

AUTOSTRADA (A1): MILANO-NAPOLI

AMPLIAMENTO ALLA TERZA CORSIA

NEL TRATTO INCISA - VALDARNO

LOTTO 1

PROGETTO ESECUTIVO

DG - DOCUMENTAZIONE GENERALE

GEOTECNICA

Parte generale

Verifica di stabilità opera-terreno lungo Arno

Prescrizione Dec VIA A6.2+C.7.1A

IL PROGETTISTA SPECIALISTICO

Ing. Marco D'Angelantonio
Ord. Ingg. Milano N. 20155

Responsabile Geotecnica all'aperto

IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE



Ing. Paola Castiglioni
Ord. Ingg. Varese N. 2725

IL DIRETTORE TECNICO

Ing. Orlando Mazza
Ord. Ingg. Pavia N. 1496

Progettazione Infrastrutture

CODICE IDENTIFICATIVO											ORDINATORE
RIFERIMENTO PROGETTO			RIFERIMENTO DIRETTORIO				RIFERIMENTO ELABORATO				
Codice Commessa	Lotto, Sub-Prog. Cod. Appalto	Fase	Capitolo	Paragrafo	W B S	Parte d'opera	Tip.	Disciplina	Progressivo	Rev.	-
119941	LL02	PE	DG	GTA	GE000	00000	R	APE	0705	-0	SCALA -

 	PROJECT MANAGER:				SUPPORTO SPECIALISTICO:				REVISIONE	
	Ing. Paola Castiglioni Ord. Ingg. Varese N. 2725								n.	data
	REDATTO:				VERIFICATO:				0	LUGLIO 2020

	<p>VISTO DEL COMMITTENTE</p>  <p>IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. Furio Cruciani</p>	<p>VISTO DEL CONCEDENTE</p>  <p>Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti DIPARTIMENTO PER LE INFRASTRUTTURE, GLI AFFARI GENERALI ED IL PERSONALE STRUTTURA DI VIGILANZA SULLE CONCESSIONARIE AUTOSTRADALI</p>
--	--	---

Sommario

1	PREMESSA.....	4
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	9
2.1	ELABORATI.....	9
2.2	SOFTWARE.....	9
2.3	NORMATIVA.....	9
3	RICHIESTA A6.2 + C.7.1.A - VALUTAZIONI DI STABILITÀ DEL MURO ESISTENTE IN LOCALITÀ POGGILUPI DURANTE EVENTI DI PIENA DEL FIUME ARNO	10
3.1	ANALISI DI FILTRAZIONE IN TRANSITORIO	12
3.1.1	Dati in ingresso.....	12
3.1.2	Risultati: sezione 20.....	14
3.1.3	Risultati: sezione PF4_v1.....	16
3.1.4	Risultati: sezione 16.....	18
3.1.5	Risultati: sezione extra_PF4_v3.....	20
3.2	ANALISI DI STABILITÀ IN TRANSITORIO	22
3.2.1	Dati in ingresso.....	22
3.2.2	Risultati: sezione 20.....	23
3.2.3	Risultati: sezione PF4_v1.....	25
3.2.4	Risultati: sezione 16.....	27
3.2.5	Risultati: sezione extra_PF4_v3.....	31
3.3	CONCLUSIONI	35
4	MONITORAGGIO.....	37
4.1	PREMESSA	37
4.2	TIPOLOGIA DI MONITORAGGIO	37
5	SOLUZIONE PROGETTUALE OPERA DI PRESIDIO	40
5.1	DESCRIZIONE DELL'OPERA	40
5.2	ANALISI DI STABILITÀ POST-OPERA	41

Indice delle Figure

FIGURA 1.1. ORTOFOTO AREA POGGILUPI – 1954.....	5
FIGURA 1.2. ORTOFOTO AREA POGGILUPI – 1965.....	5
FIGURA 1.3. ORTOFOTO AREA POGGILUPI – 1978.....	6
FIGURA 1.4. ORTOFOTO AREA POGGILUPI – 1996.....	6
FIGURA 1.5. ORTOFOTO AREA POGGILUPI – 2010.....	7
FIGURA 1.6. ORTOFOTO AREA POGGILUPI - 2019	7
FIGURA 3.1. STRALCIO PLANIMETRICO CON UBICAZIONE DELLE SEZIONI.....	11
FIGURA 3.2. SEZIONE 20 - STRATIGRAFIA E LIVELLO DI FALDA INIZIALE A +131.5 M SLMM IN EQUILIBRIO CON IL LIVELLO DEL FIUME ARNO DURANTE IL PERIODO DI MAGRA	12
FIGURA 3.3. SEZIONE PF4_v1 - STRATIGRAFIA E LIVELLO DI FALDA INIZIALE A +131.5 M SLMM IN EQUILIBRIO CON IL LIVELLO DEL FIUME ARNO DURANTE IL PERIODO DI MAGRA	12
FIGURA 3.4. SEZIONE 16 - STRATIGRAFIA E LIVELLO DI FALDA INIZIALE A +131.5 M SLMM IN EQUILIBRIO CON IL LIVELLO DEL FIUME ARNO DURANTE IL PERIODO DI MAGRA	13
FIGURA 3.5. SEZIONE PF4_EXTRA_v3 - STRATIGRAFIA E LIVELLO DI FALDA INIZIALE A +131.5 M SLMM IN EQUILIBRIO CON IL LIVELLO DEL FIUME ARNO DURANTE IL PERIODO DI MAGRA.....	13
FIGURA 3.6. IDROGRAMMA DI PIENA ALLA SEZIONE DI INTERESSE CON TEMPO DI RITORNO T = 200 ANNI	13
FIGURA 3.7. SEZIONE 20 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 0 HR	14
FIGURA 3.8. SEZIONE 20 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 20 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA	14
FIGURA 3.9. SEZIONE 20 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 27 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA	15
FIGURA 3.10. SEZIONE 20 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 33 H DALL'INIZIO DELLA PIENA	15
FIGURA 3.11. SEZIONE 20 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 44 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA	15
FIGURA 3.12. SEZIONE PF4_v1 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 0 HR	16
FIGURA 3.13. SEZIONE PF4_v1 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 20 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA	16
FIGURA 3.14. SEZIONE PF4_v1 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 27 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA	16
FIGURA 3.15. SEZIONE PF4_v1 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 33 H DALL'INIZIO DELLA PIENA.....	17
FIGURA 3.16. SEZIONE PF4_v1 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 44 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA	17
FIGURA 3.17. SEZIONE 16 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 0 HR	18
FIGURA 3.18. SEZIONE 16 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 20 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA	18
FIGURA 3.19. SEZIONE 16 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 27 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA	19
FIGURA 3.20. SEZIONE 16 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 33 H DALL'INIZIO DELLA PIENA	19
FIGURA 3.21. SEZIONE 16 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 44 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA	19
FIGURA 3.22. SEZIONE EXTRA_PF4_v3 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 0 HR.....	20
FIGURA 3.23. SEZIONE EXTRA_PF4_v3 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 20 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA.....	20
FIGURA 3.24. SEZIONE EXTRA_PF4_v3 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 27 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA.....	20
FIGURA 3.25. SEZIONE EXTRA_PF4_v3 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 33 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA.....	21
FIGURA 3.26. SEZIONE EXTRA_PF4_v3 - REGIME DI PRESSIONI INTERSTIZIALI A 44 HR DALL'INIZIO DELLA PIENA.....	21
FIGURA 3.27. SEZIONE 20: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE ALLO STATO ATTUALE CON PARAMETRI FATTORIZZATI	23
FIGURA 3.28. SEZIONE 20: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 20 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI.....	23
FIGURA 3.29. SEZIONE 20: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 27 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI.....	24
FIGURA 3.30. SEZIONE 20: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 33 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI.....	24
FIGURA 3.31. SEZIONE 20: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 44 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI.....	24
FIGURA 3.32. SEZIONE PF4_v1: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE ALLO STATO ATTUALE CON PARAMETRI FATTORIZZATI	25
FIGURA 3.33. SEZIONE PF4_v1: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 20 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	25
FIGURA 3.34. SEZIONE PF4_v1: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 27 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	26
FIGURA 3.35. SEZIONE PF4_v1: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 33 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	26
FIGURA 3.36. SEZIONE PF4_v1: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 44 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	26
FIGURA 3.37. SEZIONE 16: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE ALLO STATO ATTUALE CON PARAMETRI FATTORIZZATI	27
FIGURA 3.38. SEZIONE 16: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 20 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI.....	28
FIGURA 3.39. SEZIONE 16: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 27 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	28
FIGURA 3.40. SEZIONE 16: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 33 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI.....	28
FIGURA 3.41. SEZIONE 16: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 44 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI.....	29
FIGURA 3.42. SEZIONE 16: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE CON SCALZAMENTO FINO A 15 M A 20 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	29

FIGURA 3.43. SEZIONE 16: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE CON SCALZAMENTO FINO A 15 M A 27 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	29
FIGURA 3.44. SEZIONE 16: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE CON SCALZAMENTO FINO A 15 M A 33 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	30
FIGURA 3.45. SEZIONE 16: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE CON SCALZAMENTO FINO A 15 M A 44 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	30
FIGURA 3.46. SEZIONE EXTRA_PF4_v3: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE ALLO STATO ATTUALE CON PARAMETRI FATTORIZZATI	31
FIGURA 3.47. SEZIONE EXTRA_PF4_v3: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 20 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	32
FIGURA 3.48. SEZIONE EXTRA_PF4_v3: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 27 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	32
FIGURA 3.49. SEZIONE EXTRA_PF4_v3: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 33 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	32
FIGURA 3.50. SEZIONE EXTRA_PF4_v3: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE A 44 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	33
FIGURA 3.51. SEZIONE EXTRA_PF4_v3: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE CON SCALZAMENTO FINO A 7 M A 20 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	33
FIGURA 3.52. SEZIONE EXTRA_PF4_v3: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE CON SCALZAMENTO FINO A 7 M A 27 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	33
FIGURA 3.53. SEZIONE EXTRA_PF4_v3: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE CON SCALZAMENTO FINO A 7 M A 33 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	34
FIGURA 3.54. SEZIONE EXTRA_PF4_v3: ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE CON SCALZAMENTO FINO A 7 M A 44 H DALL'INIZIO DELLA PIENA CON PARAMETRI FATTORIZZATI	34
FIGURA 3.55. PLANIMETRIA INTERVENTI PREVISTI	36
FIGURA 4.1. SEZIONE DI CONTROLLO	37
FIGURA 4.2. ESEMPIO ELABORAZIONI IMMAGINI	38
FIGURA 5.1. PLANIMETRIA DI PROGETTO	40
FIGURA 5.2. SVILUPPATA	40
FIGURA 5.3. SEZIONE TIPO DI PROGETTO	41
FIGURA 5.4. MODELLO DI CALCOLO	42
FIGURA 5.5. RISULTATI STABILITÀ GLOBALE IN CONDIZIONI STATICHE - POST EVENTO DI PIENA - $F_5 = 2.360$	43

Indice delle Tabelle

TABELLA 3.1: PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI (IN ACCORDO A [1])	22
TABELLA 3.2: PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO (IN ACCORDO A [1])	22
TABELLA 3.3: SEZIONE 20: FATTORI DI SICUREZZA MINIMI	23
TABELLA 3.4: SEZIONE PF4_v1: FATTORI DI SICUREZZA MINIMI	25
TABELLA 3.5: SEZIONE 16: FATTORI DI SICUREZZA MINIMI	27
TABELLA 3.6: SEZIONE 16: FATTORI DI SICUREZZA MINIMI CON SCALZAMENTO FINO A 15 M	27
TABELLA 3.7: SEZIONE EXTRA_PF4_v3: FATTORI DI SICUREZZA MINIMI	31
TABELLA 3.8: SEZIONE EXTRA_PF4_v3: FATTORI DI SICUREZZA MINIMI CON SCALZAMENTO FINO A 7 M	31
TABELLA 5.1: PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI	42
TABELLA 5.2: COEFFICIENTI DI PERMEABILITÀ K	42

1 PREMESSA

Il presente documento è in risposta alle richieste della Autorità di Bacino in merito alle tematiche di stabilità della sede autostradale in adiacenza al fiume Arno.

Richieste contenute nella prescrizione **A6.2 + C.7.1.A relativa alla frana di Poggilupi per la stabilità nel tratto a valle della SR69 in fregio all'Arno** che fa riferimento all'email "Videoconferenza 11.05.2020 Riferimenti per ottemperanze Dec-VIA".

Si riassume quanto richiesto nel documento della Autorità di Bacino prot. N°0003431 del 09 maggio 2018:

Processi geomorfologici di versante e da frana:

6a) In sede di progetto esecutivo dovrà essere redatto specifico elaborato, relativo alla verifica di stabilità del sistema opera-terreno per le sezioni 455-467 tra il km 334+100 e il km 334+600 in cui siano espressamente valutate le azioni connesse alla dinamica del fiume Arno. In particolare dovranno essere considerati scenari connessi alla variazione del profilo longitudinale e trasversale del fiume. Nel caso dovranno essere progettate e opportunamente dimensionate le necessarie opere di messa in sicurezza. Su tale documentazione questa Autorità dovrà rilasciare il parere previsto dalle Norme Tecniche di attuazione del PAI indipendentemente dalle prescrizioni del DEC-VIA. Si evidenzia che il riferimento ad ARPAT riportato nella prescrizione n.6 del DEC-VIA 14372017 è probabilmente errato, dato che il materia la competenza è della scrivente Autorità;

e successivamente in Videoconferenza 11.05.2020 Riferimenti per ottemperanze Dec-VIA:

A6.2 + C.7.1.A relativa alla frana di Poggilupi per la stabilità nel tratto a valle della SR69 in fregio all'Arno

[...] Relativamente al tratto per cui è necessario progettare le opere di protezione/messa in sicurezza questo è dettato dai risultati delle verifiche in tutte le condizioni ipotizzabili per il tratto in fregio all'Arno: oltre a quelle richieste dalla norma anche la condizione di svaso rapido come nel tratto precedente.

Si tenga presente che dall'analisi di foto storiche da satellite e da rilievi topografici di alcune sezioni del fiume Arno nel tratto in esame degli ultimi 20÷30anni, si è potuto rilevare come la dinamica fluviale del fiume sia prevalentemente di migrazione trasversale. Non si sono apprezzate significativi fenomeni di erosione/deposito del fondo alveo. Tale dinamica fluviale, ha trovato riscontro, anche con le esperienze maturate dall'Autorità di Bacino in questo tratto di fiume.

In particolare l'analisi delle foto aeree dal 1965 al 2019 evidenzia una sostanziale stabilità della barra fluviale laterale presente tra le sezioni 14 e 17. In particolare, nelle figure seguenti, si riportano le immagine relative agli anni 1954 (prima della realizzazione dell'autostrada), 1965, 1978, 1996, 2010 e 2019.

