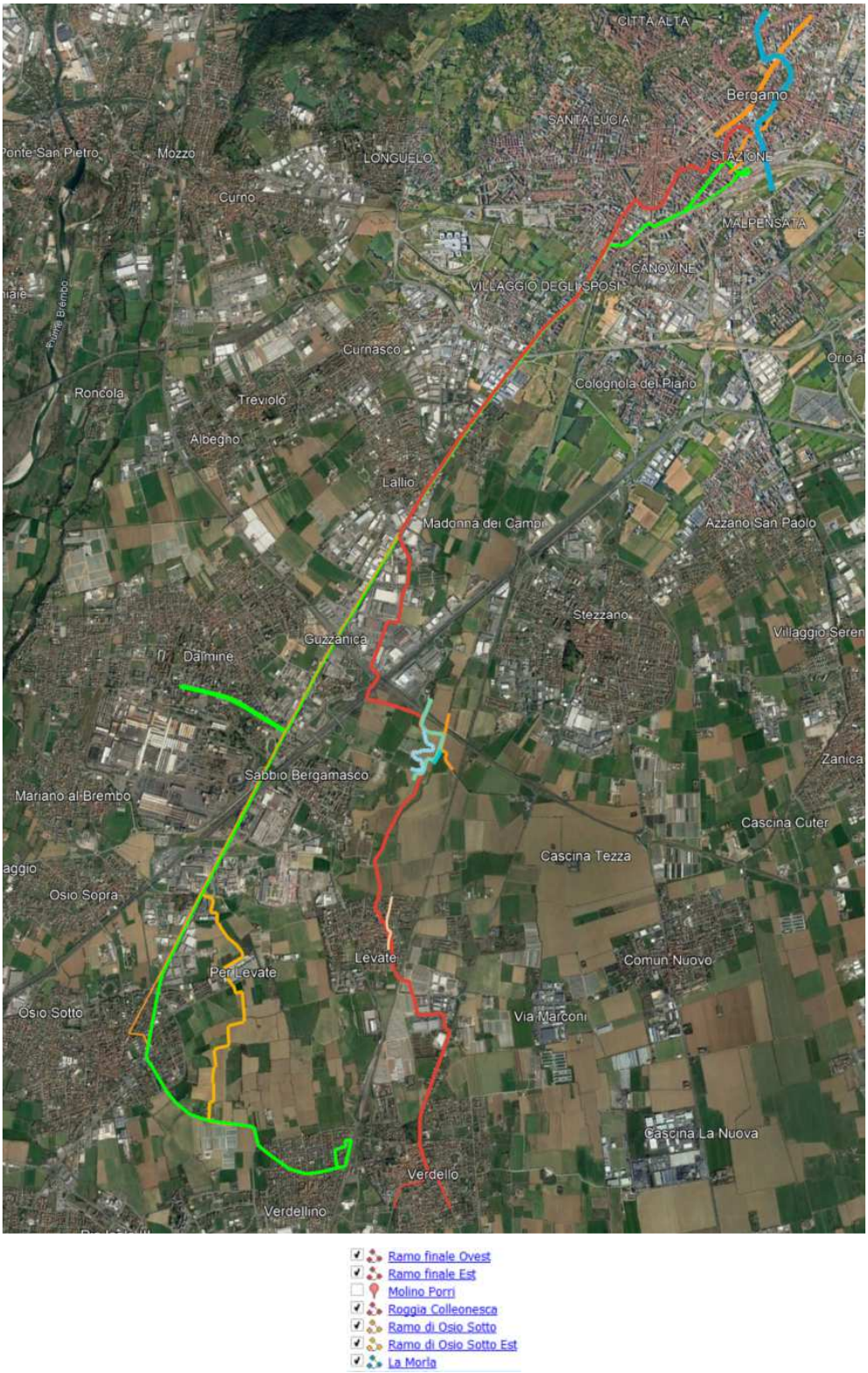


Figura 6-2 – Immagine raffigurante il tracciato della nuova linea E-BRT (linea verde) ed il reticolo idrografico minore (RIM); come si vede dall'immagine l'unica interferenza è con la roggia Colleonesca (in rosso) ed il relativo ramo di Osio Sotto (in arancio)

7 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

L'area di progetto è posta al margine settentrionale della Pianura Padana, nel settore di raccordo tra la pianura ed i primi rilievi collinari orobici.

Il contesto idrogeologico della Pianura Padana è estremamente complesso, essendo costituito da una serie di corpi sedimentari quaternari a varia genesi e granulometria (alternanze di depositi alluvionali a diversa energia di deposizione), spesso eteropici tra loro, costituenti 4 grandi acquiferi (1 superficiale libero e 3 profondi) ampiamente studiati e documentati e, ad oggi, largamente sfruttati.

L'area di progetto è ubicata nella zona che viene definita di "ricarica", ove i 4 acquiferi si congiungono alla base della catena alpina. Tale zona assume un'importanza essenziale, in quanto responsabile della ricarica degli acquiferi profondi.

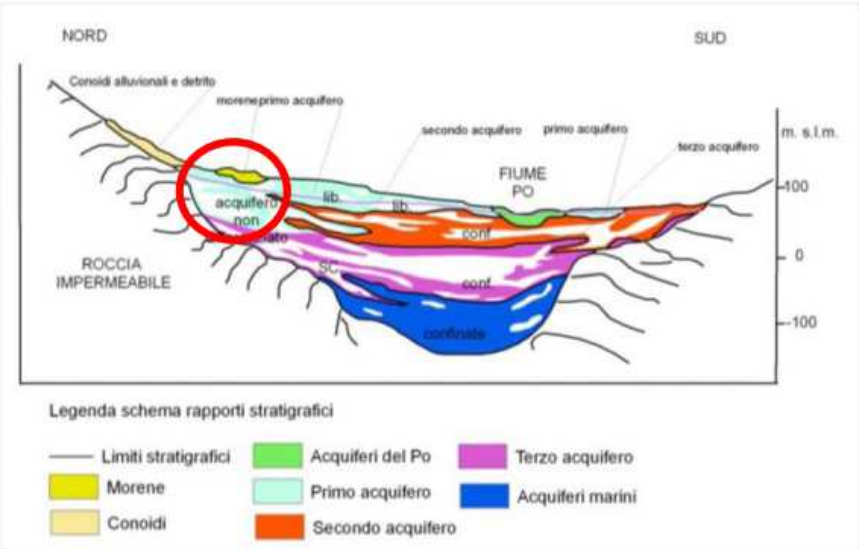


Figura 7-1 – Sezione semplificativa dell'assetto idrostratigrafico della pianura padana, in rosso è indicata la zona di ricarica alla base della catena alpina, ove si situa l'area in progetto

7.1 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI PROGETTO

Come descritto nel capitolo 5, l'area oggetto di studio ricade all'interno dei depositi quaternari ed in particolare il tracciato si sviluppa interamente entro i depositi alluvionali e fluvioglaciali appartenenti al Supersintema della Morla (OR). Nel complesso il progetto si sviluppa in un'area caratterizzata da una certa omogeneità litostratigrafica confermata dai risultati delle indagini geognostiche disponibili (stratigrafie di sondaggi e di pozzi per acqua) contenute nel documento GR02 del PFTE.

La stratigrafia del sottosuolo lungo il tracciato della nuova linea E-BRT è generalmente caratterizzata dalla presenza di una coltre superficiale pedogenizzata e rimaneggiata al di sotto della quale si ritrova un livello di potenza variabile diffuso pressoché lungo tutto il tracciato, costituito da depositi fini limoso-argillosi contenenti clasti alterati. La sequenza stratigrafica prosegue con dei depositi ghiaiosi prevalenti al cui interno, a profondità superiori ai 10 m, sono presenti livelli e lenti di conglomerati fluvioglaciali da poco cementati ed alterati a semi-litoidi. All'interno dei depositi ghiaiosi localmente è segnalata la presenza di lenti di materiale più fine di natura limoso-argillosa di spessore pluri-metrico. I depositi grossolani conglomeratici hanno una potenza dell'ordine di parecchie decine di metri (superiori ai 270 m) come si evince dalle stratigrafie dei pozzi profondi contenute

nella Raccolta delle indagini geognostiche del PFTE (GR02). Tali depositi grossolani costituiscono l'acquifero locale.

La soggiacenza dalla falda viene definita sulla base delle quote della superficie piezometrica rilevata dal monitoraggio piezometrico ed ambientale in ordine al Piano Unico di Tutela delle Acque (PTUA) all'anno 2016 e sulla base dei dati di soggiacenza contenuti all'interno delle schede stratigrafiche dei pozzi. Nel settore settentrionale dell'area di studio, ovvero all'altezza del centro di Bergamo, la superficie piezometrica si trova ad una profondità di circa 50 m dal p.c., corrispondente ad una quota di circa 200 m s.l.m. Procedendo verso Sud in direzione del comune di Verdellino si osserva una generale riduzione della soggiacenza della falda; il livello piezometrico, infatti, è posto a circa 20 m dal p.c., ovvero ad una quota di circa 160 m s.l.m. Le linee di flusso sono caratterizzate pertanto da una direzione generale verso SSW, con una leggera deviazione verso occidente nel settore di Verdellino in direzione del fiume Adda.

Nella tabella seguente si riportano i valori di soggiacenza della falda disponibili, contenuti nel documento GR02 di PFTE.

ID (GR02)	COMUNE	FONTE	CODICE FONTE	PROFONDITA' [m]	FALDA [m da p.c.]
BG_008	BERGAMO	SITER	1469	111	**47,00**
BG_016	BERGAMO	SITER	2131	67	**48,00**
BG_054	BERGAMO	SITER	094/10_2	84	**43,72**
BG_055	BERGAMO	SITER	094/10_21	80	**41,10**
LA_004	LALLIO	SITER	1234_3	80	**34,70**
LA_007	LALLIO	SITER	1538	51	**38,00**
LA_011	LALLIO	SITER	066/09_1	110	**45,00**
LA_013	LALLIO	SITER	066/09_2	95	**41,30**
LA_017	LALLIO	SITER	032/11	75	**40,47**
DA_001	DALMINE	SITER	1601	91	**38,00**
DA_013	DALMINE	SITER	1233	195	**40,00**
DA_021	DALMINE	SITER	1261	90,6	**35,00**
DA_022	DALMINE	SITER	021/15	101	**32,20**
DA_025	DALMINE	SITER	00056/DP/01	70,5	**32,00**
DA_029	DALMINE	GEA	19_096	-	**31,20**
OP_002	OSIO SOPRA	SITER	1821	49	**25,00**
OP_006	OSIO SOPRA	SITER	UD_04/055	60	**27,00**
OT_004	OSIO SOTTO	SITER	00606/ED/06_1	270	**30,00**
OT_005	OSIO SOTTO	SITER	00606/ED/06_2	270	**28,00**
OT_009	OSIO SOTTO	SITER	023/10_1	45	**20,80**
OT_014	OSIO SOTTO	SITER	00606/ED/06_3	100	**24,00**
OT_018	OSIO SOTTO	SITER	00376/PL/04	35	**29,00**
VE_006	VERDELLINO	SITER	011/08	280	**18,45**

Tabella 1 – Sintesi dei dati di soggiacenza della falda disponibili (fonte doc. GR02 PFTE)

La tabella soprastante riporta i valori del livello statico della falda misurata all'interno di pozzi prevalentemente ad uso industriale presenti lungo il corridoio del tracciato della nuova linea E-BRT; l'unico valore proveniente da un piezometro è quello dell'indagine DA_029, il quale, in realtà, rappresenta il valore medio della

soggiacenza misurata nell'agosto 2019 all'interno di 7 piezometri ubicati in corrispondenza dello stabilimento REA Dalmine.

I dati disponibili evidenziano, quindi, la presenza di una falda relativamente profonda e non interferente direttamente con le opere in progetto.

Tuttavia, dal momento che nei pozzi industriali i filtri sono stati posizionati a profondità elevate compatibili con i livelli statici misurati, non si può ad oggi escludere la presenza di una falda più superficiale, eventualmente effimera, dato che alcune delle indagini disponibili segnalano la presenza di acqua più superficiale. In particolare, nell'ambito delle indagini denominate BG_005 (documento GR02 del PFTE), realizzate a Bergamo a supporto della progettazione di un edificio, è stato realizzato un piezometro S1 spinto a 15 m di profondità nel quale è stata realizzata nel 2002 una misura di soggiacenza pari a 11 m di profondità dal p.c. Inoltre, sempre a Bergamo (Via Masone) durante l'esecuzione di prove penetrometriche dinamiche viene segnalata la presenza di acqua a 1,5/2 m dal p.c. (indagini BG-019 e BG_020; doc. GR02 del PFTE).

In questa fase di Progetto Definitivo è stato proposto un piano delle indagini integrative che prevede la realizzazione di sondaggi carotati con prove in foro e prelievo di campioni per le analisi di laboratorio, nonché l'installazione in foro di sondaggio di una serie di piezometri a tubo aperto per il monitoraggio dell'eventuale falda superficiale. Una volta che sarà completato tale piano indagini sarà possibile valutare se sia presente una falda superficiale e la sua eventuale interazione con le opere in progetto.

7.2 PROVE DI PERMEABILITÀ IN SITO

Per determinare le permeabilità delle diverse unità idrogeologiche individuate sulla base della ricostruzione geologica del sottosuolo, sono state analizzate le risultanze delle prove di permeabilità tipo Lefranc condotte nelle diverse campagne di indagini storiche disponibili; i risultati ed i relativi certificati di prova sono contenuti nel documento GR02 del PFTE.

Nella seguente tabella si riporta una sintesi dei risultati ottenuti:

ID (GR02)	CODICE INDAGINE	COMUNE	PROFONDITA (m)	LITOTIPO	PERMEABILITA (M/SEC)
OT_019	BG_086	BERGAMO	4	Ciottoli e ghiaie arrotondati o subarrotondati, poligenici, eterometrici immersi entro matrice limoso - argilllosa marrone. Supporto di matrice	8,48E-08
LA_005_B	S1	LALLIO	4	Deposito a prevalente litologia fine limosa con subordinata componente granulare sabbiosa o ghiaiosa	1,61E-06
			8,5	Deposito a prevalente litologia granulare sabbiosa e ghiaiosa con subordinata componente fine	1,83E-05
	S3		3	Deposito a prevalente litologia fine limosa con subordinata componente granulare sabbiosa o ghiaiosa	3,36E-06
			10	Deposito eterogeneo con alternanze di livelli a prevalente componente granulare e livelli a componente prevalentemente fine	1,81E-05
LA_012_B	S1	LALLIO	3	Ghiaie a supporto di matrice sabbioso-argillosa con ciottoli	1,42E-04
			6	Ghiaie e ciottoli a supporto di matrice sabbioso-argillosa passanti a ghiaia clast-supported	1,39E-04
DA_003_B	S1	DALMINE	16	Ghiaie e ciottoli a supporto di matrice sabbioso-argillosa con livelli conglomeratici alterati	3,51E-05
DA_012_A	S1	DALMINE	3	Argille limose con ghiaie e ciottoli alterati	1,49E-01
	S2	DALMINE	3	Ghiaie e ciottoli in matrice argilloso-limosa prevalente. Supporto di matrice e ciottoli in tracce	2,19E-02
	S3	DALMINE	3	Ghiaie e ciottoli in matrice limoso-argillosa	1,41E-03
	S4	DALMINE	3	Ghiaie e sabbie poco addensate	1,86E-03
DA_012_B	T01_PP1	DALMINE	2,1	Ghiaie in matrice limoso-argillosa	2,82E-05
	T01_PP2	DALMINE	3,5	Ghiaie in matrice limoso-argillosa	9,62E-05
	T02_PP1	DALMINE	2	Ghiaie in matrice limoso-argillosa	1,72E-04
	T02_PP2	DALMINE	3,1	Ghiaie in matrice limoso-argillosa	7,76E-05
OT_019	OT_019	VERDELLINO	3,5	Ghiaie e ciottoli in matrice argilloso-limosa prevalente	9,35E-05

Grado di permeabilità	*Valore di k (m/s)*
Alto	Superiore a 10^{-3}
Medio	$10^{-3} \div 10^{-5}$
Basso	$10^{-5} \div 10^{-7}$
Molto basso	$10^{-7} \div 10^{-9}$
Impermeabile	Minore di 10^{-9}

Tabella 2 –Sintesi delle prove di permeabilità Lefranc disponibili (da GR02) e tabella di riferimento per la definizione del grado di permeabilità dei terreni (in rosso valori considerati eccessivamente elevati)

I dati attualmente disponibili evidenziano che l'unità costituita dai limi argillosi con ghiaia e ciottoli, generalmente presente nei primi metri al di sotto della coltre superficiale rimaneggiata, presenta una permeabilità variabile da media a bassa, addirittura molto bassa nel settore di Bergamo, presumibilmente per la presenza di una matrice prevalente di natura limoso-argillosa. Solo localmente, in particolare sul sito di indagine DA_012_A, sono stati ottenuti dei valori di permeabilità alta più in linea con terreni ghiaiosi clast-supported o ghiaie a matrice sabbiosa (in rosso dei valori considerati eccessivamente alti per la litologia descritta e pertanto ritenuti poco affidabili). In questa fase di Progetto Definitivo è stato proposto un piano delle indagini integrative che prevede anche la realizzazione di prove di permeabilità Lefranc in foro di sondaggio distribuite lungo tutto il tracciato, al fine di definire meglio il grado di permeabilità dei terreni.

8 DISAMINA DEI VINCOLI ESISTENTI

Al fine di individuare gli eventuali ambiti di criticità e/o gli eventuali vincoli geologici ed idrogeologici presenti nell'area di studio, sono stati considerati alcuni strumenti normativi di riferimento elencati nel seguito:

- PGT vigenti dei comuni interessati dal progetto della nuova linea E-BRT: Bergamo, Lallio, Dalmine, Osio Sopra, Osio Sotto e Verdellino consultabili alla banca dati della Regione Lombardia (https://www.multiplan.servizirl.it/pgtwebn);
- Cartografia del PGRA (mappe di pericolosità e del rischio) consultabile sul Geoportale della Lombardia (https://www.geoportale.regione.lombardia.it/);
- Vincoli di polizia idraulica che individuano le fasce di rispetto dei corsi d'acqua del Reticolo Idrico Principale (RP) e Minore (RIM) presenti nel territorio comunale, consultabili sul sistema informativo RIMWEB (https://www.multiplan.servizirl.it/rimweb);
- Carta del dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio consultabile sulla piattaforma IdroGEO (https://idrogeo.isprambiente.it/app/);
- Piano di Assetto Idrogeologico (PAI), strumento normativo atto al censimento dei principali elementi di dissesto idrogeologico del territorio, consultabile sul Geoportale della Lombardia (https://www.geoportale.regione.lombardia.it/);

Nei capitoli seguenti vengono sintetizzati gli ambiti di interferenza del tracciato EBTR con le situazioni soggette a norma di tipo geologico, idraulico, idrogeologico e territoriale. Per le sintesi cartografiche degli elementi trattati nel seguito si rimanda agli specifici elaborati facenti parte della documentazione di Progetto Definitivo.

8.1 VINCOLO IDROGEOLOGICO

I P.G.R.A., Piano di Gestione del Rischio Alluvioni nel bacino del Fiume Po è lo strumento operativo previsto dalla legge italiana per individuare e programmare le azioni necessarie a ridurre le conseguenze negative delle alluvioni per la salute umana, per il territorio, per i beni, per l'ambiente, per il patrimonio culturale e per le attività economiche e sociali.

Dal punto di vista dei vincoli idrogeologici, i livelli informativi del Portale PGRA, hanno evidenziato l'assenza di scenari di probabilità di alluvioni. Sono tuttavia presenti delle situazioni prossimali, da ritenersi in ogni caso compatibili con il progetto dell'opera e comunque in ogni caso non direttamente interferenti. Nel seguito si riporta un'immagine estratta dal Geoportale della Lombardia della situazione più prossimale dove si evidenzia un'area soggetta ad allagamento prossima al tracciato della nuova linea E-BRT; il tracciato non interferisce direttamente con l'opera e tra le categorie di elementi esposti non viene segnalata la viabilità sulla SP 525.

Figura 8-1 – Immagine estratta Geoportale della Lombardia; in blu le aree a rischio di alluvione, in verde il tracciato della nuova linea E-BRT

8.2 PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (P.A.I.)

Il Piano di bacino del fiume Arno, stralcio "Assetto Idrogeologico", denominato PAI, è stato redatto, adottato e approvato, ai sensi dell'art. 17, comma 6 ter, della legge 18 maggio 1989, n. 183, quale piano stralcio del Piano di bacino (Norme di Attuazione, Comitato Istituzionale 11/11/2004).

Esso ha valore di piano territoriale di settore ed è lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, alla difesa e alla valorizzazione del suolo; tale piano ha l'obbiettivo di garantire livelli di sicurezza adeguati rispetto ai fenomeni di dissesto idraulico e geomorfologico in atto o potenziali.

La legenda P.A.I. prevede la delimitazione e classificazione, in base alla pericolosità, delle aree in 4 grandi gruppi (elaborato 2 del PAI):

- **Aree in dissesto per frana:** Fa (attiva), Fq (quiescente) e Fs (stabilizzata o relitta);
- **Aree in dissesto per esondazione torrentizia:** Ee (pericolosità molto elevata), Eb (pericolosità elevata), Em (pericolosità media o moderata);
- **Ambiti di conoide:** Ca (conoidi attivi o potenzialmente attivabili non protetti), Cp (conoidi attivi o potenzialmente attivi parzialmente protetti), Cn (conoidi non recentemente attivatisi o protetti);
- **Ambiti di valanga:** Ve (pericolosità elevata o molto elevata), Vm (ambiti a pericolosità media o moderata);.

