IRIS sas di Bacci Maurizio
Via Volterrana n. 179 – 50020 Cerbaia Val di Pesa (FI)
335.7123458 - iris@irisambiente.it – www.irisambiente.it

UNIONE EUROPEA
Fondo europeo di sviluppo regionale

REPUBBLICA ITALIANA

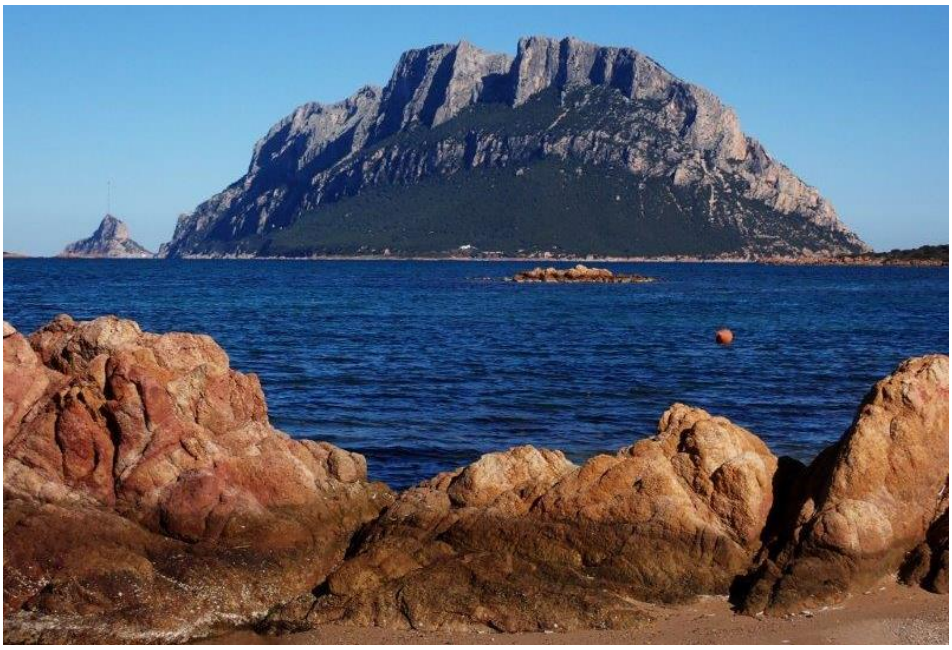
REGIONE AUTÒNOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

POR FESR SARDEGNA 2014-2020

POR FESR 2014-2020 - Asse VI - Azione 6.5.1

Progetto “Alla Natura: azioni di protezione e biosicurezza per il SIC Isole di Tavolara, Molara e Molarotto”.
Convenzione per l’affidamento dei servizi di architettura e ingegneria

CUP: E15D19000050006 - CIG: Z31297CF4E



PROGETTO DEFINITIVO

Studio di compatibilità geologica e geotecnica

ai sensi dell’art. 25 delle Norme di attuazione del PAI (DPGR 35 del 1 marzo 2008)

Eradicazione del topo domestico da tre isolotti - Contenimento del ratto nero a Molara - Eradicazione Carpobrotus sp. pl. - Protezione stazione di Centaurea horrida Cala Tramontana

Responsabile del procedimento

Ing. Simona Lepori

Direzione tecnica
ing. amb. Maurizio Bacci

Staff tecnico **IRIS sas**
ing. amb. Stefano Corsi
ing. amb. Maurizio Bacci
arch. Francesca Bacci
ing. amb. Daniele Maffi

Indagini specialistiche propedeutiche agli interventi
Dott. geol. Valentino Demurtas, Dott. Giacomo Deiana
NEMO s.r.l.

Centro Conservazione Biodiversità, Dipartimento di Scienze della Vita e dell’Ambiente dell'Università degli Studi di Cagliari

Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell’Università degli Studi di Cagliari

Nome file:
2021-04 – Def – Studio di compatibilità.docx

data: 28/07/2021

Indice

1 PREMESSA **3**

2 INQUADRAMENTO DELL'INTERVENTO **4**

2.1 *LOCALIZZAZIONE DELL'INTERVENTO* 4
2.2 *INQUADRAMENTO DELL'INTERVENTO SU CARTOGRAFIA PAI* 6
2.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO 9

3 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI PROGETTO **10**

4 ASPETTI GEOLOGICI **13**

4.1 *ASSETTO GEOLOGICO DI INQUADRAMENTO* 13
4.2 *SITUAZIONE LITOSTRATIGRAFICA LOCALE, ORIGINE E NATURA DEI LITOTIPI, STATO DI ALTERAZIONE, FRATTURAZIONE E DEGRADABILITÀ* 13
4.3 LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI, PROCESSI MORFOLOGICI E DISSESTI IN ATTO 20
4.4 *CARATTERI* GEOSTRUTTURALI, GEOMETRIA E SUPERFICI DI DISCONTINUITÀ 23
4.5 *CIRCOLAZIONE* IDRICA SUPERFICIALE E SOTTERRANEA 23

5 ASPETTI GEOTECNICI **25**

5.1 *INDAGINI* IN SITO, DI LABORATORIO 25
5.2 *PARAMETRI* GEOTECNICI DI PROGETTO E CARATTERIZZAZIONE DEL SOTTOSUOLO 36
5.3 DIMENSIONAMENTO DELL'INTERVENTO 38
5.4 *RISULTATI* DEI CALCOLI GEOTECNICI E VERIFICHE DI STABILITÀ DEL PENDIO 38
5.5 *CONCLUSIONI* TECNICHE E TIPOLOGIA DELLE OPERE 40

6 PIANO DI MANUTENZIONE, MONITORAGGIO E PROGRAMMA DELLE MISURE SPERIMENTALI **43**

6.1 *MANUALE D'USO* 43
6.2 *MANUALE DI MANUTENZIONE* 43
6.3 *PROGRAMMA DI MANUTENZIONE* 44
6.3.1 Sottoprogramma delle prestazioni *44*
6.3.2 Sottoprogramma dei controlli *44*
6.3.3 Sottoprogramma delle manutenzioni *44*

7 VALUTAZIONI CONCLUSIVE **45**

1 Premessa

La presente relazione illustra gli esisti dello studio di compatibilità geologica e geotecnica del "*Progetto “Alla Natura: azioni di protezione e biosicurezza per il SIC Isole di Tavolara, Molara e Molarotto” - Eradicazione del topo domestico da tre isolotti - Contenimento del ratto nero a Molara - Eradicazione Carpobrotus sp. pl. - Protezione stazione di Centaurea horrida Cala Tramontana*”, che sarà attuato da parte dal Consorzio di Gestione dell’Area Marina Protetta di Tavolara e Punta Cavallo. I contenuti rappresentano una sintesi degli elementi riportati nella *Relazione geotecnica* e nella *Relazione geologica* di progetto.

La relazione è redatta in applicazione all’art. 25 delle Norme di attuazione del PAI (così come aggiornato con DPGR 35 del 1 marzo 2008).

Il progetto si compone di diversi interventi: eradicazione del topo domestico, controllo del ratto nero, eradicazione del *Carpobrotus sp. pl* e protezione dall’erosione del versante dove è presente la specie *Centaurea horrida.* E . Gli interventi di eradicazione del topo domestico, controllo del ratto nero ed eradicazione del *Carpobrotus sp. pl.* non hanno evidentemente rilevanza geologico-tecnica. L’intervento di protezione della stazione di *Centaurea horrida* a Tavolara non ha una funzione di sostegno, ma di riduzione dell’erosione, risultando migliorativo dell’assetto dell’area senza alterare le caratteristiche geologico-tecniche del versante. Gli interventi risultano, quindi, compatibili con le norme del PAI e la presente relazione rende conto di tale fatto, in applicazione all’Allegato F delle Norme del PAI “*Criteri per la predisposizione degli studi di compatibilità geologica e geotecnica di cui all’articolo 25 delle norme di attuazione del PAI*”.

2 Inquadramento dell’intervento

2.1 Localizzazione dell’intervento

Il progetto è composto da una serie di interventi diffusi nelle isole di Molara, Cavalli, Piana e Isolotto Rosso, lungo la costa tra il golfo di Olbia e San Teodoro, nonché alcuni interventi localizzati nell’isola di Tavolara all’approdo e a Cala Tramontana. Si omette di riportare l’inquadramento dei primi in quanto privi di rilevanza geologica e geotecnica, limitando l’analisi all’intervento di Tavolara.

CORSICA
(Francia)
Bocche di Bonifacio
Santa Teresa Gallura
La Maddalena
Palau
Golfo Aranci
Golfo dell' Asinara
Gallura
Olbia
Porto Torres
Sorso
Sassari
Alghero
Nuoro
Orosei
Golfo di Orosei
Area di intervento
Cagliari
Golfo di Cagliari
Villasimius
Carbonia
Iglesias
Oristano
G. di Oristano
Tortolì
Arbatax
Muravera
Villaputzu
Quartu Sant'Elena
Sant'Antioco
Portoscuso
Posada
Siniscola
Bitti
Lula
Macomer
Ozieri
Ploaghe
Olmedo
Fertilia
Villanova Monteleone
Pozzomaggiore
Bosa
Cuglieri
Ghilarza
Abbasanta
Fonni
Sorgono
Bonnanaro
Tonara
Seui
Lanusei
Jerzu
Isili
Nurri
Escalaplano
Mandas
Sardara
Gavino Monreale
Samassi
Villacidro
Serramanna
Dolianova
Decimomannu
Assemini
Sinnai
Sarroch
Pula
Teulada
Capoterra
Carloforte
I. San Pietro
I. Sant'Antioco
Cabras
Arborea
Terralba
Laconi
Baunei
Dorgali
Oliena
Orotelli
Budduso
Calangianus
Tempio Pausania
Monte Limbara
Ittiri
Alghero
Golfo Aranci
I. Tavolara
I. Mortorio
I. Asinara
Punta Caprara
Costa Smeralda
Punta Falcone
C. Testa
I. Spargi
I. Maddalena
I. Caprera
C. Cala Cavallo
C. dell'Argentiera
C. Caccia
C. Comino
C. di Monte Santu
C. Mannu
I. di Mal di Ventre
C. della Frasca
C. Pecora
C. Spartivento
C. Teulada
C. di Pula
C. Carbonara
I. Serpentario
Punta Serpeddì
Punta La Marmora
M. Gennargentu
M. Corrasi
M. Ferru
M. Arci
M. Linas
M. is Caravius
M. Nieddu
M. Albo
M. Rasu
Lago Omodeo
Fiume Tirso
Fiumendosa
Flumini Mannu
Flumineddu
Flumineddu
Fluminedd

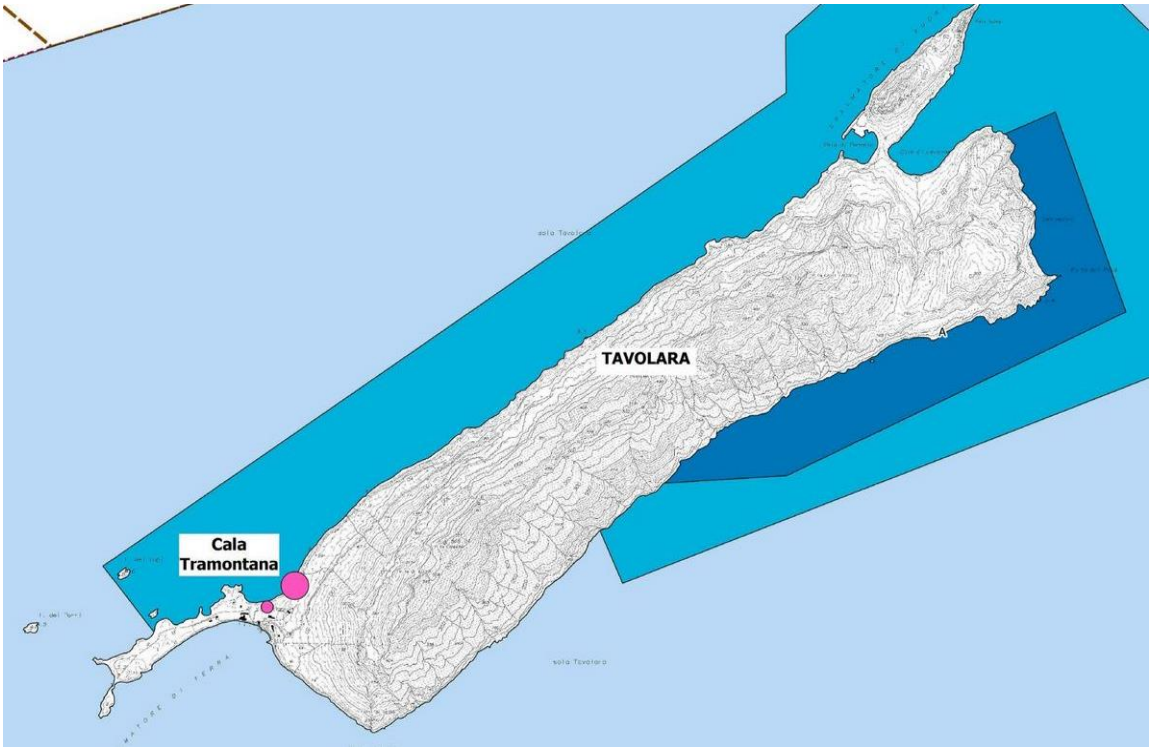


Figura 2. Localizzazione dell’intervento di Tavolara

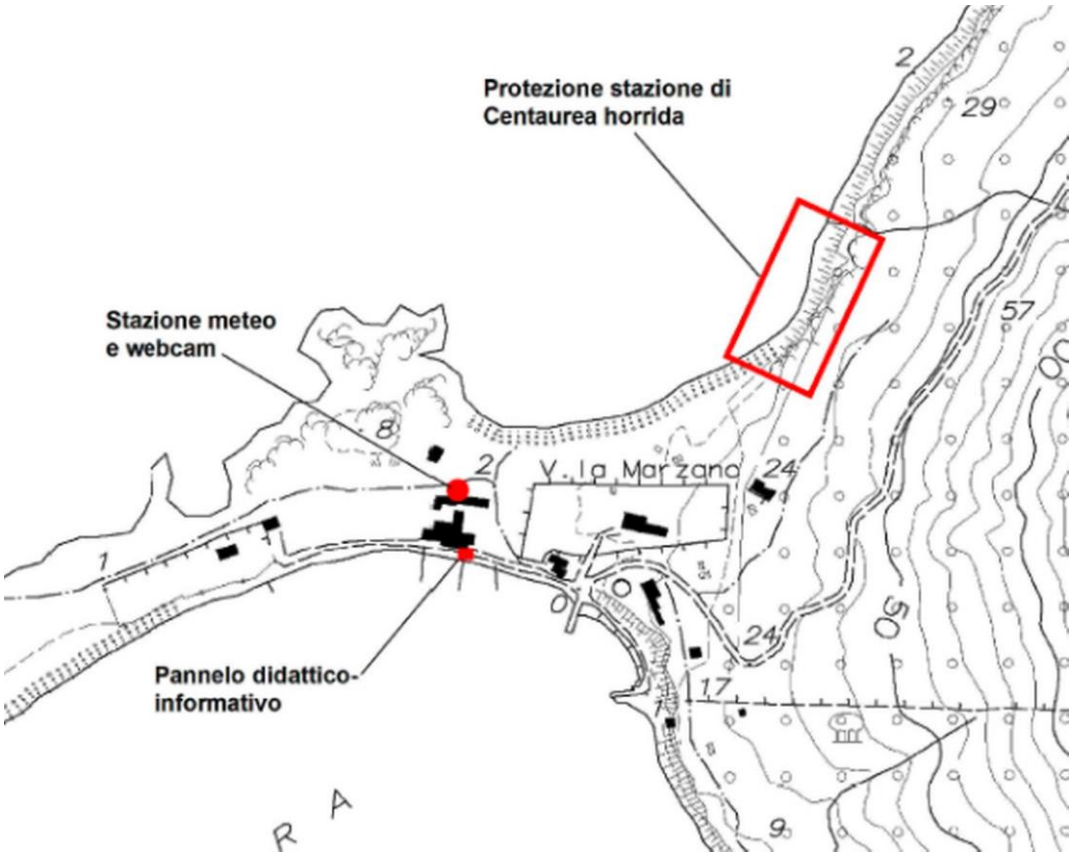
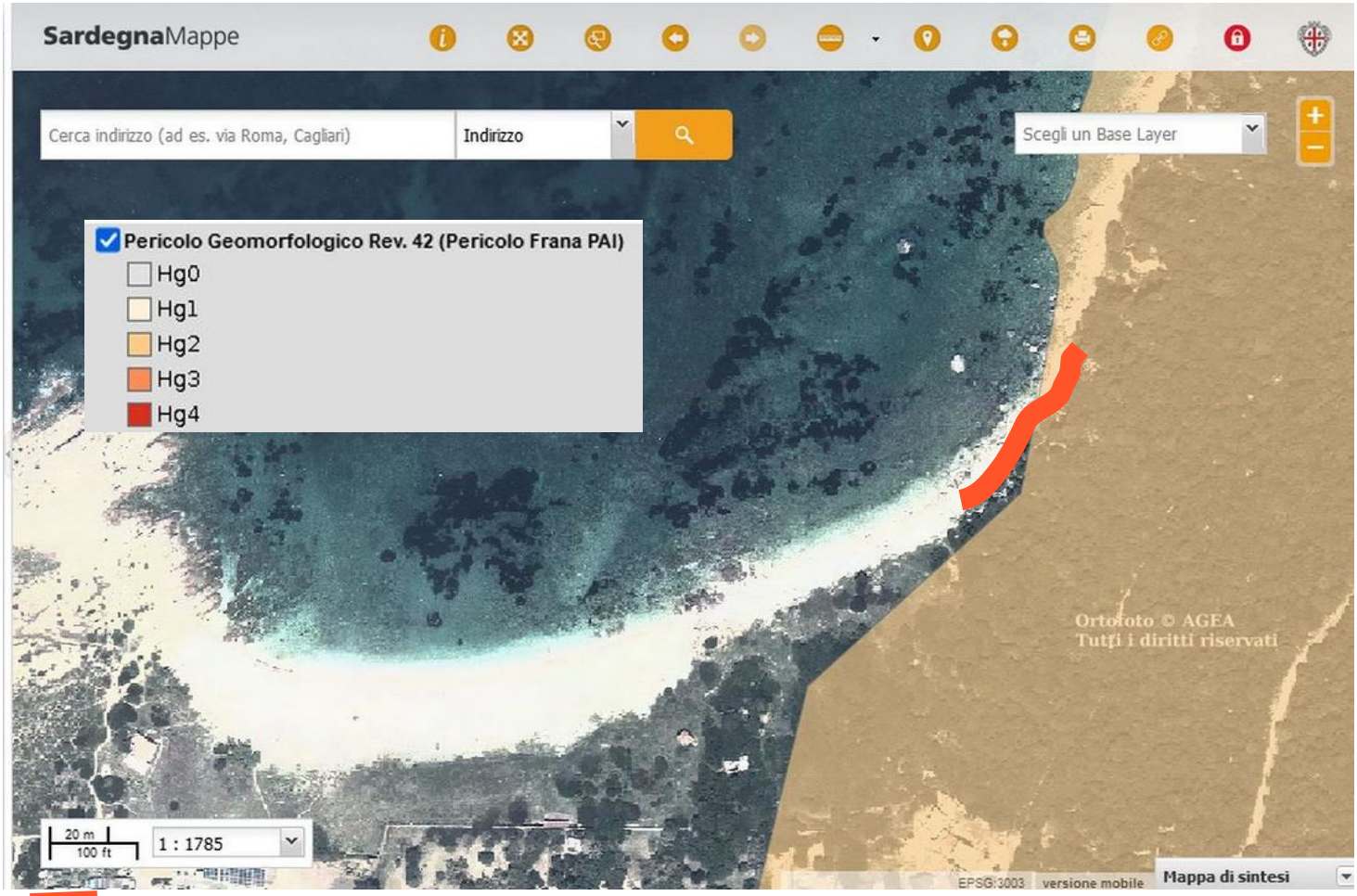