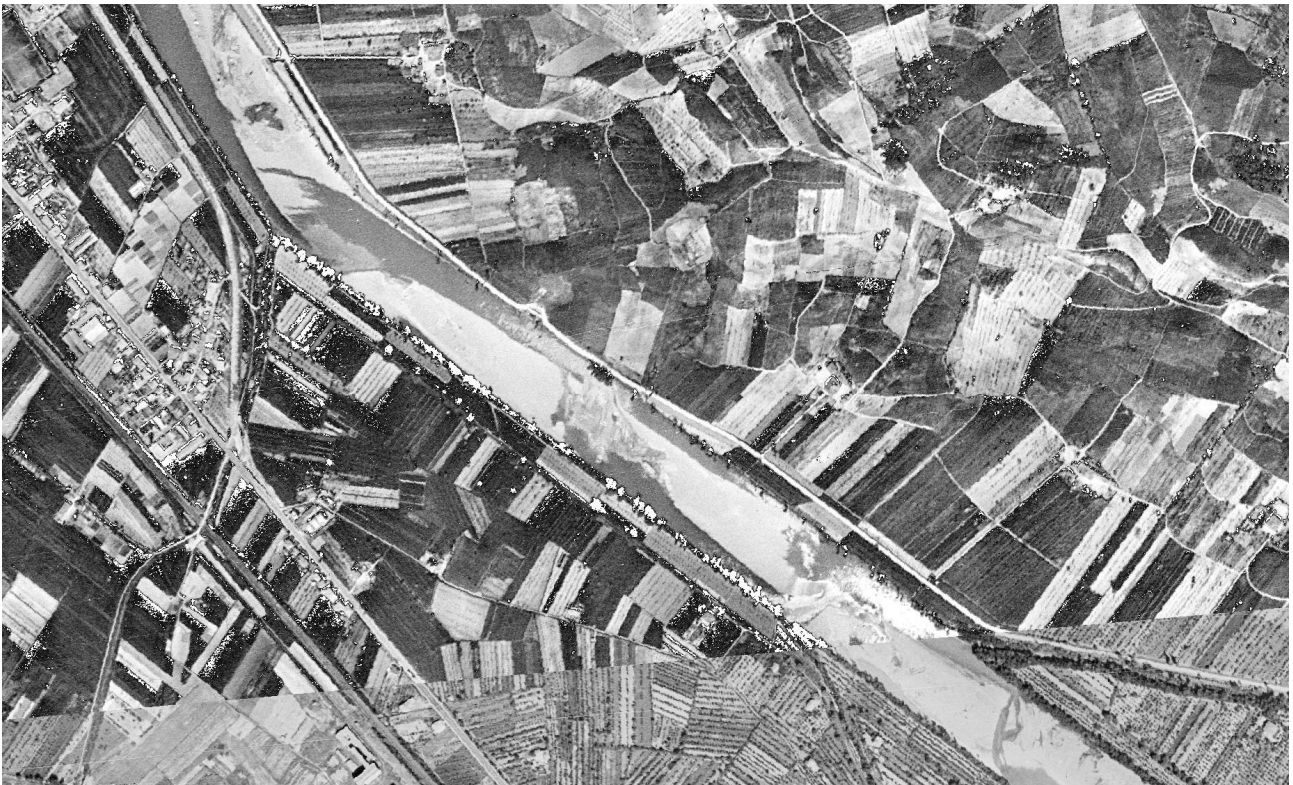


Figura 1.1. Ortofoto area Poggilupi – 1954



Figura 1.2. Ortofoto area Poggilupi – 1965

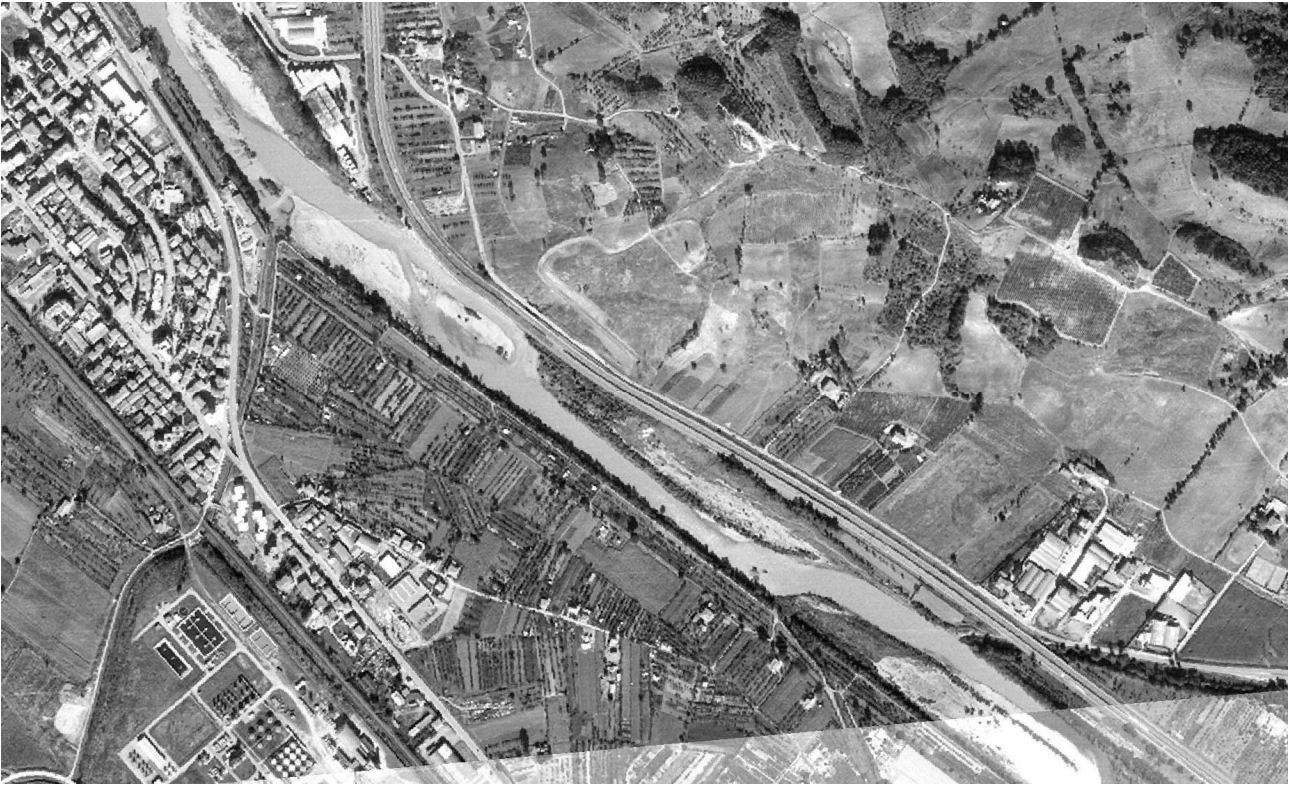


Figura 1.3. Ortofoto area Poggilupi – 1978



Figura 1.4. Ortofoto area Poggilupi – 1996



Figura 1.5. Ortofoto area Poggilupi – 2010



Figura 1.6. Ortofoto area Poggilupi - 2019

Il sopralluogo congiunto SPEA e AdB, effettuato il 17 giugno 2020, non ha evidenziato criticità nell'area di alveo lato autostrada, avvalorando quanto sopra esposto.

Alla luce di queste considerazioni, le analisi svolte hanno ipotizzato scenari ove:

- la quota di fondo alveo rimane pressochè costante;
- si ha una erosione delle sponde, ovvero si è valutato quale distanza minima tra il letto di magra attuale e la sede autostradale garantisca, in termini di stabilità globale, i requisiti previsti dalla normativa vigente.

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 ELABORATI

- [1] APE001 Autostrada Milano-Napoli – Ampliamento alla terza corsia tratta Incisa-Valdarno – Relazione geotecnica generale.

2.2 SOFTWARE

- [2] SeepW, GeoStudio 2007 ver 7.23, Geo Slope International Ltd.
[3] SlopeW, GeoStudio 2007 ver 7.23, Geo Slope International Ltd.
[4] SigmaW, GeoStudio 2007 ver 7.23, Geo Slope International Ltd.

2.3 NORMATIVA

- [5] MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI – “D.M. 14 Gennaio 2008 - Norme Tecniche per le Costruzioni” pubblicata nella G.U. n° 29 del 04/02/2008 Suppl. Ord. n° 30.
[6] MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI – “Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 C.S.LL.PP. Istruzioni per l’applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008” pubblicata nella G.U. n° 47 del 26/02/2009 Suppl. Ord. n° 27.

3 RICHIESTA A6.2 + C.7.1.A - VALUTAZIONI DI STABILITÀ DEL MURO ESISTENTE IN LOCALITÀ POGGILUPI DURANTE EVENTI DI PIENA DEL FIUME ARNO

Il muro esistente è presente tra il km 334+085 e il km 334+640 circa e rappresenta l'argine principale del fiume Arno. Il letto "di magra" del fiume si trova attualmente a distanza dal muro, tranne nella zona vicino alla progressiva iniziale, dove un ramo del letto "di magra" si trova invece a distanza ravvicinata.

Le analisi di stabilità del muro esistente a sostegno del rilevato sono state condotte considerando le condizioni:

- regime di pressioni interstiziali stimato tramite analisi di filtrazione dovuto al passaggio della piena con tempo di ritorno $T=200$ anni;
- rapido svasso del muro esistente;
- scalzamento del tratto arginale presente tra le sezioni PF4_v1 ed extra_PF4_v3 (vedi Figura 3.1); le analisi hanno individuato lo scalzamento massimo (minima distanza dal muro) per il quale sia soddisfatta la normativa.

Le analisi sono state condotte su quattro sezioni, concordate con l'AdB, e considerate rappresentative per il caso in esame ed in particolare in corrispondenza della:

- sezione 20
- sezione PF4_v1
- sezione 16
- sezione extra_PF4_v3

In Figura 3.1 si riporta lo schema planimetrico di riferimento e l'ubicazione delle sezioni di studio.

In prossimità della **Sezione 20** e della **Sezione PF4_v1** l'alveo del fiume Arno è più a ridosso del muro; contrariamente in corrispondenza della **Sezione 16** e della **Sezione extra_PF4_v3** si ha il maggiore scalzamento potenziale sotto la fondazione ma attualmente l'alveo si trova lontano dal muro.

Le analisi sono state condotte con il pacchetto software della GEOSTUDIO, che permette di analizzare, separatamente, l'analisi di filtrazione nei terreni, partendo da determinate condizioni al contorno, e (modulo SeepW), per poi, trasferire il risultato ottenuto, in termini di regime delle pressioni interstiziali, nelle analisi all'equilibrio limite condotto con il modulo SlopeW.

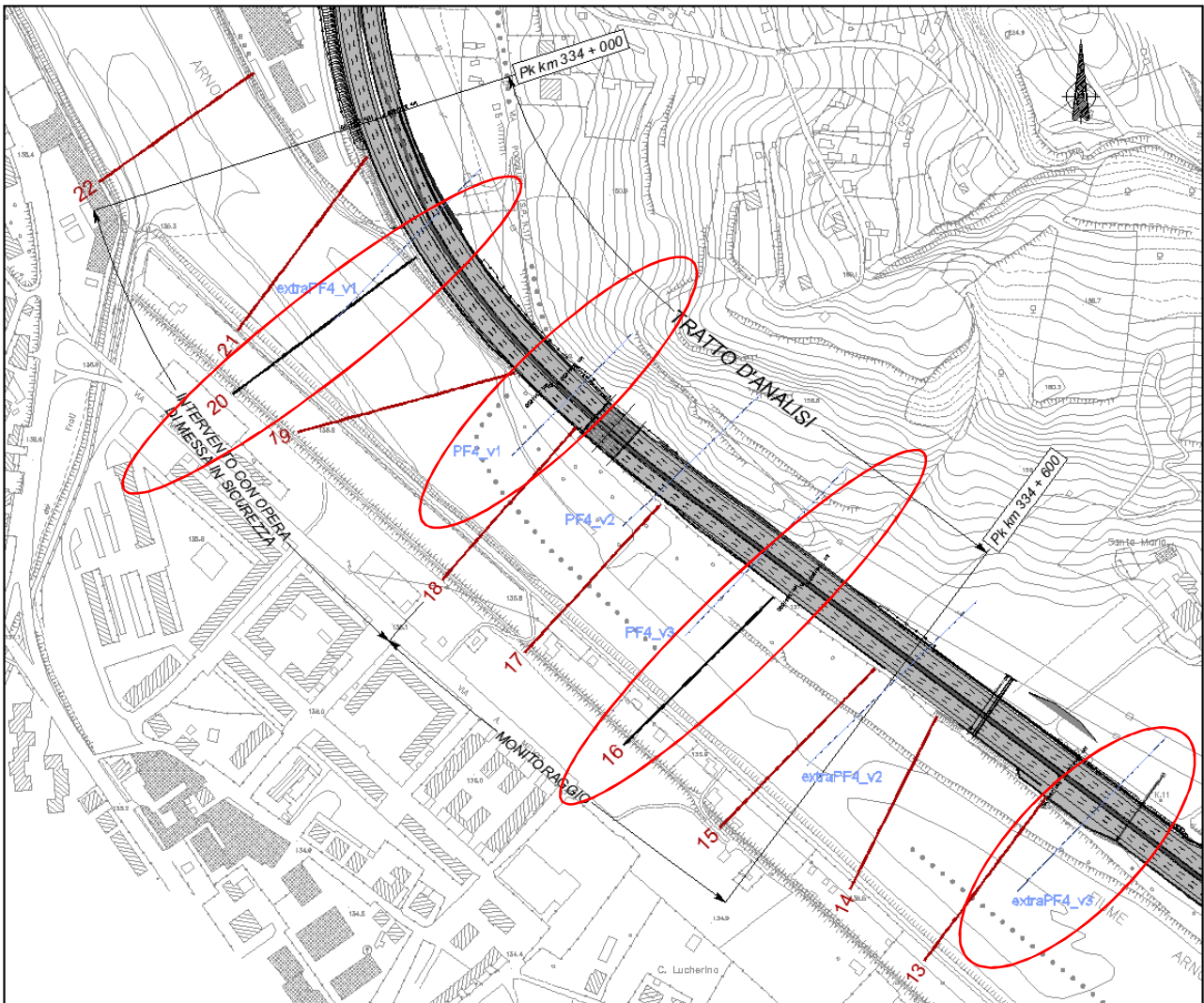


Figura 3.1. Stralcio planimetrico con ubicazione delle sezioni

3.1 ANALISI DI FILTRAZIONE IN TRANSITORIO

3.1.1 Dati in ingresso

Per la valutazione dell'andamento delle pressioni interstiziali durante l'evento di piena, per ogni sezione di studio, è stata svolta un'analisi di filtrazione considerando il regime transitorio con il codice di calcolo SeepW [2].

Nelle analisi di filtrazione è stato considerato quanto segue:

- Stratigrafie e livello di falda iniziale come nelle figure seguenti. Il livello di falda è stato assunto in equilibrio con il livello tipico del fiume Arno in periodo di magra, mediamente pari a +131. m slmm. nelle sezioni considerate.
- Le permeabilità di ciascun strato di terreno sono state prese in accordo con quanto riportato nella Relazione Geotecnica Generale [1], ovvero:

Depositi Alluvionali a grana fine	Strato A1	$k = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s
Depositi Alluvionali a grana grossa	Strato A2	$k = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s
Depositi Argillosi	Strato P1	$k = 1 \cdot 10^{-10}$ m/s
Rilevato Autostradale	Strato R	$k = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s (*)

(*) pari a quella di A1 in assenza di informazioni

- Le curve di immagazzinamento e di permeabilità nel non saturo sono state stimate a partire dai parametri granulometrici riportati nella Relazione Geotecnica Generale.
- Condizioni a contorno:
 - Livello piezometrico a est dell'autostrada pari a +131.5 m slmm
 - Flusso nullo sul muro d'argine (Total Flux = 0 m³/sec)
 - Idrogramma di piena come mostrato in Figura 3.6. Nella parte terminale sono state aggiunte 5 ore per tornare al livello iniziale pari a +131.5 m slmm.

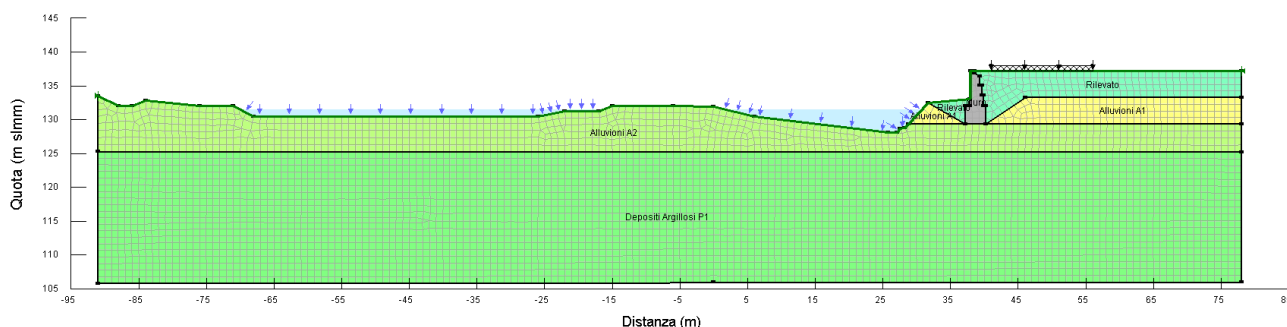


Figura 3.2. Sezione 20 - Stratigrafia e livello di falda iniziale a +131.5 m slmm in equilibrio con il livello del fiume Arno durante il periodo di magra

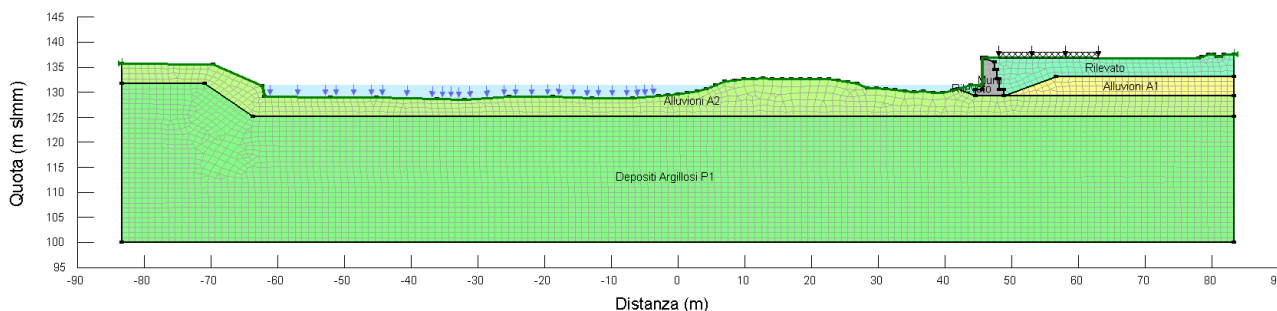


Figura 3.3. Sezione PF4_v1 - Stratigrafia e livello di falda iniziale a +131.5 m slmm in equilibrio con il livello del fiume Arno durante il periodo di magra