All'interno del P.A.I. vengono inoltre definite le fasce fluviali (elaborato 8 del PAI):

- **Fascia A** – Fascia di deflusso della Piena costituita dalla porzione di alveo che è sede prevalente del deflusso della corrente per la piena di riferimento, ovvero che è costituita dall'insieme delle forme fluviali riattivabili durante gli stati di piena.

- **Fascia B** – Fascia di Esondazione esterna alla precedente, costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione al verificarsi della piena di riferimento. Il limite di tale fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena di riferimento ovvero sino alle opere idrauliche esistenti o programmate di controllo delle inondazioni (argini o altre opere di contenimento - Fascia B di progetto).
- **Fascia C** - Area di inondazione per piena catastrofica costituita dalla porzione di territorio esterna alla Fascia B, che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quella di riferimento.

Dall'analisi dei dati territoriali disponibili, il tracciato risulta totalmente esterno a possibili interferenze con ambiti P.A.I. dal momento che non sono presenti interferenze con le fasce fluviali definite come all'elaborato 8 e non sono presenti interferenze con aree in dissesto per frana, valanga, esondazione torrentizia e conoide definite come all'elaborato 2.

8.3 VINCOLI DI POLIZIA IDRAULICA

I Vincoli di polizia idraulica ai sensi della d.g.r. 25 gennaio 2002 n. 7/7868 individuano le fasce di rispetto dei corsi d'acqua del Reticolo Idrico Principale (RP) e Minore (RIM) presenti nel territorio comunale, definite in 10 m dai cigli esterni delle sponde dei corsi d'acqua.

Per quanto riguarda il reticolo idrico minore e le relative fasce di rispetto, considerato che il reticolo idrico è costituito prevalentemente da rogge e canali e che, pertanto, le portate risultano controllate dall'ente Gestore, non avendo dunque le variazioni di portata che si avrebbero per il reticolo naturale, le principali interferenze suddivise per comune di pertinenza, segnalate anche nei documenti di PFTE (GR01), sono le seguenti:

- Comune di Bergamo: dal capolinea Bergamo Stazione alla fermata Bergamo San Tomaso: il reticolo idrico interseca in alcuni punti il nuovo tracciato, ma non sussiste interferenza sostanziale tra il progetto e il RIM in quanto la realizzazione del nuovo tracciato avviene su viabilità già esistente;

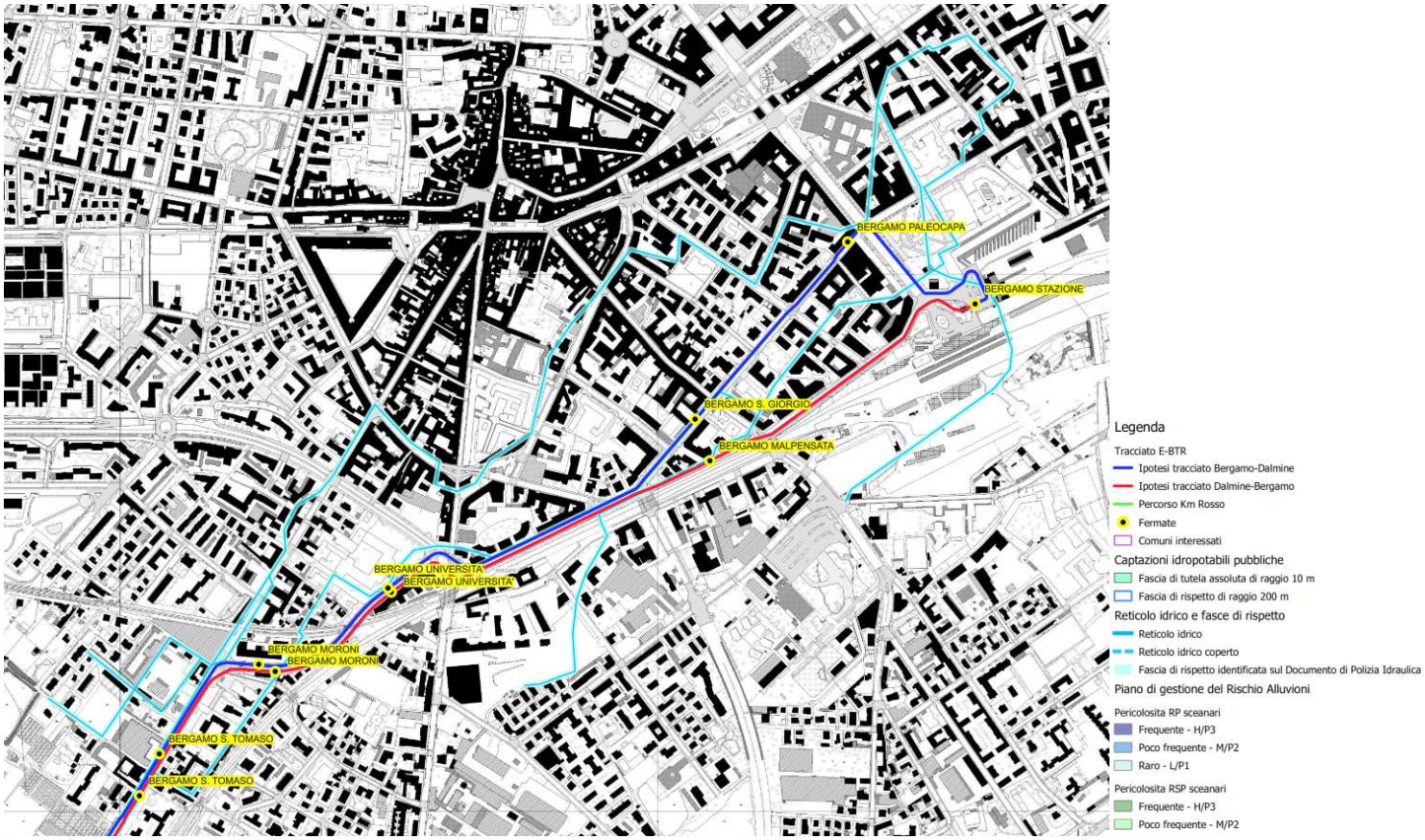


Figura 8-2 – Immagine estratta dal documento GA02.a del PFTE; Carta dei Vincoli di natura geologica, idrogeologica, idraulica (settore Bergamo stazione-Bergamo San Tommaso)

- Comune di Bergamo: dalla fermata Bergamo San Tomaso alla fermata Lallio 11: interferenza tra il RIM (Roggia Colleonesca) e il nuovo tracciato in quanto la realizzazione di quest'ultimo avverrà su un nuovo tratto di viabilità, il quale prevede il tombinamento del RIM stesso; la risoluzione dell'interferenza e la soluzione progettuale da adottare verranno definite di concerno con l'Ente Gestore.

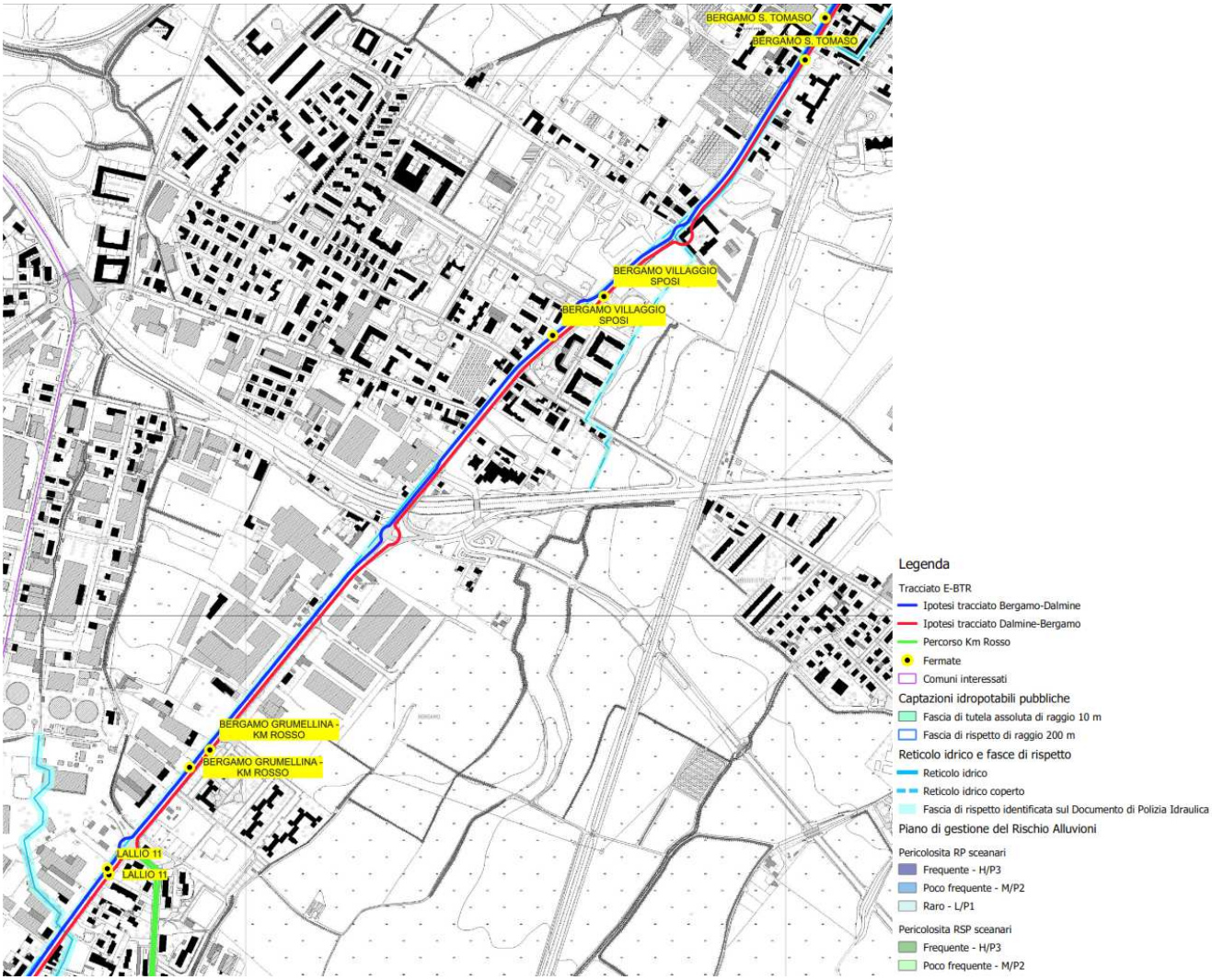


Figura 8-3 – Immagine estratta dal documento GA02.b del PFTE; Carta dei Vincoli di natura geologica, idrogeologica, idraulica (settore Bergamo San Tommaso-Lallio 10/11)

- Comune di Lallio: dalla fermata Lallio 11 alla fermata Dalmine Centro Commerciale si sviluppa un'interferenza tra il RIM (Roggia Colleonesca) e il nuovo tracciato in quanto la realizzazione di quest'ultimo avverrà su un nuovo tratto di viabilità, il quale prevede il tombinamento del RIM stesso; la risoluzione dell'interferenza e la soluzione progettuale da adottare verranno definite di concerno con l'Ente Gestore.

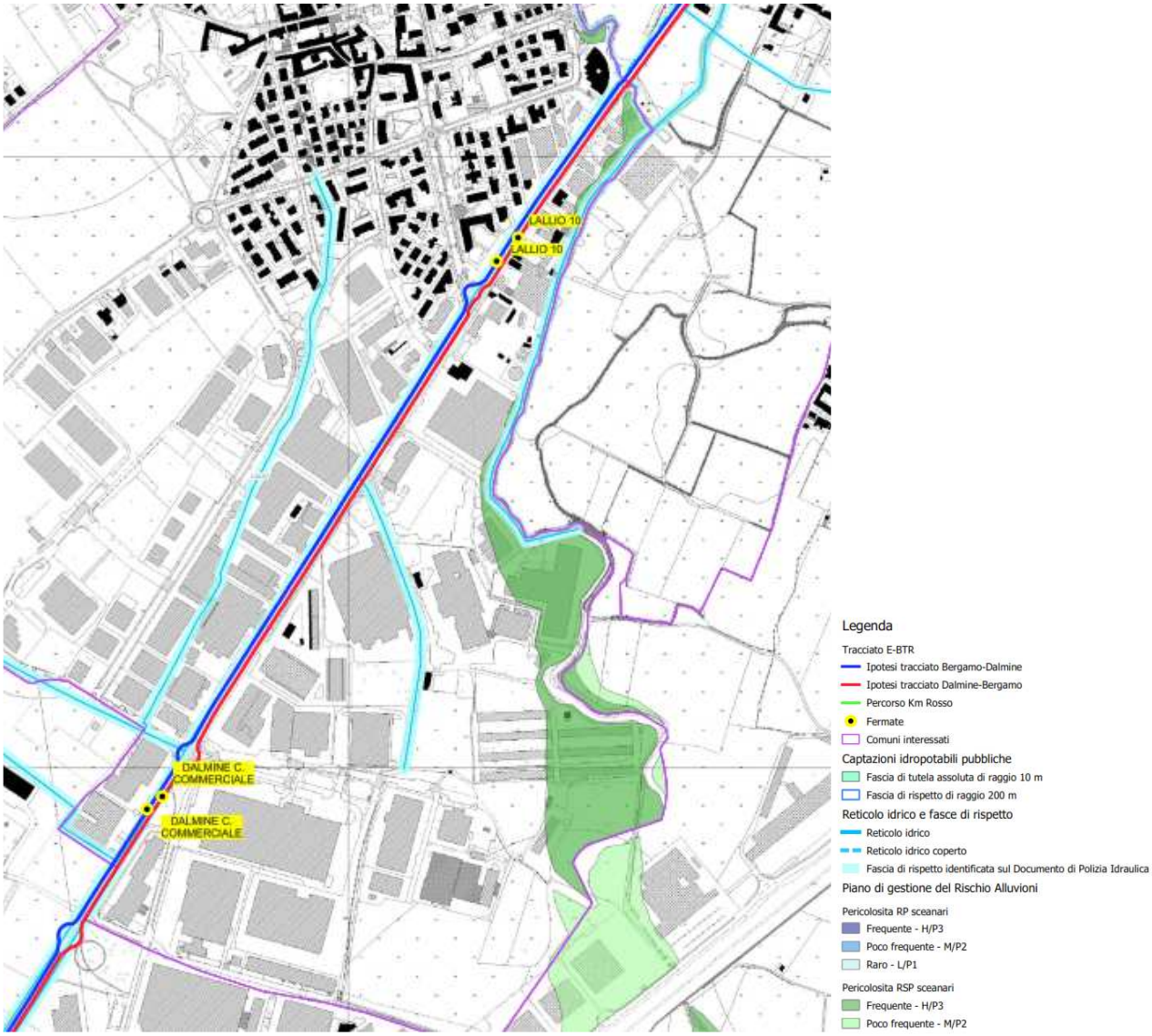
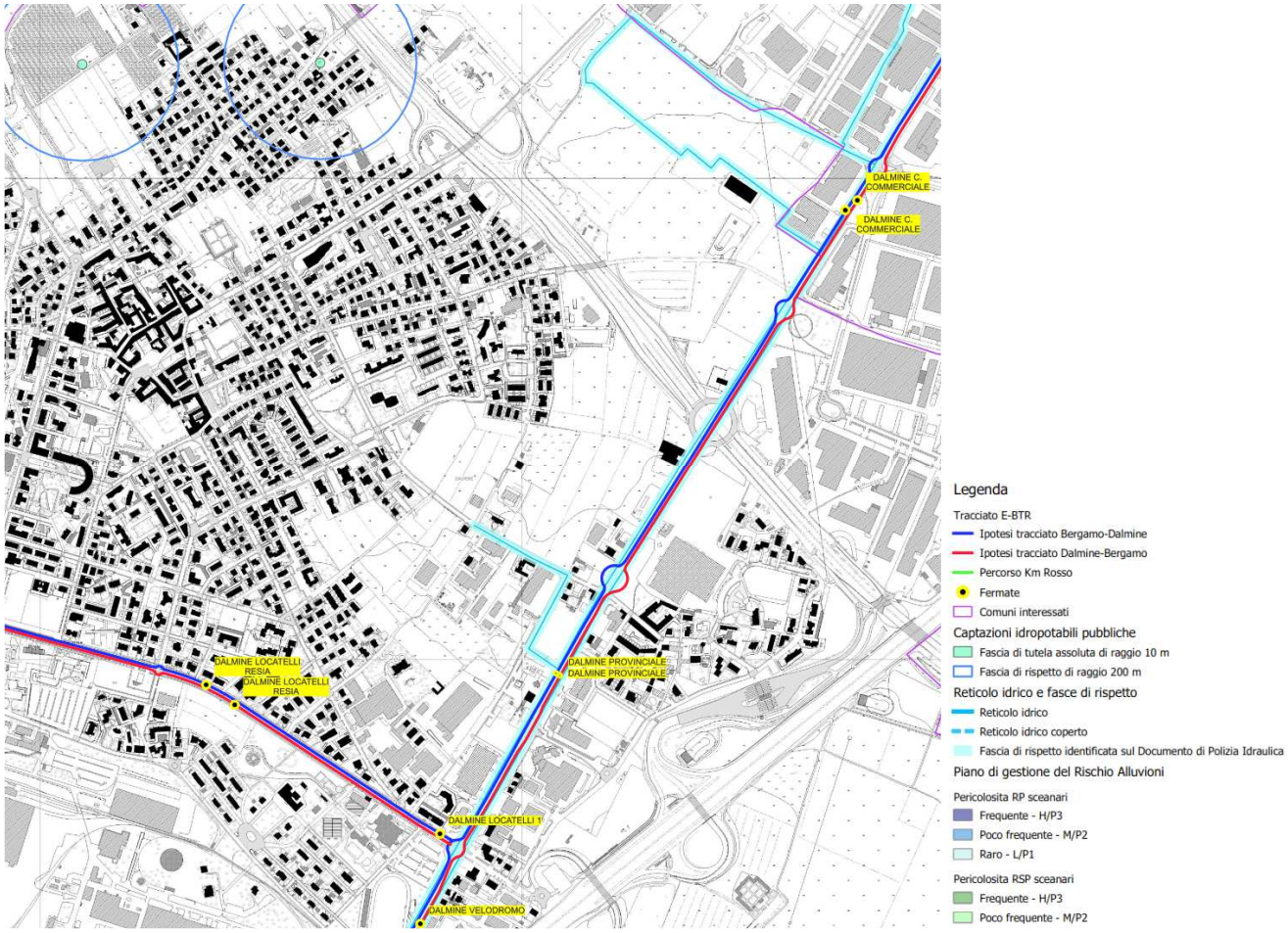


Figura 8-4 – Immagine estratta dal documento GA02.c del PFTE; Carta dei Vincoli di natura geologica, idrogeologica, idraulica (settore Lallio 10/11-Dalmine centro Commerciale)

- Comune di Dalmine: da Dalmine Centro Commerciale a Osio SIAD: interferenza tra il RIM (Roggia Colleonesca) e il nuovo tracciato in quanto la realizzazione di quest'ultimo avverrà su un nuovo tratto di viabilità, il quale prevede il tombinamento del RIM stesso; la risoluzione dell'interferenza e la soluzione progettuale da adottare verranno definite di concerno con l'Ente Gestore.