Figura 3. Interventi nell’isola di di Tavolara

2.2 Inquadramento dell'intervento su cartografia PAI

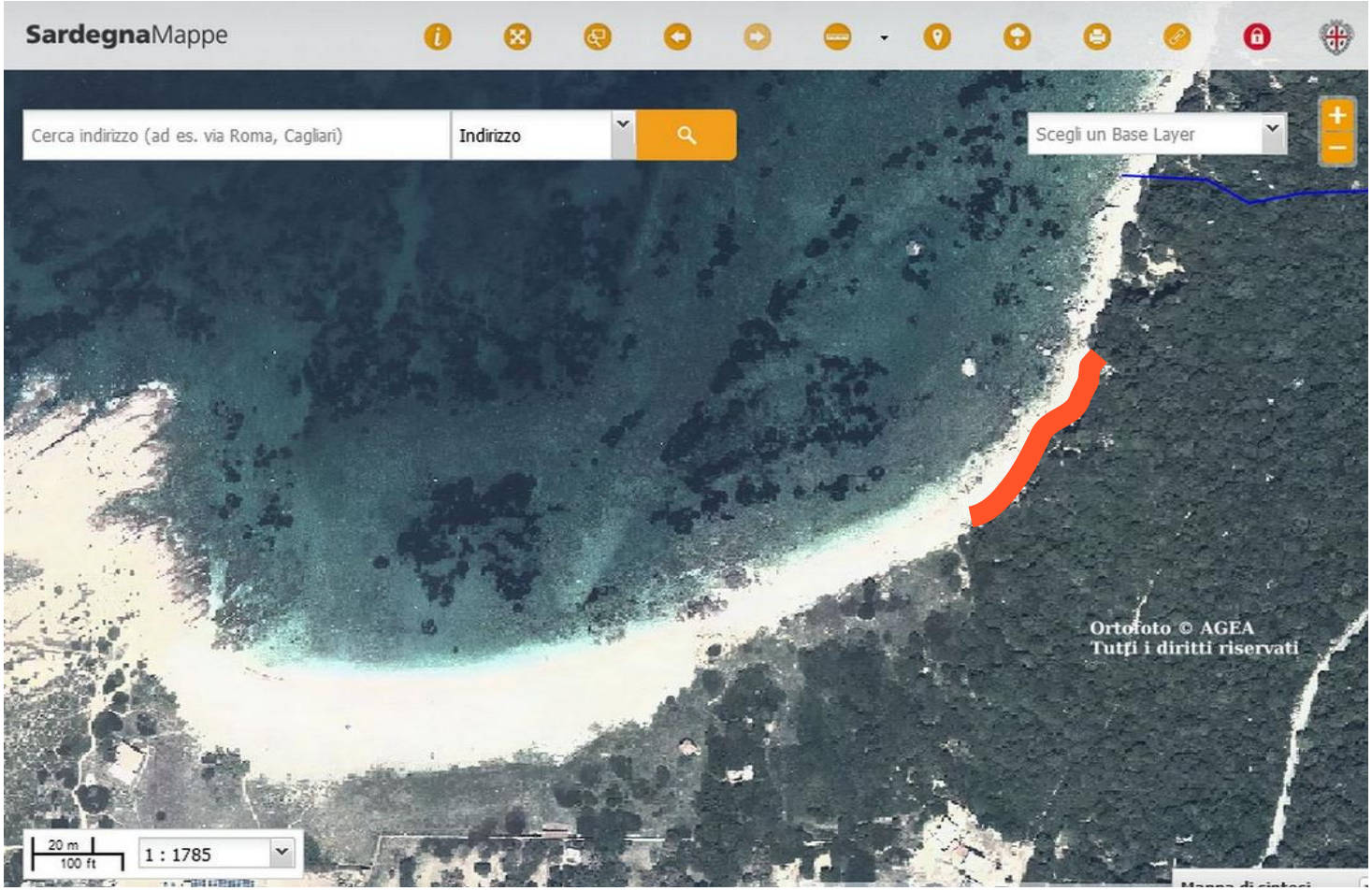
Di seguito si riporta l'inquadramento dell'intervento di Tavolare nella cartografia del PAI. Si omette di riportare l'inquadramento degli interventi di di eradicazione del topo domestico, controllo del ratto nero ed eradicazione del *Carpobrotus sp. pl. In quanto non rappresentano interventi rilevanti dal punto di vista* urbanistico-terrritoriale.

L'intervento di Cala Tramontana nel PAI (fonte http://www.sardegnageoportale.it/webgis2/sardegnamappe/?map=pai, aggiornamento luglio 2021) risulta ricadere per la porzione nord-est all'interno delle aree a pericolosità frana Hg2, mentre il Piano Urbanistico Comunale di Olbia in Adeguamento al PPR e al PAI adottato con Delibera n. 134 del 29/07/2020 ha classificato l'area in Hg3. L'area è invece esterna da zone a pericolo/rischio di alluvione e non interessa elementi del reticolo idraulico. Gli interventi in corrispondenza dell'approdo sono esterni alle zone vincolate.



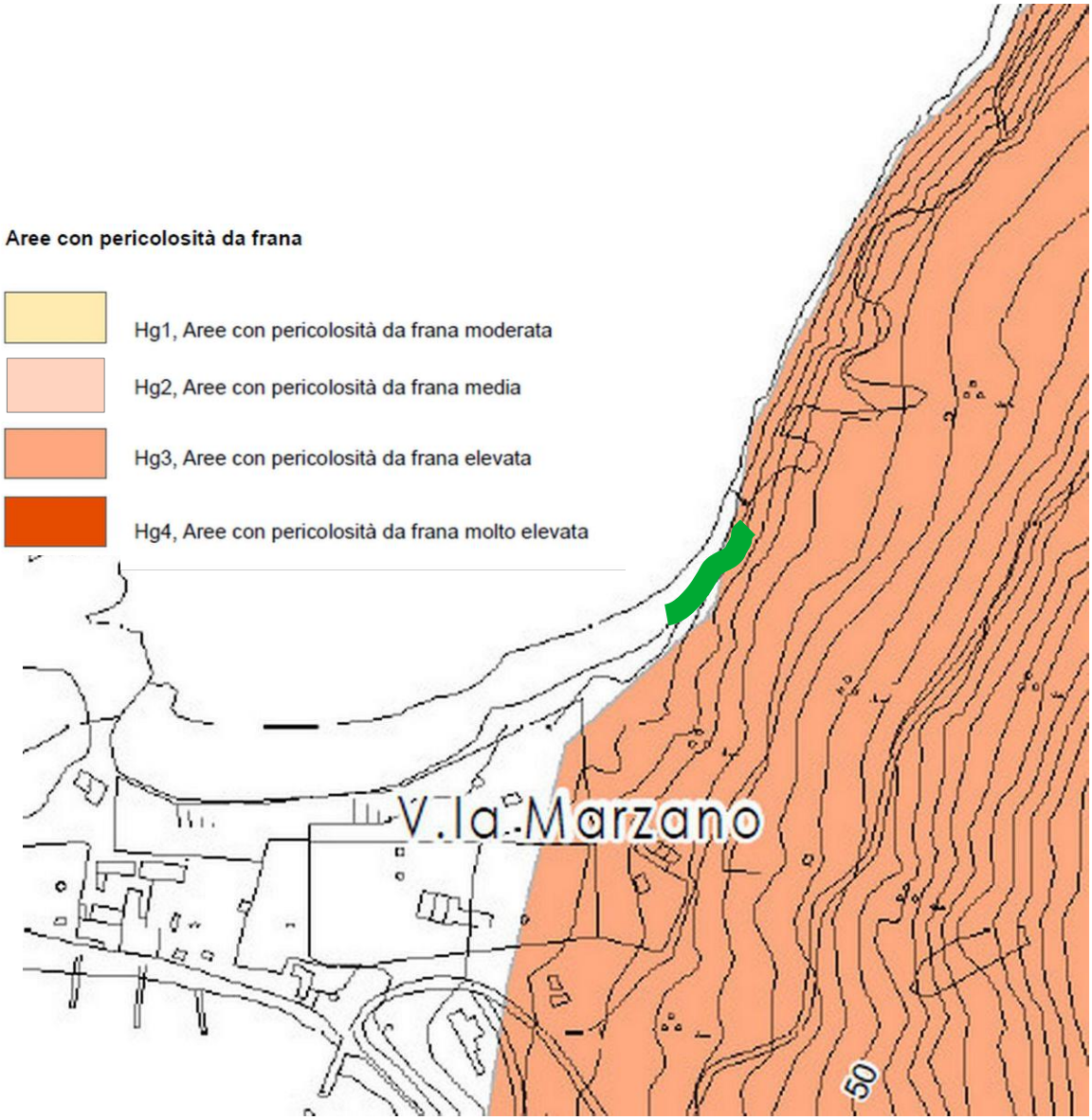
Tratto di Intervento 3 – Protezione della stazione di Centaurea horrida a Cala Tramontana

Figura 4. Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) fonte http://www.sardegnageoportale.it/webgis2/sardegnamappe/?map=pai - Tematismi:
- Pericolo geomorfologic0 Rev. 42 (Pericolo frana PAI)



Tratto di Intervento 3 – Protezione della stazione di Centaurea horrida a Cala Tramontana

Figura 5. Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) fonte http://www.sardegnageoportale.it/webgis2/sardegnamappe/?map=pai - Tematismi:
Tematismi:
- Rischio idraulico Rev. 41 (Rischio Alluvioni PAI)
- Pericoloidraulico Rev. 41 (Pericolo alluvioni PAI)
- Rischio geomorfologico Rev. 42 (Rischio frana PAI)
- Art. 8 Hi V.09 (Pericolo alluvioni)
- Art. 8 Hg V.09 (Pericolo frana)
- Aree alluvionate “Cleopatra”
- PSFF (“Piano Stralcio delle fasce fluviali”)
- Scenari stato attuale PGRA2017
- Idrografia

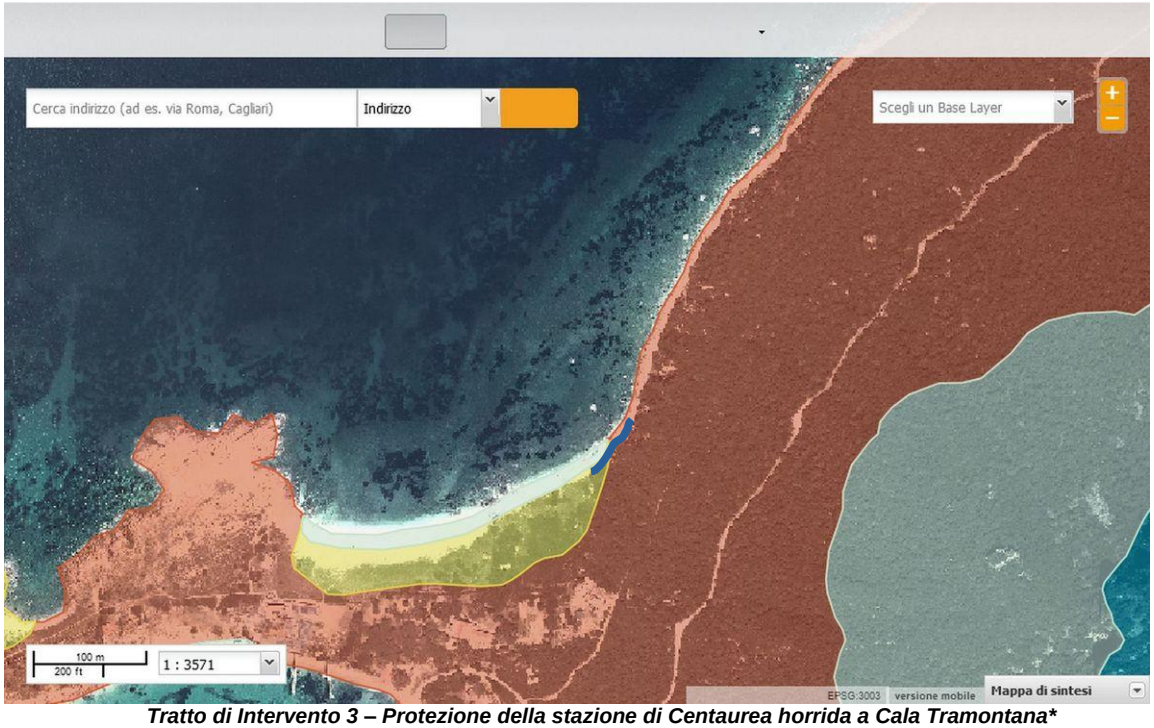


Tratto di Intervento 3 – Protezione della stazione di Centaurea horrida a Cala Tramontana

Figura 6. Piano Urbanistico Comunale di Olbia in Adeguamento al PPR e al PAI adottato con Delibera n. 134 del 29/07/2020
Estratto Tav. T.3.2 – Ambiti interessati da tutela – Adeguamento PAI

2.3 Inquadramento geologico

Nella Carta Geologica 1:25’000 della Regione Sardegna l’intervento di Cala Tramontana ricade per la porzione sud-ovest nell’unità *g – depositi di spiaggia antichi. Sabbie, arenarie, calciruditi, ghiaie con bivalvi, gestoropodi, con subordinati depositi sabbioso-limosi e calcilutiti di stagno costiero. Spessore 3-4 m. Pleistocene sup. - OLOCENE* facente parte dei *Sedimenti litorali* e per la porzione nord-est nell’unità *NIEa Facies Punta Micalotto (UNITÀ INTRUSIVA DI MONTE NIEDDU). Leucograniti rosati a grana medio-fine, inequigranulari, porfirici per fenocristalli di Qtz globulare e di Kfs rosato. CARBONIFERO SUP. - PERMIANO,* facente parte del *Complesso granitoide della Gallura.*



Tratto di Intervento 3 – Protezione della stazione di Centaurea horrida a Cala Tramontana*

Figura 7. Carta Geologica di base della Sardegna in scala 1:25.000
http://www.sardegnageoportale.it/webgis2/sardegnamappe/?map=mappetematiche

3 Descrizione degli interventi di progetto

Il progetto prevede l'attuazione dei seguenti interventi:

- Intervento 1 A – Eradicazione del topo domestico nelle isole Piana, Cavalli e Reulino
- Intervento 1 B – Contenimento del ratto nero a Molara
- Intervento 2 – Eradicazione del Fico degli Ottentotti
- Intervento 3 – Protezione della stazione di Centaurea horrida a Cala Tramontana che prevede la protezione della scarpata dal moto ondoso a Cala Tramontana, nonché alcuni interventi accessori che consistono nell'installazione di cartello informativa, di telecamera e di stazione meteo nei pressi dell'approdo

L'intervento di eradicazione del topo domestico consiste nell'installazione di erogatori (elementi scatolari) con dentro esche rodonticide nelle isole Piana, Cavalli e Reulino, formando dei sentieri per accedere e rimuovendo gli erogatori a fine intervento.

L'intervento di contenimento del ratto nero a Molara prevede l'apertura di sentieri e l'installazione di trappole anche queste da rimuovere a fine intervento.

L'eradicazione del Fico degli Ottentotti (*Carpobrotus sp.* pl.) prevede l'eliminazione di questa pianta erbaceo-bassa arbustiva in vari siti lungo la costa tra il golfo di Olbia e San Teodoro e l'eventuali installazione di teli pacciamanti che saranno rimossi a fine intervento, previa eventuale apertura di sentieri.

Questi interventi di carattere gestionale di flora e fauna non hanno valenza urbanistica né rilevanza gelogico-tecnica.

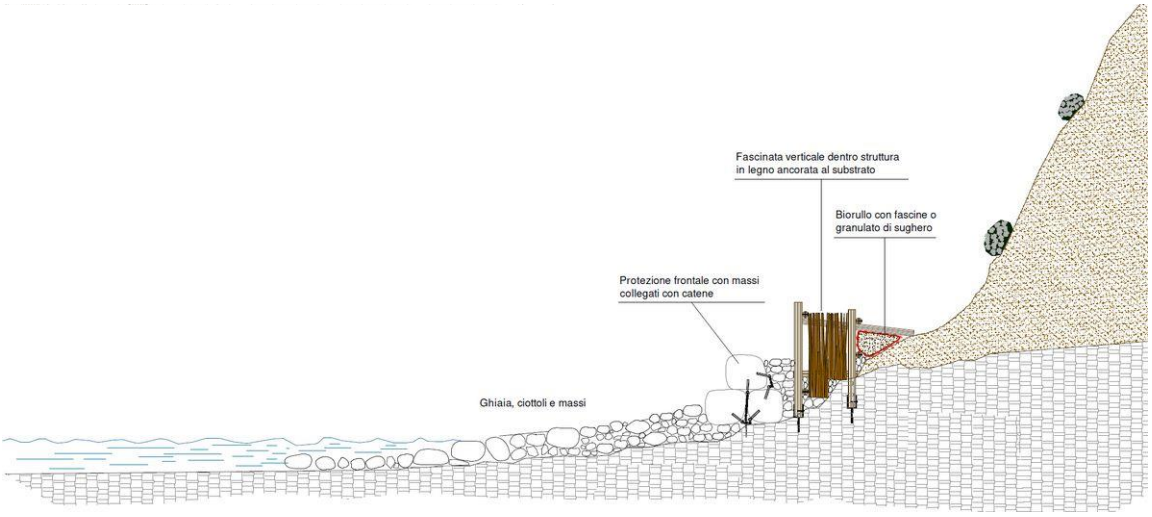
L'intervento di Tavolara rappresenta un'opera di contenimento dell'erosione marina su una falesia per un tratto finalizzato alla protezione di una stazione dove è stata rilevata la presenza della specie *Centaurea horrida*. Si tratta di un intervento composto da 3 elementi lineari:

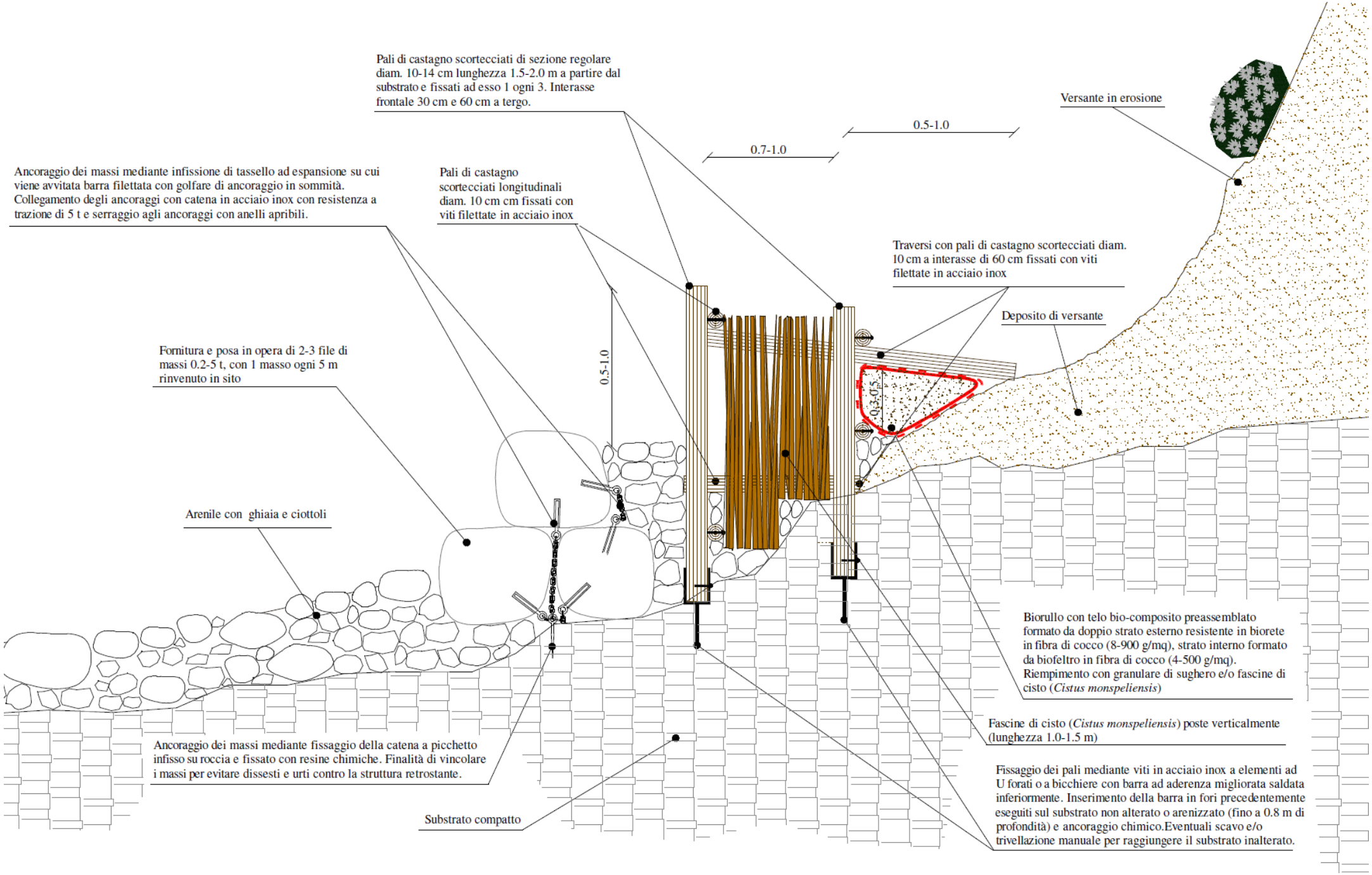
- scogliera legata, formata da massi disposti longitudinalmente all'arenile e legati con catene in acciaio inox fissate al substrato roccioso mediante picchetti;
- fascinata verticale in struttura in legno, formata da montanti disposti su due file e uniti con traversi e correnti a formare una struttura tridimensionale al cui interno alloggiare fascine di cisto; i pali sono in legno di castagno e i montanti sono fissati mediante picchetti al substrato roccioso;
- biorullo in fibra di cocco con riempimento in truciolato di sughero e/o ramaglia di cisto.