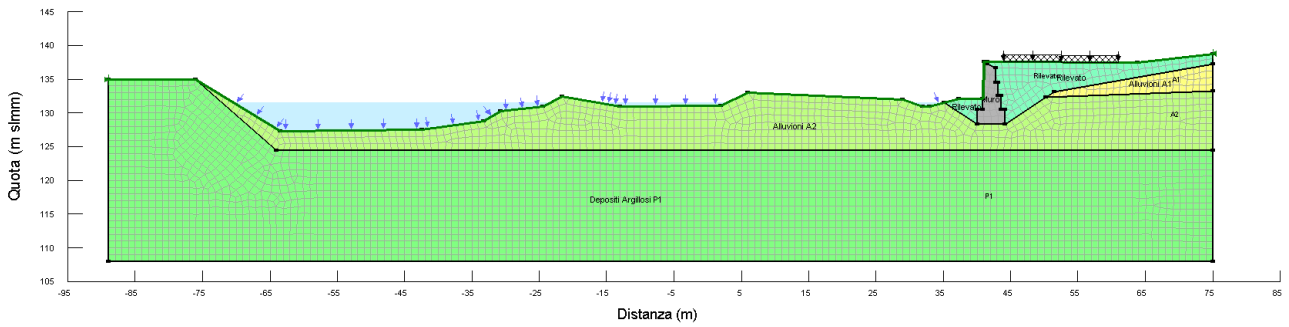


Figura 3.4. Sezione 16 - Stratigrafia e livello di falda iniziale a +131.5 m slmm in equilibrio con il livello del fiume Arno durante il periodo di magra

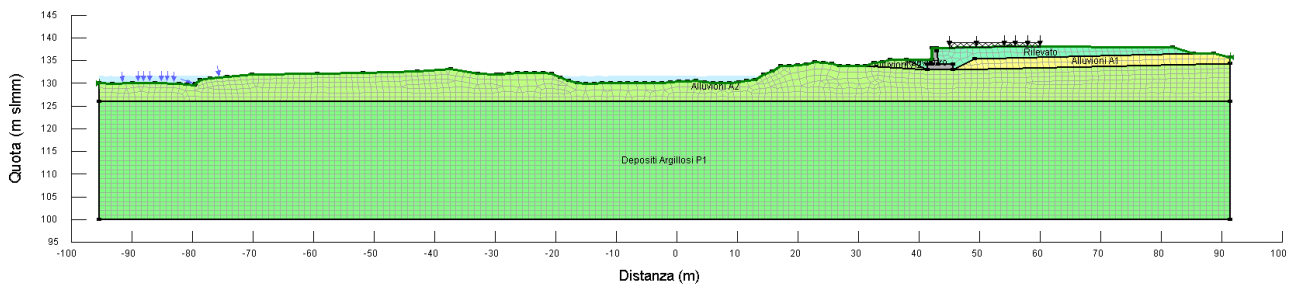


Figura 3.5. Sezione PF4_extra_v3 - Stratigrafia e livello di falda iniziale a +131.5 m slmm in equilibrio con il livello del fiume Arno durante il periodo di magra

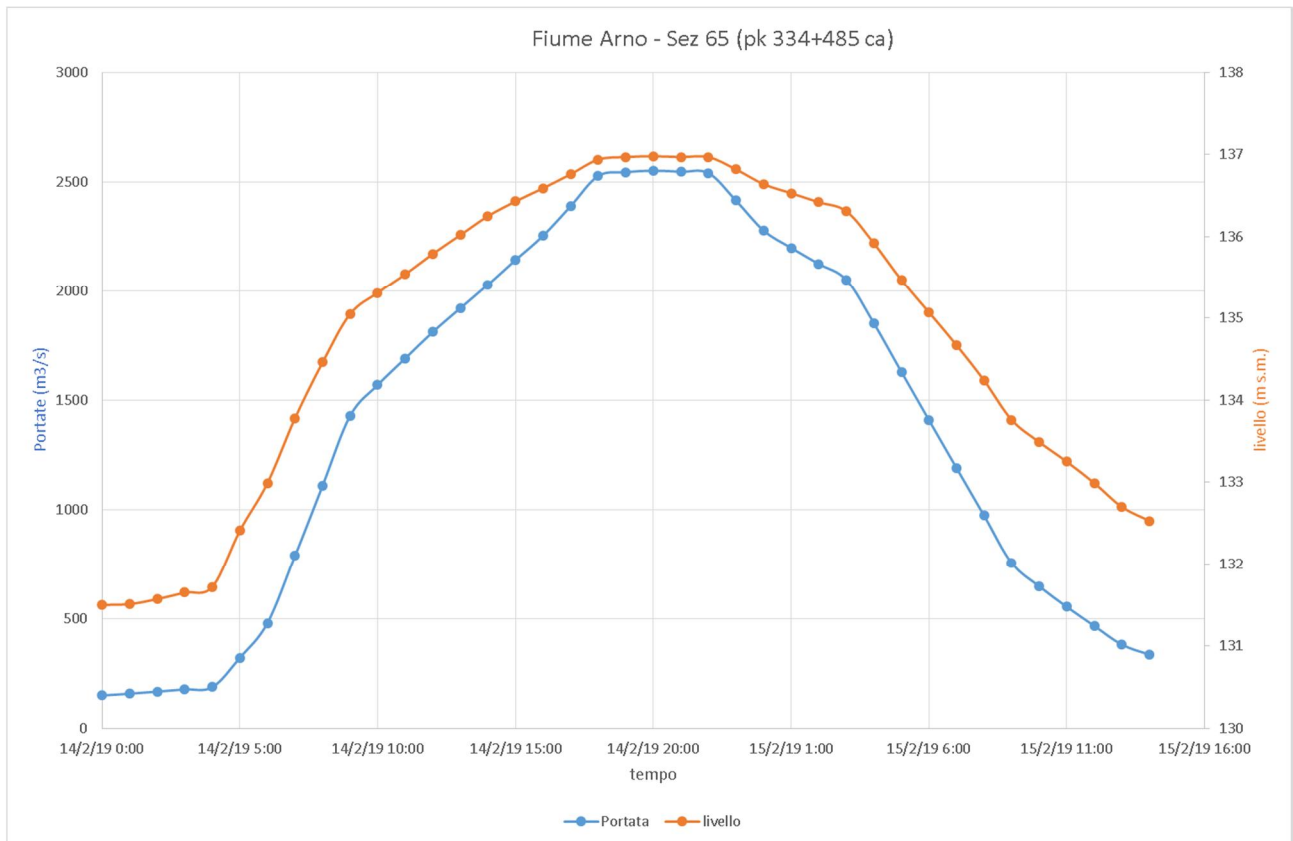


Figura 3.6. Idrogramma di piena alla sezione di interesse con tempo di ritorno T = 200 anni

3.1.2 Risultati: sezione 20

Il regime di pressioni interstiziali è stato stimato ogni 30 min per tutta la durata dell'analisi, pari a 44h. Si presentano di seguito i risultati dell'analisi in termini di andamento delle pressioni interstiziali per alcuni istanti salienti post picco (quota +136.98 m slmm al tempo di 20 hr circa) per cui è stata successivamente svolta l'analisi di stabilità:

- 0 hr situazione pre-evento di (quota +131.50m slmm)
- 20 hr evento di picco (quota +136.98m slmm)
- 27 hr
- 33 hr
- 44 hr (post-evento)

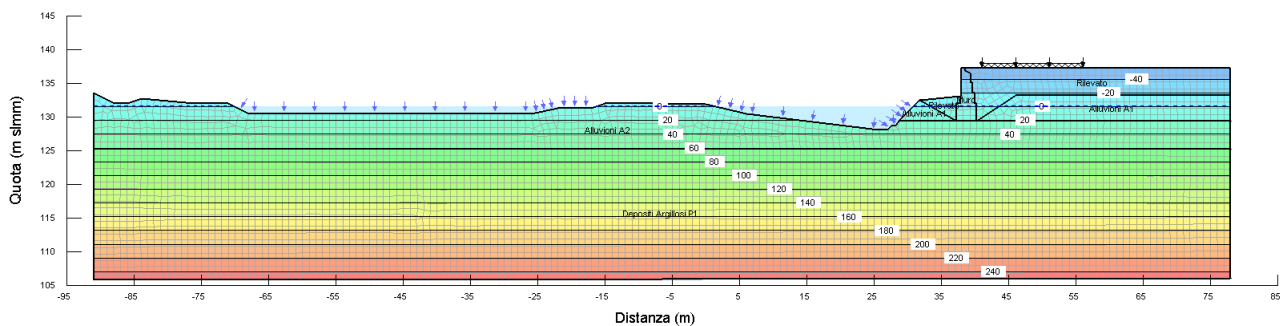


Figura 3.7. Sezione 20 - Regime di pressioni interstiziali a 0 hr

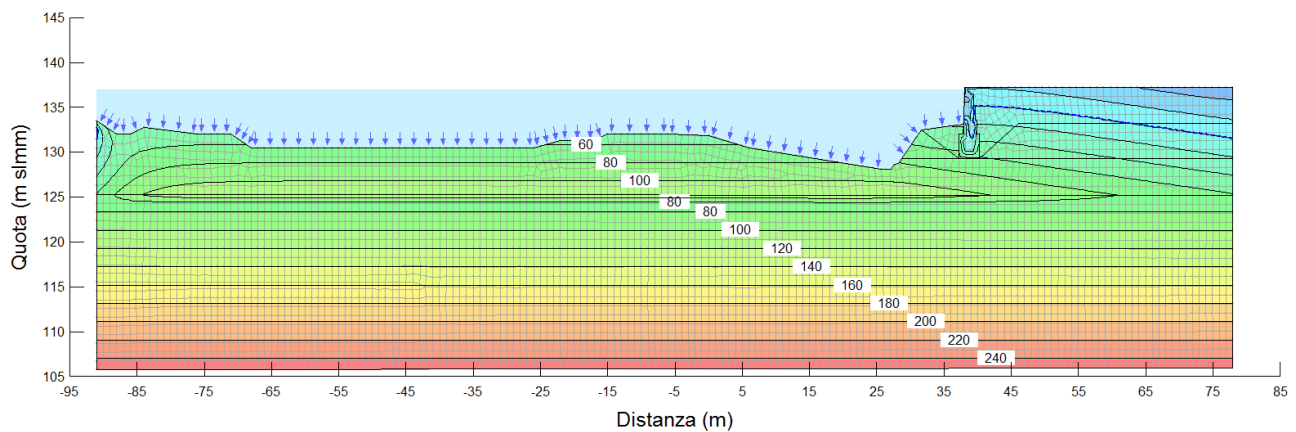


Figura 3.8. Sezione 20 - Regime di pressioni interstiziali a 20 hr dall'inizio della piena

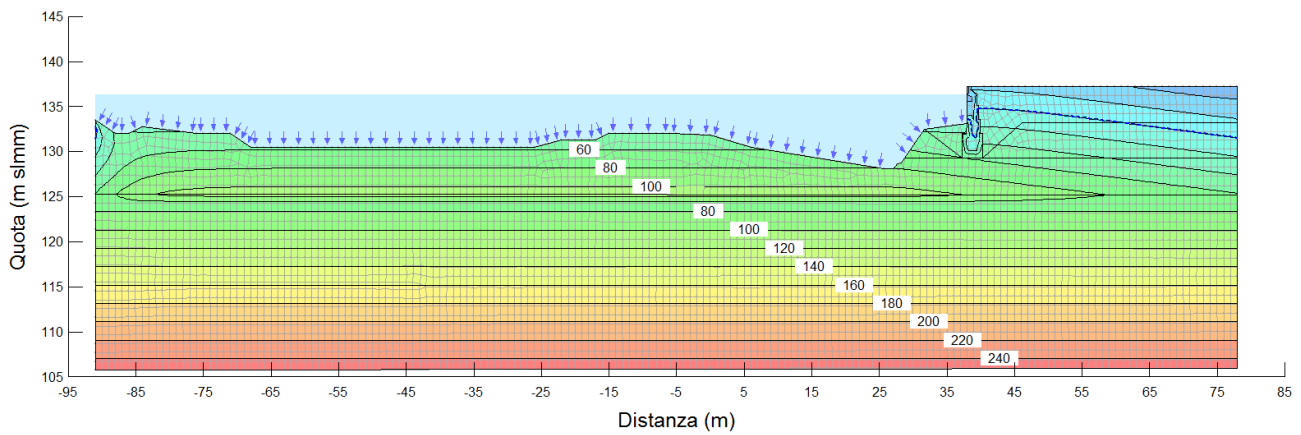


Figura 3.9. Sezione 20 - Regime di pressioni interstiziali a 27 hr dall'inizio della piena

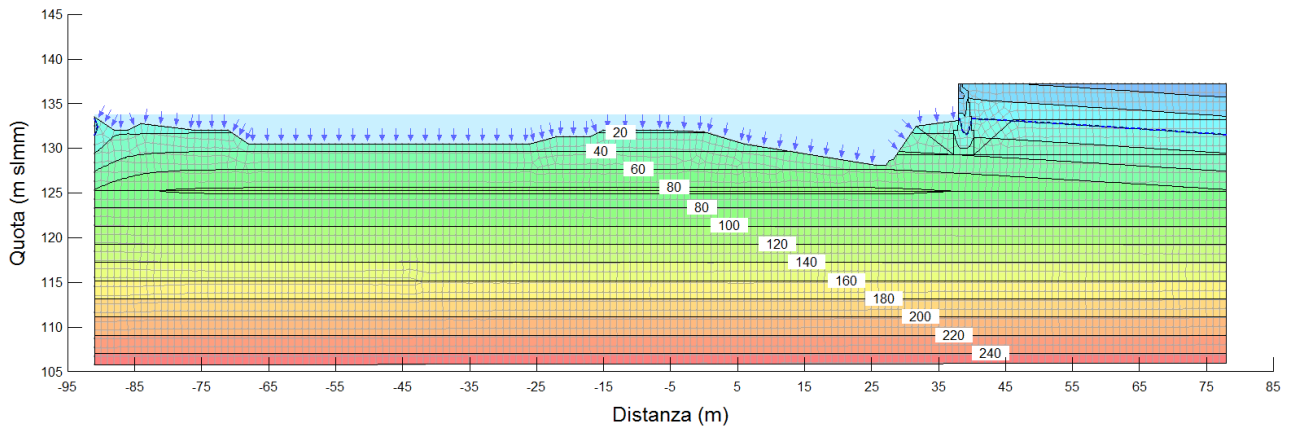


Figura 3.10. Sezione 20 - Regime di pressioni interstiziali a 33 h dall'inizio della piena

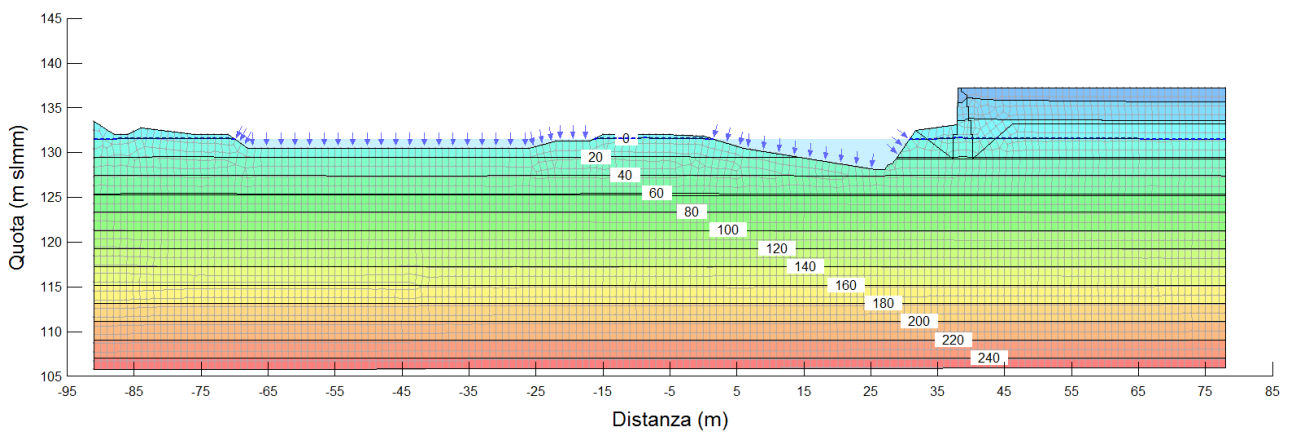


Figura 3.11. Sezione 20 - Regime di pressioni interstiziali a 44 hr dall'inizio della piena