DALMINE C. COMMERCIALE
DALMINE C. COMMERCIALE
DALMINE LOCATELLI RESIA
DALMINE LOCATELLI RESIA
DALMINE PROVINCIALE
DALMINE PROVINCIALE
DALMINE LOCATELLI 1
DALMINE VELODROMO
Legenda
Tracciato E-BTR
Ipotesi tracciato Bergamo-Dalmine
Ipotesi tracciato Dalmine-Bergamo
Percorso Km Rosso
Fermate
Comuni interessati
Captazioni idropotabili pubbliche
Fascia di tutela assoluta di raggio 10 m
Fascia di rispetto di raggio 200 m
Reticolo idrico e fasce di rispetto
Reticolo idrico
Reticolo idrico coperto
Fascia di rispetto identificata sul Documento di Polizia Idraulica
Piano di gestione del Rischio Alluvioni
Pericolosita RP sceanari
Frequente - H/P3
Poco frequente - M/P2
Raro - L/P1
Pericolosita RSP sceanari
Frequente - H/P3
Poco frequente - M/P2

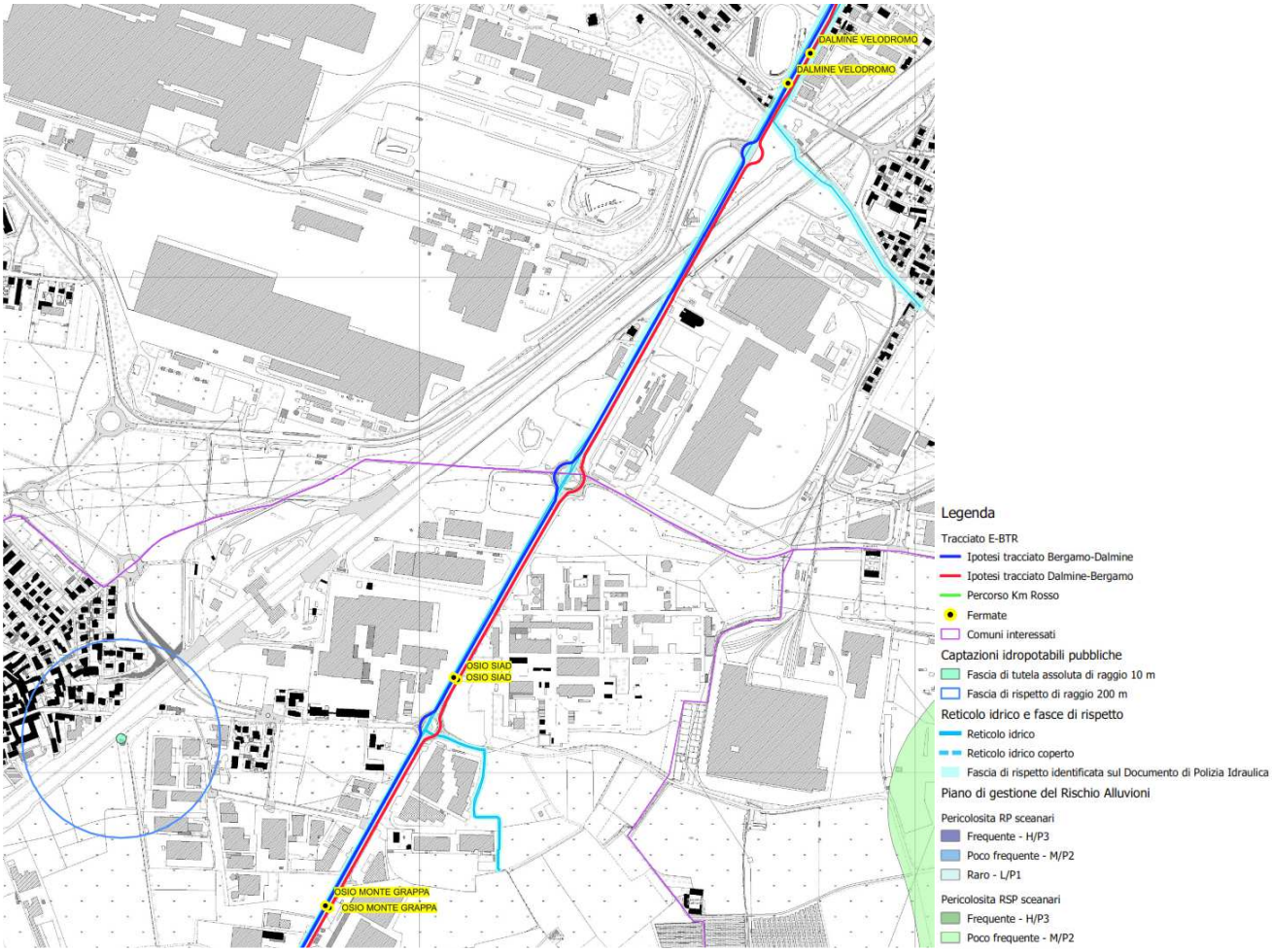


Figura 8-5 – Immagini estratte dal documento GA02.d/e del PFTE; Carta dei Vincoli di natura geologica, idrogeologica, idraulica (settore Dalmine centro Commerciale- Osio SIAD)

- Comune di Osio Sopra: da Osio SIAD fino all'altezza del Santuario Madonna della Scopa (rotatoria sulla SP525 con via G. Matteotti): interferenza tra il RIM e il nuovo tracciato in quanto la realizzazione di quest'ultimo avverrà su un nuovo tratto di viabilità, il quale prevede il tombinamento del RIM stesso; la risoluzione dell'interferenza e la soluzione progettuale da adottare verranno definite di concerno con l'Ente Gestore.

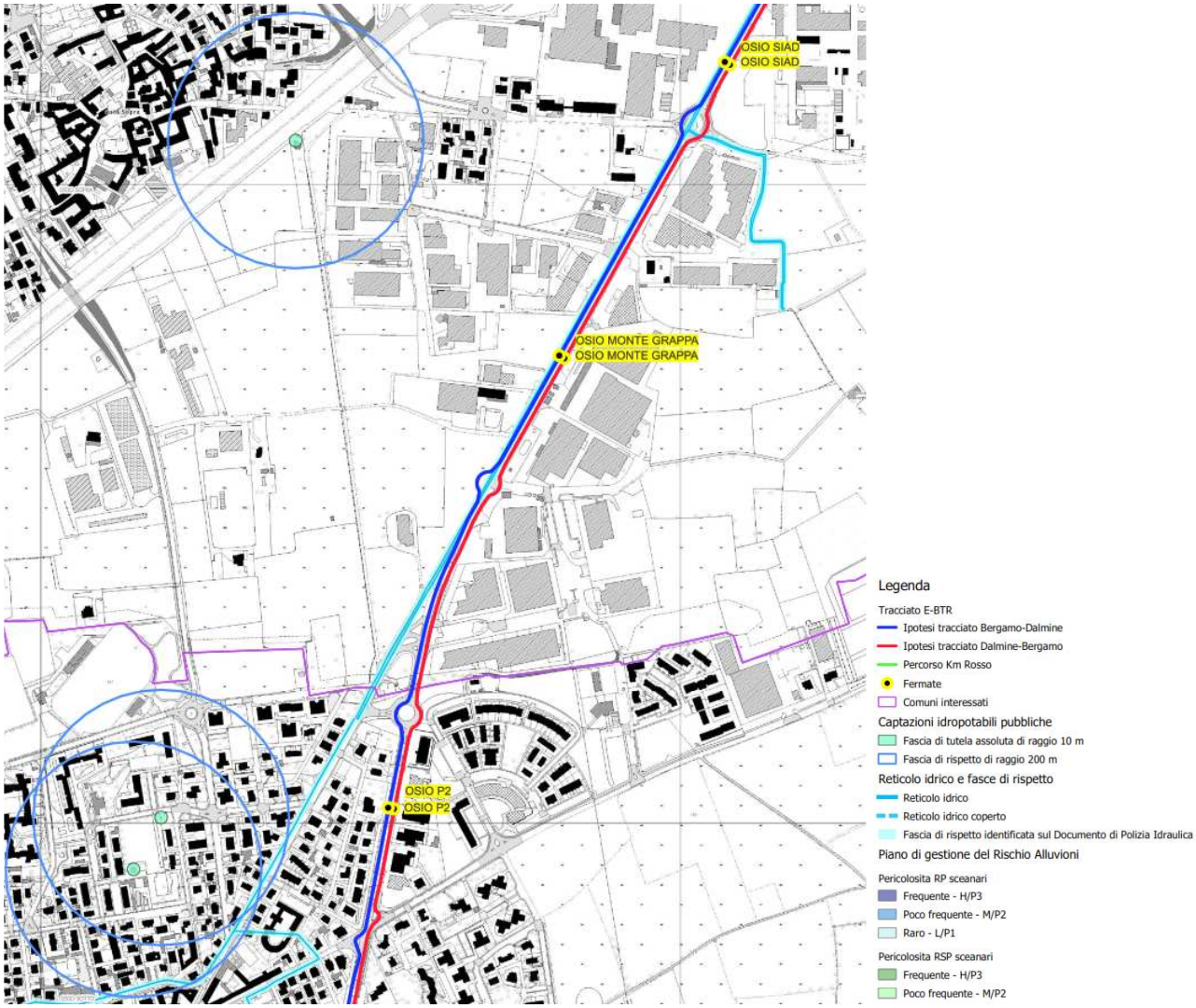


Figura 8-6 – Immagini estratte dal documento GA02.e del PFTE; Carta dei Vincoli di natura geologica, idrogeologica, idraulica (settore Osio SIAD-Osio rotatoria sulla SP525 con via G. Matteotti)

- Comune di Osio Sotto: dalla rotatoria tra la SP525 e via Verdellino. Da lì, il tracciato lascia la viabilità principale e prosegue su via Verdellino in direzione dell'omonimo comune, per cui risulta interferente con la fascia di progetto del canale che scorre parallelamente alla strada sino alle serre di proprietà dell'Az. Agricola GEAG. Non si segnalano tuttavia interferenze dirette tra il tracciato di progetto e le fasce di rispetto, in quanto il percorso sarà totalmente su strada esistente.

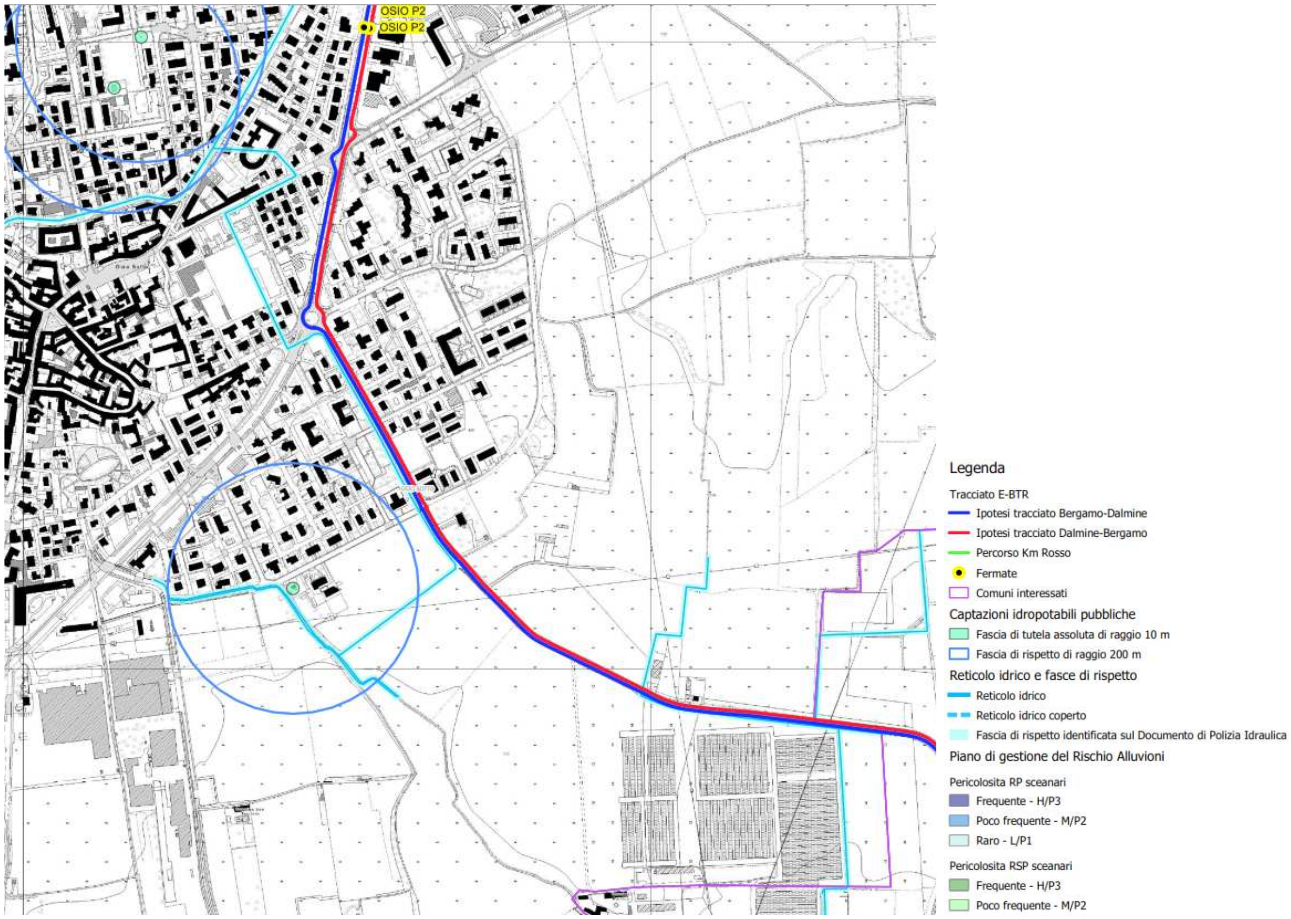


Figura 8-7 – Immagini estratte dal documento GA02.f del PFTE; Carta dei Vincoli di natura geologica, idrogeologica, idraulica (settore Osio Sotto rotatoria sulla SP525 con via G. Matteotti-Via Verdellino)

- Per Verdellino si individua un tratto di interferenza con la roggia Colleonesca nel tratto ove questa scorre parallelamente a via Dante Alighieri. Risulta inoltre una sovrapposizione con un tratto di canale dalla rotatoria di via Dante Alighieri in parallelo a via Guglielmo Marconi sino alla stazione FS. Non si segnalano tuttavia interferenze dirette tra il tracciato di progetto e le fasce di rispetto, in quanto il percorso sarà totalmente su strada esistente. Si segnala inoltre un tratto in interferenza con la fascia di rispetto del pozzo di Via Petrarca in Verdellino. Tuttavia, in tale area non sono previste opere e manufatti antropici dato che per tale sezione del tracciato la nuova linea passerà sul sedime stradale esistente, senza necessità di allargamento. Di conseguenza, il progetto risulta conforme rispetto a tale vincolo.

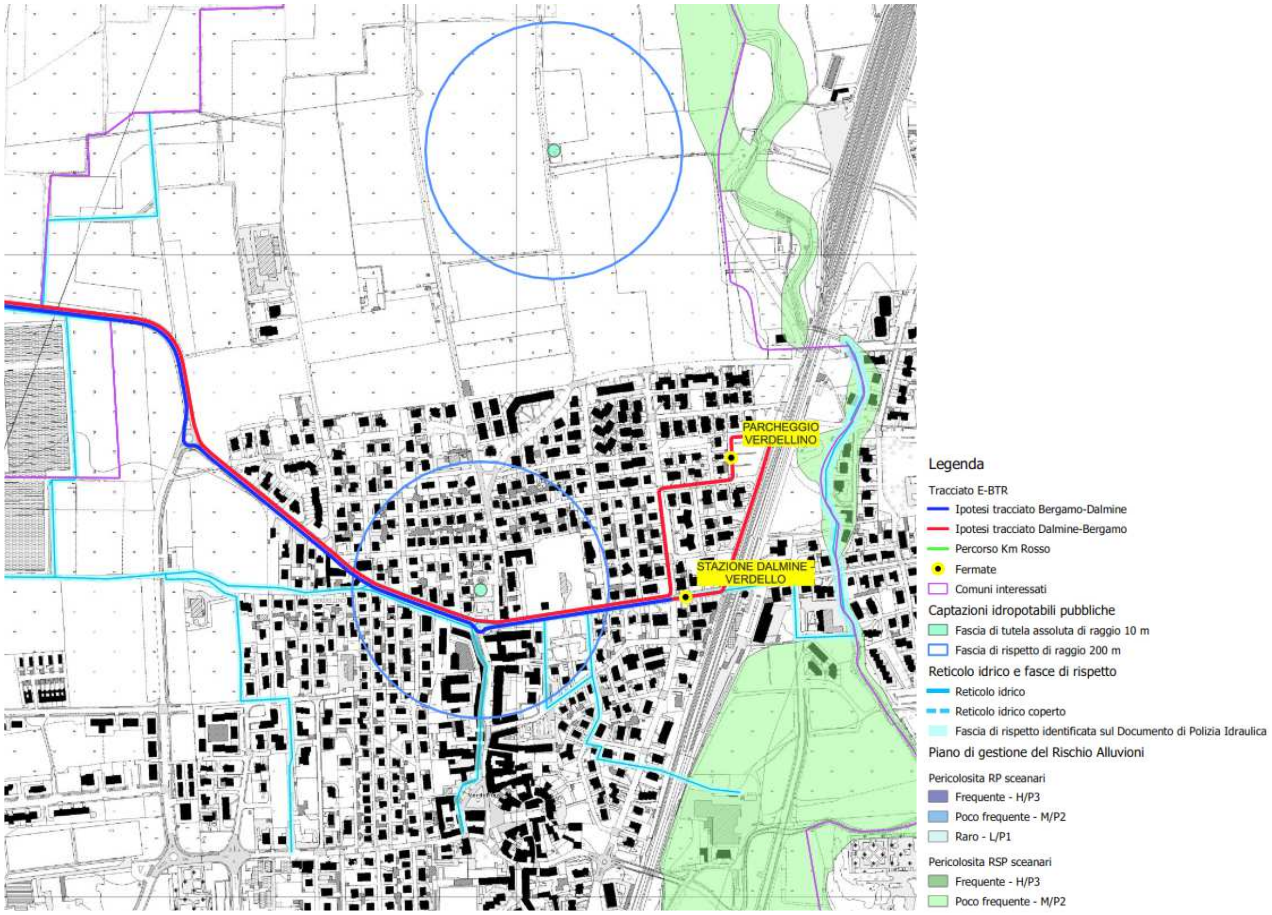


Figura 8-8 – Immagini estratte dal documento GA02.f del PFTE; Carta dei Vincoli di natura geologica, idrogeologica, idraulica (settore Verdellino Via Verdellino- Capolinea)

8.4 FATTIBILITÀ GEOLOGICA

Gli ambiti di fattibilità geologica derivati dalla sintesi degli ambiti di dissesto, idrogeologici, idraulici e geologici vengono riassunti nella cartografia digitalizzata disponibile sul Geoportale della Lombardia. La fattibilità geologica delle azioni di Piano viene definita sulla base di 4 classi principali, alle quali si aggiungono eventuali sottoclassi specifiche, a differente grado di fattibilità:

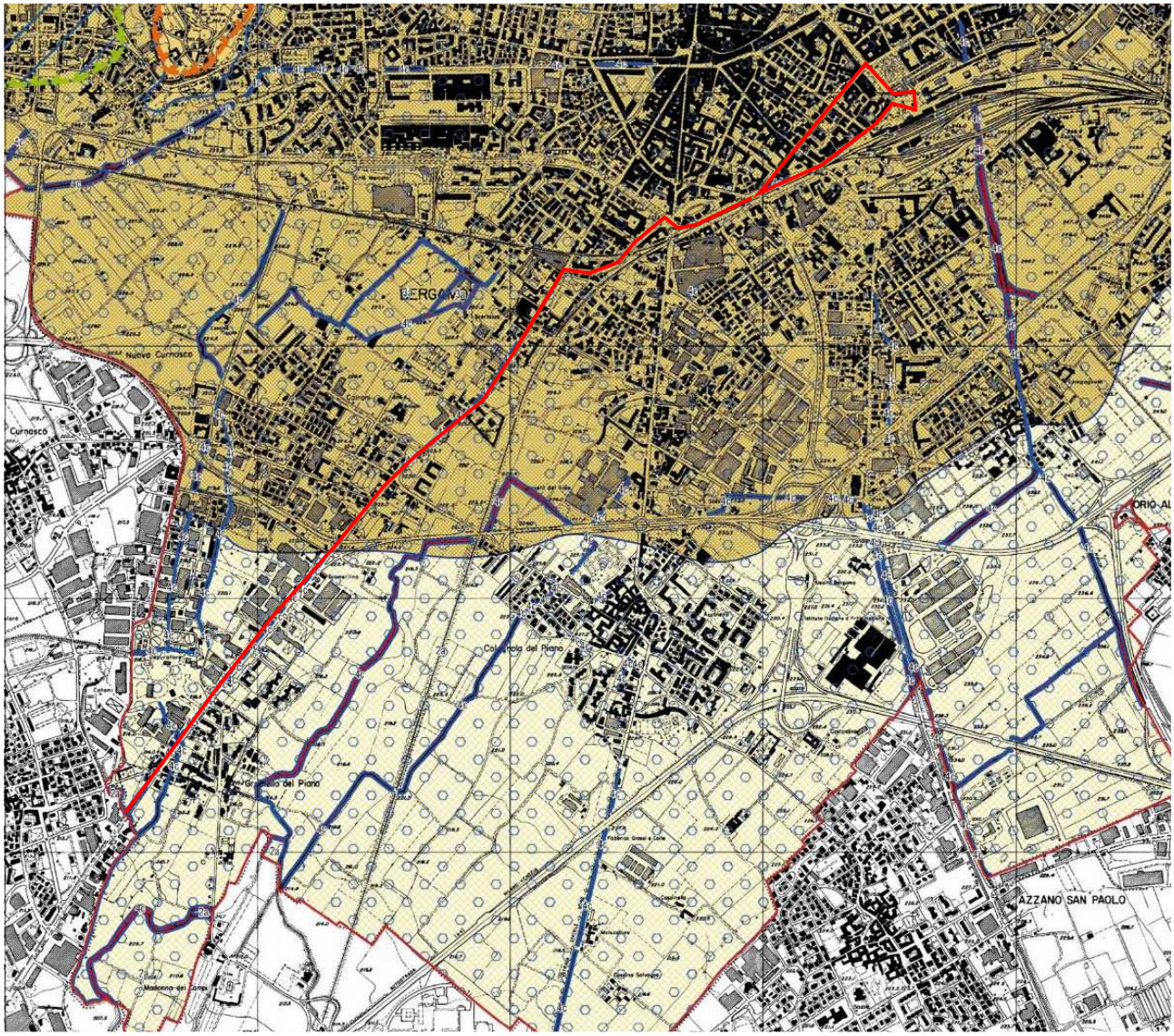
- CLASSE 1 – Fattibilità senza limitazioni;
- CLASSE 2 – Fattibilità con modeste limitazioni;
- CLASSE 3 – Fattibilità con consistenti limitazioni;
- CLASSE 4 – Fattibilità con gravi limitazioni;

Il tracciato della nuova linea E-BTR attraversi tutte e 4 le classi di fattibilità definite dalla normativa, incontrando ambiti differenti a seconda delle caratteristiche territoriali.

Di seguito, avanzando dal capolinea di Bergamo sino al capolinea di Verdellino, si descrivono gli ambiti di fattibilità riscontrati riferiti ad ogni comune interessato dal progetto.