La scogliera ha l'effetto di evitare lo scalzamento della fascinata verticale che a sua volta ha lo scopo di ridurre l'azione marina sulla scarpata. Il biorullo ha la funzione di limitare gli effetti di vortici e risacca, nonché di trattenere i depositi di versante. Tutte le opere sono realizzate senza gravare sul versante né alterare i profili del terreno, in tal senso non hanno interazione diretta con l'assetto geotecnico del versante.

L’intervento si estende per circa 50 m ma solo una porzione di 10-15 m ricade all’interno del vincolo del PAI di pericolosità geologica (Hg2 Pai, Hg3 del Piano Urbanistico Comunale adottato).

E’ anche prevista l’installazione di una bacheca in corrispondenza dell’approdo, nonché di una webcam e di una stazione meteo su traliccio esistenti nei pressi. Questi interventi sono esterni alle aree a vincolo PAI. Di seguito e a pagina seguente si riporta lo schema della sistemazione prevista.




Pali di castagno scortecciati di sezione regolare diam. 10-14 cm lunghezza 1.5-2.0 m a partire dal substrato e fissati ad esso 1 ogni 3. Interasse frontale 30 cm e 60 cm a tergo.
Versante in erosione
0.5-1.0
0.7-1.0
Ancoraggio dei massi mediante infissione di tassello ad espansione su cui viene avvitata barra filettata con golfare di ancoraggio in sommità. Collegamento degli ancoraggi con catena in acciaio inox con resistenza a trazione di 5 t e serraggio agli ancoraggi con anelli apribili.
Pali di castagno scortecciati longitudinali diam. 10 cm cm fissati con viti filettate in acciaio inox
Traversi con pali di castagno scortecciati diam. 10 cm a interasse di 60 cm fissati con viti filettate in acciaio inox
Deposito di versante
0.5-1.0
0.3-0.5
Fornitura e posa in opera di 2-3 file di massi 0.2-5 t, con 1 masso ogni 5 m rinvenuto in sito
Arenile con ghiaia e ciottoli
Biorullo con telo bio-composito preassemblato formato da doppio strato esterno resistente in biorete in fibra di cocco (8-900 g/mq), strato interno formato da biofeltro in fibra di cocco (4-500 g/mq). Riempimento con granulare di sughero e/o fascine di cisto (*Cistus monspeliensis*)
Fascine di cisto (*Cistus monspeliensis*) poste verticalmente (lunghezza 1.0-1.5 m)
Ancoraggio dei massi mediante fissaggio della catena a picchetto infisso su roccia e fissato con resine chimiche. Finalità di vincolare i massi per evitare dissesti e urti contro la struttura retrostante.
Fissaggio dei pali mediante viti in acciaio inox a elementi ad U forati o a bicchiere con barra ad aderenza migliorata saldata inferiormente. Inserimento della barra in fori precedentemente eseguiti sul substrato non alterato o arenizzato (fino a 0.8 m di profondità) e ancoraggio chimico.Eventuali scavo e/o trivellazione manuale per raggiungere il substrato inalterato.
Substrato compatto

4 Aspetti geologici

Nel presente paragrafo si riporta una sintesi della analisi geologiche sviluppate per il progetto.

4.1 Assetto geologico di inquadramento

L’assetto geologico stratigrafico alla scala del sito è caratterizzato dal locale affioramento del substrato monzogranitico su cui poggiano depositi quaternari di varia natura. Le monzograniti si presentano in differenti stati di alterazione, da litoidi a molto alterate. I depositi quaternari sono rappresentati alla base da una sequenza di depositi di pendio stratificati di varia natura. Alla base sono presenti depositi a ciottoli e blocchi eterometrici e poligenici (monzograniti, dolomie, ecc.) intercalati con livelli a sabbie grosse e fini derivanti dall’erosione del substrato granitico alterato, e da depositi di “éboulis ordonnés”.
La parte sommitale della sequenza è rappresentata da paleosuoli e suoli. I paleosuoli impostati sui depositi di pendio antichi risultano talvolta arrossati a causa dell’ossidazione e debolmente cementati. I suoli attuali o sub attuali impostati sui depositi di pendio più recenti a prevalente tessitura sabbiosa, talvolta ghiaiosa. Il colore bruno nocciola risulta talvolta più scuro e annerito a causa di accumulo di cenere associata ad antichi incendi. La parte più superficiale è caratterizzata da una modesta presenza di materiale organico.

4.2 Situazione litostratigrafica locale, origine e natura dei litotipi, stato di alterazione, fratturazione e degradabilità

DI seguito si riportano i profili di progetto e la loro localizzazione.

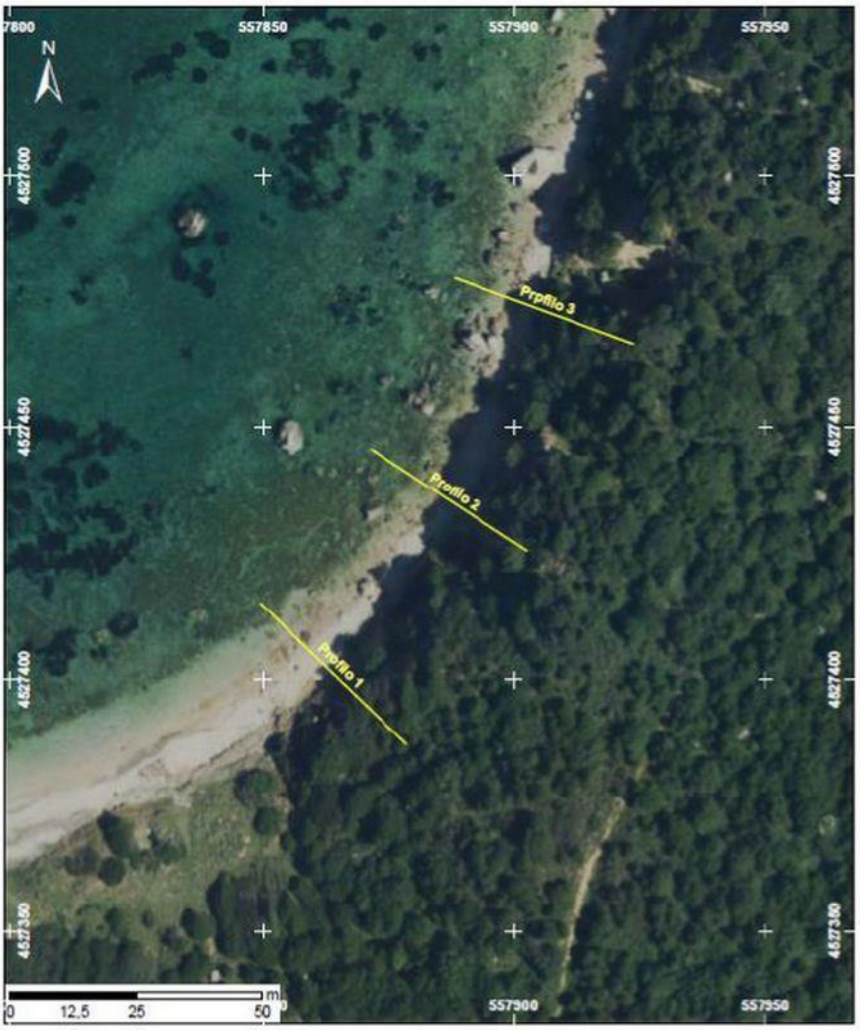


Figura 8. Localizzazione dei profili geologici

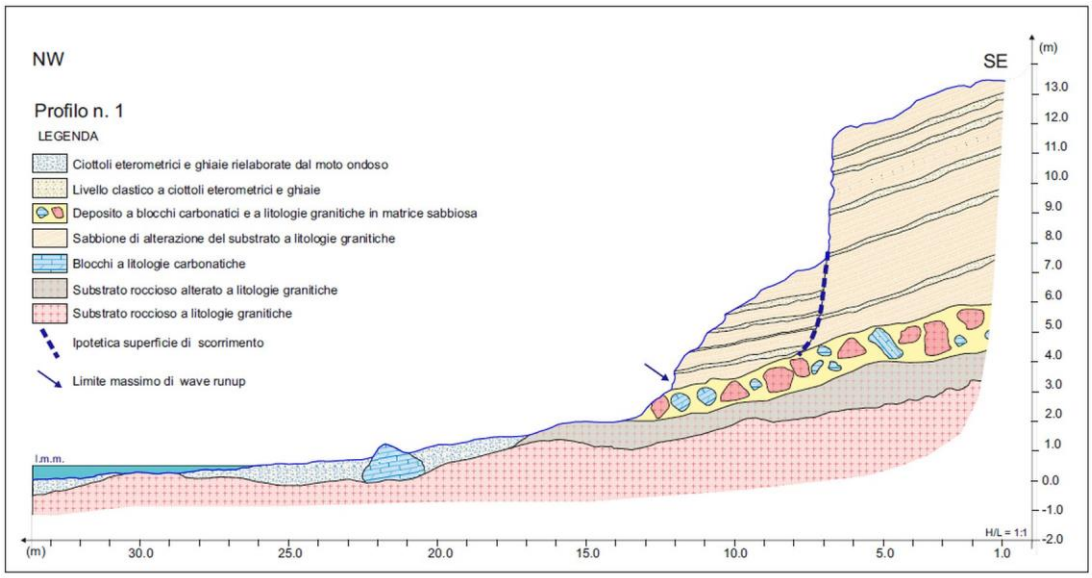


Figura 9. Profilo geologico n. 1

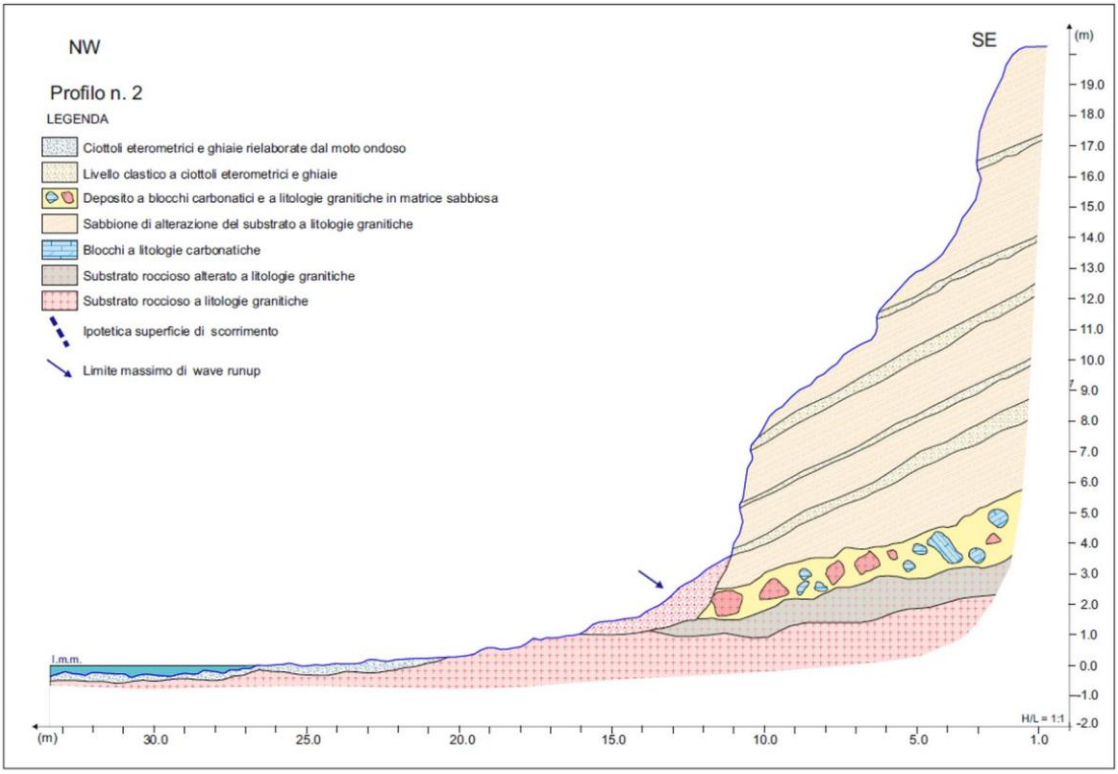


Figura 10. Profilo geologico n. 2

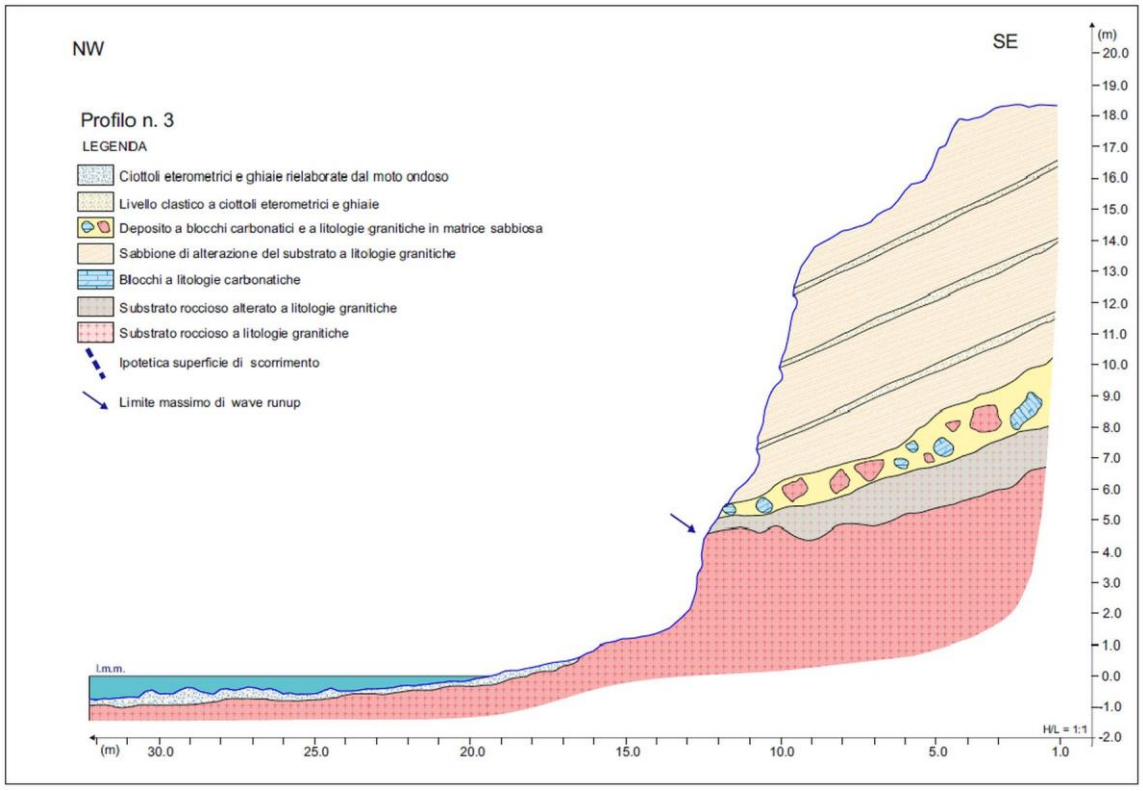
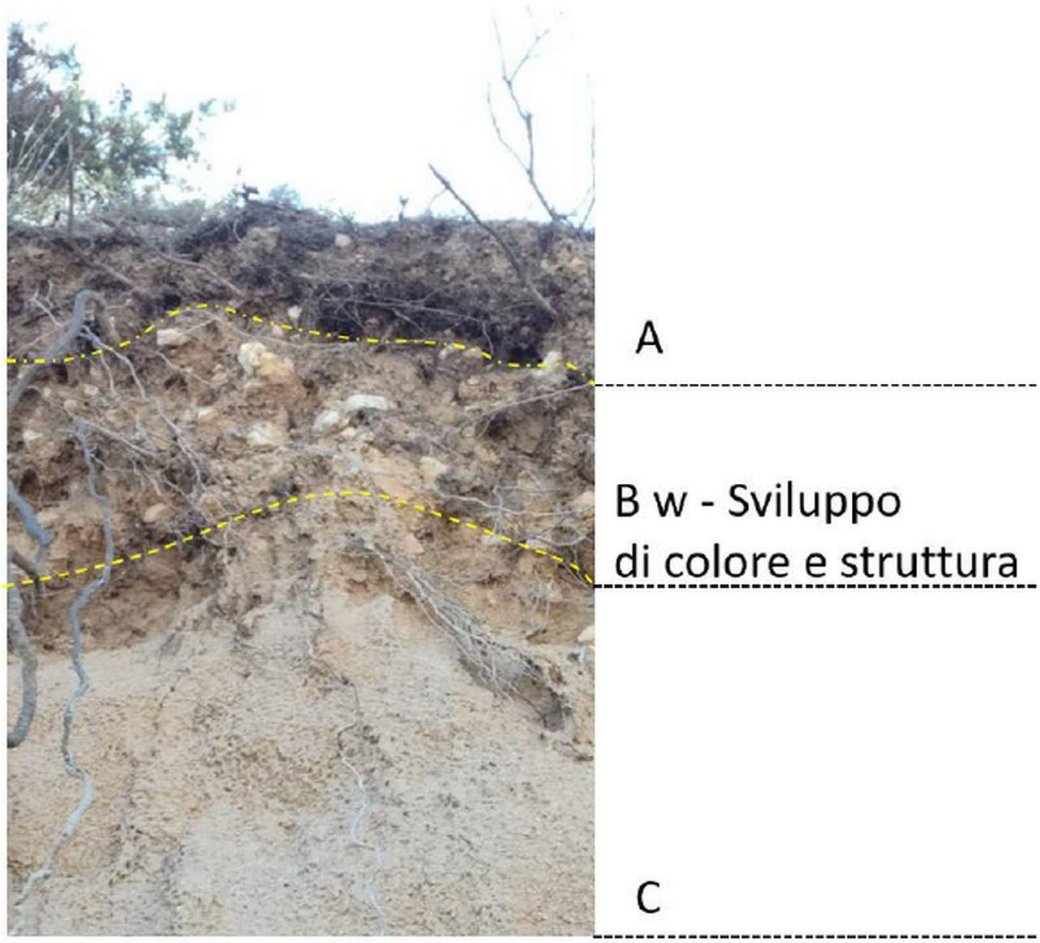
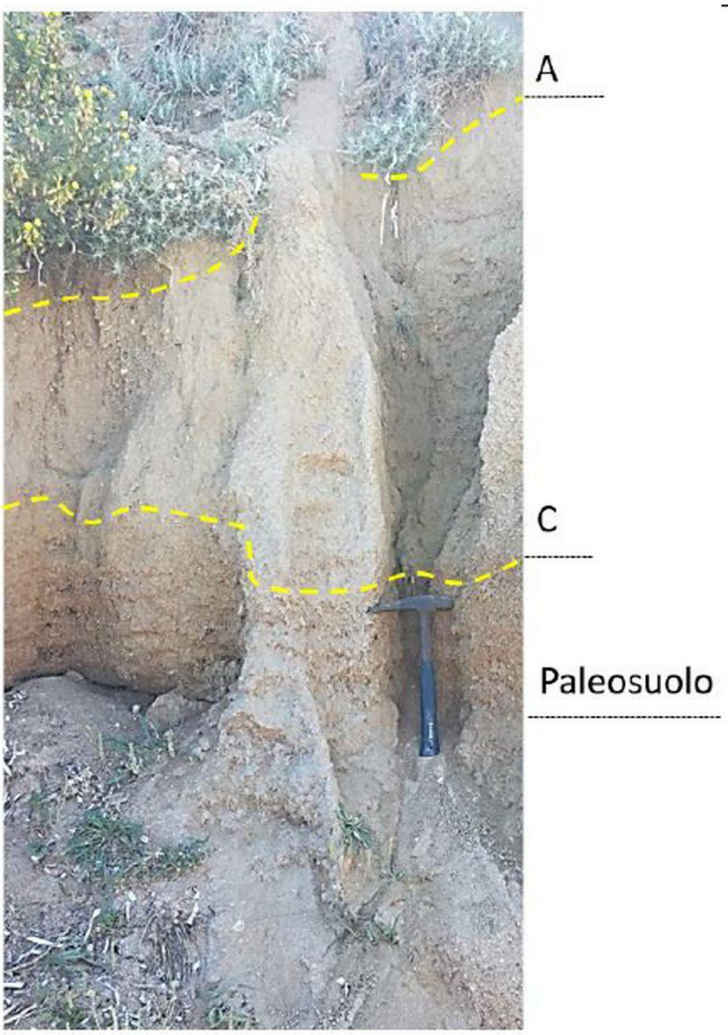
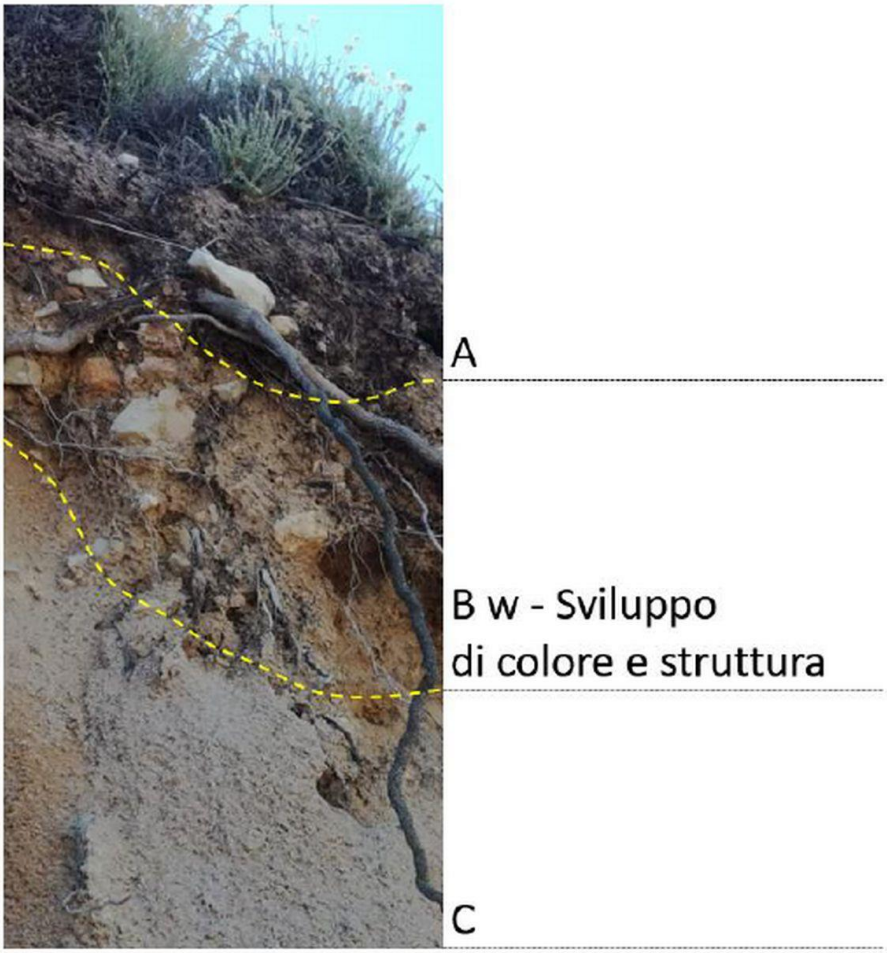