3.1.3 Risultati: sezione PF4_v1

Il regime di pressioni interstiziali è stato stimato ogni 30 min per tutta la durata dell'analisi, pari a 44h. Si presentano di seguito i risultati dell'analisi in termini di andamento delle pressioni interstiziali per alcuni istanti salienti post picco (quota +136.98 m slmm al tempo di 20 hr circa) per cui è stata successivamente svolta l'analisi di stabilità:

- 0 hr situazione pre-evento di (quota +131.50m slmm)
- 20 hr evento di picco (quota +136.98m slmm)
- 27 hr
- 33 hr
- 44 hr (post-evento)

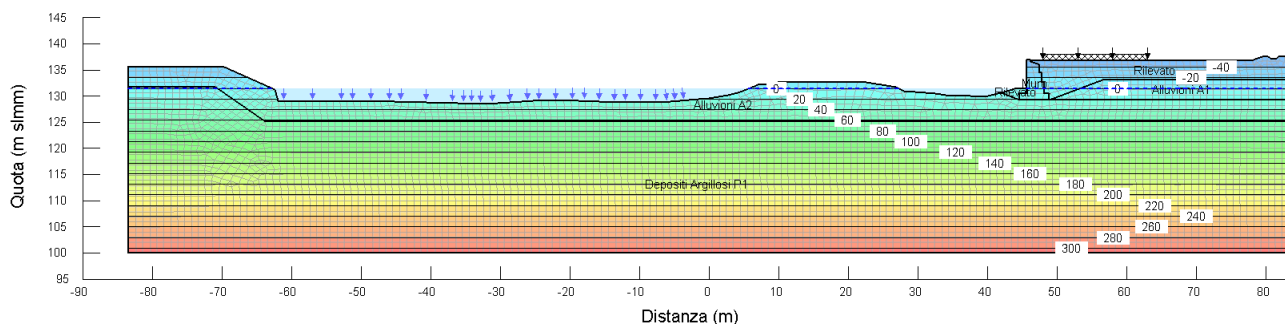


Figura 3.12. Sezione PF4_v1 - Regime di pressioni interstiziali a 0 hr

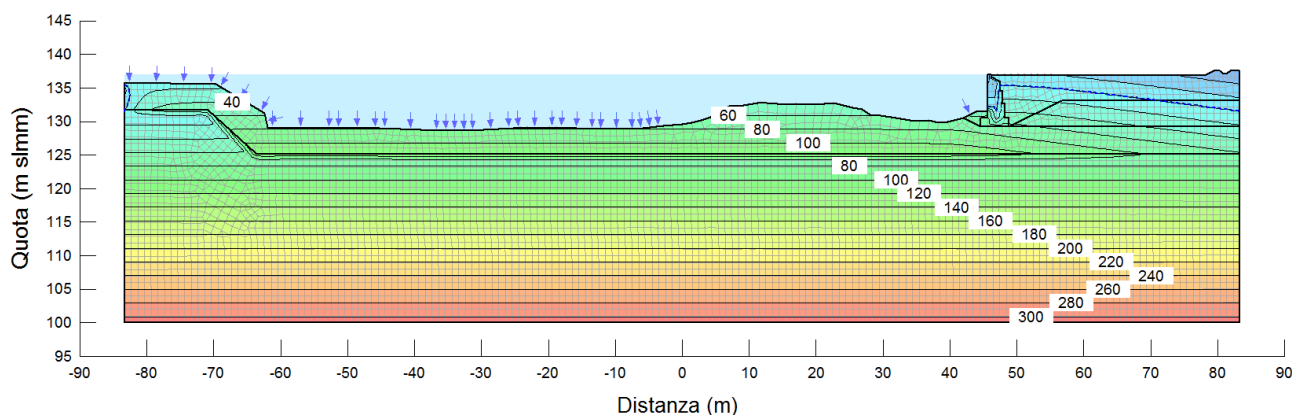


Figura 3.13. Sezione PF4_v1 - Regime di pressioni interstiziali a 20 hr dall'inizio della piena

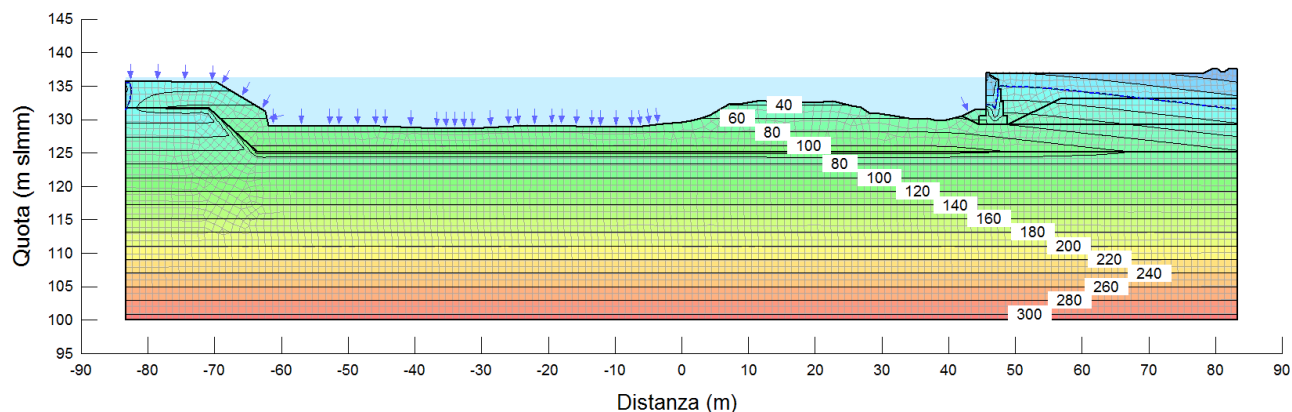


Figura 3.14. Sezione PF4_v1 - Regime di pressioni interstiziali a 27 hr dall'inizio della piena

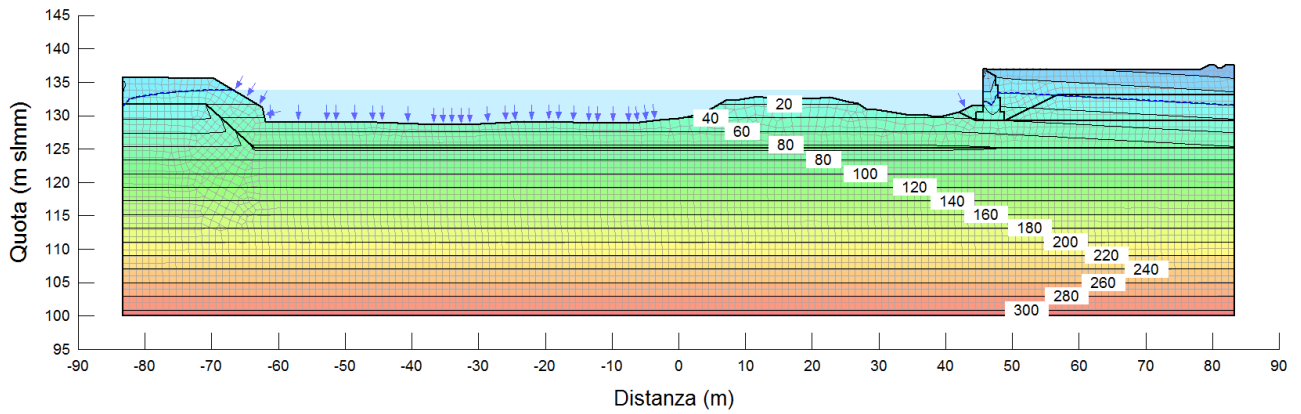


Figura 3.15. Sezione PF4_v1 - Regime di pressioni interstiziali a 33 h dall'inizio della piena

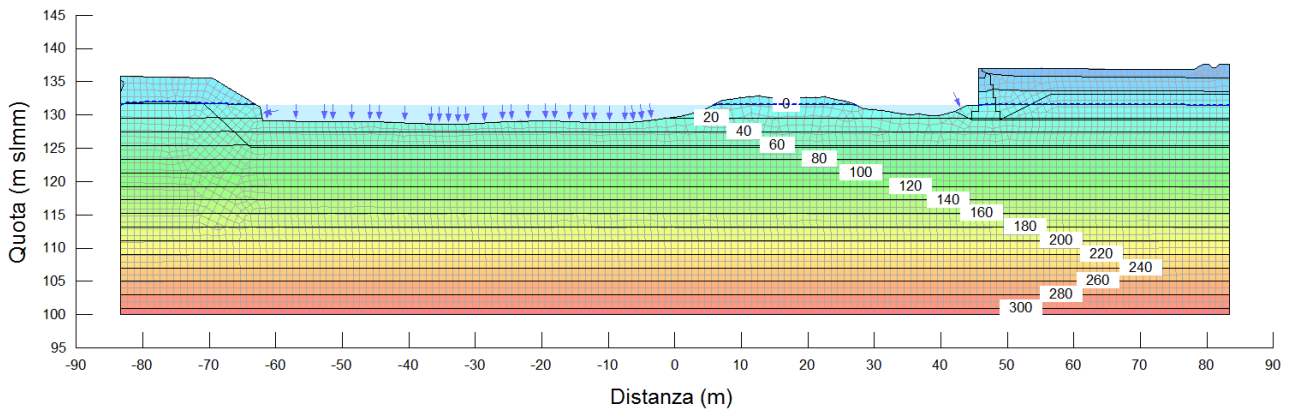


Figura 3.16. Sezione PF4_v1 - Regime di pressioni interstiziali a 44 hr dall'inizio della piena

3.1.4 Risultati: sezione 16

Il regime di pressioni interstiziali è stato stimato ogni 30 min per tutta la durata dell'analisi, pari a 44h. Si presentano di seguito i risultati dell'analisi in termini di andamento delle pressioni interstiziali per alcuni istanti salienti post picco (quota +136.98 m slmm al tempo di 20 hr circa) per cui è stata successivamente svolta l'analisi di stabilità:

- 0 hr situazione pre-evento di (quota +131.50m slmm)
- 20 hr evento di picco (quota +136.98m slmm)
- 27 hr
- 33 hr
- 44 hr (post-evento)

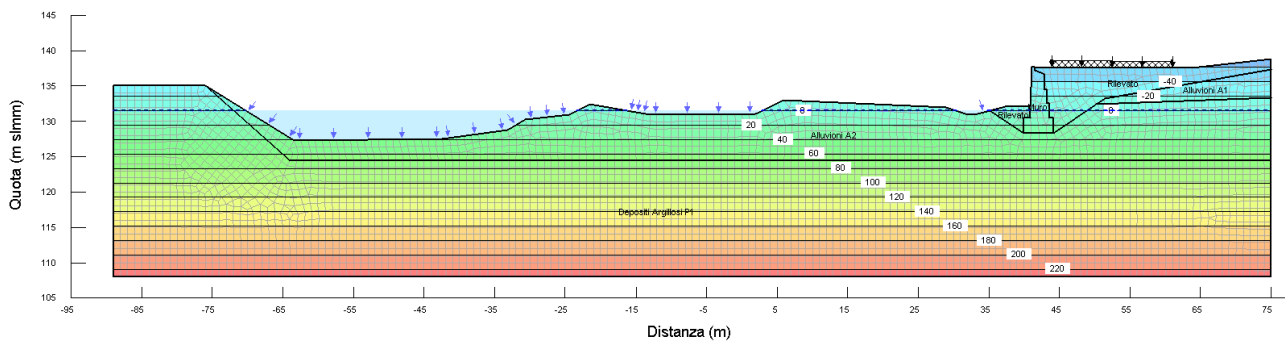


Figura 3.17. Sezione 16 - Regime di pressioni interstiziali a 0 hr

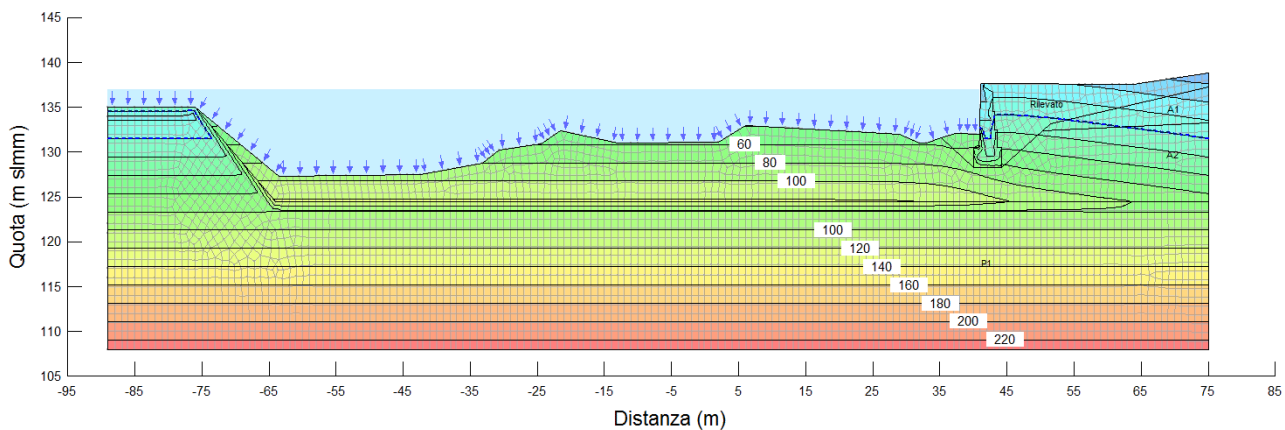


Figura 3.18. Sezione 16 - Regime di pressioni interstiziali a 20 hr dall'inizio della piena

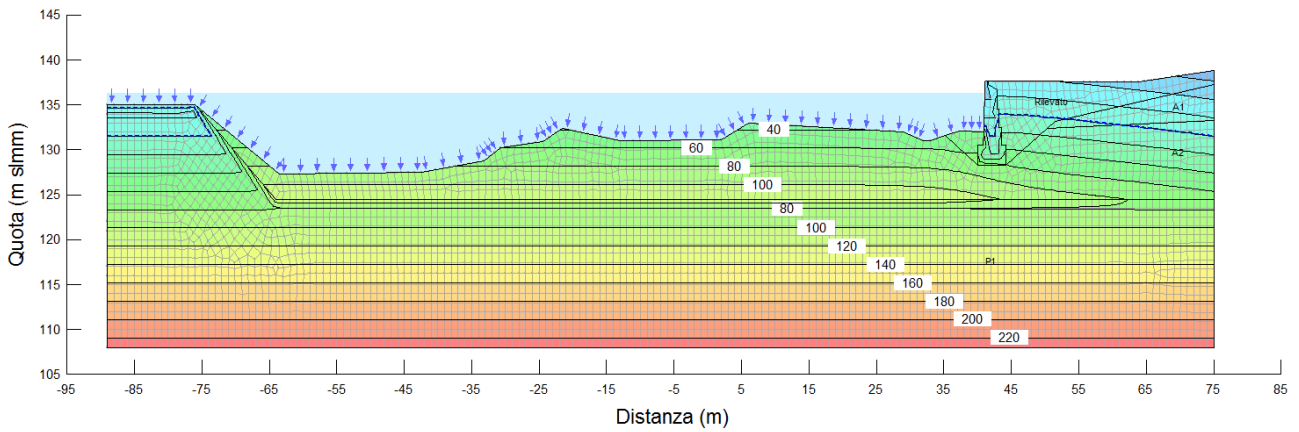


Figura 3.19. Sezione 16 - Regime di pressioni interstiziali a 27 hr dall'inizio della piena

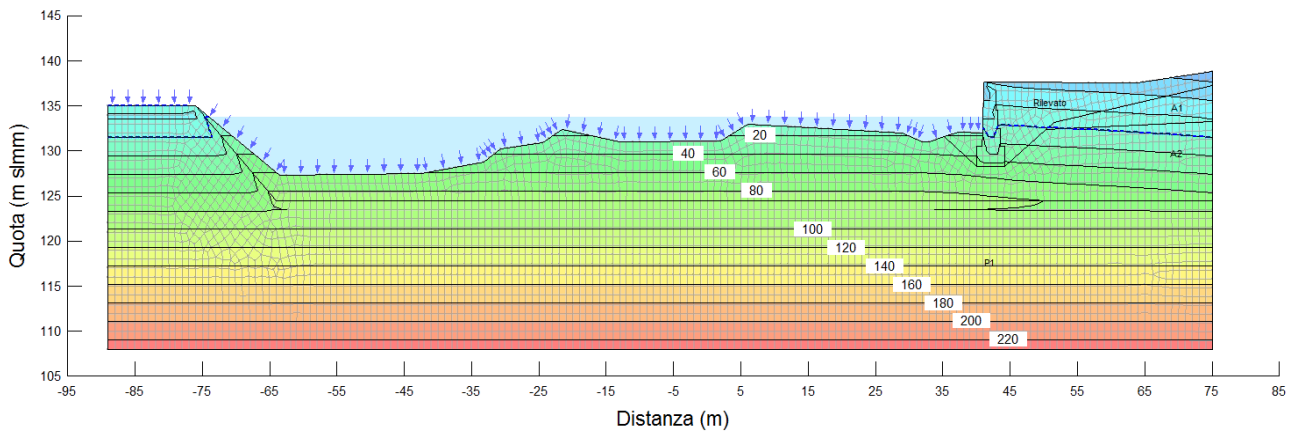


Figura 3.20. Sezione 16 - Regime di pressioni interstiziali a 33 h dall'inizio della piena