Comune di Bergamo:

L'assegnazione delle classi di fattibilità deriva dalla Carta della Fattibilità Geologica redatta in supporto allo strumento Urbanistico nel 2011. Per quanto riguarda la fattibilità geologica, dal capolinea Stazione FS sino allo svincolo tra via Moroni e la SS671 il tracciato ricade entro la classe di fattibilità 3, con sottoclasse 3a implicante consistenti limitazioni dovute a "modeste caratteristiche geotecniche del primo sottosuolo oppure consistenti eterogeneità verticali ed orizzontali". Superato lo svincolo, sino al confine comunale con Lallio il tracciato ricade entro un ambito posto in classe di fattibilità 2, ovvero con modeste limitazioni alla fattibilità, con sottoclasse 2a legata alle discrete caratteristiche geotecniche del primo sottosuolo. Lungo il tracciato la classe 2 si alterna alla classe 4 nei tratti di interferenza con la roggia Colleonesca (sottoclasse 4c), in quanto la realizzazione dell'opera avverrà su un nuovo tratto di viabilità che prevede il tombinamento della roggia stessa; la risoluzione dell'interferenza e la soluzione progettuale da adottare verranno definite di concerno con l'Ente Gestore.



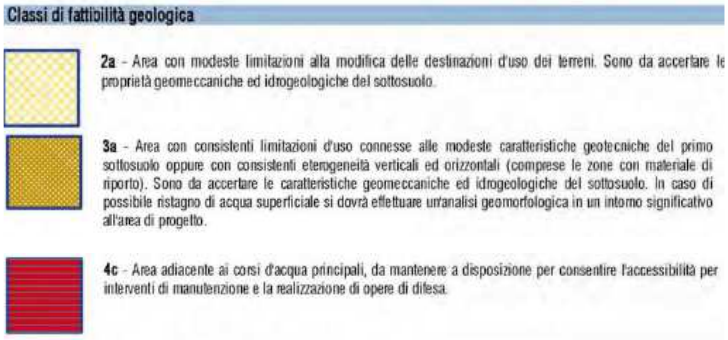


Figura 8-9 – Immagine estratta dal documento SG14abis Carta della Fattibilità Geologica delle azioni di Piano (PGT Bergamo 2011); in rosso il tracciato della nuova linea E-BRT

La normativa geologica di Piano, per le classi sopra individuate prevede le seguenti norme:

- *"Classe 3, sottoclasse 3a: Alla sottoclasse 3a appartengono, i terreni dell'alta pianura, sulla quale insiste la maggior parte dell'area urbanizzata della città bassa, e della fascia pedecollinare, formati da depositi caratterizzati da consistenti disomogeneità tessiturali laterali e verticali, da scarsa capacità di drenaggio e da una circolazione idrica subsuperficiale, nonché gli accumuli di materiale riportato. L'utilizzo delle aree ricadenti in questa sottoclasse è subordinato alla realizzazione di approfondimenti geognostici necessari per la caratterizzazione puntuale dei parametri meccanici del sottosuolo, nonché della situazione idrogeologica locale…"*
- "*Classe 2, sottoclasse 2a: Occupa la parte più meridionale del territorio della città di Bergamo per una superficie pari a circa un quarto di quella totale. L'utilizzo dei terreni ricadenti in questa sottoclasse necessita di un minimo accertamento delle proprietà meccaniche ed idrogeologiche. Tali accertamenti potranno essere realizzati mediante indagini geognostiche ad hoc oppure basarsi sulla conoscenza della situazione geologica e idrogeologica locale derivante dall'esperienza del tecnico incaricato. È previsto infatti che nel caso di costruzioni di modesto rilievo in rapporto alla stabilità dell'insieme opera – terreno, che ricadono in zone già note, la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo possa essere ottenuta per mezzo della raccolta di dati e notizie sui quali possa essere basata la progettazione…"*
- *"Classe 4, sottoclasse 4c: Nella sottoclasse 4c sono inserite le aree adiacenti ai corsi d'acqua principali che devono restare sgombre da manufatti per consentire l'accessibilità dei mezzi per gli interventi di manutenzione e la realizzazione di eventuali opere di difesa…"*

Per quanto riguarda l'interferenza con le fasce di rispetto del Reticolo Idraulico, che nel comune di Bergamo vengono oltremodo integrate come classe di fattibilità 4, è necessario specificare che:

- Trattasi sempre di interferenze con canali e rogge, per cui le portate sono controllate dall'Ente Gestore;
- Negli ambiti in cui il tracciato rimane sulla viabilità esistente, non sono necessarie valutazioni in quanto non sono previste opere che possano alterare il corso delle acque, restringere l'alveo o modificarne il regime idrico;
- Negli ambiti in cui il progetto prevede il tombinamento della Roggia Colleonesca, dovranno essere valutati gli interventi dal punto di vista idraulico.

Inoltre, in merito alle prescrizioni soprariportate, si evidenzia che è stato proposto in questa fase di Progetto Definitivo un piano delle indagini integrative che prevede anche in tale settore la realizzazione di sondaggi carotati con prove geotecniche in foro e prove di laboratorio su campioni di terreno, nonché l'installazione in foro di sondaggio di una serie di piezometri a tubo aperto per il monitoraggio dell'eventuale falda superficiale. Tale campagna indagini dovrebbe fornire tutti gli elementi utili per gli approfondimenti richiesti dal quadro normativo.

Comune di Lallio:

L'intero tracciato nel territorio di Lallio ricade nella classe di fattibilità 3, sottoclasse 3b: "scarse caratteristiche geotecniche e fenomeni di allagamento" definita nell'intorno della SP525 e probabilmente fortemente legata alla presenza della Roggia Colleonesca. Tuttavia, si precisa che, con riferimento alla normativa geologica di Piano, il termine "allagamento" viene associato esclusivamente alle aree di allagamento del torrente Morletta, come riportato nel seguito, per cui si possono escludere potenziali interferenze dirette con l'opera in progetto.

La normativa geologica di Piano, per le classi sopra individuate prevede le seguenti norme:

- *"Classe 3b - La sottoclasse 3b occupa le aree frequentemente allagabili del Torrente Morletta e le fasce di pertinenza delle rogge consortili. Gli interventi in quest'area non dovranno modificare i fenomeni idraulici naturali che possono aver luogo, né costituire significativo ostacolo al deflusso e/o limitare in maniera significativa la capacità d'invaso. A tal fine i progetti dovranno essere corredati da un'analisi di compatibilità idraulica che documenti l'assenza delle suddette interferenze o indichi i rimedi progettuali per ovviare a tale rischio…"*

Analogamente a quanto detto per il comune di Bergamo, il piano delle indagini integrative redatto in questa fase di Progetto Definitivo dovrebbe fornire tutti gli elementi utili per gli approfondimenti richiesti dal quadro normativo.

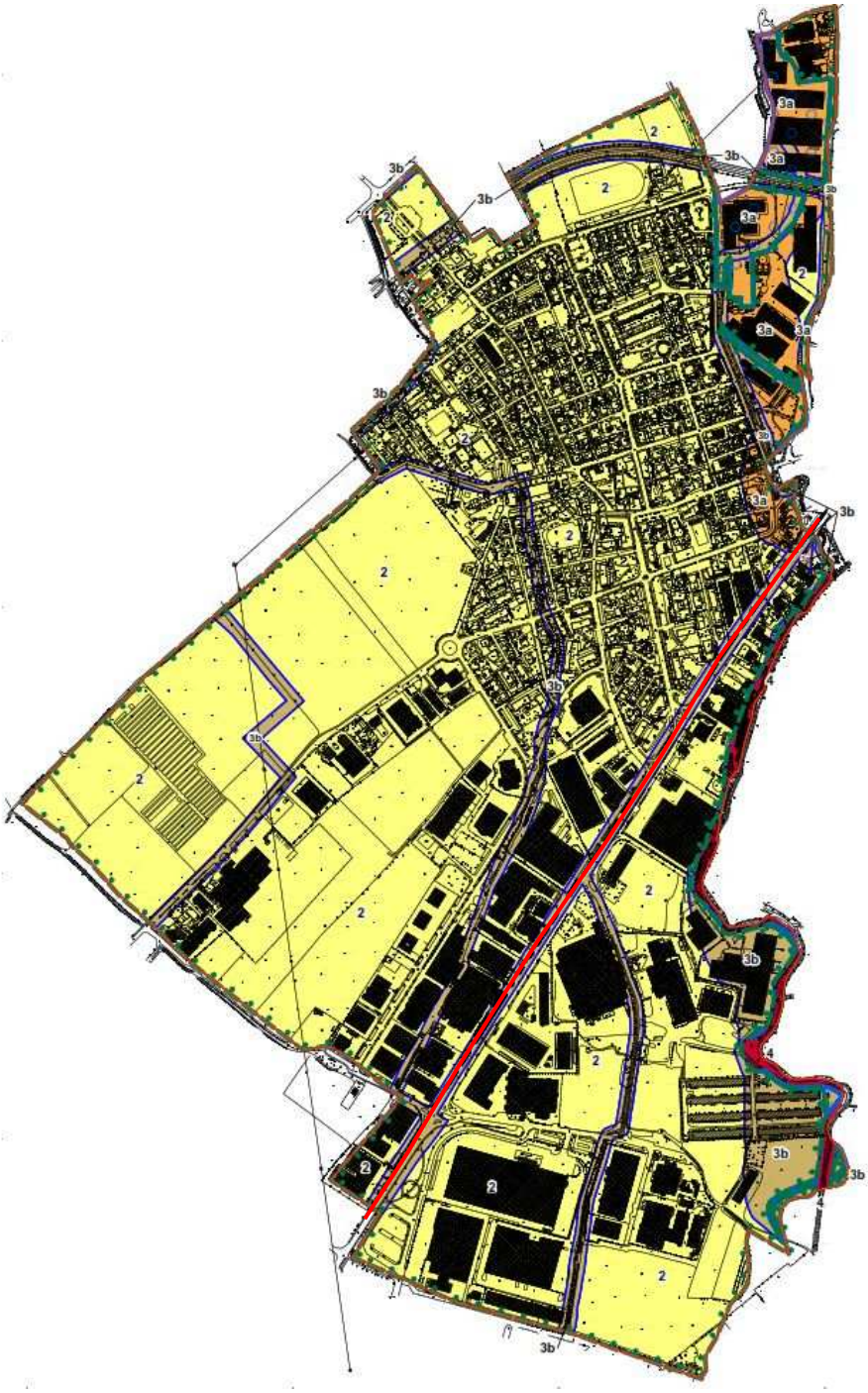


Figura 8-10 – Immagine estratta dal documento TAV.4b Carta della Fattibilità Geologica delle azioni di Piano (PGT Lallio); in rosso il tracciato della nuova linea E-BRT

Comune di Dalmine:

Per quanto riguarda il comune di Dalmine, l'intero tracciato ricade entro la classe di fattibilità 2, sottoclasse 2D "area a vulnerabilità intrinseca di grado medio" a meno di un limitato tratto posto all'altezza della rotatoria prossimo all'impianto REA Dalmine S.p.A., per cui ricade in classe di fattibilità 3, sottoclasse 3D "area a

vulnerabilità intrinseca di grado alto e elevato". Nell'ambito del PGT di Dalmine, viene data maggiore attenzione alla vulnerabilità della falda piuttosto che alle considerazioni di carattere litologico e/o geotecnico.

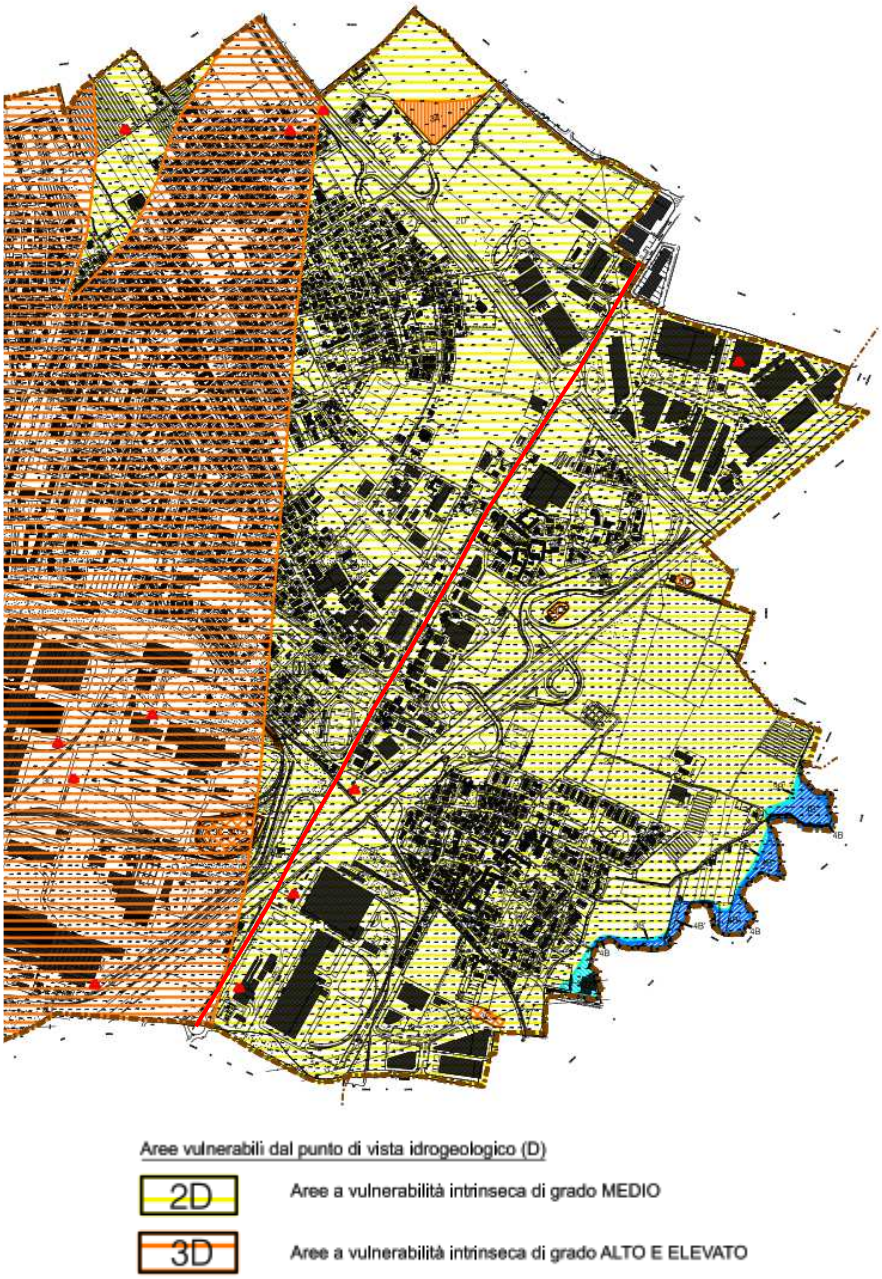


Figura 8-11 – Immagine estratta dal documento TAV.6E Carta della Fattibilità Geologica delle azioni di Piano (PGT Dalmine 2019); in rosso il tracciato della nuova linea E-BRT

La normativa geologica di Piano, per le classi sopra individuate prevede le seguenti norme:

- *"Classe 2D: Il settore orientale del territorio comunale risulta caratterizzato da una vulnerabilità della falda di grado medio; la falda freatica principale risulta profonda e abbastanza protetta dalla*

veicolazione di inquinanti provenienti dalla superficie da parte degli strati del sottosuolo sovrastanti. Prima di qualsiasi intervento dovrà essere redatta una relazione idrogeologica finalizzata alla verifica dei seguenti aspetti di potenziale vulnerabilità:

a) verifica delle eventuali interazioni negative fra le opere previste e la tutela della falda, vale a dire che l'intervento proposto non rappresenti un potenziale peggioramento delle condizioni esistenti di naturale protezione della falda;

b) verifica di compatibilità dell'intervento con la presenza di eventuali falde sospese anche se temporanee e di limitate dimensioni e quindi della potenziale interazione della struttura con esse."

- *"Classe 3D: Il settore centrale ed occidentale del territorio comunale risulta caratterizzato da una vulnerabilità della falda alta ed elevata dovuta nel settore occidentale perlopiù alla bassa soggiacenza della falda e nel settore centrale ad una scarsa protezione della stessa da parte dei sedimenti sovrastanti. Si fa presente che nella piana fluviale del Fiume Brembo la falda risulta sub superficiale con una soggiacenza anche di -1 m dal pc, mentre sul terrazzo fluviale su cui si imposta tutto l'abitato di Dalmine (settore centrale ed orientale del territorio comunale) la falda freatica ha una soggiacenza molto elevata pari a -28m - -39m dal p.c. Prima di qualsiasi intervento si dovrà pertanto redigere una relazione idrogeologica contenente l'approfondimento dei seguenti aspetti di potenziale vulnerabilità:*

  a) verifica delle eventuali interazioni negative fra le opere previste e la tutela della falda, vale a dire che l'intervento proposto non rappresenti un potenziale peggioramento delle condizioni esistenti di naturale protezione della falda;

  b) verifica di compatibilità dell'intervento con la presenza di una falda a bassa soggiacenza e quindi della potenziale interazione della struttura con la falda stessa. A tal proposito di fa presente che anche in quelle aree del territorio comunale ove la soggiacenza è elevata va comunque verificata puntualmente la presenza di eventuali falde sospese anche se temporanee e di limitate dimensioni…"

Anche per questo settore, il piano delle indagini integrative redatto in questa fase di Progetto Definitivo dovrebbe fornire tutti gli elementi utili per gli approfondimenti richiesti dal quadro normativo.

<u>Comune di Osio Sopra:</u>

Come possibile evincere dall'immagine sottostante, nel territorio comunale la progettualità ricade interamente entro la classe di fattibilità 2, sottoclasse 2Gt, ovvero con modeste limitazioni di natura geologico – geotecnica.

La normativa geologica di Piano, per le classi sopra individuate prevede le seguenti norme:

- *"Classe 2: In questa classe ricadono le aree nelle quali sono state riscontrate modeste limitazioni all'utilizzo a scopi edificatori e/o alla modifica di destinazione d'uso dei terreni; per superare le quali si rende necessario realizzare approfondimenti di carattere geologico-tecnico, idraulico o idrogeologico o l'adozione di accorgimenti tecnico-costruttivi finalizzati al superamento delle problematiche senza che sia necessaria la realizzazione di opere di difesa…"*
- *"Sottoclasse 2Gt: aree con problematiche di tipo geologico-geotecnico. La raccolta di dati stratigrafici ha consentito l'individuazione in corrispondenza del settore orientale del territorio comunale di terreni che localmente possono presentare caratteristiche geotecniche mediocri a partire dalla superficie topografica sino a profondità elevate, si tratta dei terreni appartenenti all'Unità di Brembate. In queste aree è necessaria l'effettuazione di un'approfondita campagna d'indagini geognostiche mirata all'individuazione di eventuali eterogeneità laterali e verticali."*

Anche per questo settore, il piano delle indagini integrative redatto in questa fase di Progetto Definitivo dovrebbe fornire tutti gli elementi utili per gli approfondimenti richiesti dal quadro normativo.

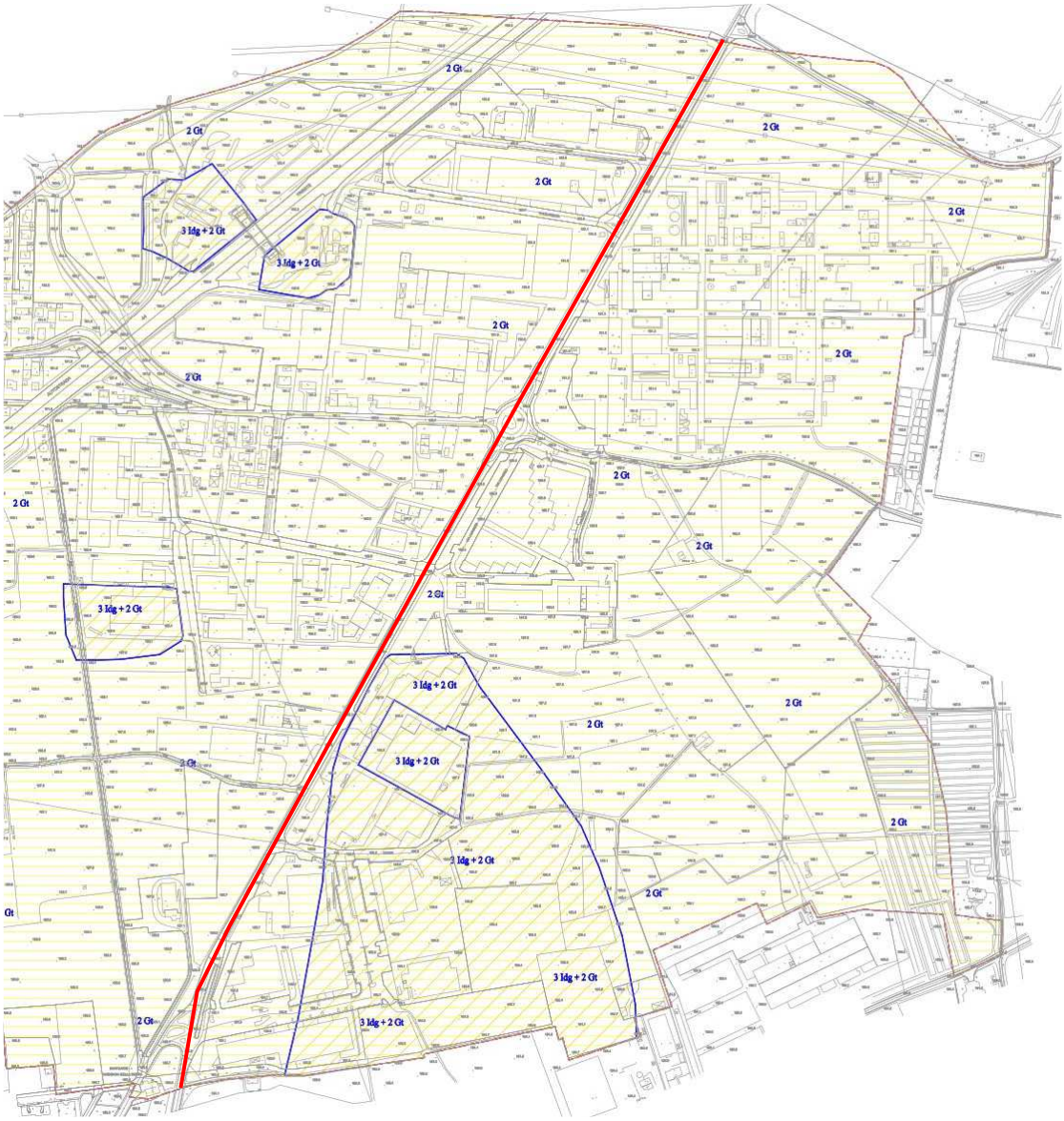


Figura 8-12 – Immagine estratta dal documento TAV.10A Carta della Fattibilità Geologica delle azioni di Piano (PGT Osio Sopra 2009); in rosso il tracciato della nuova linea E-BRT

<u>Comune di Osio Sotto:</u>

Per il comune di Osio Sotto, la componente geologica di riferimento è aggiornata all'anno 2008 e vede, per quanto riguarda il tracciato della nuova linea E-BRT, le seguenti classificazioni:

Dal confine comunale con Osio Sopra fino all'area agricola di Verdellino (oltre la villetta ubicata al civico 55) la classe di fattibilità 2, con modeste limitazioni. Dal confine occidentale dell'area di proprietà di tale villetta di via Verdellino fino circa all'altezza dell'immissione della strada di accesso all'azienda agricola GEAG, il tracciato ricade all'interno la classe di fattibilità 3, ovvero fattibilità presentante consistenti limitazioni dovute alla presenza, cartografata, di un paleoalveo fluviale. Oltre tale limite fino al confine comunale con Verdellino, ritorna la classe di fattibilità 2 con modeste limitazioni.