Figura 11. Profilo geologico n. 3

Per la definizione delle caratteristiche pedologiche di campo sono stati eseguite 3 analisi dei profili esposti sul versante in erosione. Le caratteristiche rilevate in campo hanno evidenziato suoli impostati sui depositi di pendio costituiti da ghiaie e sabbie limose di origine monzogranitica. I suoli che si sviluppano nell’area studiata sono poco evoluti (Entisuoli), poco profondi, a tessitura da ghiaiosa a sabbiosa con una componente e limosa e pelitica variabile, caratterizzati da una successione di orizzonte di tipo A-C, talvolta con un orizzonte Bw caratterizzato da una struttura più evoluta e dalla presenza di pellicole di argilla. Tali suoli sono tipici di ambienti su litologie acide poco alterabili chimicamente (monzograniti, monzograniti alterate e depositi di pendio a clasti granitici) a elevata pendenza e processi erosivi. L’orizzonte organico-minerale A ha spessore che varia da 0 a 20 cm di profondità, il colore varia da bruno nocciola (10YR 6/6) a bruno (10YR 5/3). È caratterizzato da una bassissima percentuale di materia organica umificata ma sono presenti frammenti di apparati radicali. Sono stati rilevati localmente livelli irregolari bruni grigiastri e grigi con ceneri, che indicano tracce di antichi incendi. Lo scheletro è costituito da ghiaie e sabbie a minerali di quarzo e feldspati e da frammenti litici granitoidi. Nella parte più fine aumentano le biotiti. L’orizzonte minerale C ha una profondità superiore a 100 cm, il colore varia bruno giallastro a bruno biancastro. Lo scheletro è costituito principalmente da ghiaie e sabbie granitiche con lenti con abbondanti ciottoli a spigoli vivi di dolomie giurassiche. Tra l’orizzonte A e C talvolta è presente un orizzonte Bw caratterizzato da un colore bruno nocciola con struttura poliedrica subangolare e con frequenti pellicole di argilla sui clasti. Localmente è molto compatto a causa di una leggera cementazione.
Nelle parti più basse della sequenza a circa 100 cm di profondità livelli sabbiosi debolmente ossidati, con colore rossastro 7.5 YR 8/4, indicano la presenza di un paleosuolo.
Nel complesso la sostanza organica è modestissima e limitata a sottili lenti a resti lignei combusti, il profilo pedologico si presenta spesso troncato da processi di erosione areale recente. Il complesso dei dati pedologici descrive un quadro a fertilità molto modesta e una forte tendenza verso i processi di desertificazione.

Profilo	***Profilo 1***
Morfologia	Parte sommitale della ripa di erosione
Substrato	Depositi di versante
Tessitura	Ghiaie argilloso-sabbiose
Orizzonti	A – Bw - C
Descrizione Orizzonti	A – scarsa presenza di sostanza organica umificata intimamente legata alla frazione minerale. Presenza di frammenti di apparati radicali. Bw - l’originale struttura del deposito è stata quasi completamente obliterata. Ciottoli dolomitici e subordinatamente granitici con ghiaie e sabbie. E’ presente concentrazione illuviale di argilla in pellicole sullo scheletro, leggera cementazione. C – Depositi di versante ghiaiosi e sabbiosi. Leggermente cementati. Graniti arenizzati e depositi di versatene di genesi granitica.
Classificazione	Entisuolo
Foto	

Profilo	***Profilo 2***
Morfologia	Parte sommitale della ripa di erosione
Substrato	Depositi di versante
Tessitura	Ghiaie argilloso-sabbiose
Orizzonti	A – C – Paleo-suolo
Descrizione Orizzonti	A – da o a 10 cm con scarsissima materia organica C – Depositi di versante ghiaiosi e sabbiosi a componente granitica. Paleosuolo –orizzonte C, arrossato, con accumulo di ossidi di ferro
Classificazione	Entisuolo Paleosuolo
Foto	

Profilo	***Profilo 3***
Morfologia	Parte sommitale della ripa di erosione
Substrato	Depositi di versante
Tessitura	Ghiaie argilloso-sabbiose
Orizzonti	A – Bw - C
Descrizione Orizzonti	A – scarsa presenza di sostanza organica umificata intimamente legata alla frazione minerale. Presenza di frammenti di apparati radicali. L'originale struttura del deposito è stata quasi completamente obliterata. Ciottoli dolomitici e subordinatamente granitici con ghiaie e sabbie. È presente concentrazione illuviale di argilla in pellicole sullo scheletro, leggera cementazione. C – Depositi di versante ghiaiosi e sabbiosi. Leggermente cementati. Graniti arenizzati e depositi di versatene di genesi granitica.
Classificazione	Entisuolo
Foto	

4.3 Lineamenti geomorfologici, processi morfologici e dissesti in atto

L'intervento interessa un'area costiera caratterizzata dalla presenza di falesie, ovvero oggetto di progressiva erosione e arretramento.

I meccanismi di attivazione dei processi che portano all'instabilità delle falesie in generale sono, in diversa misura e talvolta in compartecipazione:

- il moto ondoso;
- le caratteristiche geotecniche dei depositi interessati dai processi di frana;
- la variazione del livello del mare e della marea (sebbene questa sia poco significativa nel contesto mediterraneo);
- l'azione dei venti (ed eventi metereologici in genere),
- il comportamento delle acque sotterranee
- le precipitazioni;
- l'effetto di alterazione provocato dallo spray marino.

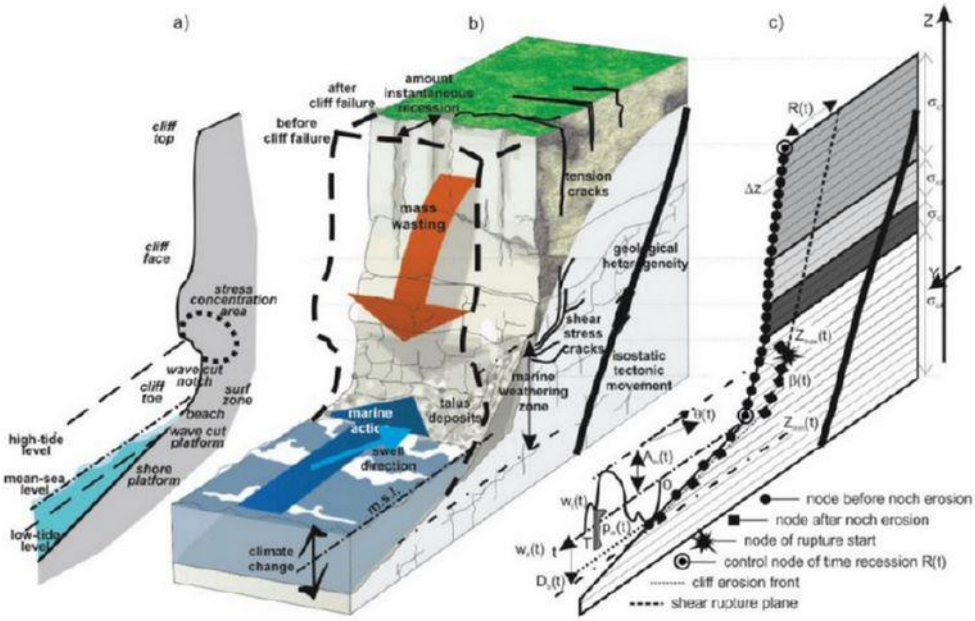


Figura 12. Blocco diagramma di una falesia: (a) aspetti morfologici di una falesia; (b) unità costiera omogenea (CBU), che presenta condizioni geologiche ed oceanografiche omogenee; (c) discretizzazione di una sezione litorale su falesia con gli elementi principali coinvolti, da (Castedo et al., 2012).

Figura 13. Deposito di frana con abbondante matrice siltoso- sabbiosa alla base della ripa di erosione. I materiali sono stati già in parte rimobilizzati dai massimi frangenti.

Nel sito in esame i processi di alterazione, erosione e deposizione che hanno influenza sugli aspetti morfologici dell'area costiera, definendone l'ubicazione e la forma sono principalmente i seguenti:

- **alterazione chimico-fisica**, il basamento intrusivo dell'area mostra spesso delle fasce arenizzate frutto di processi di alterazione anche profonda, che evidenziano blocchi isolati, di dimensioni estremamente variabili, fino a volumi di decine di mc;
- **erosione areale**, nell'area di studio, i processi di erosione areale, interessano principalmente i settori superiori del versante laddove la vegetazione è assente. In minor misura sono rilevabili anche nel settore basale; in questo ultimo caso i processi di erosione areale si aggiungono ai processi di dilavamento da parte del moto ondoso in occasione degli eventi meteomarini straordinari;
- **erosione concentrata**, nei settori a dominati da maggiore pendenza e da assenza di vegetazione arborea e arbustiva, si impostano canali di erosione su depositi incoerenti. I canali di erosione incidono i depositi di versante talvolta sino al substrato roccioso alterato;
- **processi di erosione retrogressiva legata ai massimi frangenti**, nel settore di costa studiato è stata definita l'area interessata dai processi di wave run-up è una fascia che dalla linea di riva si estende verso terra fino alla quota massima di circa 3÷4 metri. Il limite verso terra è di due tipologie:
    - *ripe di erosione*: si rilevano nei depositi alla base dei versanti ed hanno altezza variabile tra pochi decimetri e circa 1,5 metri. La ripa di erosione è sede di processi

di scalzamento alla base che innescano processi gravitativi con maggior grado di attività in occasione degli eventi meteo marini estremi.

- *nicchie e solchi di run-up*: si rilevano alla base di versanti ad alta pendenza, fino alla quota massima di circa 2-3 metri; la profondità massima rilevata per queste morfologie è nell'ordine di qualche decimetro. Tale processo predispone a processi di crollo, crollo-ribaltamento e scivolamenti planari a causa dell'erosione alla base.

Figura 14. Affioramento di granito alterato alla base della ripa di erosione.

Figura 15. a) substrato monzogranitico alterato. b) Erosione lineare (Rills). C) area interessata da erosione diffusa.

4.4 Caratteri geostrutturali, geometria e superfici di discontinuità

Il basamento paleozoico affiora in più settori dell'Isola Tavolara. In generale si tratta del Complesso granitoide del Carbonifero-Permiano a prevalenti monzograniti porfiriche in ammassi rocciosi che affiorano integre o poco fessurate e monzograniti molto fratturate e fessurate.

L'assetto geologico stratigrafico alla scala del sito è caratterizzato dal locale affioramento del substrato monzogranitico su cui poggiano depositi quaternari di varia natura. Le monzograniti si presentano in differenti stati di alterazione, da litoidi a molto alterate.

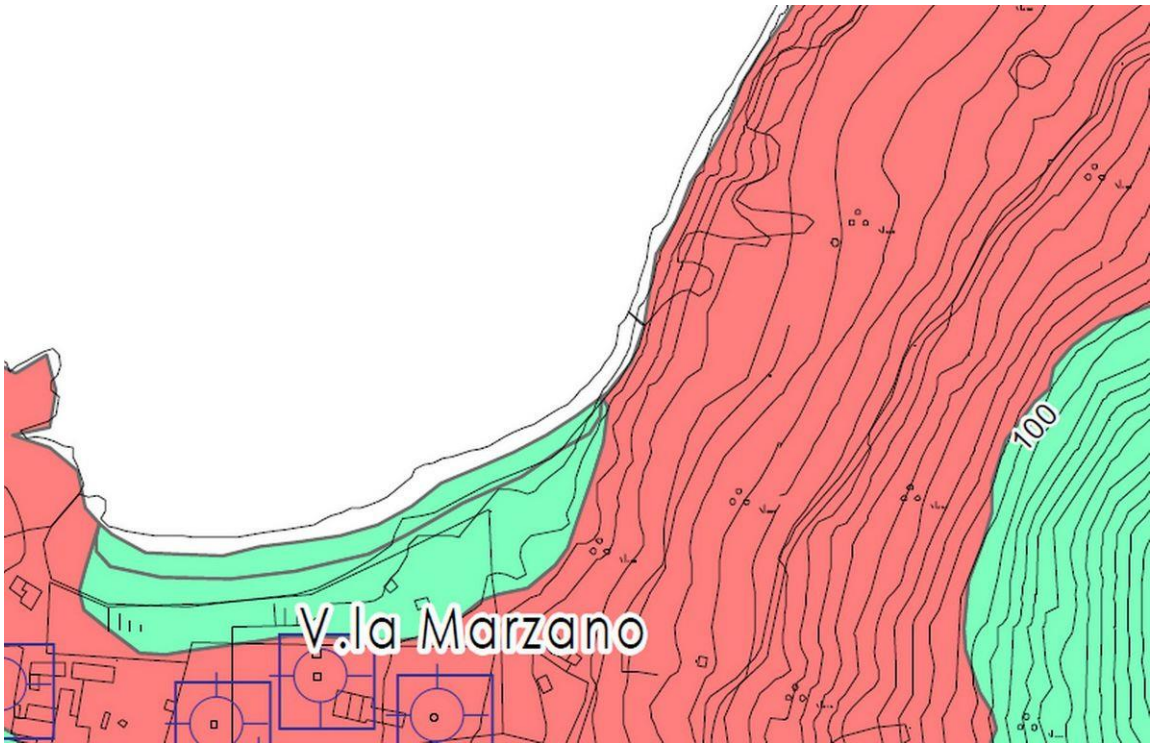
L'intensità della fratturazione è inoltre un elemento che favorisce il processo di alterazione provocato dallo spray marino, poiché incrementa la superficie esposta dell'ammasso roccioso soggetta a tale azione.

4.5 Circolazione idrica superficiale e sotterranea

Il versante nord di Tavolara presenta un reticolo idrografico povero se non assente. Il deflusso superficiale si infiltra o scorre superficialmente creando canali di incisione nelle zone non coperte di vegetazione. Tale fenomeno è una concausa dei processi erosivi che interessano il versante.

Su Tavolara la presenza di acqua dolce è molto limitata, praticamente assente. Le poche fonti citabili sono "la Minerale" nella zona di Punta Timone e la Fonte di Scirocco sul versante meridionale, peraltro distanti dal sito di intervento, ma sono comunque assenti sorgenti perenni. Il versante alla cui base si situa l'intervento è caratterizzato da una circolazione prevalentemente superficiale tranne fenomeni carsici.

La carta idrogeologica del Piano Urbanistico Comunale di Olbia individua nell'area due unità: l'"*Unita Detritico-Carbonatica Quaternaria, sabbie marine di spiaggia e dunari arenarie eoliche sabbie derivanti da arenizzazione dei graniti; panchina tirreniana travertini calcari detriti di falda"* caratterizzata da permeabilità alta per porosità nella porzione sud-ovest; l'*Unita Magmatica Paleozoica, Complesso intrusivo - Complesso migmatitico ercinico"* caratterizzata da permeabilità per porosità complessiva medio-bassa nella porzione nord-est.



1, Unita Detritico-Carbonatica Quaternaria, Sabbie marine di spiaggia e dunari arenarie eoliche sabbie derivanti da arenizzazione dei graniti; panchina tirreniana travertini calcari; detriti di falda — Permeabilità alta per porosità

11, Unita Magmatica Paleozoica, Complesso intrusivo - Complesso migmatitico ercinico — Permeabilità per porosità complessiva medio-bassa; localmentemedio-alta nei livelli a matrice più grossolana

Tratto di Intervento 3 – Protezione della stazione di Centaurea horrida a Cala Tramontana*

Figura 16. Piano Urbanistico Comunale di Olbia in Adeguamento al PPR e al PAI adottato con Delibera n. 134 del 29/07/2020
Estratto Tav. A.7 TM – Assetto ambientale – Idrogeologia

5 Aspetti geotecnici

5.1 Indagini in sito, di laboratorio

Le indagini eseguite sono:

Novembre 2020

- analisi granulometriche,
- peso specifico dei grani,
- prova di taglio diretta,
- rilievo pedologico,

Febbraio 2021

- rilievo geologico e ricostruzione di dettaglio della stratigrafia dell’arenile

Inoltre i rilievi geologici sono stati supportati con analisi fotogrammetrica da drone.