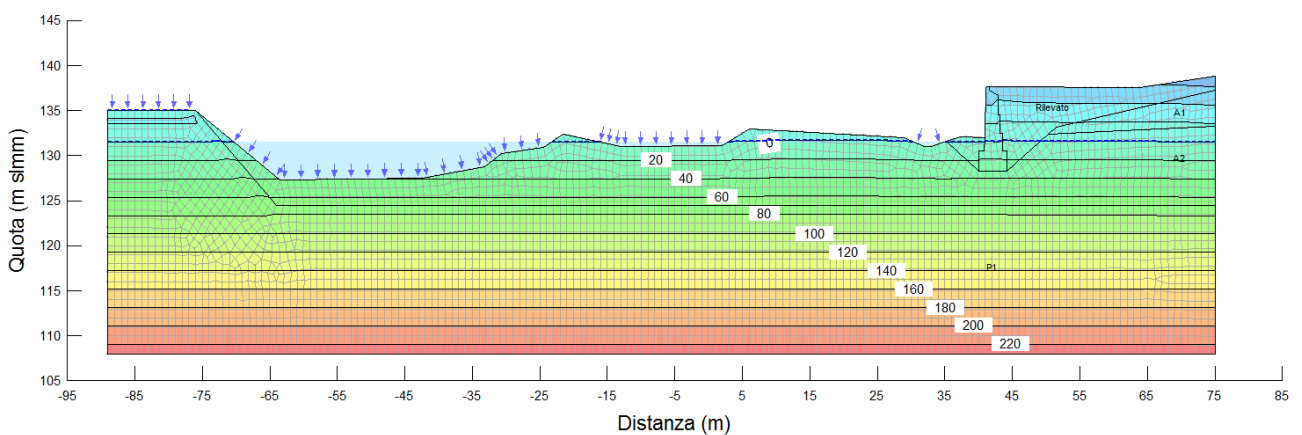


Figura 3.21. Sezione 16 - Regime di pressioni interstiziali a 44 hr dall'inizio della piena

3.1.5 Risultati: sezione extra_PF4_v3

Il regime di pressioni interstiziali è stato stimato ogni 30 min per tutta la durata dell'analisi, pari a 44h. Si presentano di seguito i risultati dell'analisi in termini di andamento delle pressioni interstiziali per alcuni istanti salienti post picco (quota +136.98 m slmm al tempo di 20 hr circa) per cui è stata successivamente svolta l'analisi di stabilità:

- 0 hr situazione pre-evento di (quota +131.50m slmm)
- 20 hr evento di picco (quota +136.98m slmm)
- 27 hr
- 33 hr
- 44 hr (post-evento)

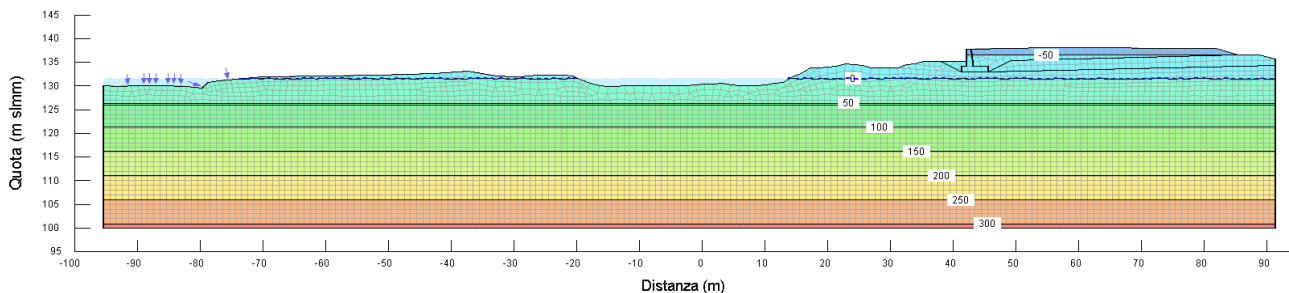


Figura 3.22. Sezione Extra_PF4_v3 - Regime di pressioni interstiziali a 0 hr

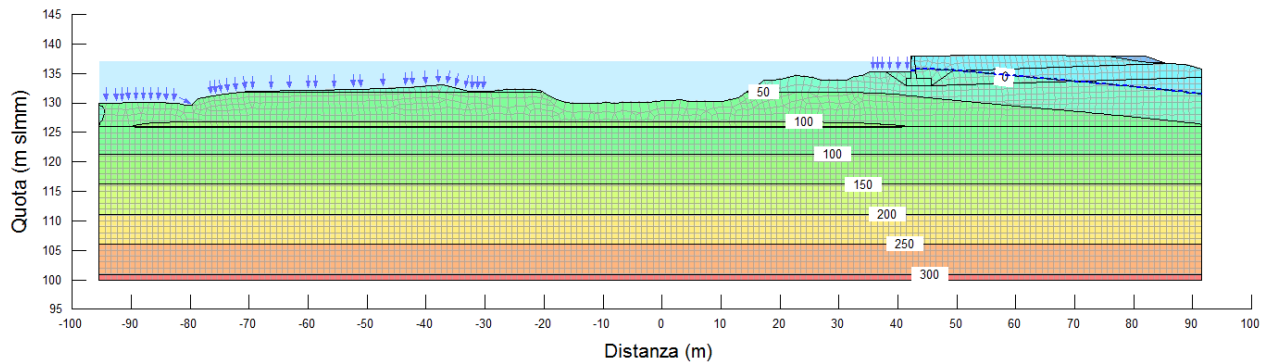


Figura 3.23. Sezione Extra_PF4_v3 - Regime di pressioni interstiziali a 20 hr dall'inizio della piena

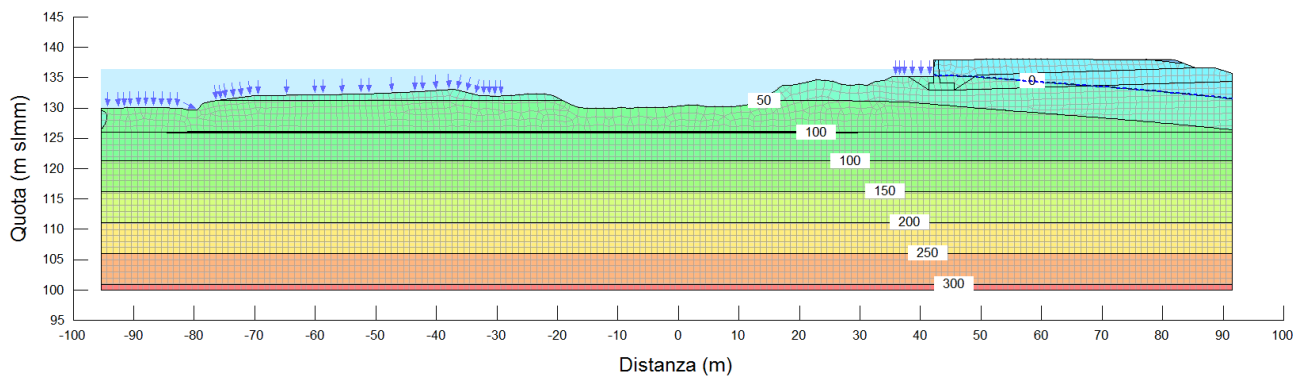


Figura 3.24. Sezione Extra_PF4_v3 - Regime di pressioni interstiziali a 27 hr dall'inizio della piena

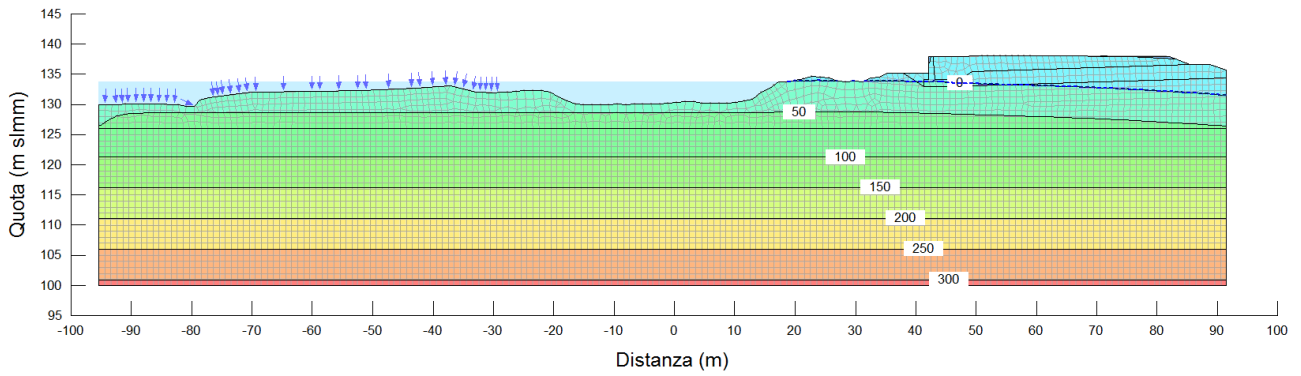


Figura 3.25. Sezione Extra_PF4_v3 - Regime di pressioni interstiziali a 33 hr dall'inizio della piena

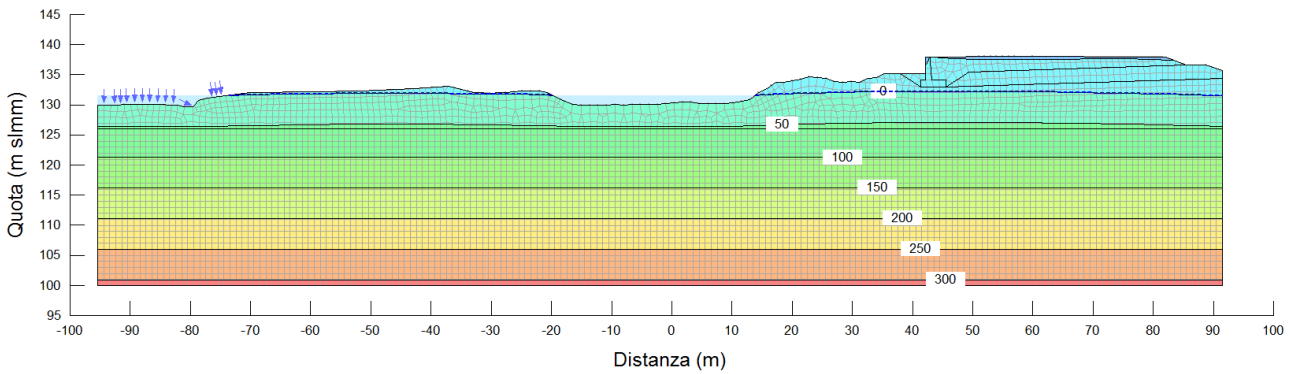


Figura 3.26. Sezione Extra_PF4_v3 - Regime di pressioni interstiziali a 44 hr dall'inizio della piena

3.2 ANALISI DI STABILITÀ IN TRANSITORIO

3.2.1 Dati in ingresso

Per la condizione iniziale e per ciascuna delle condizioni di regime di pressioni interstiziali, stimate negli istanti di cui al precedente paragrafo 3.1 sono state svolte analisi di stabilità globale con il codice di calcolo SlopeW [3].

Stratigrafia, livelli di falda (ottenute con le analisi di filtrazione), sovraccarichi e parametri geotecnici di progetto sono mostrati nelle figure seguenti rispettivamente per ogni sezione di studio.

Per le sezioni 16 e extra_PV4_v3 si è verificato quale fosse la distanza minima alveo-muro (massimo scalzamento) tale per cui siano soddisfatti i requisiti di Normativa.

Nella modellazione piana, i terreni sono stati caratterizzati mediante un legame costitutivo rigido-plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb.

I parametri geotecnici, riportati in Tabella 3.1 sono stati presi in accordo alla Relazione Geotecnica Generale [1] e fattorizzati in accordo alla normativa NTC2008 – Approccio 1 Combinazione 2 (A2+M2+R2). Questi, si ricorda che, sono già essi stessi frutto di una stima cautelativa.

Le analisi sono state svolte utilizzando il metodo di Morgenstern-Price e imponendo il passaggio delle superfici per il rilevato autostradale. Nelle figure, in rosso, i punti di partenza e di arrivo da cui sono state create le superfici di scivolamento per la verifica di stabilità.

Tabella 3.1: Parametri geotecnici caratteristici (in accordo a [1])

Strato	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Rilevato	19	0	35
A1	19	0	30
A2	19	0	32
P1	20	5	24

Tabella 3.2: Parametri geotecnici di progetto (in accordo a [1])

Strato	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Rilevato	19	0	29
A1	19	0	24
A2	19	0	26
P1	20	5	19

3.2.2 Risultati: sezione 20

Nel seguito si riportano i risultati delle analisi di stabilità globale e le potenziali superfici che interessano il corpo del rilevato autostradale.

Dalle figure emerge che la stabilità non è garantita, con valori del fattore di sicurezza inferiori al valore minimo richiesto dalla Normativa ($F_s < 1.1$).

Tabella 3.3: Sezione 20: Fattori di sicurezza minimi

Analisi di Stabilità globale	Fs
t = 0 sec (pre-evento)	1.066
t = 72000 sec (picco)	1.283
t = 97200 sec	1.228
t = 118800 sec	1.093
t = 158400 sec (post-evento)	1.051

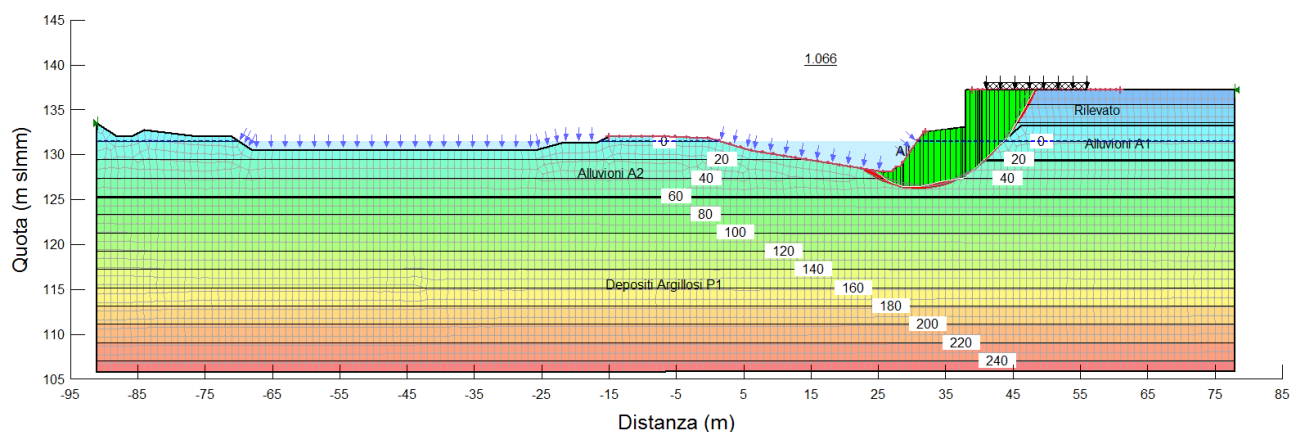


Figura 3.27. Sezione 20: Analisi di stabilità globale allo stato attuale con parametri fattorizzati