La normativa geologica di Piano, per le classi sopra individuate prevede le seguenti norme:

- *"Classe 2: In questa classe (non suddivisa in ambiti) valgono le norme di cui alla D.G.R. 22-12- 2005 n. 8/1566 e alla D.G.R. 28-05-2008 n. 8/7374. La classe comprende le zone nelle quali sono state riscontrate modeste limitazioni all'utilizzo a scopi edificatori e/o alla modifica della destinazione d'uso, che possono essere superate mediante approfondimenti di indagine e accorgimenti tecnicocostruttivi e senza l'esecuzione di opere di difesa. Le relazioni geologiche redatte per eventuali interventi ricadenti in questo ambito dovranno comprendere obbligatoriamente quanto riportato nell'Allegato GT ai punti: GT.1, GT.3, GT.4, GT.5, GT.6, GT.7, GT.8, GT.12, GT.15…"*
- *"Classe 3, Ambito "pf": aree di paleoalveo fluviale: In questo ambito valgono le norme di cui alla D.G.R. 22-12-2005 n. 8/1566 e alla D.G.R. 28-05-2008 n. 8/7374… Le relazioni geologiche redatte per gli interventi ricadenti in questo ambito dovranno comprendere obbligatoriamente quanto riportato nell'Allegato GT ai punti: GT.1, GT.2, GT.3, GT.4, GT.5, GT.6, GT.7, GT.8, GT.12, GT.15. In più, in considerazione delle criticità specifiche per questo ambito, sarà necessario attenersi alle seguenti indicazioni:*

    a) Ridurre il più possibile l'altezza degli sbancamenti.

    b) Valutare caso per caso l'adozione di adeguate opere provvisionali di sostegno agli scavi.

    c) Evitare tassativamente dispersioni incontrollate di acque"

Anche per questo settore, il piano delle indagini integrative redatto in questa fase di Progetto Definitivo dovrebbe fornire tutti gli elementi utili per gli approfondimenti richiesti dal quadro normativo.

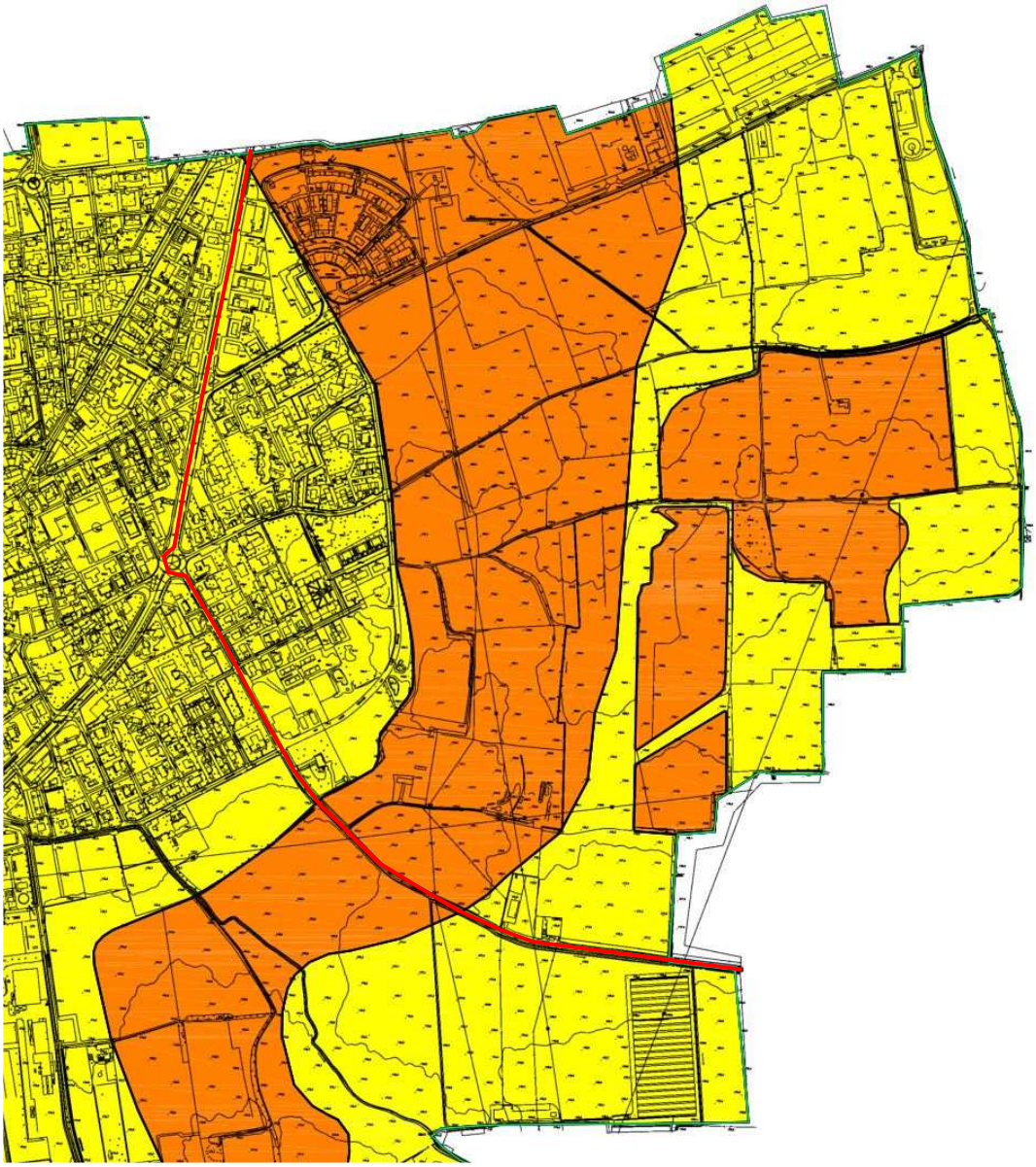


Figura 8-13 – Immagine estratta dal documento TAV.5/e Carta della Fattibilità Geologica delle azioni di Piano (PGT Osio Sotto 2008); in rosso il tracciato della nuova linea E-BRT

<u>Comune di Verdellino:</u>

La componente geologica del PGT di Verdellino, da cui derivano le prescrizioni alla fattibilità della nuova linea E-BRT, è datata 2017. Rispetto alla cartografia di fattibilità geologica, il tracciato ricade quasi interamente entro la classe di fattibilità 1, senza particolari limitazioni, a meno dell'interferenza con la fascia di rispetto per le captazioni idropotabili (fascia dei 200 m) in corrispondenza del pozzo comunale di via Petrarca (non c'è interferenza con la fascia di tutela assoluta). Tuttavia, in tale area non sono previste opere e manufatti antropici dato che per tale sezione del tracciato la nuova linea passerà sul sedime stradale esistente, senza necessità di allargamento. In generale, in ogni caso, non sono previste opere come definite all'interno dell'art. 94 "Disciplina delle aree di salvaguardia delle acque superficiali e sotterranee destinate al consumo umano" del d.lgs. 152/2006. Di conseguenza, il progetto risulta conforme rispetto a tale vincolo.

La normativa geologica di Piano, per le classi sopra individuate prevede le seguenti norme:

- *"Classe 1: In questa classe rientrano le aree per le quali gli studi non hanno individuato specifiche controindicazioni di carattere geologico-idrogeologico all'urbanizzazione, all'utilizzo a scopi edificatori e/o alla modifica di destinazione d'uso delle particelle…"*
- *"Sottoclasse 3a: Si tratta di aree che possono essere considerate particolarmente delicate e vulnerabili dal punto di vista idrogeologico. Nella cartografia sono state puntualmente individuate in carta le zone di rispetto dei pozzi ad uso umano, al cui interno valgono le limitazioni imposte dall'art. 94 del D. Lgs 3 aprile 2006 n° 152 e succ. modifiche ed integrazioni…"*

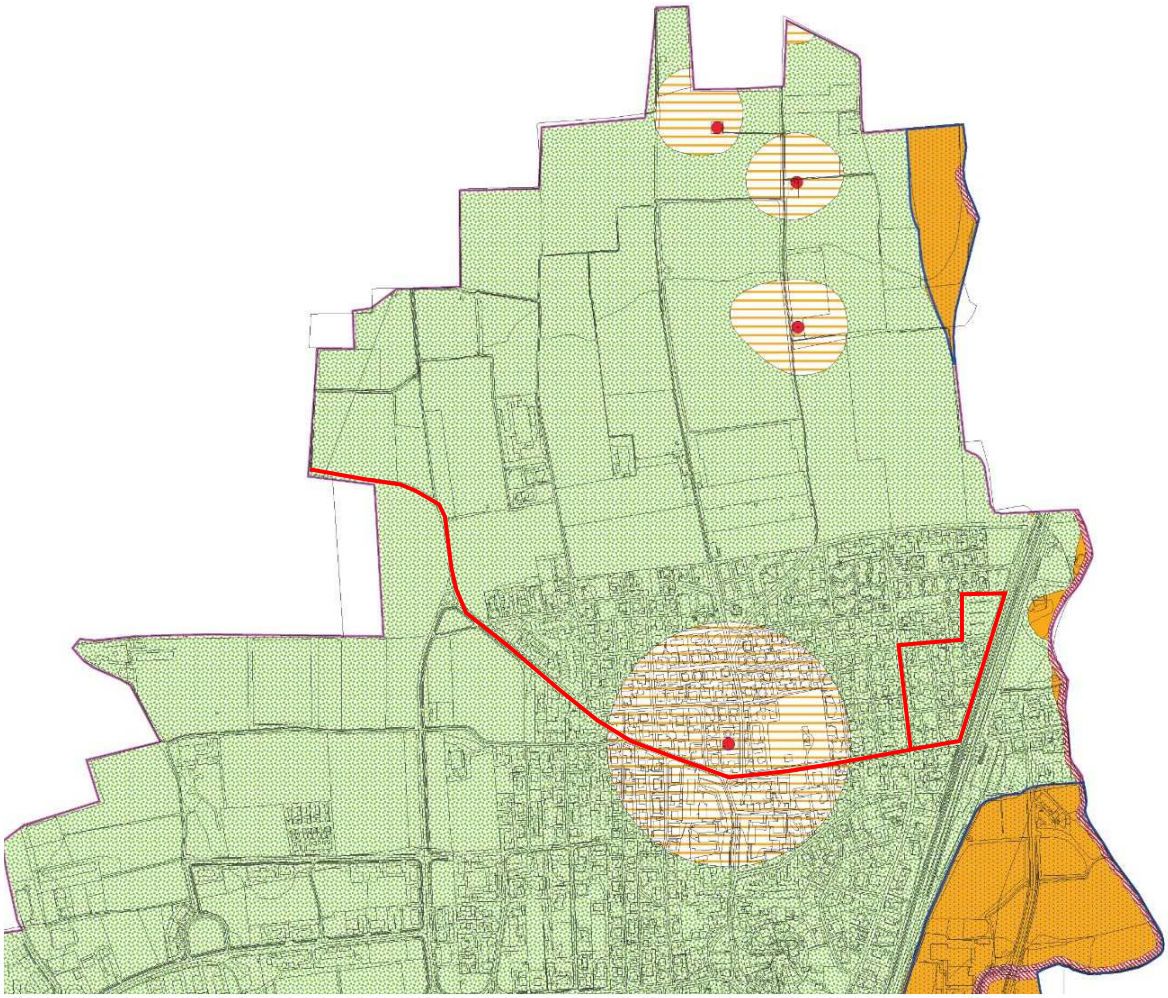


Figura 8-14 – Immagine estratta dal documento TAV.06/bis Carta della Fattibilità Geologica delle azioni di Piano (PGT Verdellino 2017); in rosso il tracciato della nuova linea E-BRT

In generale si può affermare che, per quanto riguarda le classi 2 e 3 di natura geotecnica ed idrogeologica (mediocri caratteristiche geotecniche dei terreni e vulnerabilità della falda), la normativa non pone vincoli ostativi alla realizzazione dei principali interventi in progetto, anche in considerazione del fatto che l'opera di maggiore impatto riguarda la posa delle tubazioni per il tombinamento della roggia Colleonesca, per il cui dimensionamento sarà redatto specifico studio idraulico.

In ragione delle considerazioni riportate nel presente capitolo, dal punto di vista normativo e vincolistico si ritengono le opere in progetto compatibili con il quadro di riferimento vincolistico–prescrittivo in termini geologico–tecnici ed idrogeologici.

Inoltre, si ripete che lungo tutto il tracciato è stato proposto in questa fase di Progetto Definitivo un piano delle indagini integrative che prevede la realizzazione di sondaggi carotati con prove geotecniche in foro e prove di laboratorio su campioni di terreno, nonché l'installazione in foro di sondaggio di una serie di piezometri a tubo aperto per il monitoraggio dell'eventuale falda superficiale. Tale campagna indagini dovrebbe fornire tutti gli elementi utili per gli approfondimenti richiesti dal quadro normativo.

9 SISMICITÀ

9.1 CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL TERRITORIO

Negli ultimi anni si sono succeduti diversi provvedimenti normativi ed amministrativi per la definizione delle caratteristiche di pericolosità sismica locale. Dal 1999 al 2003, la classificazione sismica del territorio nazionale era riconducibile alla mappa di classificazione sismica prodotta dal Gruppo di Lavoro (GdL, 1999), istituito dal Servizio Sismico Nazionale su indicazione della Commissione Grandi Rischi della Protezione Civile.

L'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri OPCM 3274/2003 ha rappresentato una prima risposta alle questioni aperte sulla necessità di aggiornare gli strumenti normativi per la riduzione del rischio sismico.

Con tale strumento si sono stabiliti i criteri per l'individuazione delle zone sismiche introducendo la nuova classificazione sismica dei comuni italiani (successivamente integrati e aggiornati dall'OPCM 3519/2006) ed abbandonando così la precedente terminologia di "categorie sismiche".

L'intero territorio nazionale è stato suddiviso in quattro zone sismiche sulla base di un differente valore dell'accelerazione di picco ag su terreno a comportamento rigido, derivante da studi predisposti dall'INGVDPC. Uno dei cambiamenti fondamentali apportati dalla normativa è stata l'introduzione della zona 4; procedendo in questo modo tutto il territorio italiano viene definito come sismico, poiché di fatto, sparisce il territorio "non classificato", che diviene zona 4, nella quale è facoltà delle Regioni prescrivere l'obbligo della progettazione antisismica.

	Caratteristiche	Accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (ag)
Zona 1	E' la zona più pericolosa, dove possono verificarsi forti terremoti.	ag >0.25
Zona 2	Nei comuni inseriti in questa zona possono verificarsi terremoti abbastanza forti.	0.15 <ag≤ 0.25
Zona 3	I Comuni interessati in questa zona possono essere soggetti a scuotimenti modesti.	0.05 <ag≤ 0.15
Zona 4	E' la meno pericolosa. Nei comuni inseriti in questa zona le possibilità di danni sismici sono basse.	ag ≤ 0.05

Tabella 3 – zone sismiche sulla base dei differenti valori dell'accelerazione di picco ag

Con la successiva ordinanza OPCM 3519/2006 è stata adottata la mappa di pericolosità sismica di riferimento nazionale (INGV, 2004), e sono state stabilite nuove disposizioni per l'individuazione a livello regionale delle zone sismiche su base probabilistica. I nuovi criteri per la determinazione della classificazione sismica individuano 12 fasce e sono basati, (innovando le disposizioni del precedente OPCM 3274/2003) su valori delle accelerazioni massime al suolo con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi. Tale classificazione è quindi basata su un'approssimazione dei valori e della distribuzione del parametro ag secondo i limiti amministrativi (criterio "zona dipendente").

Nel rispetto degli indirizzi e criteri stabiliti a livello nazionale, le Regioni hanno inoltre riclassificato il proprio territorio in termini di livello di pericolosità, o mantenendo le quattro zone nazionali o adottando tre sole zone (zona 1, 2 e 3) e introducendo, in alcuni casi, delle sottozone per meglio adattare le norme alle caratteristiche di sismicità.

Qualunque sia stata la scelta regionale, a ciascuna zona o sottozone è attribuito un valore di pericolosità di base, espressa in termini di accelerazione massima su suolo rigido (ag).

Allo stato attuale, tale valore di pericolosità di base non ha diretta influenza sulla progettazione. Infatti, con l'entrata in vigore delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008 e succ. DM 17/01/2018) la stima dei parametri spettrali necessari per la definizione dell'azione sismica di progetto (accelerazione del moto del suolo, intensità al sito, spettro di sito) avviene direttamente per il sito in esame, utilizzando le

informazioni disponibili nel reticolo di riferimento (riportato nella tabella 1 dell''Allegato B delle stesse NTC), indipendentemente dai limiti amministrativi comunali.

L'allegato A di tali Norme prevede inoltre che l'azione sismica di riferimento per la progettazione venga definita sulla base dei valori di pericolosità sismica proposti dall'INGV, utilizzati per determinare la forma dello spettro di risposta elastico di riferimento.

L'approccio "sito dipendente" della nuova normativa permette di riferirsi, per ogni costruzione, ad un'accelerazione di riferimento propria in relazione sia alle coordinate geografiche dell'area di progetto, sia alla vita nominale dell'opera stessa. In quest'ottica la precedente zonazione dei territori comunali mantiene la propria utilità, dal punto amministrativo, per la gestione delle attività di pianificazione e controllo.

Di seguito si riporta uno stralcio della mappa di "Classificazione Sismica" dell'Italia al 31 marzo 2022 pubblicata dalla Protezione Civile.

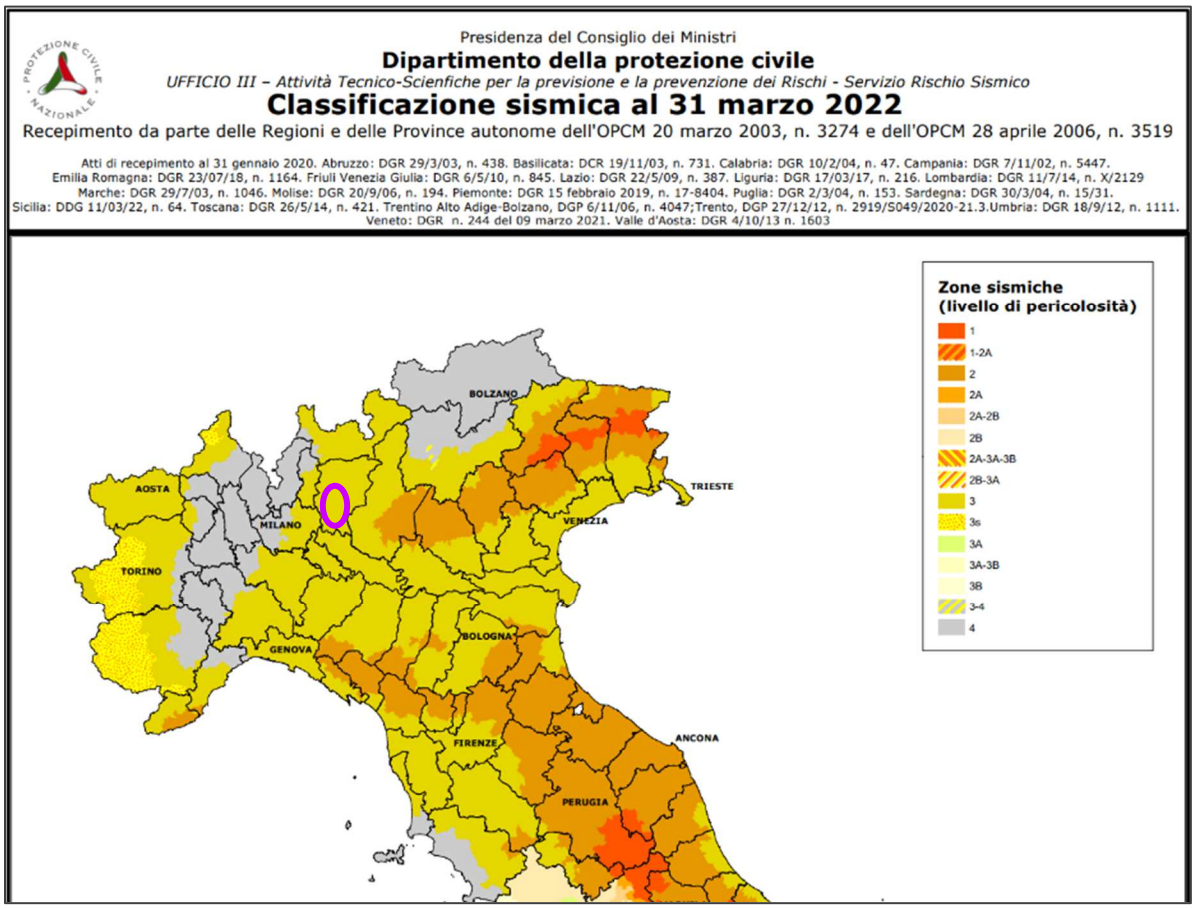


Figura 9-1 – Classificazione Sismica al 31 marzo 2022. Ellisse viola: area oggetto d'intervento

In ambito locale, la normativa nazionale è stata recepita dalla Regione Lombardia che ha approvato la delibera n. 5001 del 30 marzo 2016, che definisce le linee di indirizzo e coordinamento per l'esercizio delle funzioni trasferite ai comuni in materia sismica, ai sensi dell'art. 3, comma 1, e dell'art. 13, comma 1, della legge regionale n. 33 del 2015. La nuova zonazione sismica e la l.r. n. 33 del 2015 sono entrambe efficaci dal 10 aprile 2016.