Contestualmente all’esecuzione dei rilievi geomorfologici è stato eseguito il campionamento dei materiali per le analisi in laboratorio. Sono stati prelevati campioni sui depositi di versante e sui suoli. Sono stati prelevati sia campioni disturbati che indisturbati per mezzo di campionatore a infissione.

Su questi campioni sono state effettuate prove di: analisi granulometrica, determinazione del peso specifico dei grani, determinazione del peso di volume e due prove di taglio diretto. In totale sono stati prelevati 2 campioni di suolo superficiale, 3 campioni dei depositi di versante di cui uno tramite campionatore a infissione e uno relativamente ad un livello cementato.

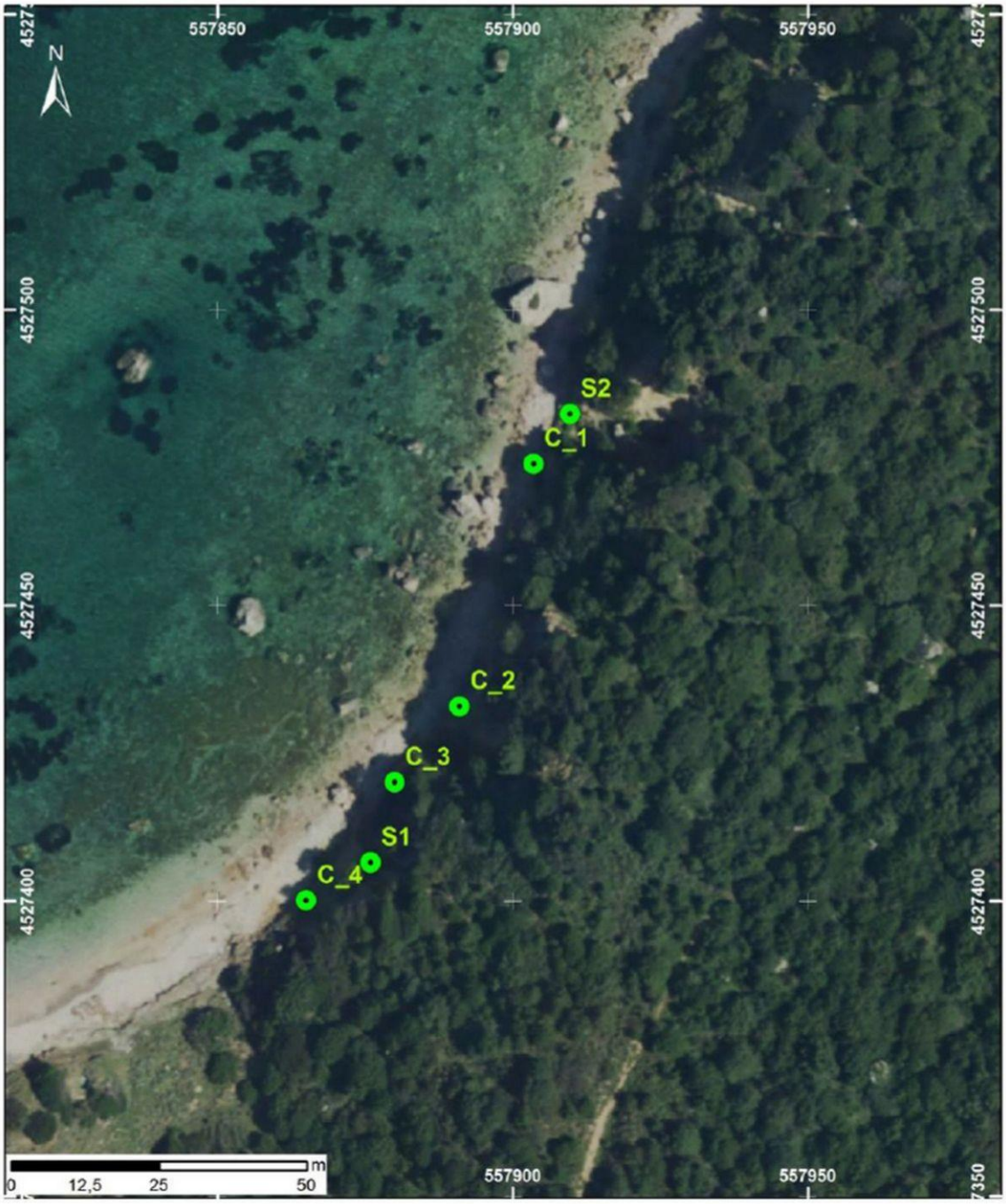


Figura 17. Ortofoto con localizzazione dei punti di campionamento

L’attività analitica per la determinazione delle caratteristiche tessiturali è consistita in tre fasi:

Fase 1: preparazione e pretrattamento.

Ogni campione (del peso di circa 1200 gr.) è stato trattato con una soluzione di perossido di idrogeno (30%) ed acqua distillata in proporzione 1:4, per 48 ore a temperatura ambiente. I campioni sono stati poi lavati con acqua distillata per due volte, al fine di rimuovere i sali presenti ed essiccati in stufa per 24 ore alla temperatura di 100°C.

Fase 2: separazione della frazione grossolana da quella pelitica.

Dopo gli opportuni pretrattamenti e la determinazione del peso totale, ciascun campione è stato separato ad umido in due frazioni granulometriche mediante un setaccio con vuoto di maglia da 63 µm. La frazione grossolana (>63 µm) e quella fine (<63 µm) sono state poste in appositi contenitori, essiccate in stufa per 24 ore alla temperatura di 100°C e successivamente pesate.

Fase 3: analisi delle frazioni ottenute.

La frazione maggiore di 63 µm è stata vagliata per 12 minuti con una pila di setacci della serie ASTM (American Society for Testing and Materials) con maglie di dimensioni variabili da 5600 a 63 µm, intervallati di 1/2 Φ (Φ = -log2 d; dove d è il diametro di ogni singola particella espresso in mm); infine si è proceduto alla determinazione del peso trattenuto entro ciascun setaccio.

Nelle tabelle e nei grafici seguenti sono riportati tutti i dati relativi alle analisi granulometriche eseguite; in particolare le tabelle e i grafici riportano: le percentuali in peso del trattenuto al relativo setaccio, le determinazioni di coefficiente di uniformità e di curvatura, la curva cumulativa che caratterizza il sedimento e la distribuzione della granulometria rappresentata su grafico a istogrammi.

SAMPLE STATISTICS

SIEVING ERROR: -0,1%

SAMPLE IDENTITY: **Suolo** ANALYST & DATE: ,

SAMPLE TYPE: Polymodal, Very Poorly Sorted TEXTURAL GROUP: Gravelly Muddy Sand

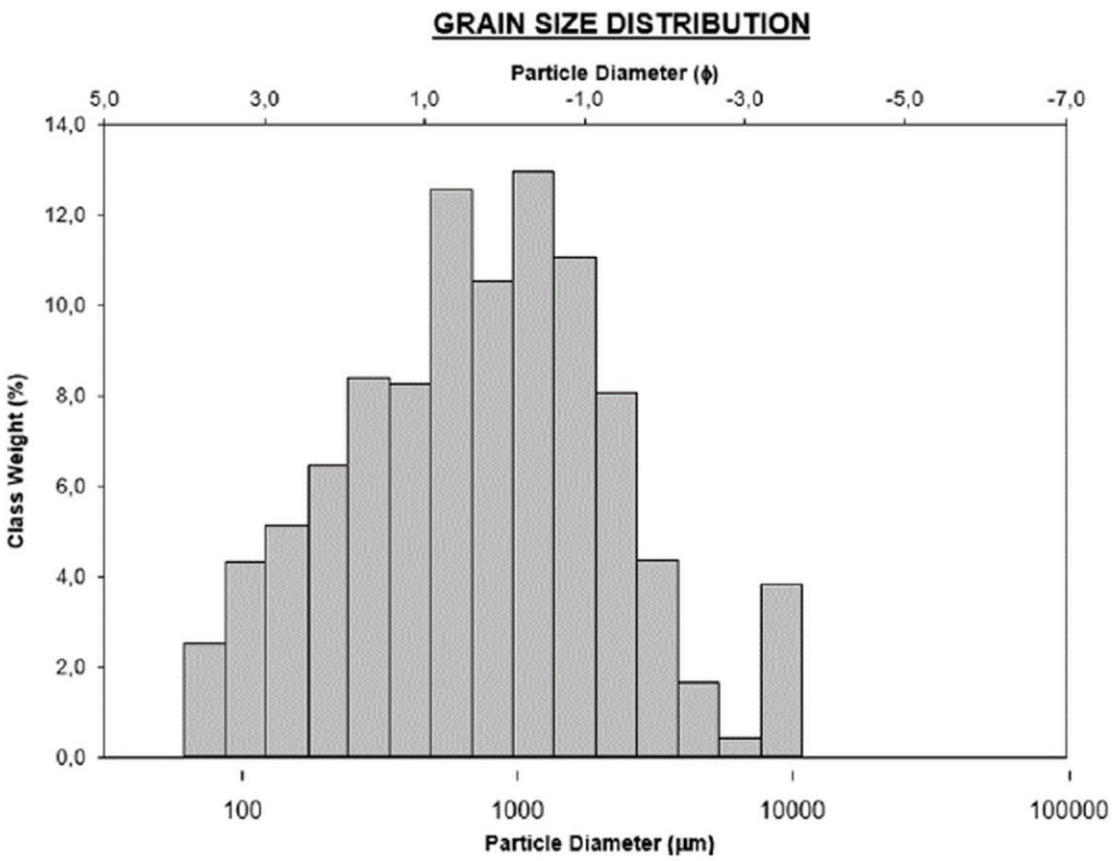
SEDIMENT NAME: Very Fine Gravelly Medium Silty Very Coarse Sand

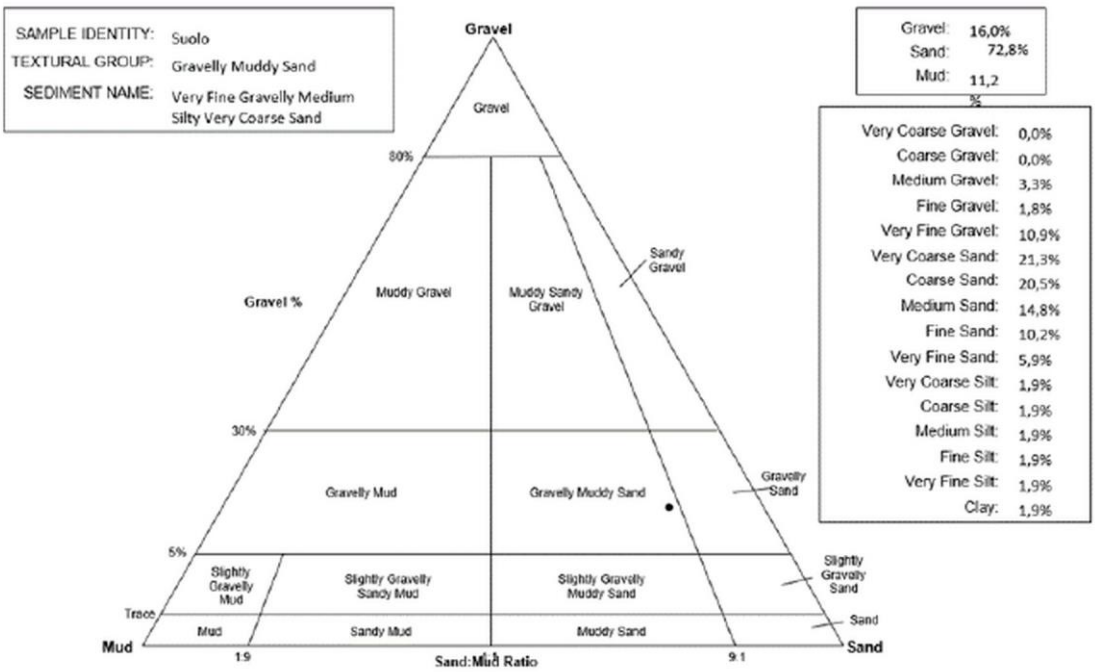
	µm	ϕ
MODE 1:	1200,0	-0,243
MODE 2:	605,0	0,747
MODE 3:	302,5	1,747
D_{10}:	46,10	-1,420
MEDIAN or D_{50}:	637,2	0,650
D_{90}:	2676,1	4,439
(D_{90} / D_{10}):	58,05	-3,126
(D_{90} - D_{10}):	2630,0	5,859
(D_{75} / D_{25}):	6,731	-4,079
(D_{75} - D_{25}):	1239,3	2,751

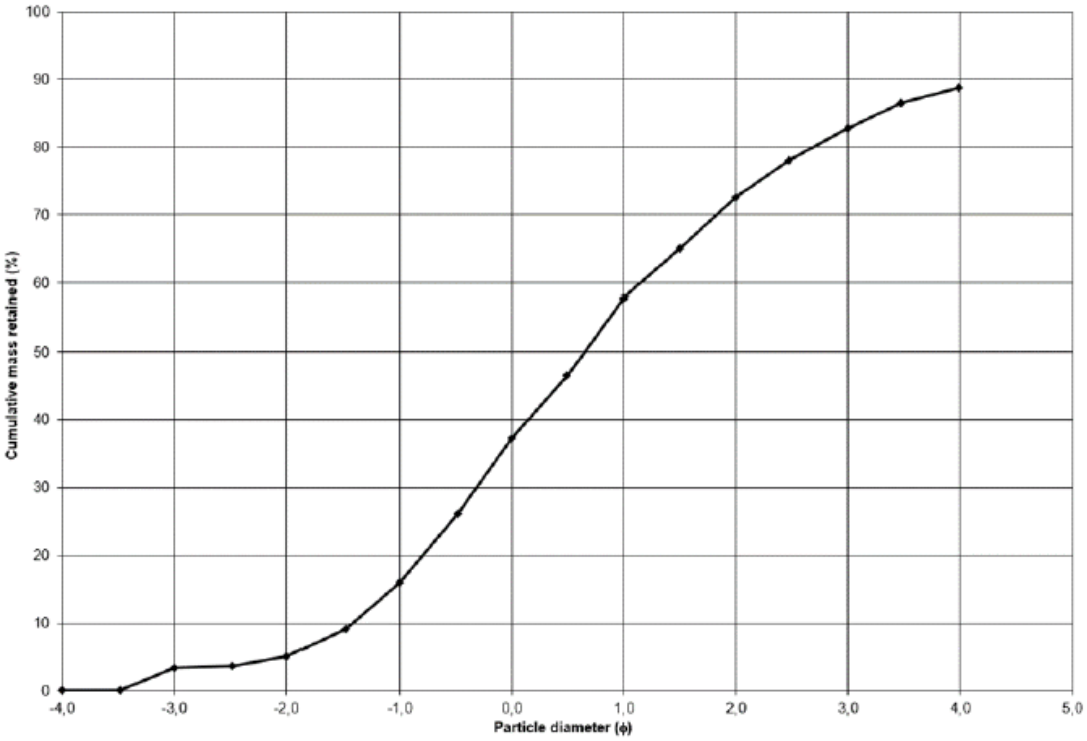
GRAIN SIZE DISTRIBUTION

GRAVEL:	16,0%	COARSE SAND:	20,5%
SAND:	72,8%	MEDIUM SAND:	14,8%
MUD:	11,2%	FINE SAND:	10,2%
		V FINE SAND:	5,9%
V COARSE GRAVEL:	0,0%	V COARSE SILT:	1,9%
COARSE GRAVEL:	0,0%	COARSE SILT:	1,9%
MEDIUM GRAVEL:	3,3%	MEDIUM SILT:	1,9%
FINE GRAVEL:	1,8%	FINE SILT:	1,9%
V FINE GRAVEL:	10,9%	V FINE SILT:	1,9%
V COARSE SAND:	21,3%	CLAY:	1,9%

	METHOD OF MOMENTS			FOLK & WARD METHOD		
	Arithmetic µm	Geometric µm	Logarithmic ϕ	Geometric µm	Logarithmic ϕ	Description
MEAN ($\bar{x}$):	1246,9	445,7	1,166	523,2	0,935	Coarse Sand
SORTING (σ):	1851,7	5,957	2,575	4,886	2,289	Very Poorly Sorted
SKEWNESS (Sk):	3,221	-0,974	0,974	-0,278	0,278	Fine Skewed
KURTOSIS (K):	14,28	3,512	3,512	1,229	1,229	Leptokurtic


GRAIN SIZE DISTRIBUTION
Particle Diameter (ϕ)
5,0
3,0
1,0
-1,0
-3,0
-5,0
-7,0
14,0
12,0
10,0
8,0
6,0
4,0
2,0
0,0
Class Weight (%)
100
1000
10000
100000
Particle Diameter (µm)


SAMPLE IDENTITY: Suolo
TEXTURAL GROUP: Gravelly Muddy Sand
SEDIMENT NAME: Very Fine Gravelly Medium Silty Very Coarse Sand
Gravel: 16,0%
Sand: 72,8%
Mud: 11,2 %
Very Coarse Gravel: 0,0%
Coarse Gravel: 0,0%
Medium Gravel: 3,3%
Fine Gravel: 1,8%
Very Fine Gravel: 10,9%
Very Coarse Sand: 21,3%
Coarse Sand: 20,5%
Medium Sand: 14,8%
Fine Sand: 10,2%
Very Fine Sand: 5,9%
Very Coarse Silt: 1,9%
Coarse Silt: 1,9%
Medium Silt: 1,9%
Fine Silt: 1,9%
Very Fine Silt: 1,9%
Clay: 1,9%
Gravel
Gravel
80%
Gravel %
Muddy Gravel
Muddy Sandy Gravel
Sandy Gravel
30%
Gravelly Mud
Gravelly Muddy Sand
Gravelly Sand
5%
Slightly Gravelly Mud
Slightly Gravelly Sandy Mud
Slightly Gravelly Muddy Sand
Slightly Gravelly Sand
Trace
Mud
Sandy Mud
Muddy Sand
Sand
Mud
1:9
Sand:Mud Ratio
9:1
Sand



SAMPLE STATISTICS

SIEVING ERROR: 0,0%

SAMPLE IDENTITY: **Suolo 2**

ANALYST & DATE: ,

SAMPLE TYPE: Bimodal, Very Poorly Sorted

TEXTURAL GROUP: Gravelly Muddy Sand

SEDIMENT NAME: Very Fine Gravelly Very Coarse Silty Very Coarse Sand

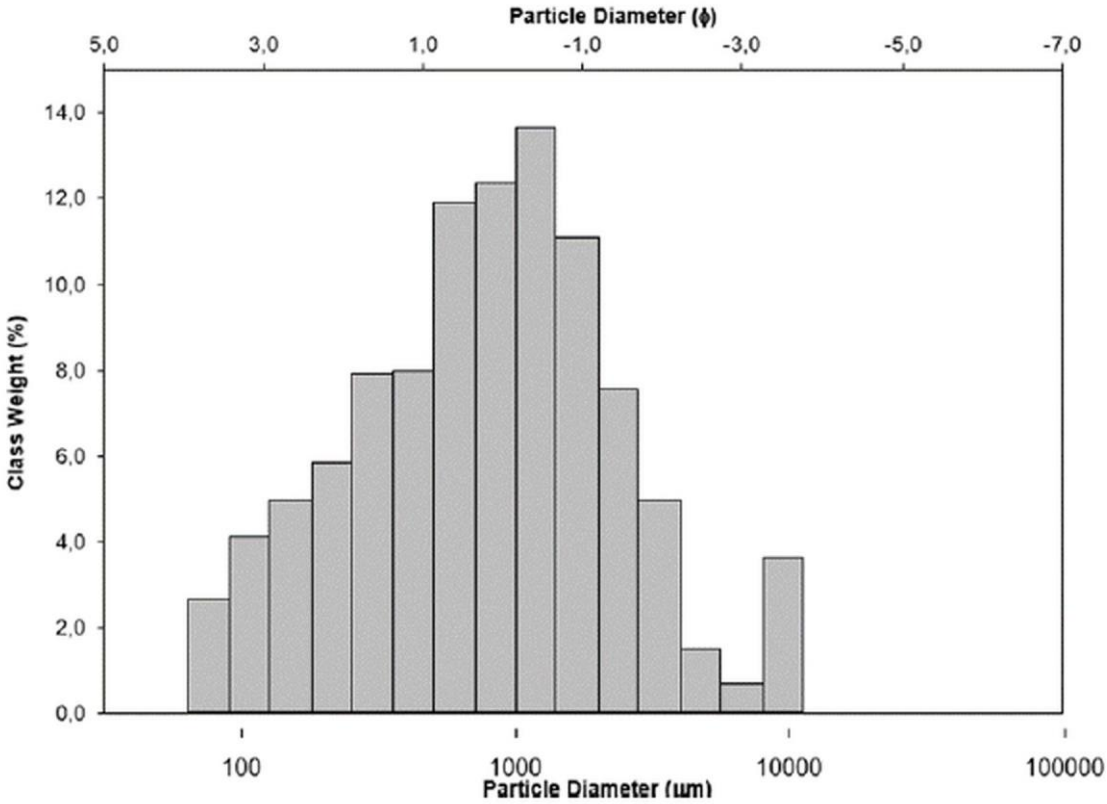
	µm	ϕ
MODE 1:	1200,0	-0,243
MODE 2:	9600,0	-3,243
MODE 3:		
D_{10}:	69,02	-1,461
MEDIAN or D_{50}:	703,5	0,507
D_{90}:	2753,5	3,857
(D_{90} / D_{10}):	39,90	-2,639
(D_{90} - D_{10}):	2684,5	5,318
(D_{75} / D_{25}):	5,941	-3,530
(D_{75} - D_{25}):	1232,4	2,571