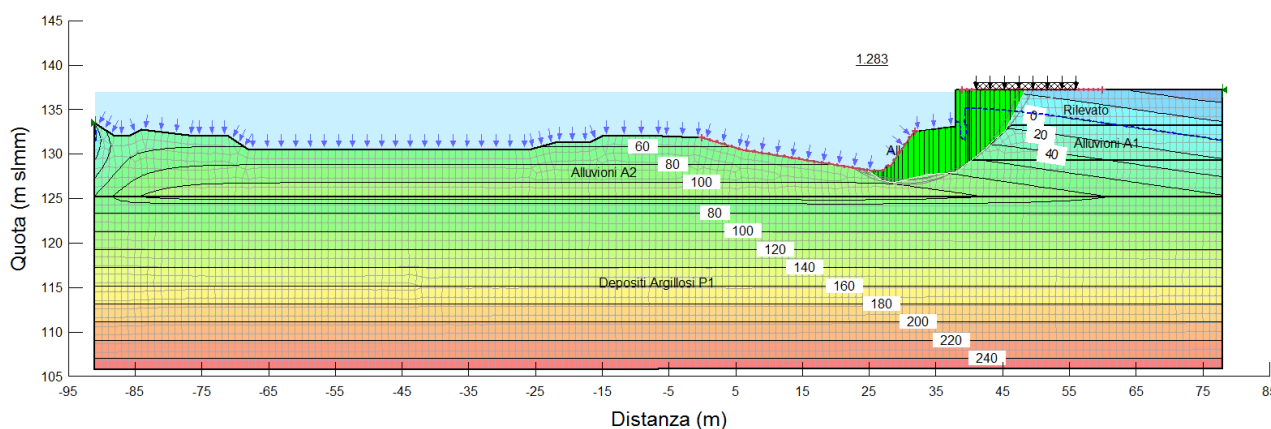


Figura 3.28. Sezione 20: Analisi di stabilità globale a 20 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

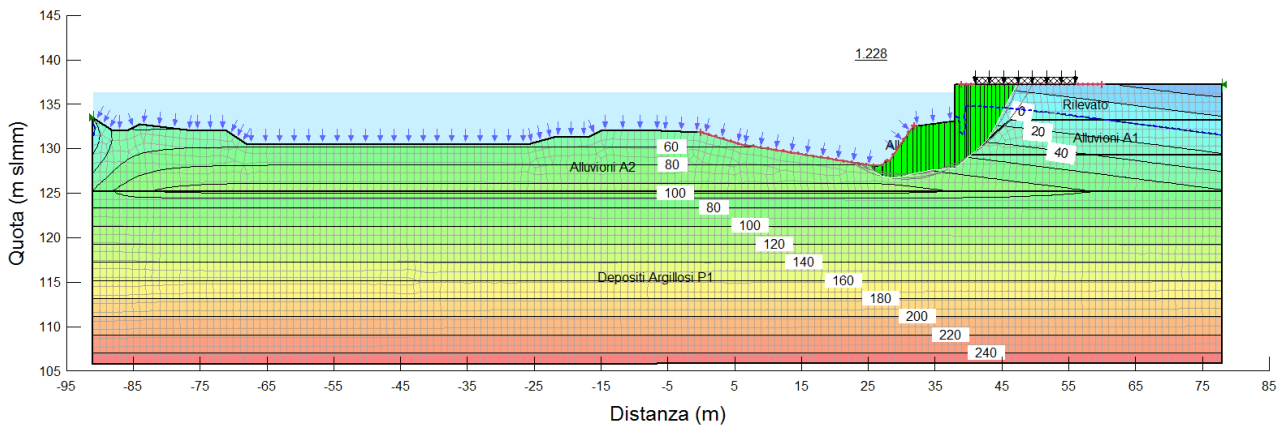


Figura 3.29. Sezione 20: Analisi di stabilità globale a 27 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

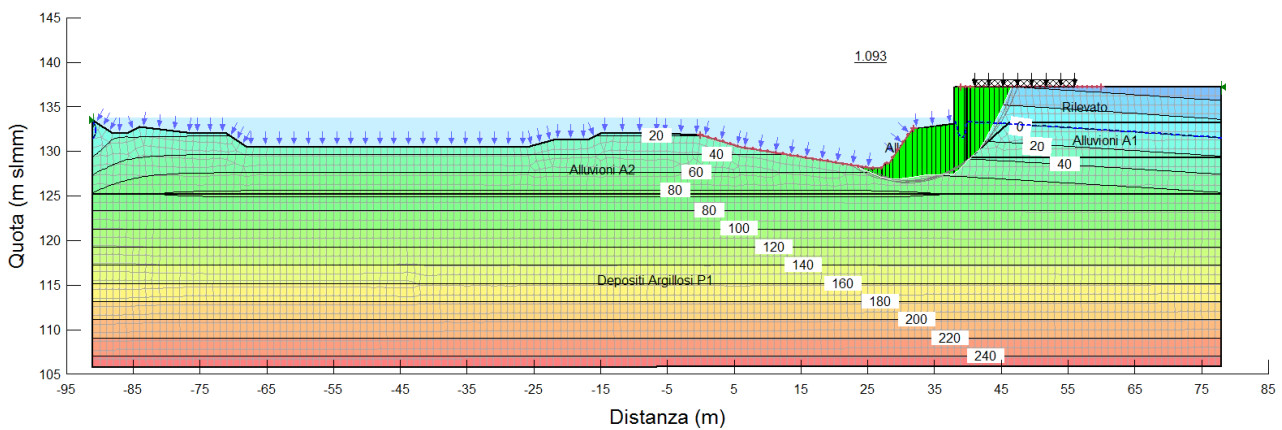


Figura 3.30. Sezione 20: Analisi di stabilità globale a 33 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

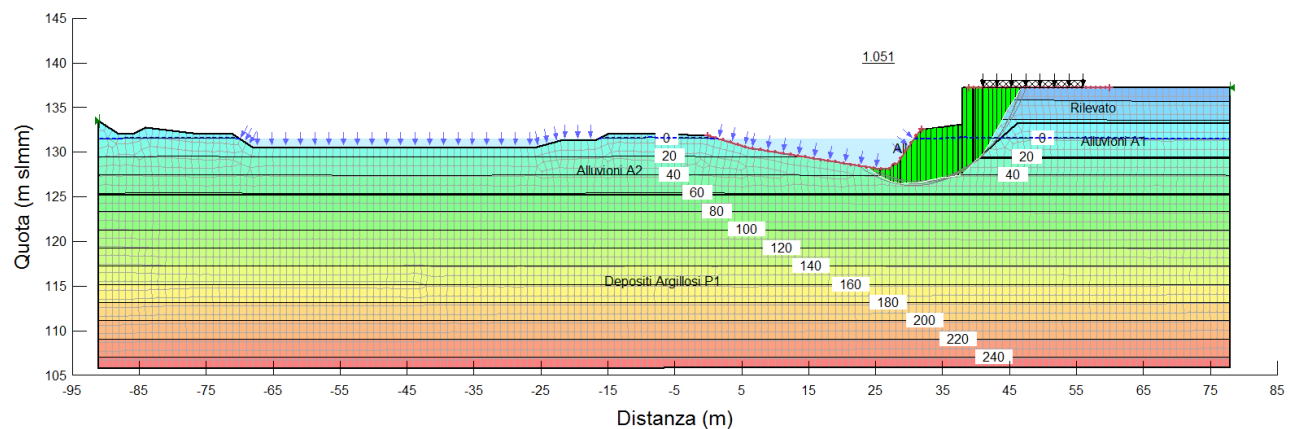


Figura 3.31. Sezione 20: Analisi di stabilità globale a 44 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

3.2.3 Risultati: sezione PF4_v1

Nel seguito si riportano i risultati delle analisi di stabilità globale e le potenziali superfici che interessano il corpo del rilevato autostradale.

Dalle figure emerge che la stabilità non è garantita, con valori del fattore di sicurezza inferiori al valore minimo richiesto dalla Normativa ($F_s < 1.1$).

Tabella 3.4: Sezione PF4_v1: Fattori di sicurezza minimi

Analisi di Stabilità globale	F_s
$t = 0$ sec (pre-evento)	1.010
$t = 72000$ sec (picco)	1.144
$t = 97200$ sec	1.128
$t = 118800$ sec	1.077
$t = 158400$ sec (post-evento)	1.027

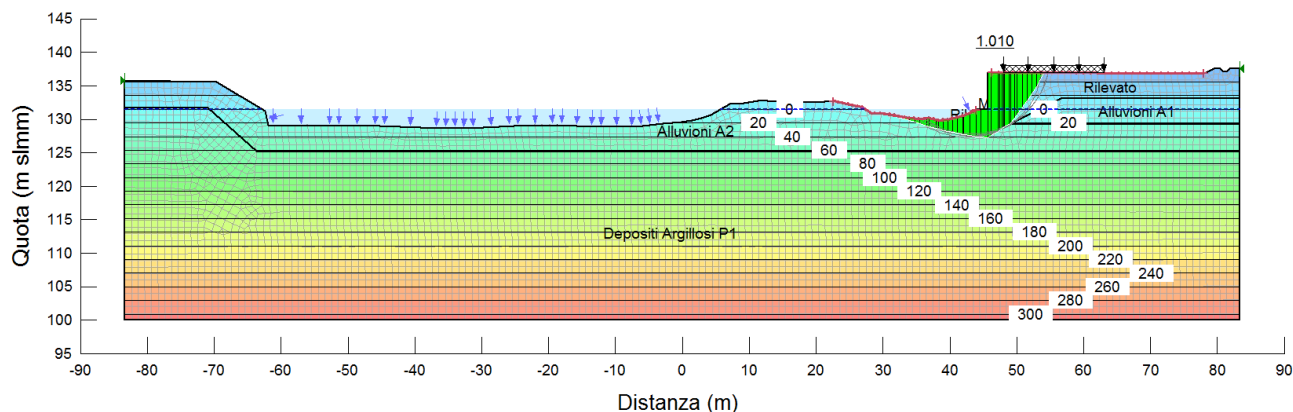


Figura 3.32. Sezione PF4_v1: Analisi di stabilità globale allo stato attuale con parametri fattorizzati

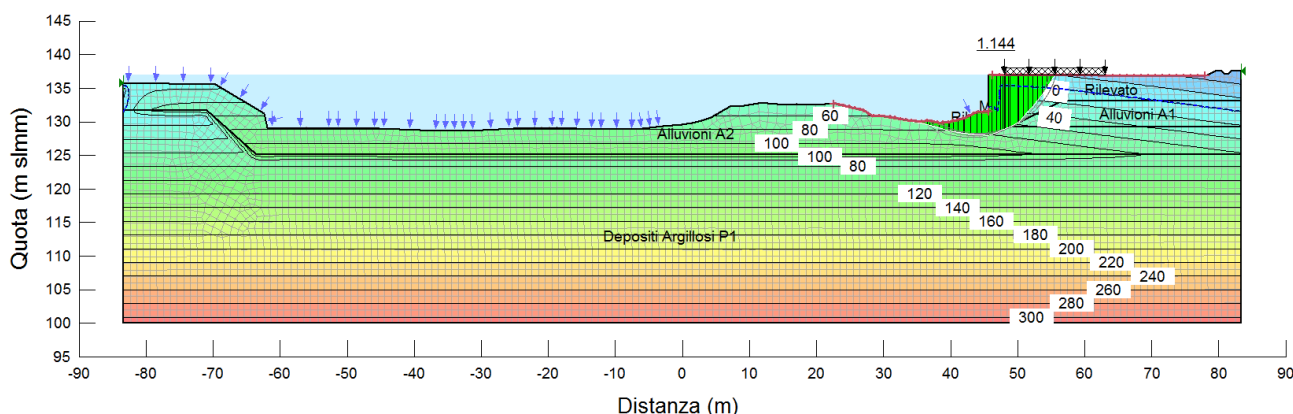


Figura 3.33. Sezione PF4_v1: Analisi di stabilità globale a 20 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

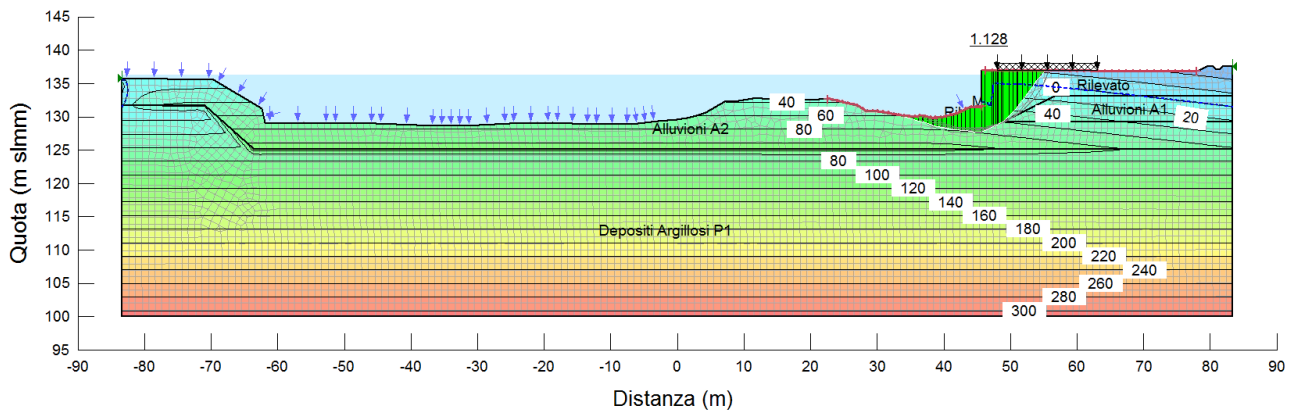


Figura 3.34. Sezione PF4_v1: Analisi di stabilità globale a 27 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

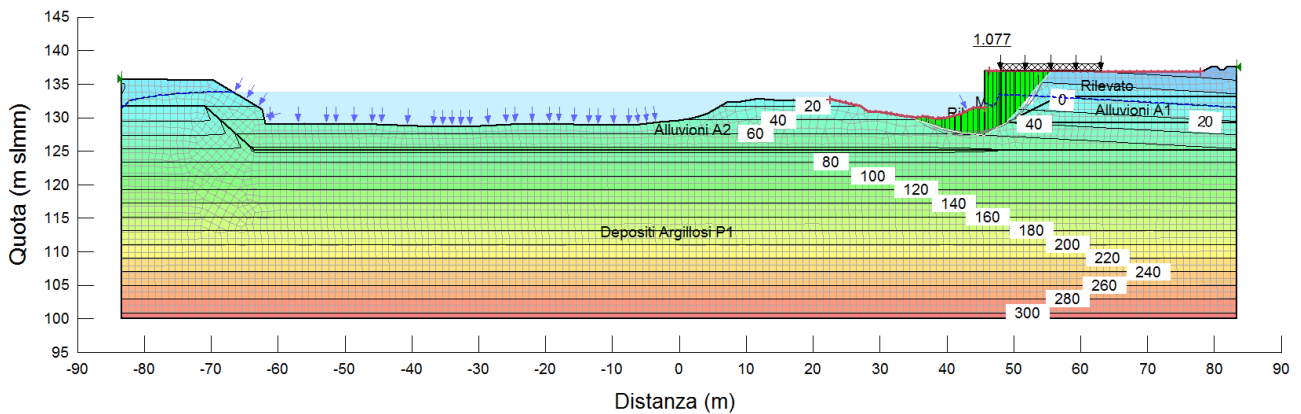


Figura 3.35. Sezione PF4_v1: Analisi di stabilità globale a 33 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

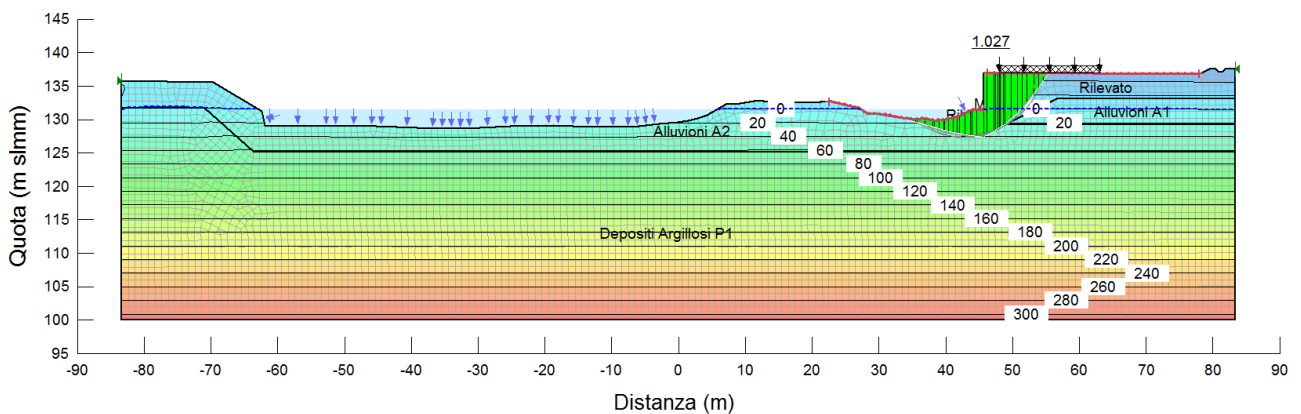


Figura 3.36. Sezione PF4_v1: Analisi di stabilità globale a 44 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

3.2.4 Risultati: sezione 16

Nel seguito si riportano i risultati delle analisi di stabilità globale e le potenziali superfici che interessano il corpo del rilevato autostradale.