Di seguito si riporta la "Mappa di aggiornamento della classificazione Sismica della Regione Lombardia".

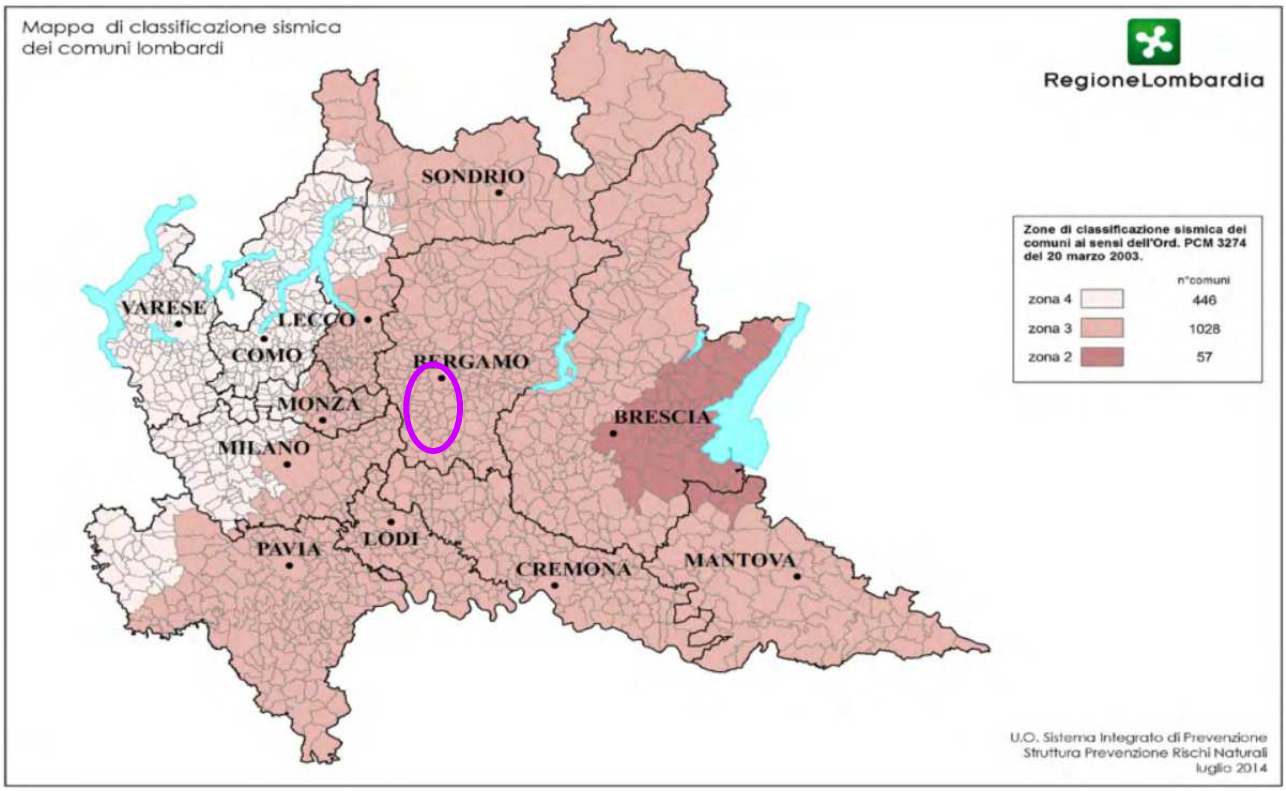


Figura 9-2 – Classificazione Sismica secondo D.G.R. 11 luglio 2014 (Fonte: Regione Lombardia). Ellisse viola: area oggetto d'intervento

In conformità alla normativa vigente, il territorio dei comuni interessati dal tracciato della nuova linea E-BRT ricade nella classe 3.

9.2 AZIONE SISMICA SI BASE

La verifica dell'operatività di un'opera necessita della definizione delle caratteristiche sismiche dell'area di progetto e delle possibili accelerazioni che le caratteristiche stratigrafiche e topografiche dell'area possono portare.

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale.

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_{gmax} in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A come definita al par. 3.2.2 delle NTC2018), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} come definite nel par. 3.2.1 delle NTC2018, nel periodo di riferimento V_R, come definito nel par. 2.4.3 delle NTC2018.

Ai fini della presente normativa le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento P_{VR} nel periodo di riferimento V_R, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

a_g accelerazione orizzontale massima al sito;

F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

T^*_C valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

L'azione sismica così individuata deve essere variata in funzione delle modifiche apportate dalle condizioni sito-specifiche (caratteristiche litologiche e morfologiche); le variazioni apportate caratterizzano la risposta sismica locale.

L'Allegato B alle citate norme fornisce le tabelle contenenti i valori dei parametri a_g, F_O e T_C* relativi alla pericolosità sismica su reticolo di riferimento, consultabile sul sito http://esse1.mi.ingv.it/.

Nelle nuove NTC18 (Decreto ministeriale del 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni", pubblicato su Gazzetta Ufficiale il 20 febbraio 2018, con entrata in vigore dal 22 marzo 2018), le azioni sismiche vengono determinate facendo riferimento ai valori di ag, F_0 e T_C* riportati nell'allegato B delle NTC08.

9.2.1 Approccio normativo

I parametri necessari per la determinazione dell'azione sismica di progetto secondo la NTC 2018 sono calcolati direttamente per il sito in esame, utilizzando le informazioni disponibili nel reticolo di riferimento riportato in forma tabellare nell'allegato B della NTC 2008, a cui fa riferimento la norma attuale (NTC 2018).

I valori al sito sono ottenuti interpolando i parametri spettrali (ag, F0, Tc*) dei 4 punti di ancoraggio nodale di un reticolo di 5km di lato, più prossimi al sito stesso mediante la seguente formula:

$$P = \sum_{i=1}^{4} \frac{Pi}{di} / \sum_{i=1}^{4} \frac{1}{di}$$

Dove:

- P = valore del parametro nel sito in esame;
- P_i = valore del parametro nell'i-esimo punto della maglia contenente il sito in esame;
- d_i = distanza del sito in esame dall'i-esimo punto della maglia.

9.2.2 Tempo di ritorno

Il valore di progetto dell'accelerazione a_g dipende dalla probabilità di superamento dell'evento sismico atteso e dalla vita utile di riferimento dell'opera, secondo la seguente espressione:

$$T_R = -V_R / \ln (1-P_{VR})$$

dove:

- T_R è il tempo di ritorno;
- V_R è il periodo di riferimento dell'opera o vita utile;
- P_{VR} è la probabilità di superamento nel periodo di riferimento.

Le probabilità di superamento PVR, per ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate nella Tabella seguente:

Stati limite		PVR
Stati limite di esercizio (SLE)	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi (SLU)	SLV	10%
	SLC	5%

Tabella 4 – Probabilità di superamento del periodo di riferimento (PVR) al variare dello stato limite considerato

9.2.3 Vita di riferimento e classe d'uso

La vita utile è definita dalla formula di norma (paragrafo 2.4.3, NTC 2018), riportata di seguito:

$$V_R = V_N \times C_U$$

Dove:

- VN è la vita nominale definita per l'opera, sulla base delle indicazioni di norma (Tab. 2.4.I, paragrafo 2.4.1 NTC 2018);
- CU è il coefficiente d'uso che dipende dalla classe d'uso dell'opera (Tab 2.4.II, paragrafo 2.4.3 NTC 2018).

Nel caso specifico, per l'opera in progetto è stata definita una classe d'uso III, secondo normativa attualmente vigente, come di seguito riportato:

- *Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.*

Alla classe d'uso III corrisponde un coefficiente d'uso C_U = 1,5.

I valori di PVR, VR e TR associati alle opere in progetto sono riportati nella Tabella sottostante, in funzione di opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale (Tipo di costruzione 2), secondo la Tab.2.4.I delle NTC18.

Tipo di costruzione	V_N [anni]	Cu	V_R	P_{VR}	T_R
2	50	1.5	75	10%	712

Tabella 5 – Valori, in funzione del periodo di riferimento (VR), dei tempi di ritorno (TR)

9.3 RISPOSTA SISMICA LOCALE

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale (ossia la modifica dell'azione sismica indotta dalle caratteristiche stratigrafiche locali e topografiche). Per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento; in particolare, si possono adottare opportuni

coefficienti moltiplicativi definiti dalle NTC2018 in funzione della categoria stratigrafica e topografica, riassunti nel fattore di sito S definito come:

$$S = S_s \cdot S_T$$

dove SS tiene conto della categoria di suolo, e ST dell'andamento della superficie topografica. Pertanto, fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo (parte di sottosuolo influenzata, direttamente o indirettamente, dalla costruzione del manufatto e che influenza il manufatto stesso), ai fini della identificazione della categoria di sottosuolo, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente Vs,eq di propagazione delle onde di taglio definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^{N} \frac{h_i}{Vs_{,i}}}$$

Dove:

- h_i = spessore dell'i-esimo strato compreso nei 30m di profondità;
- $V_{S,i}$ = velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- N = numero di strati;
- H = profondità del substrato, costituito da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da VS non inferiore a 800m/s.

Per la definizione della categoria di sottosuolo è stato fatto riferimento ad una serie di indagini geofisiche di tipo HVSR realizzate nella fase di PFTE, durante la campagna indagine del 2022, distribuite lungo tutto il tracciato di progetto. Nel dettaglio tale campagna di indagini è consistita in 30 misurazioni del microtremore sismico naturale elaborate mediante analisi HVSR alle quali si sommano 3 indagini sismiche eseguite da GEA per interventi limitrofi al tracciato della nuova linea E-BRT. I risultati delle indagini sismiche sono contenute nel Report indagini geognostiche e prove in situ facente parte della documentazione di Progetto Definitivo.

Le indagini eseguite sono state raggruppate in gruppi omogenei, che includono quelle indagini che presentano caratteristiche similari in termini sia di frequenze di picco sia di ampiezza del rapporto H/V. Sono stati così ottenuti n. 5 gruppi omogeni, a cui corrispondono altrettanti settori del tracciato, rappresentati ciascuno da un'indagine specifica assumibile come riferimento:

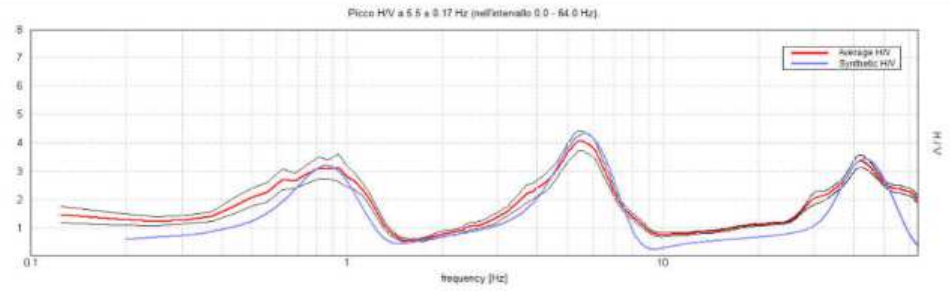
ID PROGETTO	GRUPPO OMOGENEO	RIFERIMENTO	INDAGINI CORRELATE
BG_004	NON DEFINITO		
BG_015	A	HVSR7 BG_042	BG_041, BG_048, BG_043, BG_044, BG_045. BG_046, BG_047, BG_048, BG_049
BG_017	A		
BG_033	A		
BG_034	A		
BG_038	A		
BG_042	A		
BG_051	A		
BG_058	B	HVSR10 BG_066	BG_068, BG_065. BG_067, BG_069
BG_066	B		
BG_087	C	HVSR15 DA_005	DA_012A, DA_013
LA_006	C		
LA_009	C		
LA_015	NON DEFINITO		
DA_005	C		
DA_015	C		
DA_017	C		
DA_020	C		
DA_023	D	HVSR20 DA_028	DA_025, DA_026, DA_027
DA_028	D		
OP_003	D		
OP_007	D		
OP_010	E	HVSR26 OT_012	OT_013, OT_014, OT_015
OT_001	E		
OT_006	E		
OT_012	E		
OT_020	E		
VE_001	E		
VE_003	E		
VE_008	E		

Tabella 6 – Definizione dei 5 gruppi omogenei di indagini HVSR realizzate in fase di PFTE

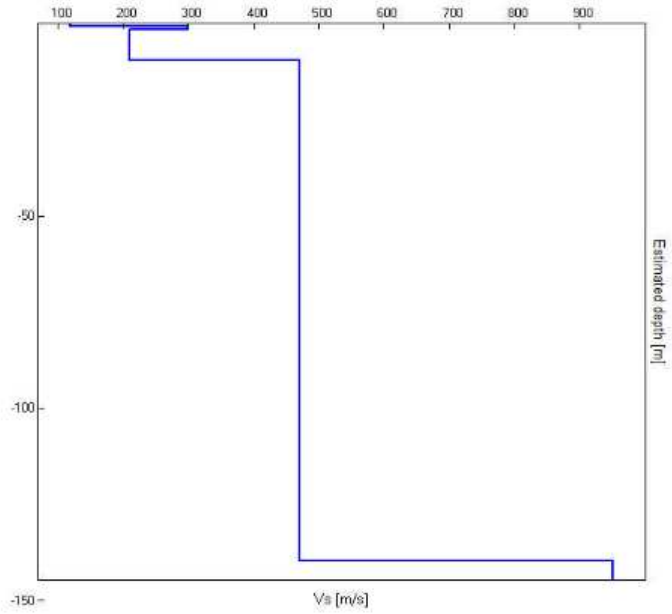
Le caratteristiche principali di ciascuno dei gruppi omogenei sono riassunte nelle figure che seguono:

Gruppo omogeneo A:

GRUPPO OMOGENEO	A	ID PROVA	HVSR7 - BG_042



PROFONDITA' (m)	SPESSORE (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	μ	γ (t/m3)
0.80	0.80	323.00	120.00	0.42	1.70
1.60	0.80	808.00	300.00	0.42	2.00
9.60	8.00	565.00	210.00	0.42	1.70
139.60	130.00	1151.00	470.00	0.40	2.10
inf	inf.	2327.00	950.00	0.40	2.40
-	-	-	-	-	-



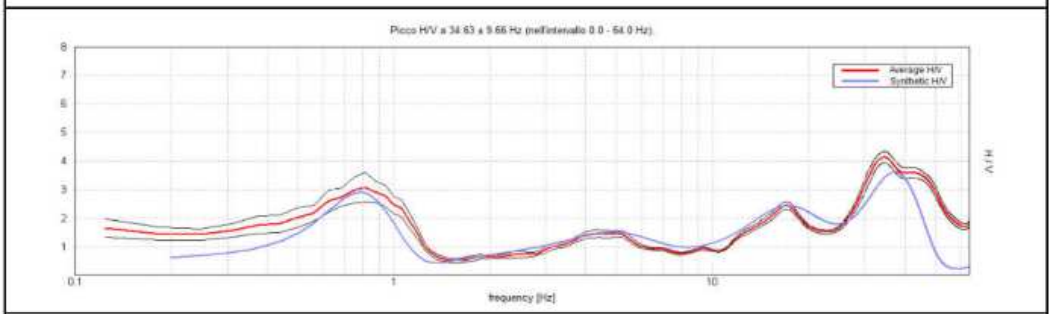
profondità bedrock sismico	139.60 m
Vs,eq	330 m/s

Figura 9-3 – Sintesi delle caratteristiche principali del gruppo omogeneo A (indagine di riferimento HVSR7 – BG_042)

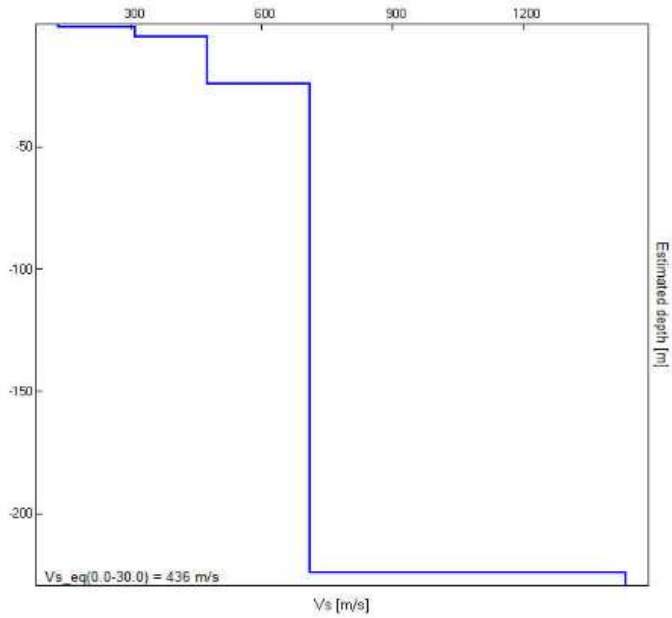
Le misure mostrano valori delle velocità delle onde trasversali di 330 m/s per cui possiamo attribuire la categoria di suolo "C" (Depositi con valori di Vs compresi tra 180 m/s e 360 m/s).

Gruppo omogeneo B:

GRUPPO OMOGENEO	B	ID PROVA	HVSR10 - BG_066



PROFONDITA' (m)	SPESSORE (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	μ	γ (t/m3)
1.00	1.00	363.00	135.00	0.42	1.70
5.20	4.20	764.00	312.00	0.40	1.90
24.20	19.00	1284.00	477.00	0.42	2.20
224.20	200.00	1920.00	713.00	0.42	2.20
inf	inf.	3867.00	1436.00	0.42	2.20
-	-	-	-	-	-



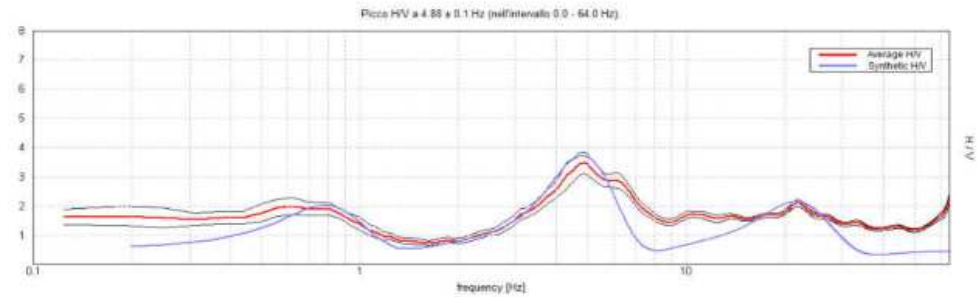
profondità bedrock sismico	224.2 m
Vs,eq	436 m/s

Figura 9-4 – Sintesi delle caratteristiche principali del gruppo omogeneo B (indagine di riferimento HVSR10 – BG_066)

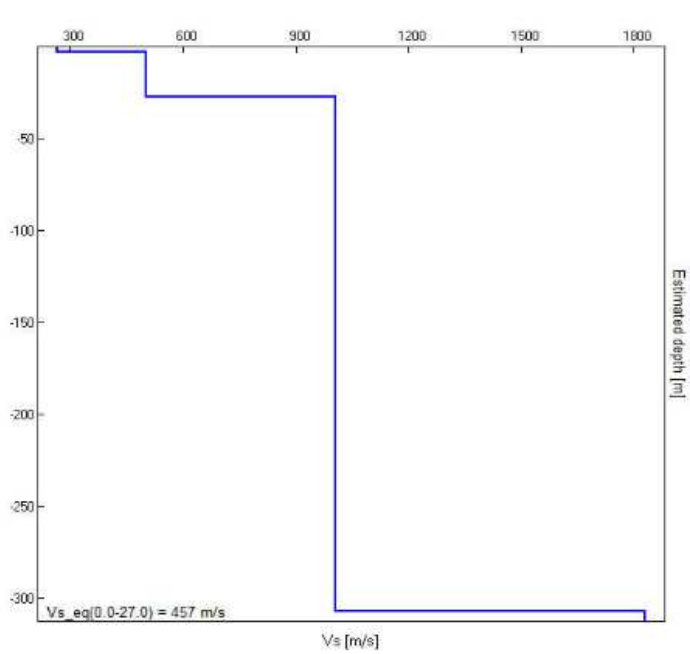
Le misure mostrano valori delle velocità delle onde trasversali di 436 m/s per cui possiamo attribuire la categoria di suolo "B" (Depositi con valori di Vs compresi tra 360 m/s e 800 m/s).