GRAIN SIZE DISTRIBUTION

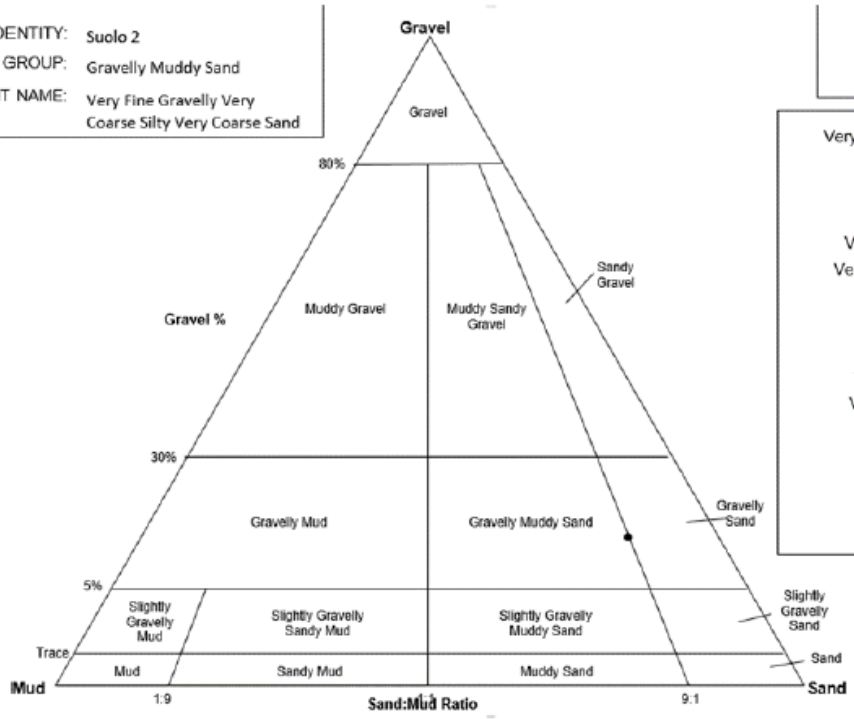
GRAVEL:	16,3%	COARSE SAND:	22,0%
SAND:	74,3%	MEDIUM SAND:	14,4%
MUD:	9,4%	FINE SAND:	9,7%
		V FINE SAND:	6,0%
V COARSE GRAVEL:	0,0%	V COARSE SILT:	1,6%
COARSE GRAVEL:	0,0%	COARSE SILT:	1,6%
MEDIUM GRAVEL:	3,2%	MEDIUM SILT:	1,6%
FINE GRAVEL:	1,9%	FINE SILT:	1,6%
V FINE GRAVEL:	11,3%	V FINE SILT:	1,6%
V COARSE SAND:	22,4%	CLAY:	1,6%

	METHOD OF MOMENTS			FOLK & WARD METHOD		
	Arithmetic µm	Geometric µm	Logarithmic ϕ	Geometric µm	Logarithmic ϕ	Description
MEAN ($\bar{x}$):	1282,0	497,2	1,008	573,0	0,803	Coarse Sand
SORTING (σ):	1838,4	5,485	2,456	4,534	2,181	Very Poorly Sorted
SKEWNESS (Sk):	3,180	-1,055	1,055	-0,292	0,292	Fine Skewed
KURTOSIS (K):	14,07	3,900	3,900	1,256	1,256	Leptokurtic

GRAIN SIZE DISTRIBUTION

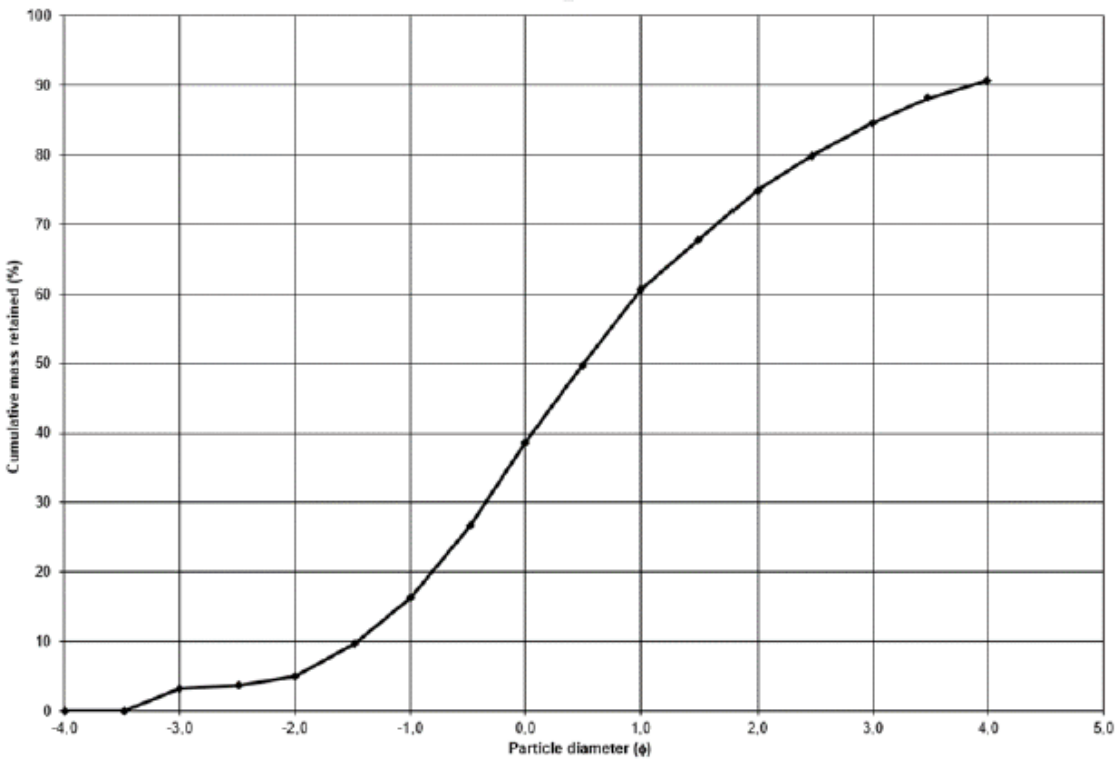


SAMPLE IDENTITY: Suolo 2
TEXTURAL GROUP: Gravelly Muddy Sand
SEDIMENT NAME: Very Fine Gravelly Very Coarse Silty Very Coarse Sand



Gravel:	16,3%
Sand:	74,3%
Mud:	9,4%

Very Coarse Gravel:	0,0%
Coarse Gravel:	0,0%
Medium Gravel:	3,2%
Fine Gravel:	1,9%
Very Fine Gravel:	11,3%
Very Coarse Sand:	22,4%
Coarse Sand:	22,0%
Medium Sand:	14,4%
Fine Sand:	9,7%
Very Fine Sand:	6,0%
Very Coarse Silt:	1,6%
Coarse Silt:	1,6%
Medium Silt:	1,6%
Fine Silt:	1,6%
Very Fine Silt:	1,6%
Clay:	1,6%



Per la determinazione del peso specifico dei grani, viene inserito all'interno di un picnometro di volume pari a 100 ml una quantità nota (50 g) di materiale secco, riempito per metà di acqua distillata e precedentemente disareata, riposto sottovuoto per il tempo necessario ad espellere tutti i gas. Dopodiché si procede a riempire il picnometro esattamente fino al segno riportato sul collo e a pesare il tutto con una precisione di 0.01 g. Viene poi ripetuta la pesata del picnometro pieno solo di acqua distillata fino alla tacca riportata sul collo e, per differenza, si ricava il volume spostato dalle particelle solide. Da questi dati è possibile ricavare il peso specifico delle particelle solide attraverso la formula:

$$\gamma d = \frac{\gamma w * (P2 - P1)}{[P4 + (P2 - P1)] - P3}$$

γw= Peso specifico dell'acqua

P1= Peso picnometro vuoto con tappo

P2= Peso picnometro con tappo + campione

P3= Peso picnometro con tappo + campione + acqua

P4= Peso picnometro con tappo + acqua

Campione	γd (g/cm3)
Pendio	2,61
Suolo	2,62

Con lo scopo di definire i valori di angolo di attrito interno e di coesione sono state eseguite n° 2 prove di taglio diretto sul campione indisturbato prelevato durante la campagna di rilievi in sito. Obiettivo di questa prova è stato determinare le caratteristiche di resistenza a taglio di un terreno in condizioni drenate, mediante interpretazione della relazione τ:σ' nel piano di Mohr. La prova è stata eseguita secondo le procedure ASTM D 3080-04; UNI CEN ISO/TS 17892-10/2005, su un numero di 4 provini per campione.

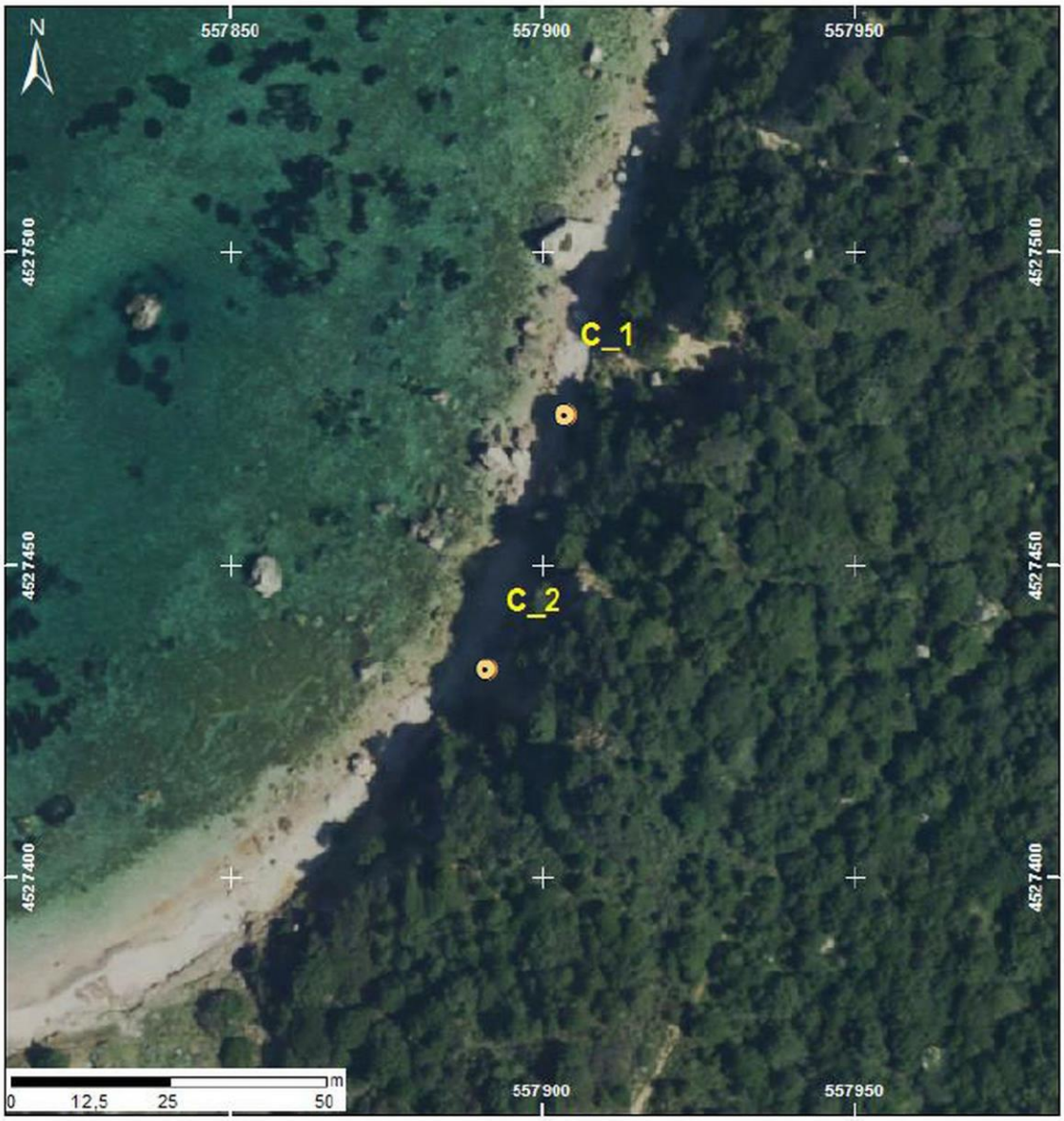
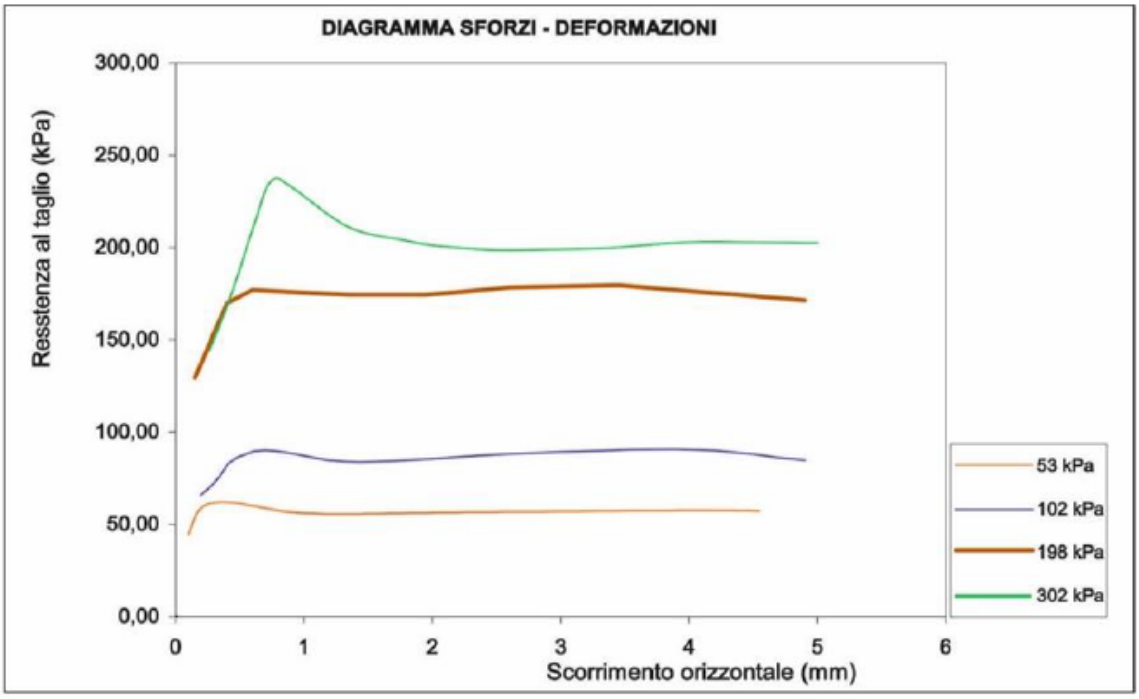


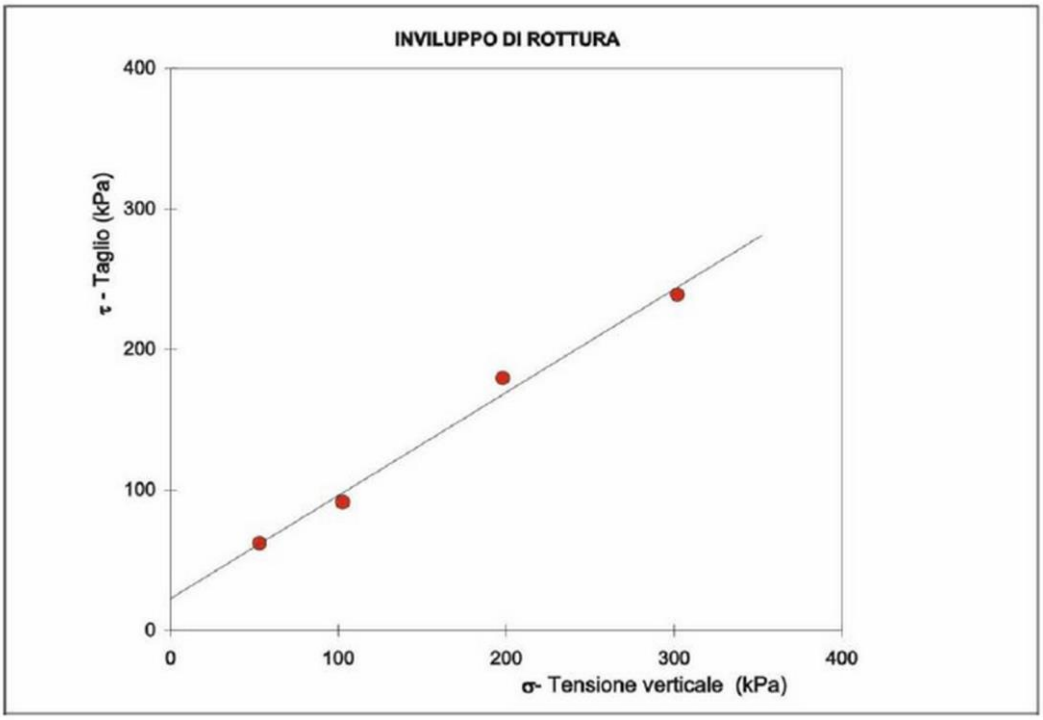
Figura 18. Localizzazione dei campioni indisturbati su cui sono state eseguite le prove di taglio diretto.

Nella tabella di seguito si riportano le caratteristiche dei provini e i risultati ottenuti durante le prove.