Dalle figure emerge che la stabilità è sempre garantita, con valori del fattore di sicurezza superiori al valore minimo richiesto dalla Normativa ($F_s > 1.1$).

Tabella 3.5: Sezione 16: Fattori di sicurezza minimi

Analisi di Stabilità globale	F_s
t = 0 sec (pre-evento)	1.333
t = 72000 sec (picco)	1.673
t = 97200 sec	1.618
t = 118800 sec	1.434
t = 158400 sec (post-evento)	1.327

Dalla Figura 3.42 alla Figura 3.45 si riportano le analisi con il massimo scalzamento potenziale sotto la fondazione che restituiscono fattori di sicurezza minimi superiore a quello di Normativa.

Tabella 3.6: Sezione 16: Fattori di sicurezza minimi con scalzamento fino a 15 m

Analisi di Stabilità globale	F_s
t = 72000 sec (picco)	1.459
t = 97200 sec	1.415
t = 118800 sec	1.227
t = 158400 sec (post-evento)	1.131

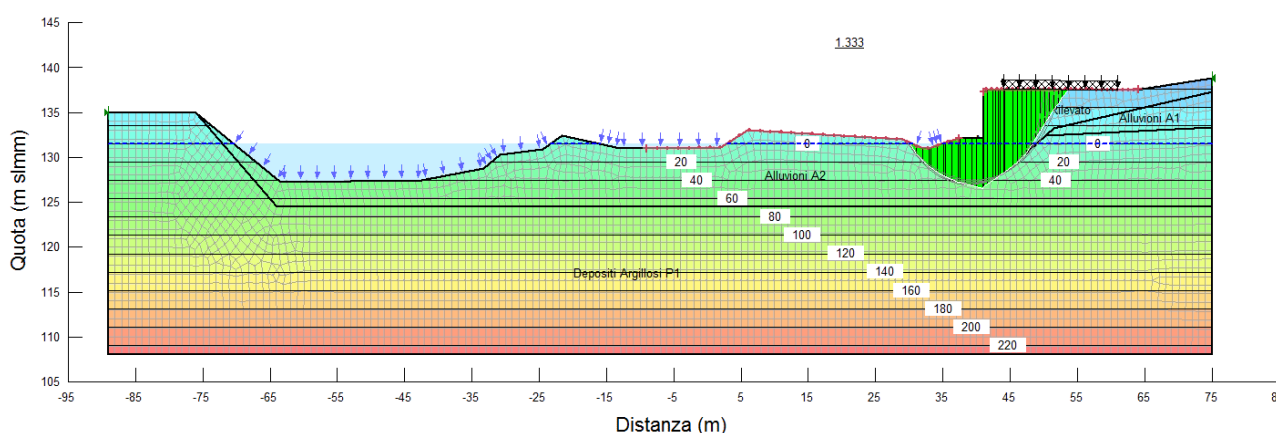


Figura 3.37. Sezione 16: Analisi di stabilità globale allo stato attuale con parametri fattorizzati

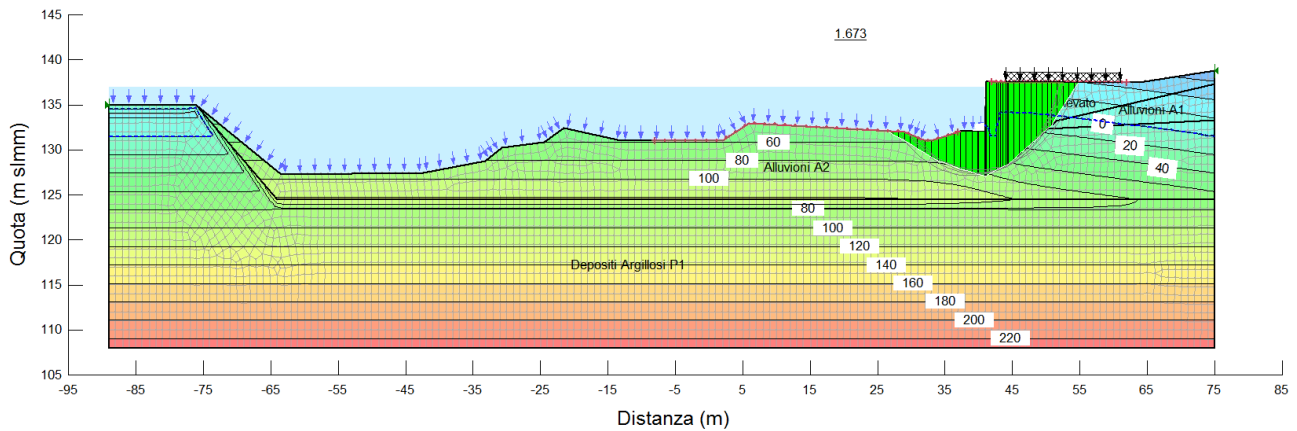


Figura 3.38. Sezione 16: Analisi di stabilità globale a 20 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

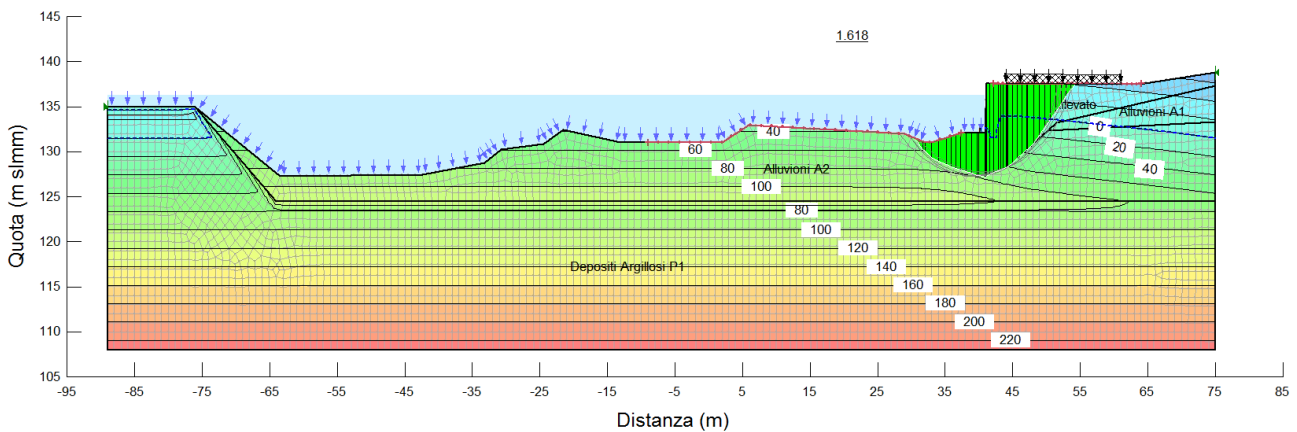


Figura 3.39. Sezione 16: Analisi di stabilità globale a 27 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

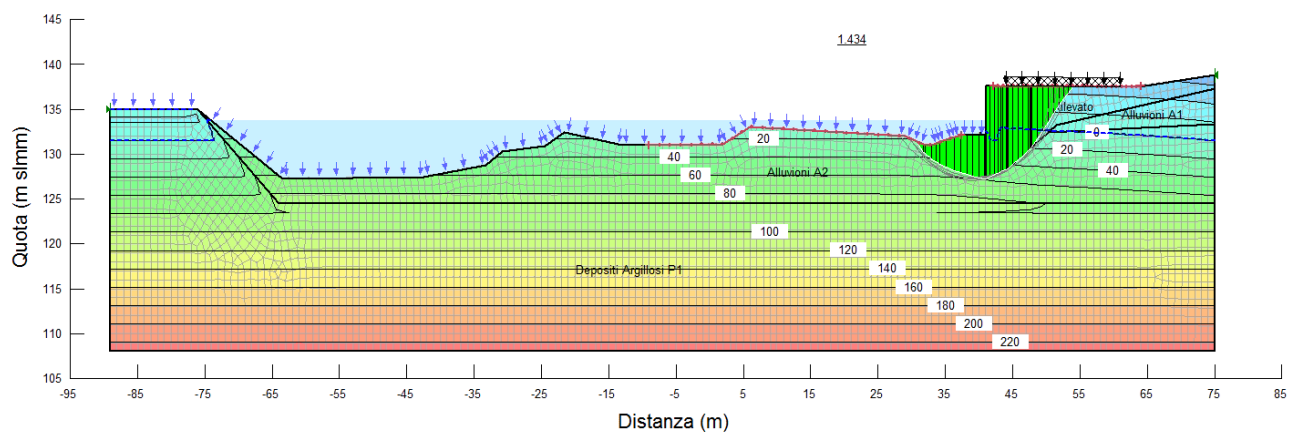


Figura 3.40. Sezione 16: Analisi di stabilità globale a 33 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

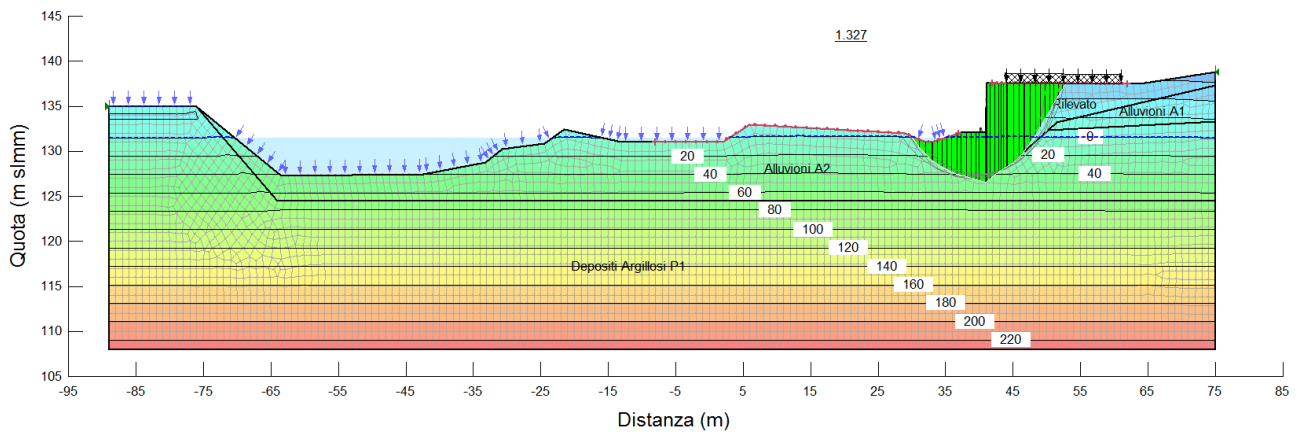


Figura 3.41. Sezione 16: Analisi di stabilità globale a 44 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

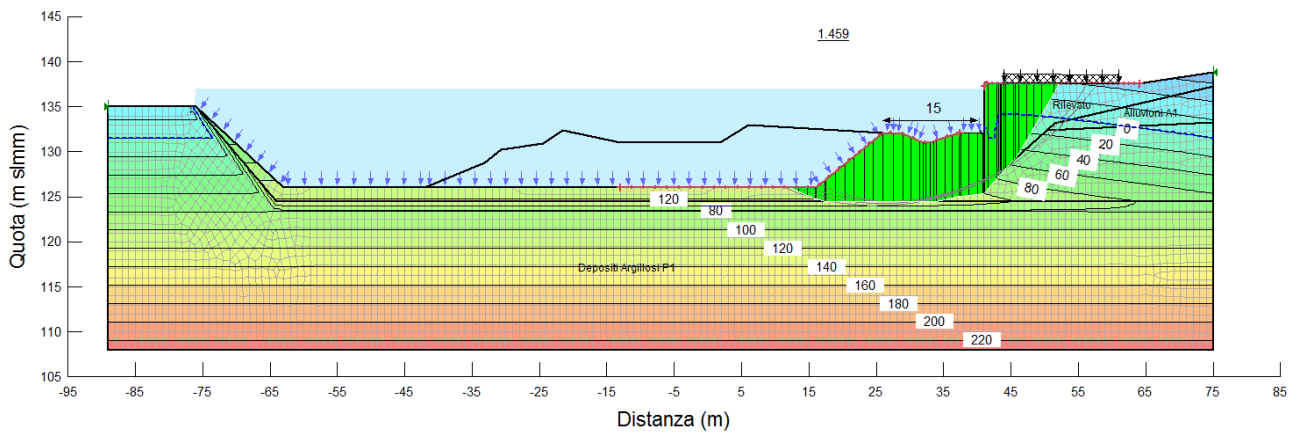


Figura 3.42. Sezione 16: Analisi di stabilità globale con scalzamento fino a 15 m a 20 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

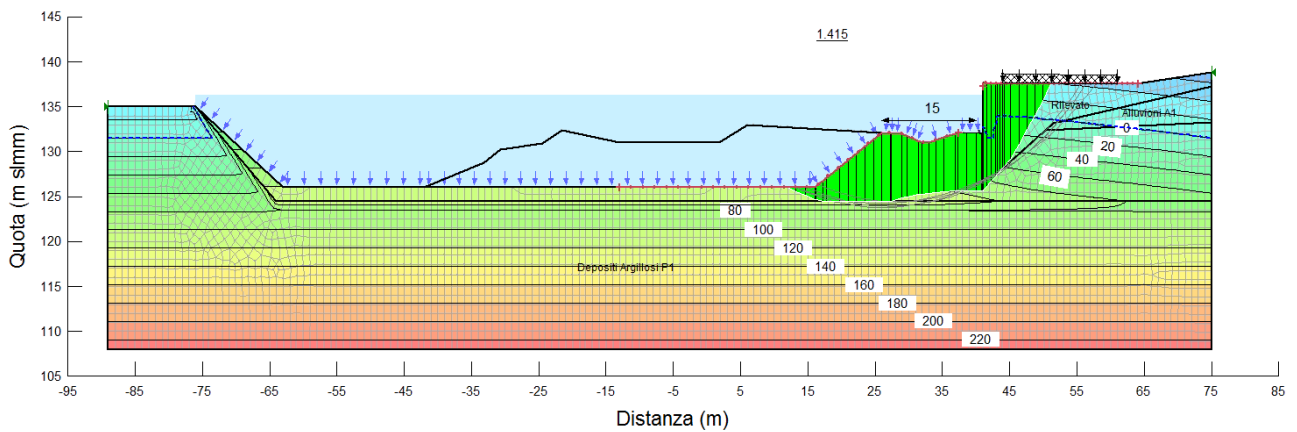


Figura 3.43. Sezione 16: Analisi di stabilità globale con scalzamento fino a 15 m a 27 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

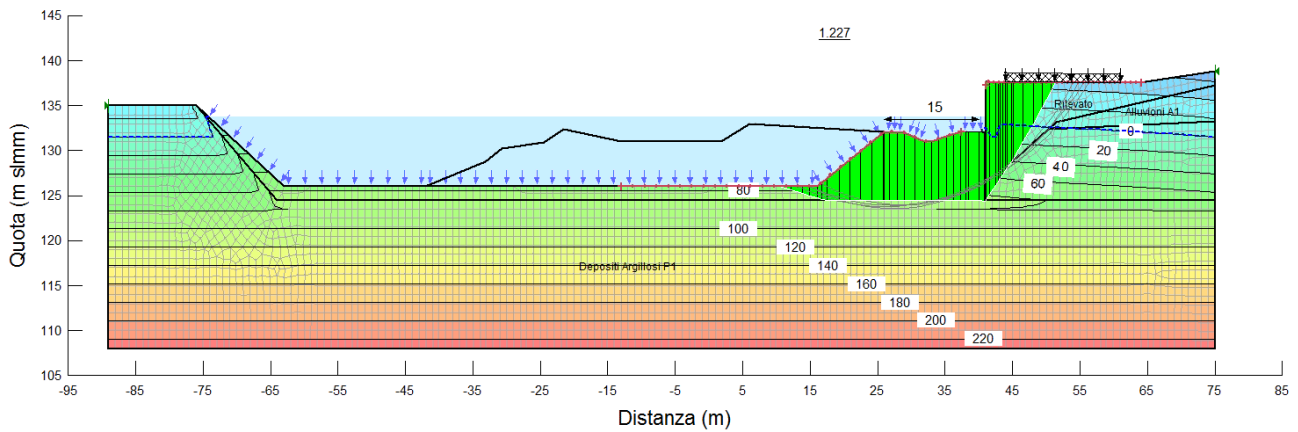


Figura 3.44. Sezione 16: Analisi di stabilità globale con scalzamento fino a 15 m a 33 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

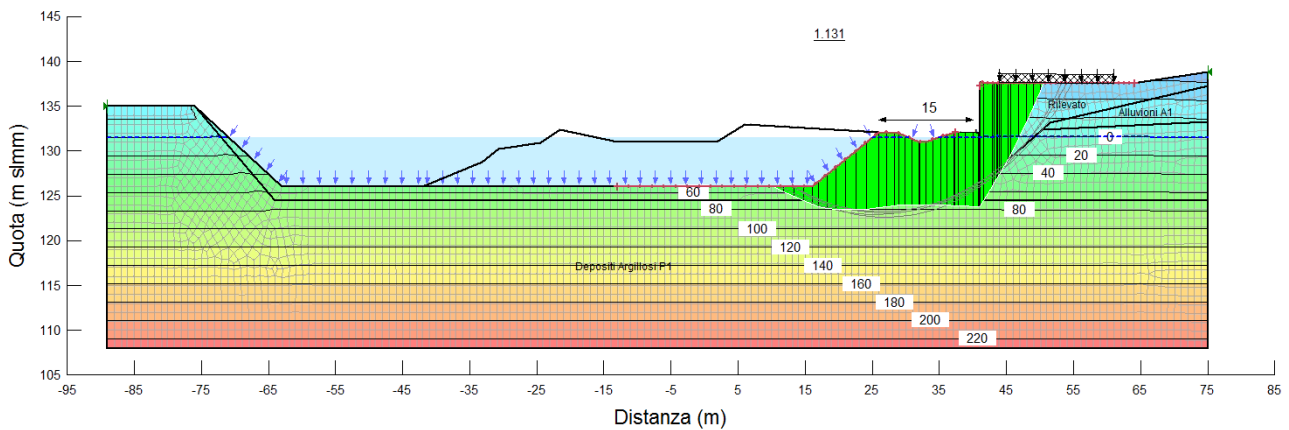


Figura 3.45. Sezione 16: Analisi di stabilità globale con scalzamento fino a 15 m a 44 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

3.2.5 Risultati: sezione extra_PF4_v3

Nel seguito si riportano i risultati delle analisi di stabilità globale e le potenziali superfici che interessano il corpo del rilevato autostradale.