Gruppo omogeneo C:

GRUPPO OMOGENEO	C	ID PROVA	HVSR15 - DA_005



PROFONDITA' (m)	SPESSORE (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	μ	γ (t/m3)
3.00	3.00	711.00	264.00	0.42	1.80
27.00	24.00	1354.00	503.00	0.42	2.00
307.00	280.00	2711.00	1007.00	0.42	2.20
inf	inf.	4930.00	1831.00	0.42	2.20
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-



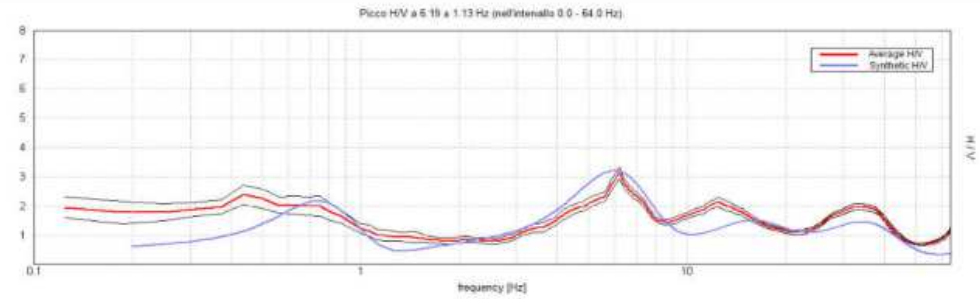
profondità bedrock sismico	27.0 m
Vs,eq	457 m/s

Figura 9-5 – Sintesi delle caratteristiche principali del gruppo omogeneo C (indagine di riferimento HVSR15 – DA_005)

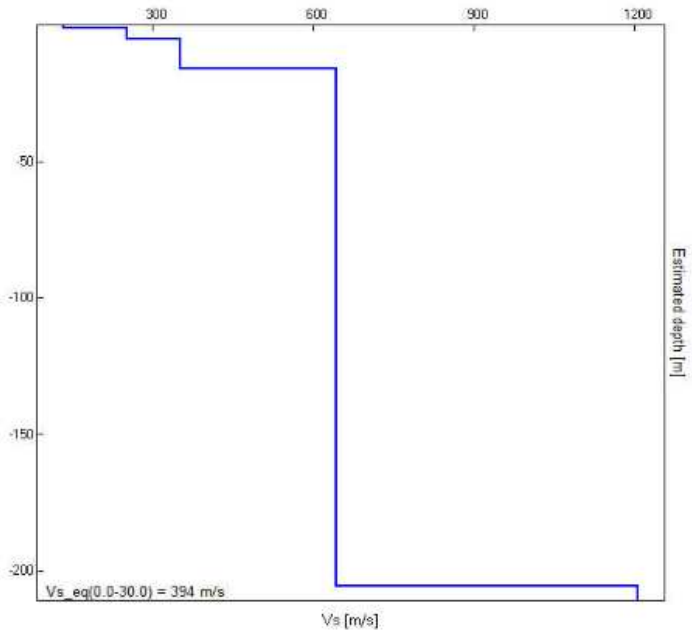
Le misure mostrano valori delle velocità delle onde trasversali di 457 m/s per cui possiamo attribuire la categoria di suolo "B" (Depositi con valori di Vs compresi tra 360 m/s e 800 m/s).

Gruppo omogeneo D:

GRUPPO OMOGENEO	D	ID PROVA	HVSR20 - DA_028



PROFONDITA' (m)	SPESSORE (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	μ	γ (t/m3)
1.00	1.00	363.00	135.00	0.42	1.70
4.90	3.90	681.00	253.00	0.42	1.80
15.90	11.00	945.00	351.00	0.42	2.20
205.90	190.00	1731.00	643.00	0.42	2.20
inf.	inf.	3247.00	1206.00	0.42	2.50
-	-	-	-	-	-



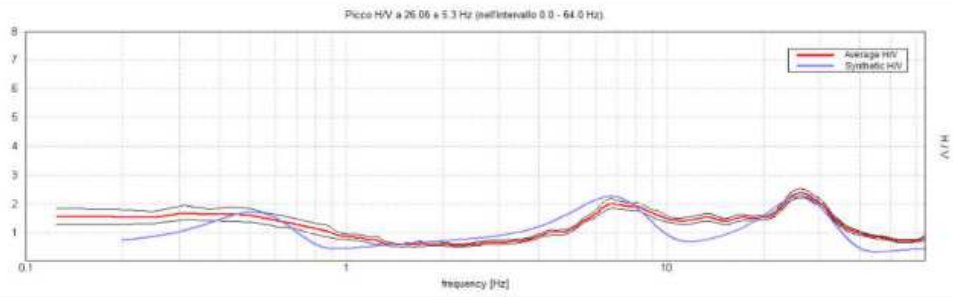
profondità bedrock sismico	205.9.0 m
Vs,eq	394 m/s

Figura 9-6 – Sintesi delle caratteristiche principali del gruppo omogeneo D (indagine di riferimento HVSR20 – DA_028)

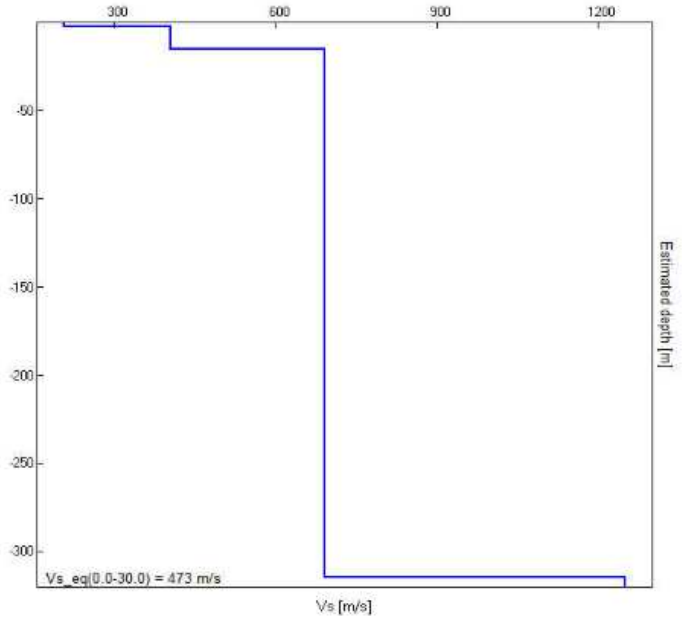
Le misure mostrano valori delle velocità delle onde trasversali di 394 m/s per cui possiamo attribuire la categoria di suolo “B” (Depositi con valori di Vs compresi tra 360 m/s e 800 m/s).

Gruppo omogeneo E:

GRUPPO OMOGENEO	E	ID PROVA	HVSR26 - OT_012



PROFONDITA' (m)	SPESSORE (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	μ	γ (t/m3)
2.00	2.00	557.00	207.00	0.42	1.80
15.00	13.00	1090.00	405.00	0.42	2.00
315.00	300.00	1863.00	692.00	0.42	2.20
inf.	inf.	3366.00	1250.00	0.42	2.20
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-



profondità bedrock sismico	315 m
Vs,eq	473 m/s

Figura 9-7 – Sintesi delle caratteristiche principali del gruppo omogeneo E (indagine di riferimento HVSR26 – OT_012)

Le misure mostrano valori delle velocità delle onde trasversali di 473 m/s per cui possiamo attribuire la categoria di suolo "B" (Depositi con valori di Vs compresi tra 360 m/s e 800 m/s).

Da quanto sopra riportato emerge come la classe di sottosuolo più rappresentativa dell'intero tracciato in progetto sia la classe B, mentre nella porzione settentrionale in comune di Bergamo è necessario associare la classe di sottosuolo C, con una corrispondenza abbastanza lineare con quanto osservato all'interno della carta della fattibilità geologica per le azioni di Piano del Comune di Bergamo, in cui nel primo tratto veniva posta una certa attenzione alle scadenti caratteristiche geotecniche del sottosuolo (capitolo 8.4).

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina 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.
C	*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina 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.
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina 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.
E	*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.

Tabella 7 – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato (da §3.2. 2 delle NTC 2018)

Il coefficiente di amplificazione stratigrafica S_S del sito è esprimibile come segue (vedi §3.2.3.2.1 delle NTC 2018), per ogni categoria di suolo:

Categoria sottosuolo	S_S	C_C
A	1,00	1,00
B	$1{,}00 \le 1{,}40 - 0{,}40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1{,}20$	$1{,}10 \cdot (T_C^*)^{-0{,}20}$
C	$1{,}00 \le 1{,}70 - 0{,}60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1{,}50$	$1{,}05 \cdot (T_C^*)^{-0{,}33}$
D	$0{,}90 \le 2{,}40 - 1{,}50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1{,}80$	$1{,}25 \cdot (T_C^*)^{-0{,}50}$
E	$1{,}00 \le 2{,}00 - 1{,}10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1{,}60$	$1{,}15 \cdot (T_C^*)^{-0{,}40}$

Tabella 8 – Valori di Ss da Tabella 3.2.IV NTC 2018

9.3.1 Definizione della categoria topografica

In merito al coefficiente di amplificazione topografica, trattandosi di una tratta praticamente pianeggiante, è stata assunta la categoria topografica T1 (Tabb. 3.2.III e 3.2.V - NTC 2018, riportate in Tabella 9).

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media i ≤ 15°
T2	Pendii con inclinazione media i > 15°
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media 15° ≤ i ≤ 30°
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media i > 30°

Tab. 3.2.V – *Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica* S_T

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Tabella 9 – Valori di S_T da tabelle NTC 2018

9.3.2 Valori dei parametri dell'azione sismica di base

Concordemente a quanto fatto in fase di PFTE ai fini della determinazione dei parametri sismici di base, il tracciato è stato suddiviso in 4 tratte della maglia specifica:

- il primo tratto, dal capolinea della stazione FS di Bergamo fino all'incrocio con via Grumello;
- il secondo tratto, tra l'incrocio con via Grumello in Bergamo e la rotonda di Via Aldo Moro in Lallio;
- il terzo tratto, tra la rotonda di Via Aldo Moro in Lallio e la rotonda della chiesetta del Santuario della Madonna della Scopa, in Osio Sotto,
- il quarto ed ultimo tratto, tra la rotonda ed il capolinea di Verdellino presso il parcheggio della stazione FS.

Nelle figure seguenti si riportano i 4 tratti con l'individuazione secondo la maglia di attribuzione dei parametri sismici di base determinati con GeoStru PS.

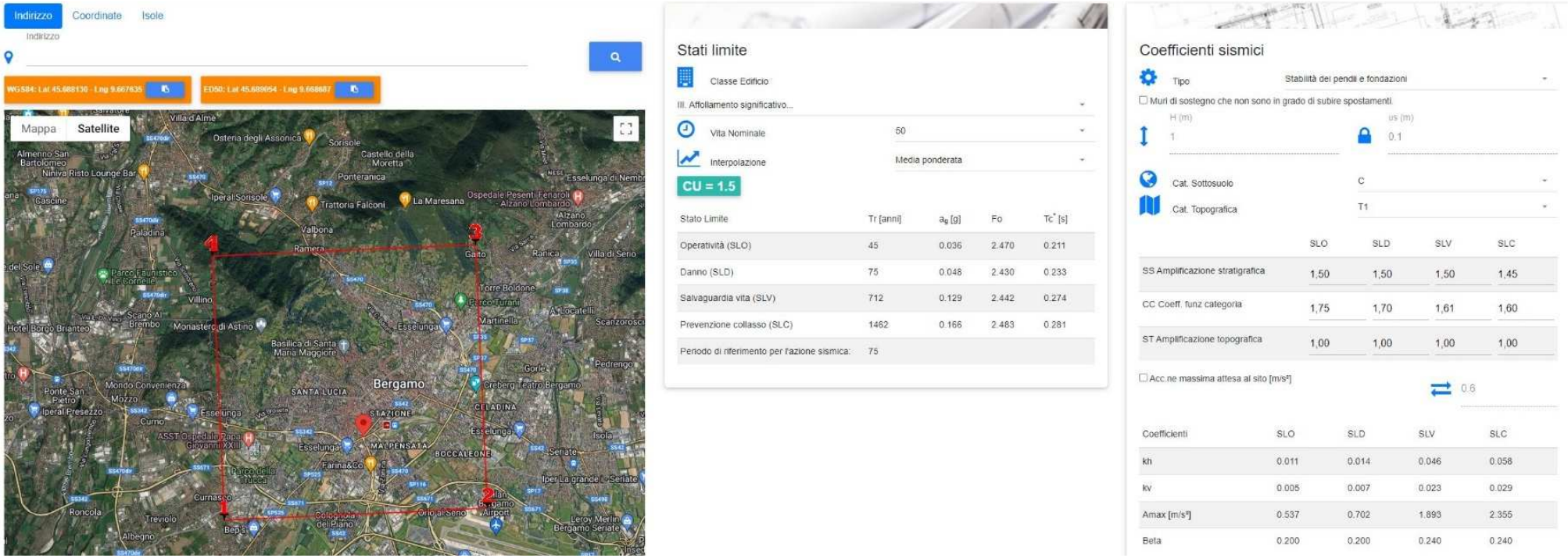


Figura 9-8 – Parametri sismici primo tratto

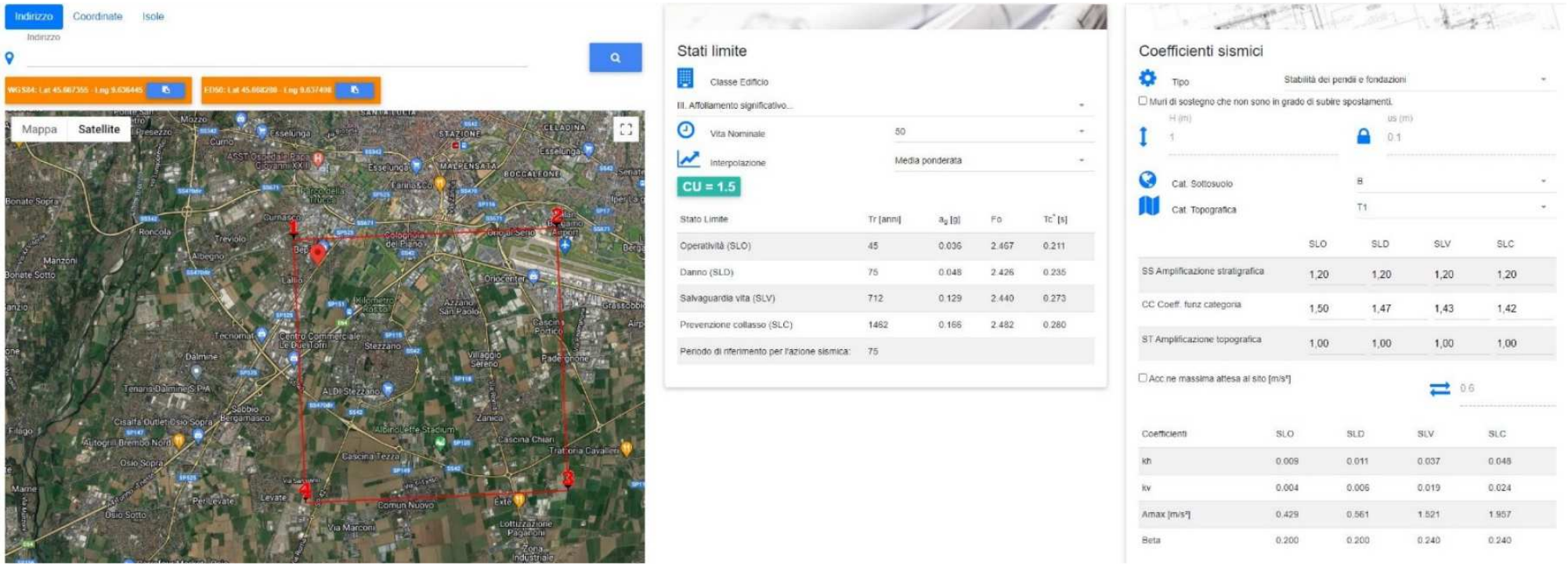


Figura 9-9 – Parametri sismici secondo tratto

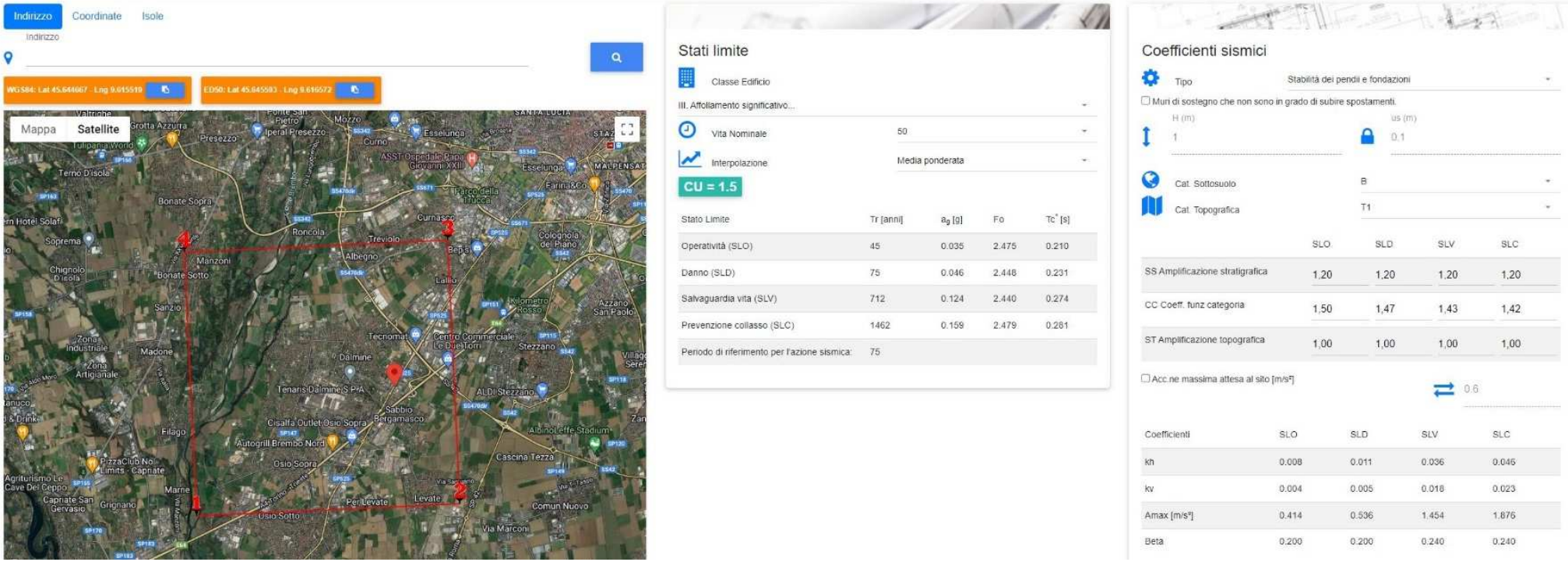


Figura 9-10 – Parametri sismici terzo tratto

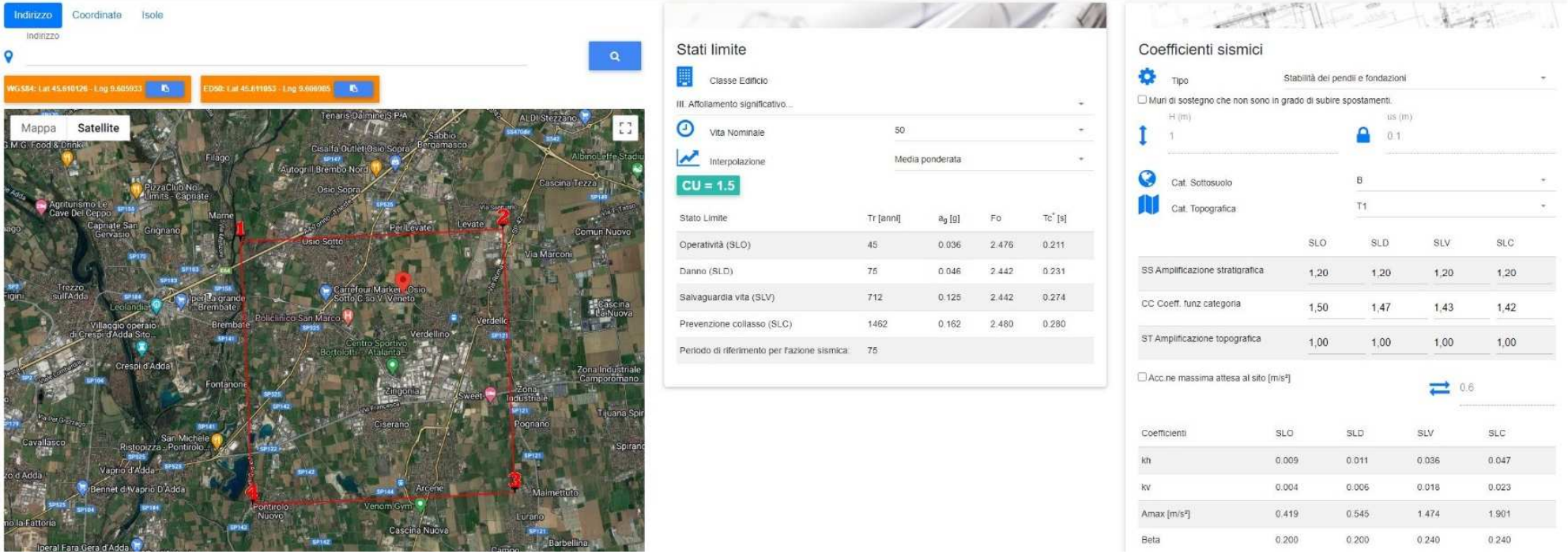


Figura 9-11 – Parametri sismici quarto tratto

9.4 EFFETTI SISMICI LOCALI

Al fine di sviluppare una metodologia di valutazione dell'amplificazione sismica locale in adempimento alle nuove normative nazionali, la Regione Lombardia ha predisposto uno studio pilota, elaborato dal Politecnico di Milano – Dipartimento di Ingegneria Strutturale, basato sull'analisi di indagini dirette e prove sperimentali effettuate in aree campione del territorio regionale. Tale metodologia, esaustivamente descritta nell'Allegato 5 della D.G.R. IX/2616, prevede studi basati su tre livelli di approfondimento crescente organizzati come da Figura 9-12 che mostra il diagramma di flusso, che illustra i dati necessari e i percorsi da seguire.