PROVA DI TAGLIO DIRETTO (Direct Shear Test Under Consolidated Drained Conditions) ASTM D 3080 - 98 / UNI CEN ISO/TS 17892-10					
Descrizione geotecnica del campione		Sabbia limosa debolmente cementata talora con livelli a ghiaia			
Caratteristiche della prova:		**Consolidata drenata** su provini indisturbati			
Immersione in acqua del provino durante la consolidazione e la fase di taglio		**SI**	NO		
CARATTERISTICHE DEL PROVINO					
	Provino n°	**1**	**2**	**3**	**4**
Contenuto d'acqua	%	17,9			
Peso di volume iniziale	g/m³	1,969	1,966	1,980	2,022
Peso di volume secco	g/m³	1,670	1,667	1,679	1,715
DATI DELLA CURVA DI CONSOLIDAZIONE					
	Provino n°	1	2	3	4
Tempo al 100% della consolidazione primaria	min	4,84			
Tempo minimo di durata della prova	min	61,468			
Velocità massima di esecuzione calcolata	mm/min	0,07			
TAGLIO					
Tensione verticale applicata	kPa	53,09	102,54	197,97	302,08
Resistenza massima al taglio	kPa	62,0	91,3	179,5	238,9
Deformazione orizzontale alla rottura	%	0,7	6,7	5,8	1,3
Velocità di prova	mm/min	0,07			
PARAMETRI DI RESISTENZA DI PICCO					
Angolo di resistenza al taglio (°)		36,27			
Coesione (Kpa)		22,6			

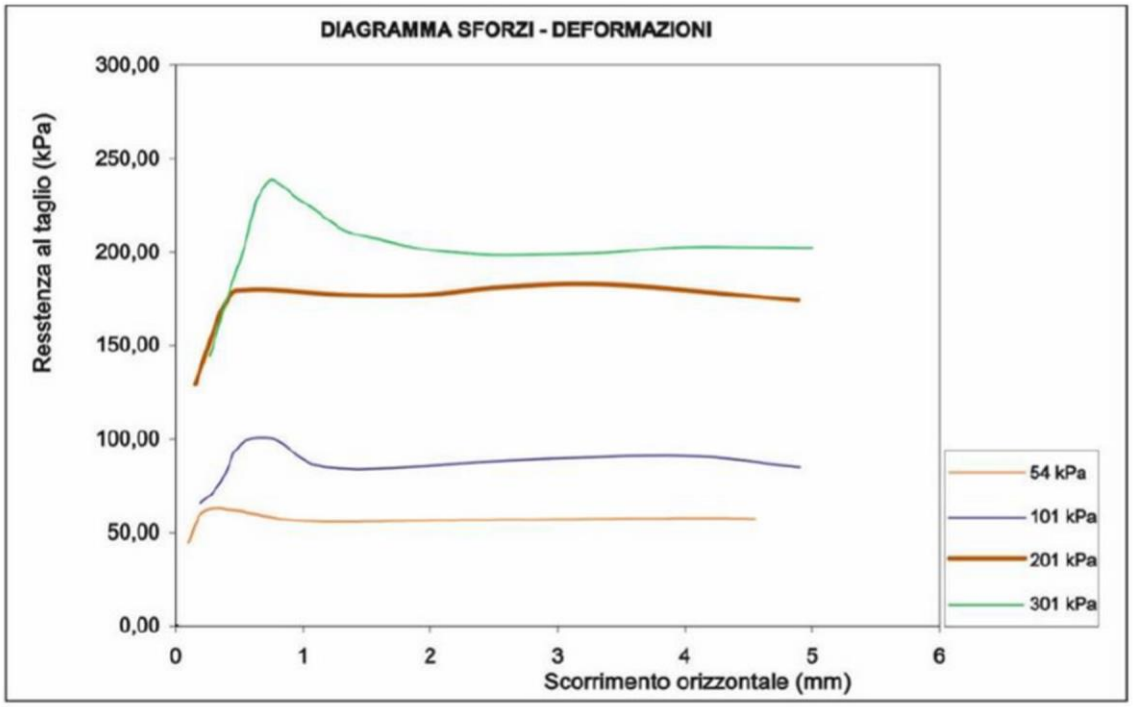
CAMPIONE C1

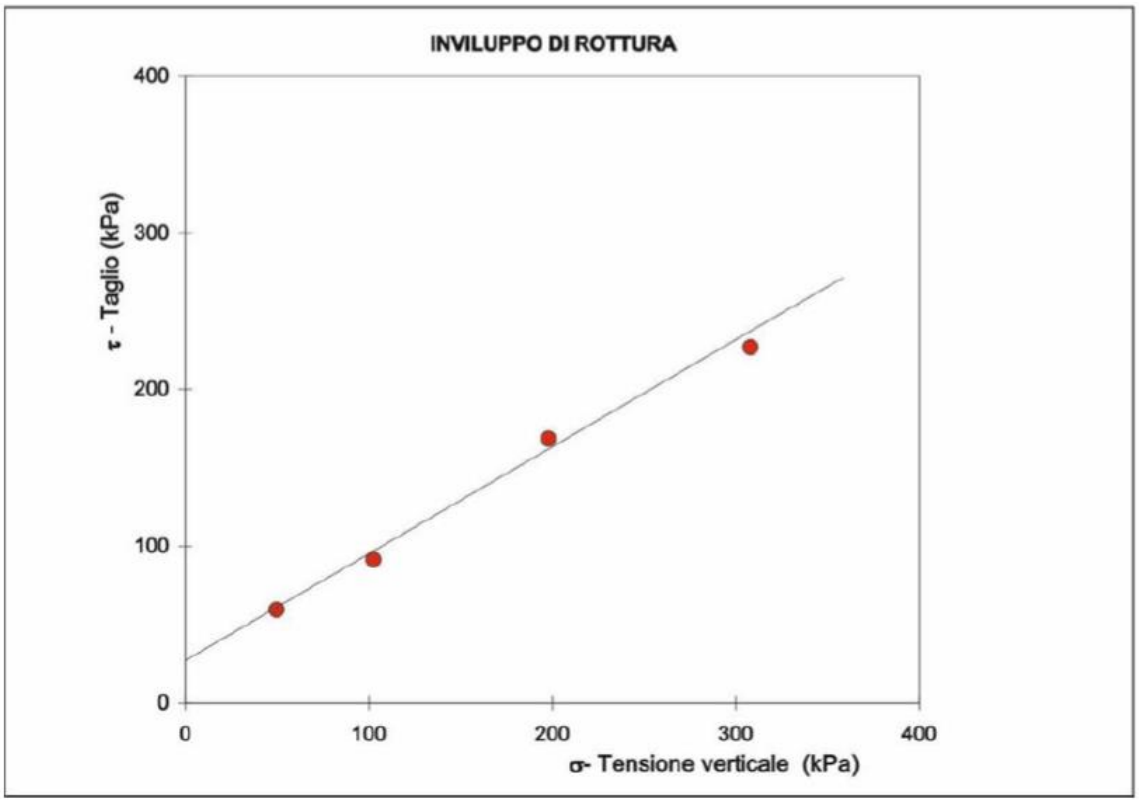




CAMPIONE C2

PROVA DI TAGLIO DIRETTO (Direct Shear Test Under Consolidated Drained Conditions) ASTM D 3080 - 98 / UNI CEN ISO/TS 17892-10					
Descrizione geotecnica del campione		Sabbia limosa debolmente cementata talora con livelli a ghiaia			
Caratteristiche della prova:		**Consolidata drenata** su provini indisturbati			
Immersione in acqua del provino durante la consolidazione e la fase di taglio		**SI**		NO	
CARATTERISTICHE DEL PROVINO					
	Provino n°	**1**	**2**	**3**	**4**
Contenuto d'acqua	%	12,2			
Peso di volume iniziale	g/m³	2,010	1,995	1,980	2,002
Peso di volume secco	g/m³	1,753	1,702	1,690	1,730
DATI DELLA CURVA DI CONSOLIDAZIONE					
	Provino n°	1	2	3	4
Tempo al 100% della consolidazione primaria	min	4,01			
Tempo minimo di durata della prova	min	58,321			
Velocità massima di esecuzione calcolata	mm/min	0,07			
TAGLIO					
Tensione verticale applicata	kPa	54,01	101,23	201,31	301,18
Resistenza massima al taglio	kPa	74,0	96,16	195,5	245,9
Deformazione orizzontale alla rottura	%	0,5	4,8	4,2	1,1
Velocità di prova	mm/min	0,05			
PARAMETRI DI RESISTENZA DI PICCO					
Angolo di resistenza al taglio (°)				38,53	
Coesione (Kpa)				25,3	





Il peso di volume è stato determinato attraverso il metodo della pesata con bilancia idrostatica. La procedura è stata applicata su tre provini dei campioni indisturbati C_1 e C_2; di seguito si riportano i risultati del peso di volume secco e umido.

Durante i rilievi geologici e geomorfologici non è stata rilevata la presenza di livelli plastici su cui effettuare prove con scissometro e penetrometro.

CAMPIONE C1

PESO DI VOLUME				
Descrizione	Provino n.°	Umidità (%)	Peso (g/cm³)	
			Umido	Secco
Sabbia limosa debolmente cementata talora con livelli a ghiaia	1	8,3	2,113	1,792
	2		2,015	1,709
	3		2,083	1,756
		Valore medio	**2,070**	**1,756**

CAMPIONE C2

PESO DI VOLUME				
Descrizione	Provino n.°	Umidità (%)	Peso (g/cm³)	
			Umido	Secco
Sabbia limosa debolmente cementata talora con livelli a ghiaia	1	10,1	2,139	1,801
	2		2,018	1,779
	3		2,132	1,799
		Valore medio	**2,093**	**1,793**

5.2 Parametri geotecnici di progetto e caratterizzazione del sottosuolo

Il modello geologico ha schematizzato il pendio con un'alternanza di sabbie e ghiaie poggiate su un substrato roccioso con e senza presenza di erosione al piede.

Stratigrafia

Strato	Coesione (kg/cm²)	Coesione non drenata (kg/cm²)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m³)	Peso saturo (Kg/m³)	Litologia	
1	2.26	0	36	1756	2070	Sabbia limosa	
2	2.53	0	38	1793	2093	Ghiaia sabbiosa	
8	0	0	45	2300	2500	Substrato roccioso	

Figura 19. Modello geologico stratigrafico semplificato del versante in assenza di solco di erosione al piede della ripa.

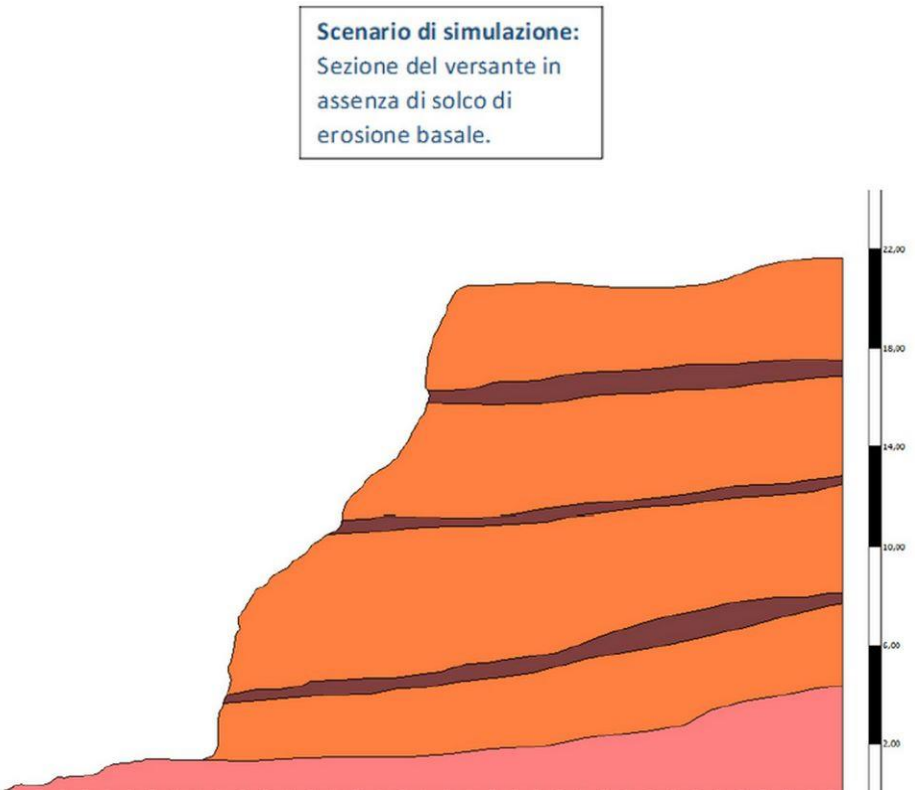


Figura 20. Modello geologico-tecnico stratigrafico semplificato del versante in assenza di solco di erosione al piede della ripa.

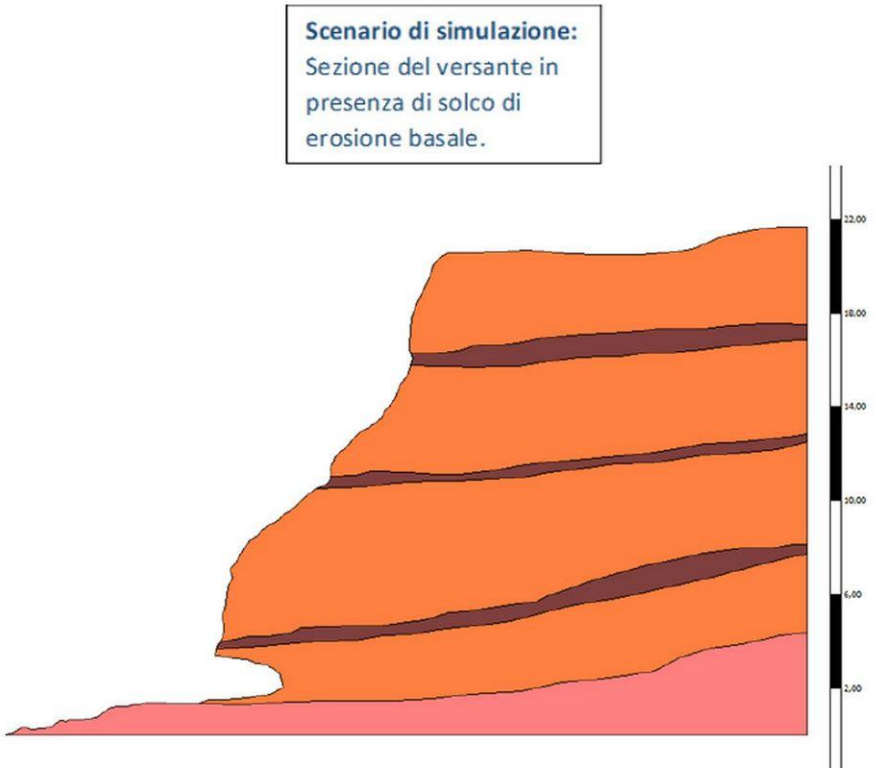


Figura 21. Modello geologico-tecnico stratigrafico semplificato del versante in presenza di solco di erosione al piede della ripa.

5.3 Dimensionamento dell'intervento

L'intervento non ha funzione di sostegno, pertanto il suo dimensionamento prescinde da valutazioni e verifiche strutturali o geotecniche delle opere di ingegneria civile tradizionale. L'opera è stata, anzi progettata in modo da evitare ogni interazione con il versante.

L'intervento è finalizzato a ridurre l'azione erosiva del moto ondoso. Le condizioni morfologiche caratterizzata da un arenile particolarmente stretto e l'altezza d'onda di 3-4 m corrispondono a un azione marina particolarmente gravosa che non consente di dimensionare l'opera per contrastare completamente tale azione. Pertanto l'opera ha la funzione di ridurre l'energia cinetica del moto ondoso, non impedendo il passaggio dell'acqua ma riducendone la velocità e quindi l'effetto sul piede del versante.

Al fine di limitare lo scalzamento dovuto all'erosione frontale l'opera è protetta con scogliera ed è fissata al substrato roccioso. Per contrastare l'azione di risacca a tergo è posto un biorullo, L'opera ha, inoltre, la funzione di trattenere il materiale depositato da movimenti di versante.

Nel complesso, quindi l'opera è stata dimensionata per ottenere la massima funzionalità possibile di contenimento dell'azione delle mareggiate, senza interagire direttamente con il pendio. In caso di eventi intensi di mareggiata, l'opera è comunque sormontabile e l'effetto risulta parziale. L'opera può subire danneggiamenti senza che questo produca effetti negativi sul versante o sull'assetto dell'area.

5.4 Risultati dei calcoli geotecnici e verifiche di stabilità del pendio

L'analisi geologico-tecnica quali-quantitativa è stata svolta con il metodo di Fellenius (1927), prevedendo l'individuazione di una superficie circolare critica di rottura, la suddivisione del volume in conci e ipotizzando che la risultante delle forze sulle superfici laterali dei conci sia pari a 0. La superficie di scorrimento critica è stata individuata per tentativi, reiterando il calcolo per diverse superfici con centro e raggio differenti.

L'analisi è da ritenersi quali-quantitativa in quanto non redatta ai sensi delle NTC2018, per quanto siano stati applicati metodi scientifici rigorosi. Il risultato non rappresenta quindi una valutazione delle stabilità del pendio con i metodi ed i fattori di sicurezza previsti dalla norma, inoltre non tiene conto dell'azione sismica. Infatti, essendo evidente una condizione intrinseca di instabilità, l'analisi verte sull'individuazione della causa di tale instabilità per indirizzare l'intervento. Nello specifico è stato, quindi, opportuno sviluppare un modello che simuli condizioni ordinarie senza fattori di sicurezza o azioni straordinarie, al fine di poter valutare se il dissesto è da ricondurre in modo prevalente a condizioni di instabilità globale o agli altri fattori.

Sotto le ipotesi sopra elencate, nel caso di assenza di solco il fattore di sicurezza è superiore a 2.25, con solco superiore a 1.48. Entrambi i valori sono superiori a 1.3, pertanto non corrispondono a condizioni di instabilità globale.

Il fatto che le verifiche di stabilità non evidenzino una condizione di instabilità anche con pareti quasi verticali significa che il dissesto è prevalentemente da ricondurre all'azione erosiva marina (moto ondoso), eolica (compreso trasporto dell'aerosol), delle acque superficiali e sotterranee.

L’evoluzione dell’erosione ovviamente può produrre solchi e incisioni maggiori rispetto a quelli simulati innescando fenomeni di instabilità legati a movimenti profondi lungo superfici di scorrimento. Di seguito si riportano i risultati.

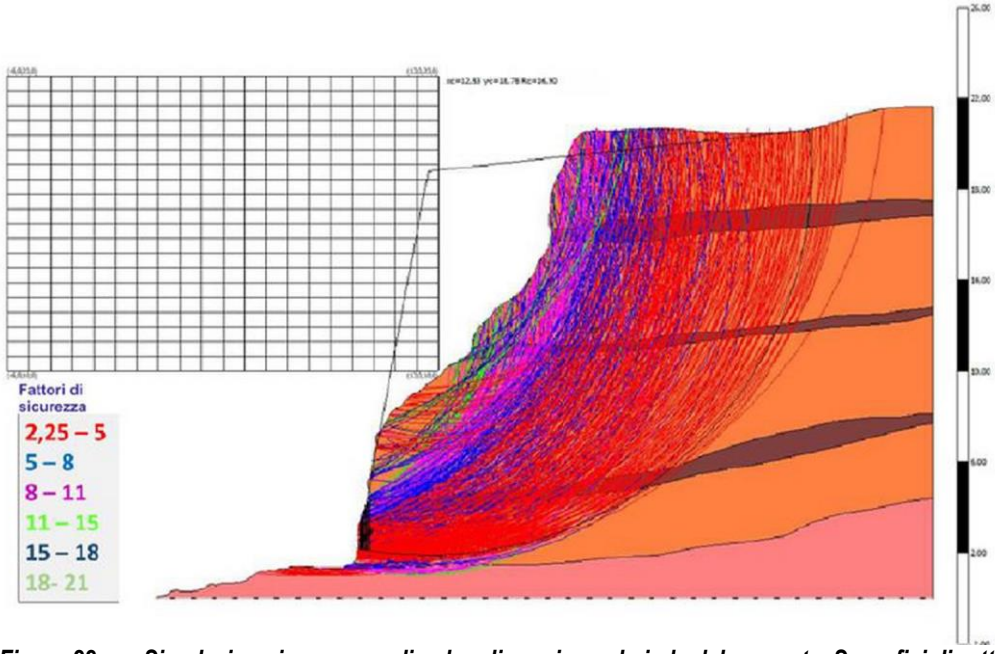


Figura 22. Simulazione in assenza di solco di erosione al piede del versante. Superfici di rottura potenziali e relativi fattori di sicurezza

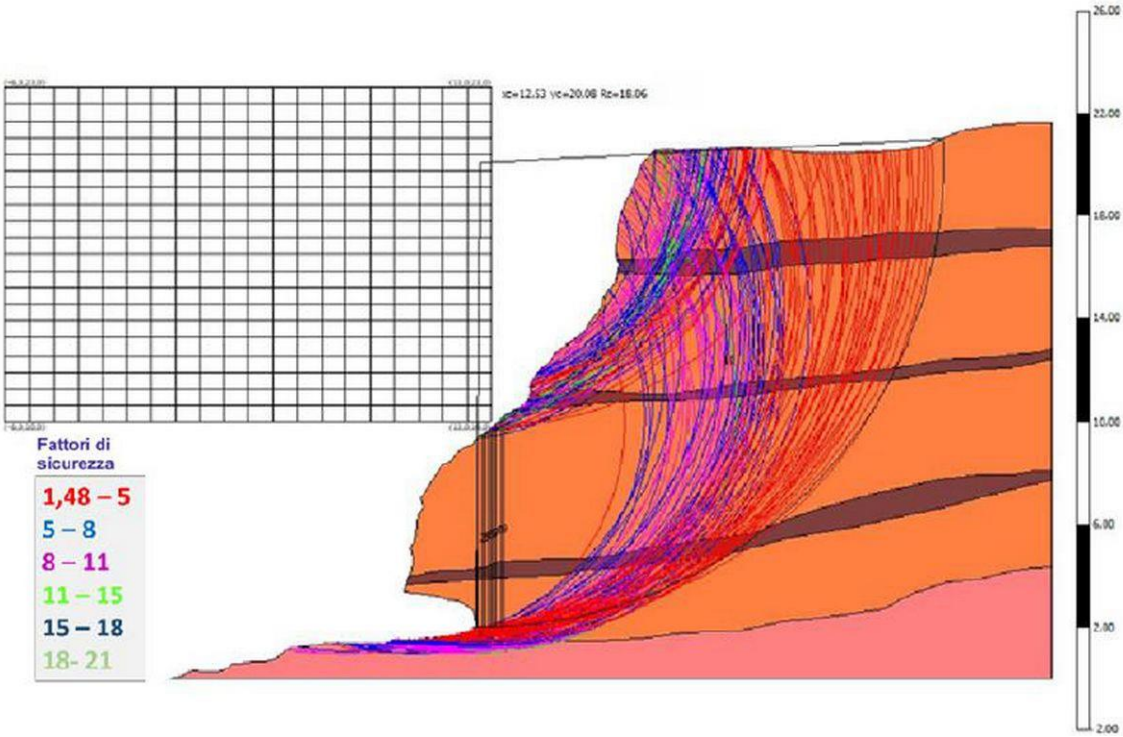


Figura 23. Simulazione in presenza di solco di erosione al piede del versante. Superfici di rottura potenziali e relativi fattori di sicurezza

Poiché l’intervento non altera le caratteristiche geotecniche del sito, le verifiche di stabilità ex post coincidono con quelle ex ante.

Non sono presenti altre opere con cui l'intervento abbia interazione.

5.5 Conclusioni tecniche e tipologia delle opere

Sulla base delle analisi riportate ai capitoli precedenti il progetto è stato impostato sulla base dei seguenti principi:

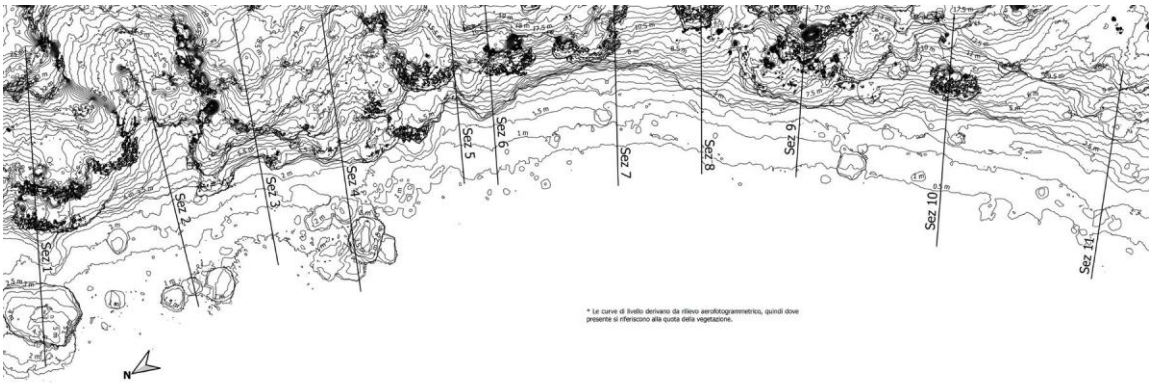
- non è opportuna la realizzazione di opere di sostegno, sia con tecniche di ingegneria tradizionale che naturalistica, in quanto l'instabilità del versante è legata a fenomeni di erosione, inoltre la realizzazione di opere di sostengo richiederebbe fondazioni che interferirebbero con il versante rischiando di aggravare le condizioni di instabilità;
- è opportuno prevedere opere di difesa dall'erosione, in quanto questa rappresenta la causa predominante del dissesto;
- le opere di protezione dall'erosione dovrebbero essere collocate al piede, in modo da contrastare l'azione marina, che risulta la causa principale;
- l'opera deve possibilmente essere fondata o ancorata al substrato roccioso, comunque evitando di inserirsi sul versante inalterato, per evitare di destabilizzarlo, ma anche di rimuovere gli accumuli al piede se non temporaneamente per le porzioni necessarie alla realizzazione delle opere e con opportune misure sostitutive con equivalente funzione di protezione del piede stesso.

Tali misure hanno portato alla definizione di un sistema di protezione formato da:

- protezione frontale con scogliera legata e fissata al substrato con catene o altri elementi similari in acciaio;
- fascine di cisto poste verticalmente tra due file di palizzata con legno di castagno, fissate con elementi metallici al substrato; tale opera ha la funzione di ridurre l'energia cinetica del moto ondoso, senza avere un effetto specchiante (infatti consente il passaggio del flusso idrico), che potrebbe produrre fenomeni turbolenti con erosione localizzata; inoltre favorisce il trattenimento e l'accumulo del materiale sul retro;
- biorullo con sughero granulato o fascine protette con biorete in fibra di cocco, disposto sul retro e in continuità con le fascine con funzione di protezione da erosione per effetto della risacca.

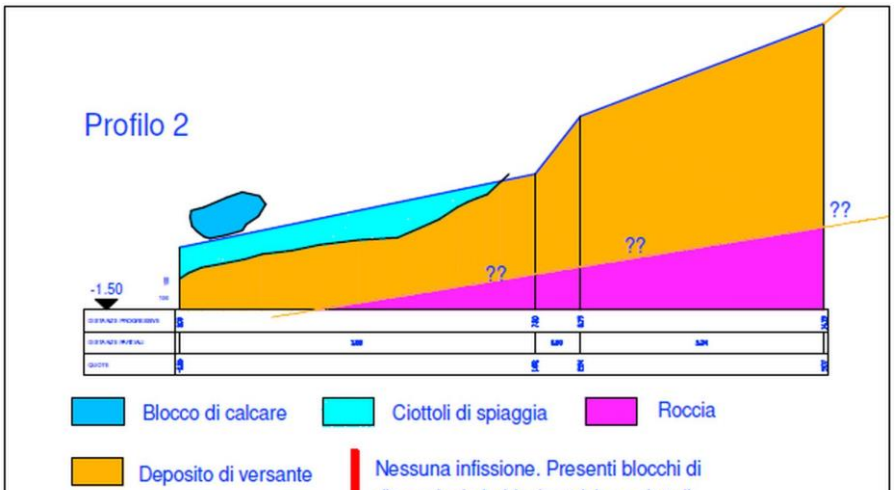
L'opera così strutturata riduce l'effetto erosivo del moto ondoso, senza poterlo eliminare del tutto e contribuisce, eventualmente anche danneggiandosi, a ridurre gli effetti delle mareggiate. E', comunque, necessario un monitoraggio periodico della funzionalità e un suo ripristino.

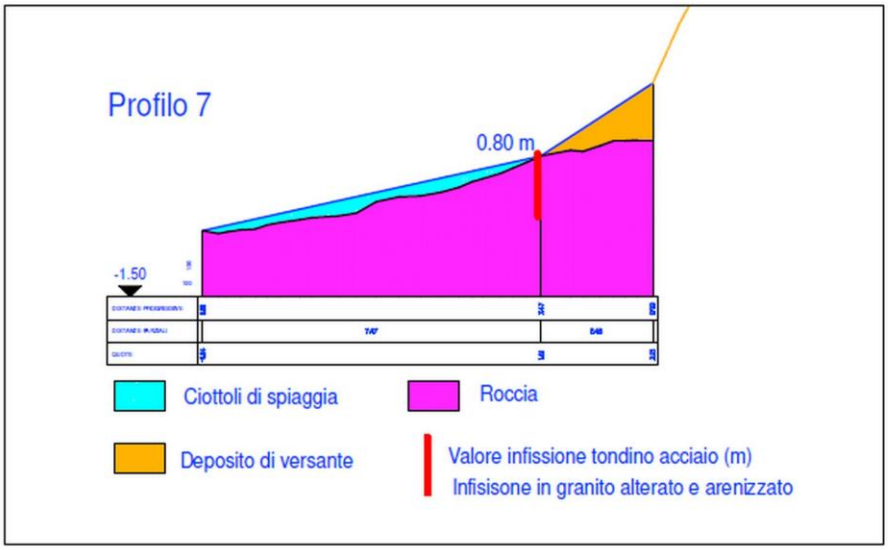
Al fine di individuare le modalità di realizzazione della fondazione è stato eseguito un approfondimento geologico per verificare lo spessore dello strato di depositi di versante e/o

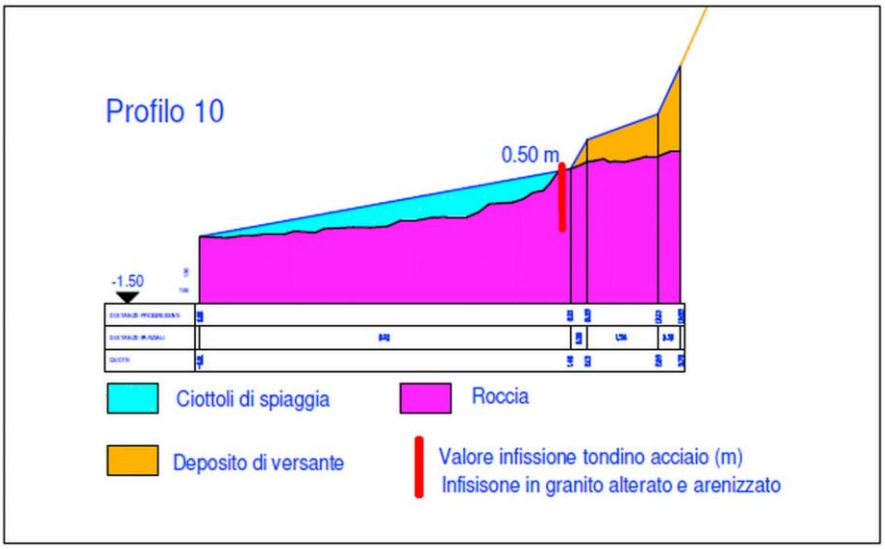


ghiaia dell’arenile sopra il substrato.

Figura 24. Profili stratigrafici della geologia dell’arenile







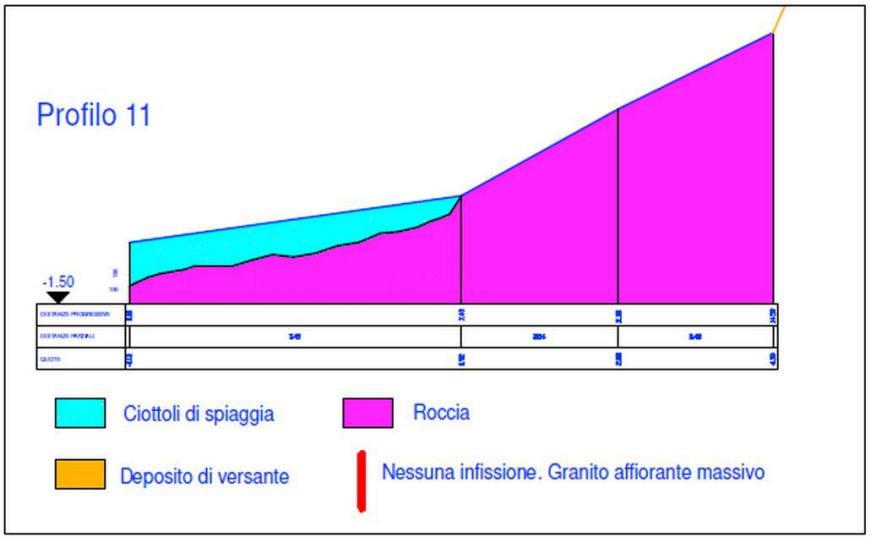


Figura 25. Profili stratigrafici della geologia dell'arenile

L'analisi di dettaglio del profilo stratigrafico permette di evidenziare che il substrato granitico a tratti risulta affiorante ma le sezioni interessate dall'intervento (7-10) presentano un accumulo di versante al limite dell'arenile ghiaioso. Il substrato roccioso risulta arenizzato e, quindi, incoerente per i primi 50-100 cm, per cui l'opera dovrà essere fondata al di sotto di questo strato. Anche con queste accortezze l'opera risulta particolarmente esposta agli agenti esterni e, quindi, può subire danneggiamenti che richiedono di essere monitorato e gestiti. Non avendo funzioni strutturali, non è necessario eseguire una modellazione specifica e non alterando il profilo attuale, peraltro dinamico e soggetto a continue modifiche naturali, non richiede una rivalutazione rispetto alle analisi di stato attuale. Analogamente a quanto indicato per le valutazioni di stato di fatto non rientra nel campo di applicazione delle NTC 2018.

Sulla base di quanto sopra esposto è stato definito l'intervento descritto in precedenza.

6 Piano di manutenzione, monitoraggio e programma delle misure sperimentali

Il progetto esecutivo sarà dotato di *Piano di manutenzione* ai sensi del DPR 207/2010, che si svilupperà con la redazione dai seguenti documenti contenuti:

- il *Manuale d'uso*;
- il *Manuale di manutenzione*;
- il *Programma di manutenzione*.

Il *Manuale d'uso* contierrà le informazioni atte a permettere all’utente di conoscere le modalità per la migliore utilizzazione del bene.

Il *Manuale di manutenzione conterrà* le indicazioni necessarie all’attuazione della manutenzione, ovvero la descrizione delle componenti dell'opera, le risorse che possono risultare necessarie negli interventi di manutenzione, le prestazioni che devono essere fornite dalla sistemazione e le possibili anomalie riscontrabili.

Il *Programma di manutenzione*, si suddividerà in 3 sottoprogrammi:

- *Sottoprogramma delle prestazioni*, che descriverà le prestazioni attese nei vari periodi di vita dell'opera;
- *Sottoprogramma dei controlli,* che indicherà i tempi e le modalità dei controlli sulle diverse opere e interventi;
- *Sottoprogramma delle manutenzioni,* che descriverà la modalità di attuazione di manutenzione ordinaria e straordinaria.

6.1 Manuale d’uso

Il *Manuale d'uso* contiene le informazioni atte a permettere all’utente di conoscere le modalità per la migliore utilizzazione del bene. Nel caso specifico l’opera non prevede utilizzi alternativi rispetto a quello di difesa dall’erosione.

6.2 Manuale di manutenzione

Il *Manuale di manutenzione* descriverà le modalità operative di manutenzione che si limiteranno ad interventi straordinari di ripristino dell’opera con medesimi materiali e tecniche costruttive dell’opera originaria.

6.3 Programma di manutenzione

6.3.1 Sottoprogramma delle prestazioni

L’opera subirà inevitabilmente un degrado nel tempo dovuto sia al deterioramento dei materiali non lapidei sia al susseguersidi eventi meteo marini intensi.

La vita utile dell'opera, se correttamente controllata e manutenuta, può considerarsi circa 10 anni, dopo i quali la funzionalità e l'assetto complessivo devono essere rivalutati. Singole porzioni dell'opera possono avere un degrado in tempi minori. In particolare le fascine potrebbero cominciare a subire un degrado a partire dal secondo/terzo anno che dovrebbe diventare significativo dal quinto anno. Anche i pali di castagno tendono a deteriorarsi in alcuni anni (5-10 anni). I biocompositi in fibra di cocco se esposti si deteriorano in poco tempo (1-2 anni), se rimangono interrati hanno una durata maggiore (5 anni). Gli elementi deteriorati all'interno dell'arco di vita dell'opera dovranno essere sostituiti a meno che risultino non più funzionali all'assetto raggiunto dall'opera e dal contesto.

6.3.2 Sottoprogramma dei controlli

L'opera dovrà essere controllata:

- 2 volte l'anno indicativamente un controllo in autunno o inizio inverno ed uno a maggio-giugno,

- a seguito di mareggiate intense.

L'attività di controllo deve riguardare sia l'opera che le condizioni al contorno.

Per quanto riguarda l'opera, deve essere controllata il mantenimento dell'assetto la stabilità degli elementi, l'assenza di rotture, la funzionalità dei collegamenti e delle unioni, il permanere del riempimento delle fascine e dei biorulli.

Inoltre, devono essere verificate le condizioni al contorno con particolare riferimento all'evolversi di eventuali fenomeni franosi del versante nonché dell'arenile.

I controlli saranno eseguiti confrontando foto scattate a fine lavori con quelle durante i vari controlli e con misurazioni geometriche e topografiche. Nel dettaglio, se risultano alterazioni significative dovranno essere misurato le variazioni di quota dell'arenile, l'entità dell'accumulo o abbassamento a retro opera, l'arretramento del versante, il tutto se necessario su più sezioni. Eventuali approfondimenti geologici saranno sviluppati sulla base di esigenze che dovessero emergere.

6.3.3 Sottoprogramma delle manutenzioni

Considerando la variabilità del contesto non è possibile prevedere un'attività ordinaria. Nell'arco della vita utile, la manutenzione dovrà tendere a ripristinare l'opera, fatte salve ulteriori valutazioni. In particolare, qualora risultino danneggiamenti frequenti e significativi se ne dovrà valutare le cause e proporre le necessarie modifiche, anche in relazione a mutate condizioni a contorno. A fine del tempo stimato di vita utile si dovrà analizzare l'assetto complessivo e valutare eventuali interventi ulteriori.

7 Valutazioni conclusive

Il "*Progetto "Alla Natura: azioni di protezione e biosicurezza per il SIC Isole di Tavolara, Molara e Molarotto" - Eradicazione del topo domestico da tre isolotti - Contenimento del ratto nero a Molara - Eradicazione Carpobrotus sp. pl. - Protezione stazione di Centaurea horrida Cala Tramontana.*", prevede vari interventi, ma l'unico con rilevanza geologico-tecnica è quello di Tavolara a Cala Tramontana.

In particolare l'intervento:

- ricade all'interno di aree a pericolosità geologica Hg del PAI per una porzione di circa 10-15 m sui 50 m complessivi di intervento;
- è esterno ad aree a pericolosità idraulica Hi;
- non interessa elementi del reticolo idraulico.

L'intervento è compatibile con le Norme di Attuazione del PAI. In primo luogo rientra tra gli interventi consentiti ai sensi dell'art. 31, comma 1, lettera a) "*opere di bonifica e sistemazione dei movimenti franosi, di manutenzione e consolidamento dei versanti, di tutela dei suoli*" in quanto riduce l'azione dell'erosione che rappresenta una delle causa della franosità del versante. Inoltre, risulta coerente con quanto prescritto all'art. 23 comma 9 in quanto non comporta un aggravio delle condizioni di rischio, che anzi risultano migliorate, nel dettaglio:

- riduce l'azione di erosione sul versante e non interagisce direttamente con esso, risultando coerente con la prescrizione "*migliorare in modo significativo o comunque non peggiorare le condizioni di equilibrio statico dei versanti e di stabilità dei suoli attraverso trasformazioni del territorio non compatibili*" (lettera b);
- non impedisce né pone dei vincoli ad ulteriori interventi di sistemazione, risultando coerente con la prescrizione "*non compromettere la riduzione o l'eliminazione delle cause di pericolosità o di danno potenziale né la sistemazione idrogeologica a regime*" (lettera c);
- non incrementa superfici impermeabili, in coerenza con la prescrizione "*limitare l'impermeabilizzazione dei suoli e creare idonee reti di regimazione e drenaggio*" (lettera e);
- ha una finalità di salvaguardia delle biodiversità di una specie di pregio presente sul versante, in coerenza con la lettera g dell'art. 23 comma 9 delle Norme;
- non interferisce con altri interventi previsti da strumenti di programmazione o piani di protezione civile (lettera h);
- è attuato con tecniche di ingegneria naturalistica a basso impatto (lettera i);
- non interagisce con il versante e quindi non altera l'assetto geotecnico, risultando coerente con la prescrizione "*non incrementare le condizioni di rischio specifico*

idraulico o da frana degli elementi vulnerabili interessati ad eccezione dell'eventuale incremento sostenibile connesso all'intervento espressamente assentito" (lettera l);

- le valutazioni di cui sopra valgono anche per la fase di cantiere, per cui è rispettata la prescrizione *"garantire condizioni di sicurezza durante l'apertura del cantiere, assicurando che i lavori si svolgano senza creare, neppure temporaneamente, un significativo aumento del livello di rischio o del grado di esposizione al rischio esistente"* (lettera n);
- altre lettere dell'art. 23 comma non sono pertinenti.