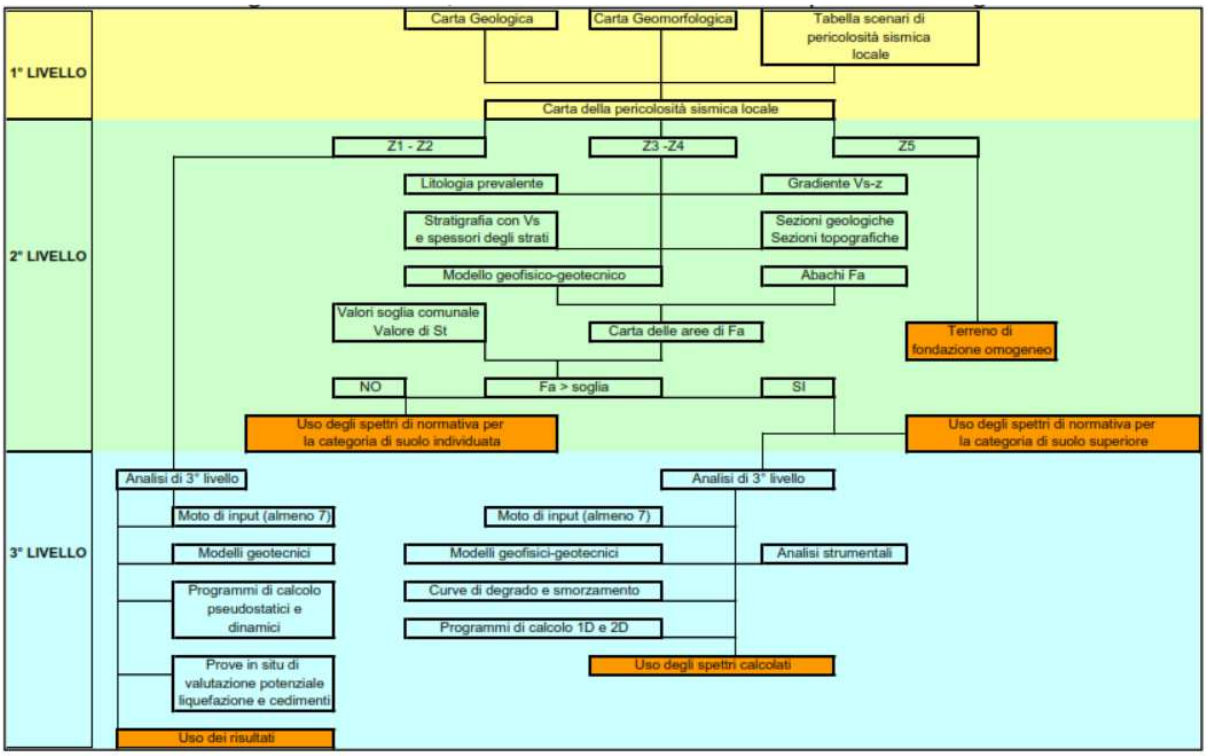


Figura 9-12 – Diagramma di flusso dei dati necessari e dei percorsi da seguire nei tre livelli di indagine (da D.G.R. IX/2616)

Nel dettaglio:

- Il 1° livello, obbligatorio per tutti i comuni, consiste in una zonazione del territorio comunale in aree a diverso grado di pericolosità sismica locale, sulla base degli elementi geologici e geomorfologici presenti, nonché la redazione di una Carta della Pericolosità Sismica Locale (PSL) contenente tali perimetrazioni.

Sigla	SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	EFFETTI
Z1a	Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi	Instabilità
Z1b	Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti	
Z1c	Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio di frana	
Z2a	*Zone con terreni di fondazione saturi particolarmente scadenti (riporti poco addensati, depositi altamente compressibili, ecc.)*	*Cedimenti*
Z2b	*Zone con depositi granulari fini saturi*	*Liquefazioni*
Z3a	Zona di ciglio H > 10 m (scarpata, bordo di cava, nicchia di distacco, orlo di terrazzo fluviale o di natura antropica, ecc.)	Amplificazioni topografiche
Z3b	Zona di cresta rocciosa e/o cocuzzolo: appuntite - arrotondate	
Z4a	Zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi	Amplificazioni litologiche e geometriche
Z4b	Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre	
Z4c	Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (compresi le coltri loessiche)	
Z4d	Zone con presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio-colluviale	
Z5	Zona di contatto stratigrafico e/o tettonico tra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche molto diverse	Comportamenti differenziali

Tabella 10 – Scenari di pericolosità sismica locale (da D.G.R. IX/2616)

- Il 2° livello si applica in base alle risultanze del livello 1° ed in relazione alla classificazione sismica del Comune e prevede un approccio semiquantitativo per valutare quali sono gli effetti di amplificazione attesi;
- Il 3° livello è un approccio quantitativo e corrisponde ad un'analisi di risposta sismica locale, si effettua nelle seguenti situazioni:
    - per le aree suscettibili di amplificazioni sismiche (Z3 e Z4) che sono caratterizzate da un valore Fa (fattore di amplificazione) superiore al valore soglia corrispondente così come ricavato dall'applicazione del 2° livello;
    - per aree caratterizzate da effetti di instabilità (Z1b e Z1c);
    - per aree caratterizzate da cedimenti e/o liquefazione (Z2);
    - per aree caratterizzate da contatto stratigrafico e/o tettonico tra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche molto diverse (Z5);
    - per la progettazione di edifici strategici-rilevanti.

Dall'analisi del tracciato con gli ambiti di PSL, si evince che tutto il tracciato della nuova linea E-BRT ricade all'interno della classe di amplificazione sismica locale Z4a, riferita a potenziali amplificazioni litologiche e geometriche in un contesto di piana alluvionale con presenza di depositi granulari e/o coesivi.

Di conseguenza, in funzione della normativa è necessaria la redazione di un'analisi sismica di II livello.

9.5 ANALISI SISMICA DI II LIVELLO

Il secondo livello si applica a tutti gli scenari suscettibili di amplificazioni sismiche morfologiche (Z3) e stratigrafiche (Z4). La procedura consiste in un approccio di tipo semiquantitativo per la definizione della classe di sottosuolo NTC2018 attraverso il confronto tra un fattore di amplificazione (Fa) ed i relativi valori di soglia Comunali definiti da studi specialistici (Politecnico di Milano; vd. Tabella 11). Il fattore di amplificazione si calcola attraverso correlazioni analitiche valide in due intervalli standard del periodo caratteristico di vibrazione strutturale (Ts):

- Ts = 0.1 – 0.5s per strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide;
- Ts = 0.5 – 1.5s per strutture più alte e flessibili.

Comune	intervallo [s]	B	C	D	E
Bergamo	0.1-0.5	1.5	1.9	2.3	2.0
	0.5-1.5	1.7	2.4	4.3	3.1
Lallio	0.1-0.5	1.5	1.9	2.3	2.0
	0.5-1.5	1.7	2.4	4.3	3.1
Dalmine	0.1-0.5	1.5	1.9	2.3	2.0
	0.5-1.5	1.7	2.4	4.3	3.1
Osio Sopra	0.1-0.5	1.5	1.9	2.3	2.0
	0.5-1.5	1.7	2.4	4.3	3.1
Osio Sotto	0.1-0.5	1.5	1.9	2.3	2.0
	0.5-1.5	1.7	2.4	4.3	3.1
Verdellino	0.1-0.5	1.5	1.9	2.3	2.0
	0.5-1.5	1.7	2.4	4.3	3.1

Tabella 11 – Soglie definite dalla regione Lombardia per i fattori di amplificazione dei comuni interessati dal progetto della nuova linea E-BRT

Operativamente, la procedura si basa sulla scelta di una scheda di valutazione tra quelle disponibili nell'Allegato 5, della D.G.R. IX/2616 in cui sono contenute le indicazioni per il calcolo del fattore di amplificazione (Fa). La scelta è operata verificando la compatibilità delle seguenti caratteristiche geotecniche dei terreni estratti dal sottosuolo dell'area in esame, con i limiti definiti nella specifica scheda:

- curva granulometrica dei terreni campionati;
- stratigrafia del sito;
- andamento del parametro Vs con la profondità fino a valori pari o superiori a 800 m/s (classe di sottosuolo A, NTC 2018, associata al substrato rigido di base): spessore e velocità di ciascuno strato.

Il fattore di amplificazione è funzione del periodo proprio di vibrazione del sottosuolo (T), da calcolare con la seguente formula:

$$T = \frac{4 \times \sum_{i=1}^{n} h_i}{\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} Vs_i \times h_i}{\sum_{i=1}^{n} h_i} \right)}$$

in cui

- VSi è la velocità di propagazione delle onde di taglio caratteristica di ogni sismostrato;
- h_i è lo spessore del singolo sismostrato.

Il periodo proprio del sito è calcolato considerando tutta la stratigrafia fino alla profondità in cui il valore della velocità VS è uguale o superiore a 800m/s.

Se il valore calcolato di Fa è inferiore al valore di soglia corrispondente definito dallo studio del Politecnico di Milano si assume la classe di sottosuolo NTC 2018. Se, invece, Fa è superiore al valore di soglia, è necessario effettuare analisi più approfondite (3° livello) o, in alternativa, utilizzare lo spettro di norma caratteristico della categoria di suolo superiore.

Rispetto alla valutazione di II livello a scala comunale, per i Comuni interessati dal progetto lo stato di aggiornamento degli aspetti sismici è il seguente:

Comune	Analisi sismica di I livello	Analisi sismica di II livello
Bergamo	ESEGUITA	**ESEGUITA**
Lallio	ESEGUITA	Eseguite le indagini sismiche ma non la valutazione di II livello
Dalmine	ESEGUITA	**ESEGUITA**
Osio Sopra	ESEGUITA	NON ESEGUITA
Osio Sotto	ESEGUITA	NON ESEGUITA
Verdellino	ESEGUITA	**ESEGUITA**

Rispetto ai tre comuni che hanno eseguito la valutazione sismica di II livello, si sottolinea che:

- **Comune di Bergamo:** sono emersi valori territoriali di amplificazione Fa inferiori alle soglie definite dalla Regione Lombardia, per cui si ritiene coerenti le classi di sottosuolo NTC 2018 emerse dalle indagini eseguite (suolo tipo C).
- **Comune di Dalmine:** sono emersi valori territoriali di amplificazione Fa inferiori alle soglie definite dalla Regione Lombardia, per cui si ritiene coerenti le classi di sottosuolo NTC 2018 emerse dalle indagini eseguite (suolo tipo B).
- **Comune di Verdellino:** sono emersi valori territoriali di amplificazione Fa definiti come in Tabella 12; pertanto, essendo stata definita per questo settore una categoria di suolo di tipo B, per il periodo caratteristico di vibrazione strutturale *T=0,1-0,5 s* si verifica la situazione per cui i valori territoriali di amplificazione Fa sono superiori alle soglie definite dalla Regione Lombardia ed occorrerà utilizzare lo spettro di norma caratteristico della categoria di suolo superiore. Al contrario, per il periodo caratteristico di vibrazione strutturale *T=0,1-1,5 s* si verifica la situazione per cui i valori territoriali di amplificazione Fa sono inferiori alle soglie definite dalla Regione Lombardia per cui si tende a ritenere coerenti le classi di sottosuolo NTC 2018 emerse dalle indagini eseguite (suolo tipo B).

Fattore di amplificazione Fa per tutti gli edifici			
Periodo	**Categoria Suolo**	**Risultato procedura di 2° livello**	**Prescrizioni**
T=0.1-0.5 s	B	$Fa_{stimato} > Fa_{soglia}$	Utilizzo spettro di progetto della categoria C o applicazione approfondimento 3° livello
T=0.1-0.5 s	C/D	$Fa_{stimato} \leq Fa_{soglia}$	Utilizzo spettro di progetto propria categoria
T=0.1-1.5 s	B/C/D	$Fa_{stimato} \leq Fa_{soglia}$	Utilizzo spettro di progetto propria categoria

Tabella 12 – estratto della Carta della pericolosità sismica di 2° Livello (PGT Comune di Verdellino 2017)

Per i rimanenti comuni interessati dal progetto viene riassunta nel seguito la trattazione sismica di II livello eseguita in questa fase di Progetto Definitivo.

- **Comune di Lallio**: Per ottenere il fattore di amplificazione (Fa) è stata scelta la scheda litologia ghiaiosa, in base alle condizioni geologiche locali e dalle curve granulometriche ottenute dai campioni prelevati nei sondaggi S1, S2 ed S3 (vd. indagini DA_024_B doc. GR02 del PFTE) che sono state assunte come rappresentative data l'omogeneità geologica del tracciato e la scarsità di indagini granulometriche disponibili. In base alla formulazione sopra riportata, risulta T=1.28s. Nel calcolo per i periodi 0.1-0.5 e 0.5-1.5, sono state utilizzate le rispettive formulazioni della curva 2 (verde), per T = 1.00; in quanto le velocità delle onde di taglio del primo strato si attesta intorno ai 264 m/s.

  Fa periodo 0.1-0.5 = 1,25 < 1.5 (soglia comunale B)

  Fa periodo 0.5-1.5 = 1,06 < 1.7 (soglia comunale B)

  si ritiene coerente la classe di sottosuolo NTC 2018 emersa dalle indagini eseguite (suolo tipo B).

- **Comune di Osio Sopra**: Per ottenere il fattore di amplificazione (Fa) è stata scelta la scheda litologia ghiaiosa, in base alle condizioni geologiche locali e dalle curve granulometriche ottenute dai campioni prelevati nei sondaggi S1, S2 ed S3 (vd. indagini DA_024_B doc. GR02 del PFTE) che sono state assunte come rappresentative data l'omogeneità geologica del tracciato e la scarsità di indagini granulometriche disponibili. In base alla formulazione sopra riportata, risulta T=1.33s. Nel calcolo per i periodi 0.1-0.5 e 0.5-1.5, sono state utilizzate le rispettive formulazioni della curva 2 (verde), per T = 1.00; in quanto le velocità delle onde di taglio del primo strato si attesta intorno ai 253 m/s.

  Fa periodo 0.1-0.5 = 1,24 < 1.5 (soglia comunale B)

  Fa periodo 0.5-1.5 = 1,04 < 1.7 (soglia comunale B)

  si ritiene coerente la classe di sottosuolo NTC 2018 emersa dalle indagini eseguite (suolo tipo B).

- **Comune di Osio Sotto**: Per ottenere il fattore di amplificazione (Fa) è stata scelta la scheda litologia ghiaiosa, in base alle condizioni geologiche locali e dalle curve granulometriche ottenute dai campioni prelevati nei sondaggi S1, S2 ed S3 (vd. indagini DA_024_B doc. GR02 del PFTE) che sono state assunte come rappresentative data l'omogeneità geologica del tracciato e la scarsità di indagini granulometriche disponibili. In base alla formulazione sopra riportata, risulta T=1.86s. Nel calcolo per i periodi 0.1-0.5 e 0.5-1.5, sono state utilizzate le rispettive formulazioni della curva 1 (rossa), per T = 1.00; in quanto le velocità delle onde di taglio del primo strato si attesta intorno ai 207 m/s.

  Fa periodo 0.1-0.5 = 1,26 < 1.5 (soglia comunale B)

  Fa periodo 0.5-1.5 = 0,5 < 1.7 (soglia comunale B)

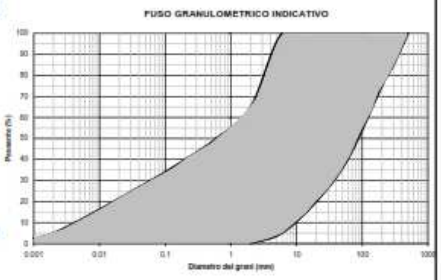
  si ritiene coerente la classe di sottosuolo NTC 2018 emersa dalle indagini eseguite (suolo tipo B).

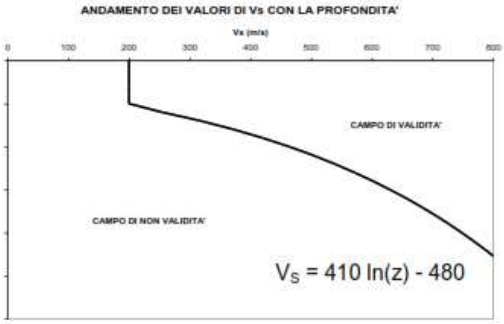
EFFETTI LITOLOGICI – SCHEDA LITOLOGIA GHIAIOSA

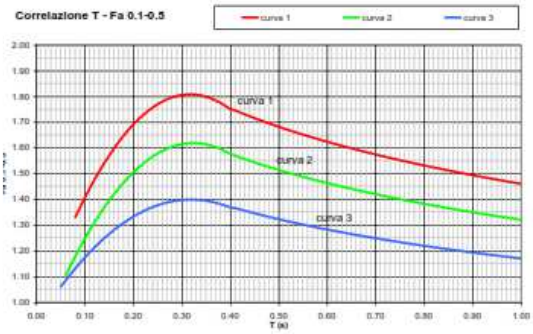
PARAMETRI INDICATIVI

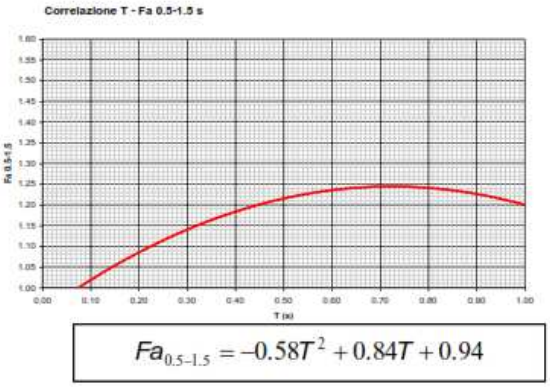
GRANULOMETRIA:
Da ghiaie e ciottoli con blocchi a ghiaie e sabbie limose debolmente argillose passando per ghiaie con sabbie limose, ghiaie sabbiose, ghiaie con limo debolmente sabbiose e sabbie con ghiaie

NOTE:
Comportamento granulare
Struttura granulo-sostenuta
Frazione ghiaiosa superiore al 35%
Frequenti clasti con D_{max} > 20 cm
Frazione sabbiosa fino ad un massimo del 65%
Matrice limoso - argillosa fino ad un massimo del 30% con frazione argillosa subordinata (fino al 5%)
Presenza di eventuali trovanti con D > 50 cm
Presenza di eventuali orizzonti localmente cementati









$$Fa_{0.5-1.5} = -0.58T^2 + 0.84T + 0.94$$

Curva	Tratto polinomiale	Tratto logaritmico
1	$0.08 < T \le 0.40$	$0.40 < T \le 1.00$
	$Fa_{0.1-0.5} = -8.5T^2 + 5.4T + 0.95$	$Fa_{0.1-0.5} = 1.46 - 0.32LnT$
2	$0.06 < T \le 0.40$	$0.40 < T \le 1.00$
	$Fa_{0.1-0.5} = -7.4T^2 + 4.8T + 0.84$	$Fa_{0.1-0.5} = 1.32 - 0.28LnT$
3	$0.05 < T \le 0.40$	$0.40 < T \le 1.00$
	$Fa_{0.1-0.5} = -4.7T^2 + 3.0T + 0.92$	$Fa_{0.1-0.5} = 1.17 - 0.22LnT$

Figura 9-13 – Scheda di valutazione di riferimento per le litologie prevalentemente ghiaiose (Allegato 5, della D.G.R. IX/2616)

9.6 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DEI FENOMENI DI LIQUEFAZIONE E CEDIMENTO

I problemi riguardanti i terreni di fondazione in rapporto al fenomeno sismico sono la liquefazione e il cedimento.

Ai fini delle norme, il termine “liquefazione” denota una diminuzione di resistenza a taglio e/o di rigidezza causata dall’aumento di pressione interstiziale in un terreno saturo non coesivo durante lo scuotimento sismico, tale da generare deformazioni permanenti significative o persino l’annullamento degli sforzi efficaci nel terreno. Deve essere verificata la suscettibilità alla liquefazione quando la falda freatica si trova in prossimità della superficie (< 15 m da p.c.) ed il terreno di fondazione comprende strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, anche se contenenti una frazione fine limo-argillosa.

Ai fini delle norme, il termine “cedimento sismico” denota un abbassamento del piano campagna conseguente all’addensamento di sabbie sciolte, in condizioni sia sature che sottosature, indotto dal sisma.

Si premette che, all’interno della valutazione di I livello, non sono stati riscontrate interferenze con ambiti classificati in Z2 nello scenario di Pericolosità Sismica Locale (vd. Tabella 10), di conseguenza, a livello normativo, la pianificazione territoriale ha escluso possibili ambiti soggetti a tali fenomeni.

Inoltre, sia il fenomeno della liquefazione sismica sia gli effetti di cedimento post-sismico possono essere esclusi per mancanza delle condizioni idrogeologiche (falda sempre a profondità > di 15.0 m da p.c.) e litotecniche (assenza di livelli importanti di sabbie sciolte).