Dalle figure emerge che la stabilità è sempre garantita, con valori del fattore di sicurezza superiori al valore minimo richiesto dalla Normativa ($F_s > 1.1$).

Tabella 3.7: Sezione extra_PF4_v3: Fattori di sicurezza minimi

Analisi di Stabilità globale	Fs
t = 0 sec (pre-evento)	2.017
t = 72000 sec (picco)	1.743
t = 97200 sec	1.662
t = 118800 sec	1.675
t = 158400 sec (post-evento)	1.989

Dalla Figura 3.51 alla Figura 3.54 si riportano le analisi con il massimo scalzamento potenziale sotto la fondazione che restituiscono fattori di sicurezza minimi superiore a quello di Normativa.

Tabella 3.8: Sezione extra_PF4_v3: Fattori di sicurezza minimi con scalzamento fino a 7 m

Analisi di Stabilità globale	Fs
t = 72000 sec (picco)	1.265
t = 97200 sec	1.234
t = 118800 sec	1.178
t = 158400 sec (post-evento)	1.118

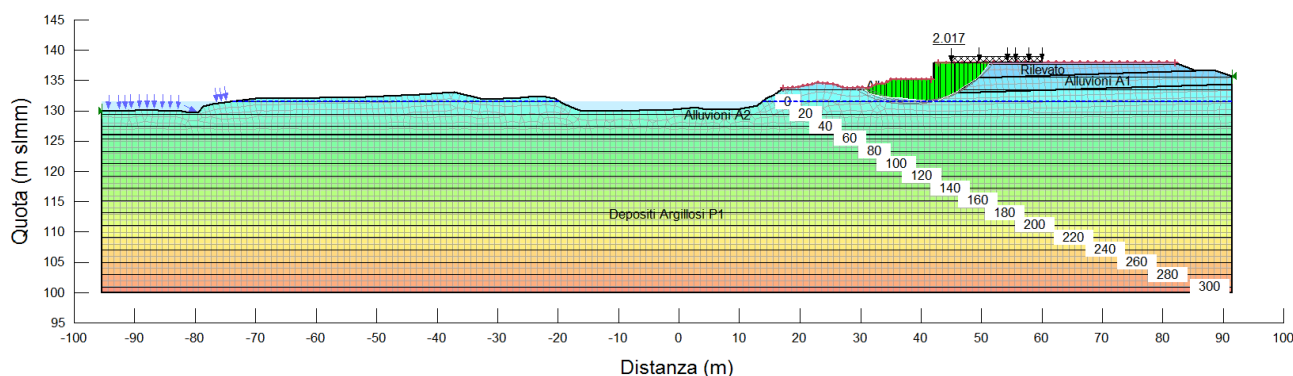


Figura 3.46. Sezione extra_PF4_v3: Analisi di stabilità globale allo stato attuale con parametri fattorizzati

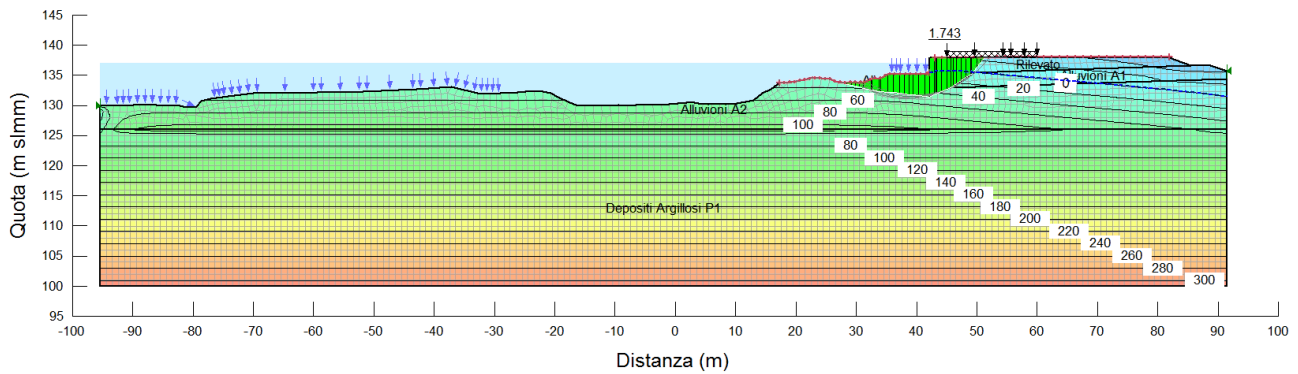


Figura 3.47. Sezione extra_PF4_v3: Analisi di stabilità globale a 20 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

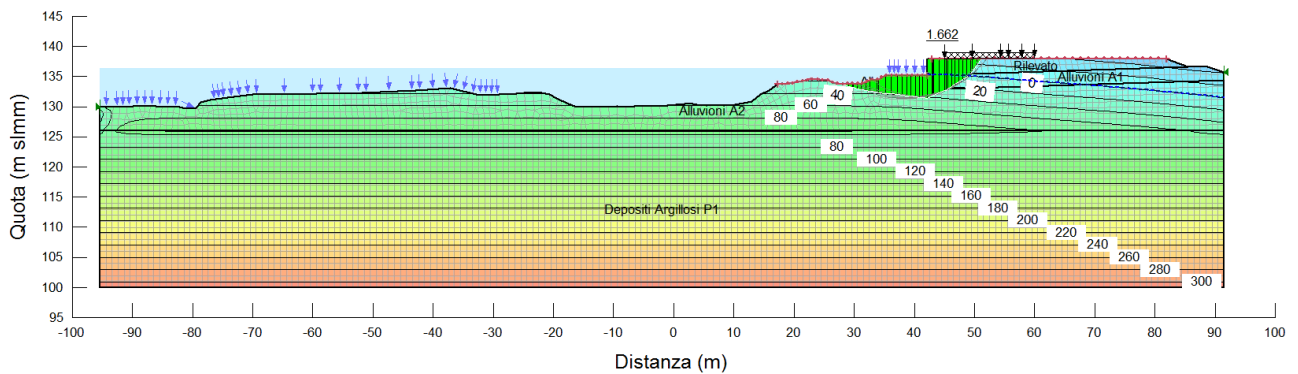


Figura 3.48. Sezione extra_PF4_v3: Analisi di stabilità globale a 27 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

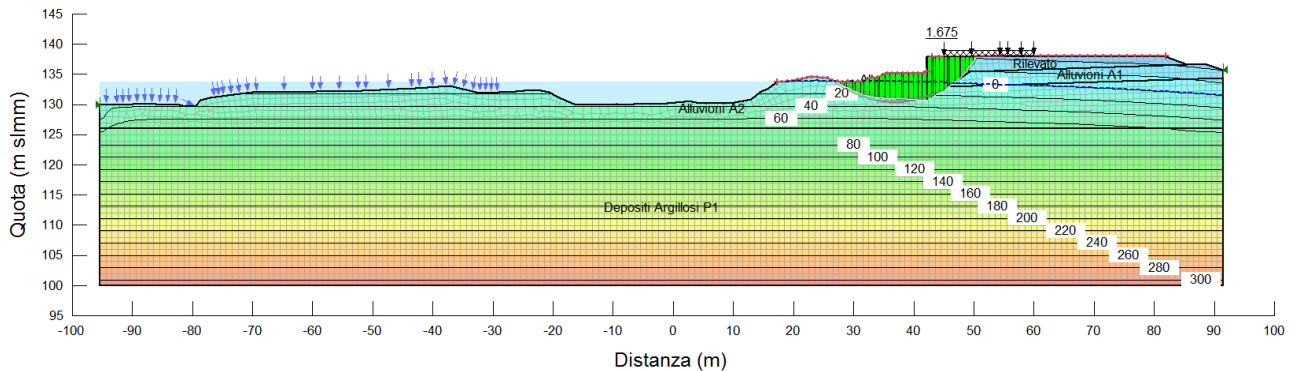


Figura 3.49. Sezione extra_PF4_v3: Analisi di stabilità globale a 33 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

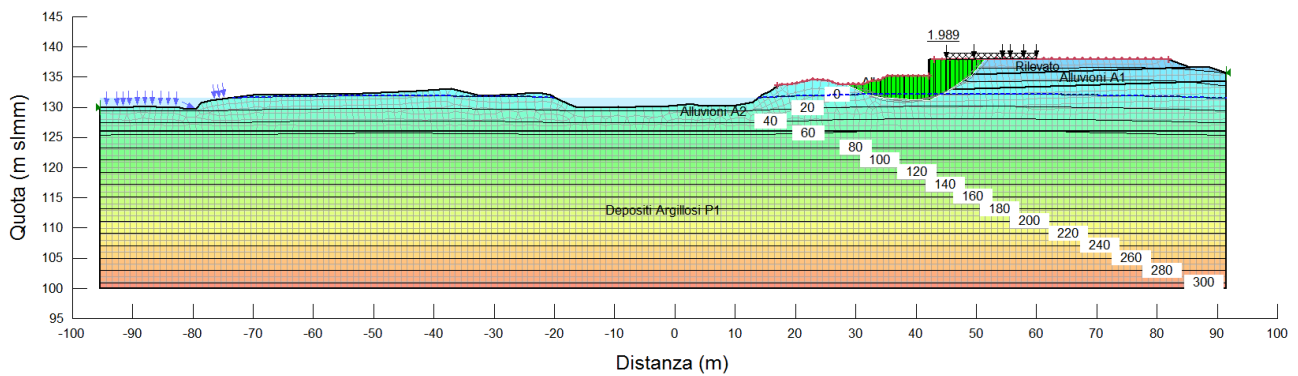


Figura 3.50. Sezione extra_PF4_v3: Analisi di stabilità globale a 44 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

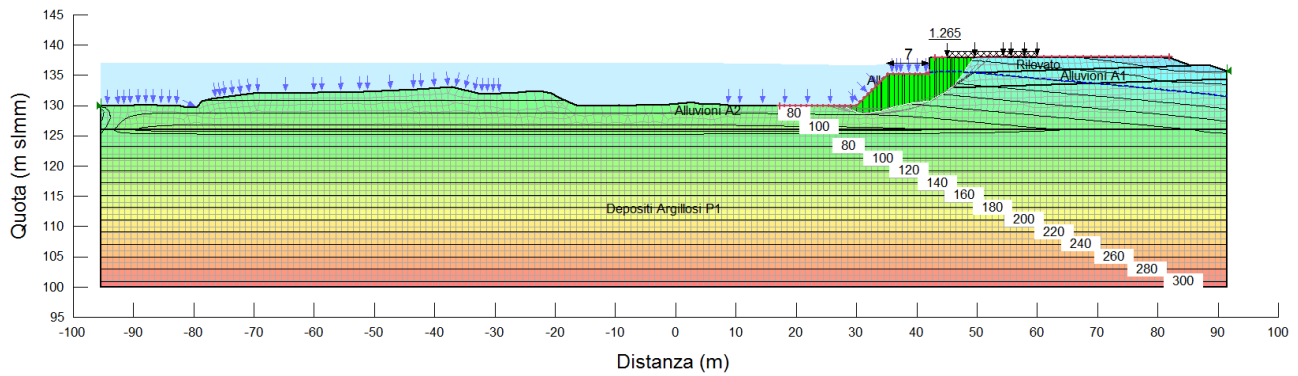


Figura 3.51. Sezione extra_PF4_v3: Analisi di stabilità globale con scalzamento fino a 7 m a 20 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

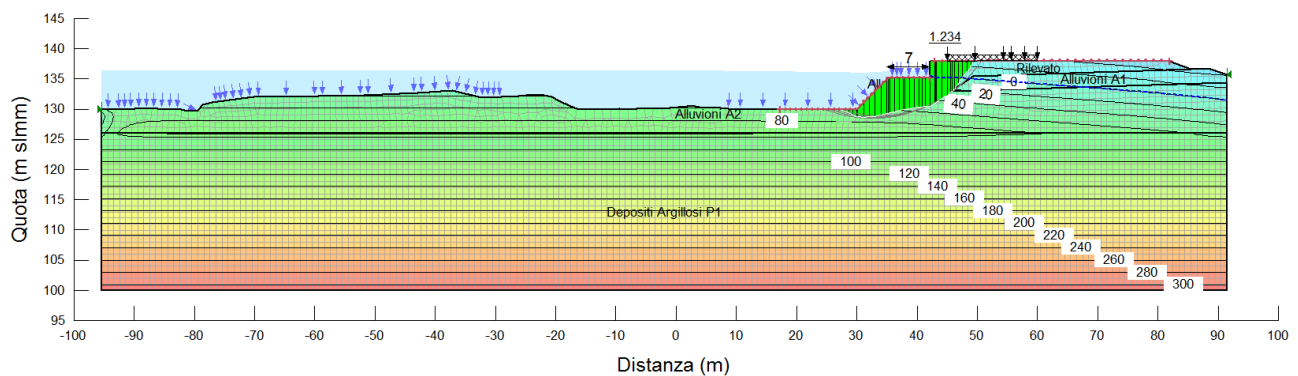


Figura 3.52. Sezione extra_PF4_v3: Analisi di stabilità globale con scalzamento fino a 7 m a 27 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

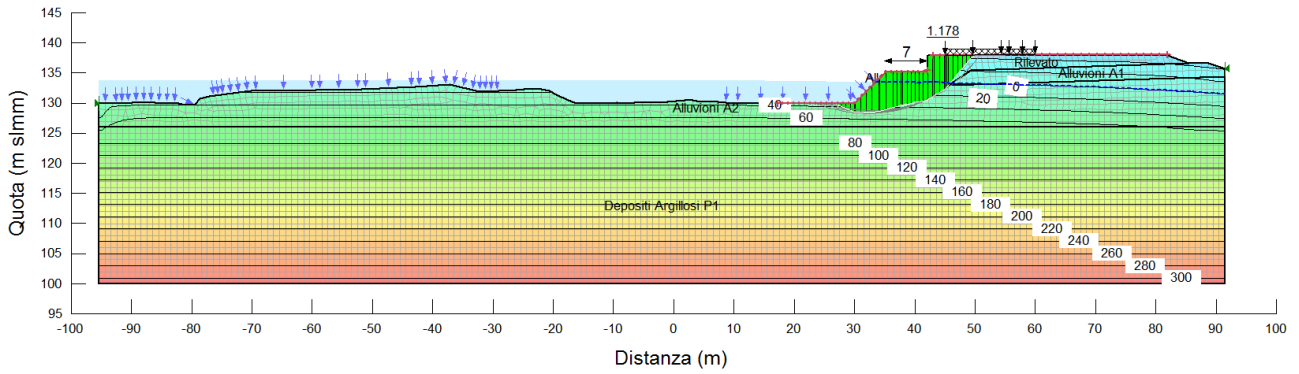


Figura 3.53. Sezione extra_PF4_v3: Analisi di stabilità globale con scalzamento fino a 7 m a 33 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

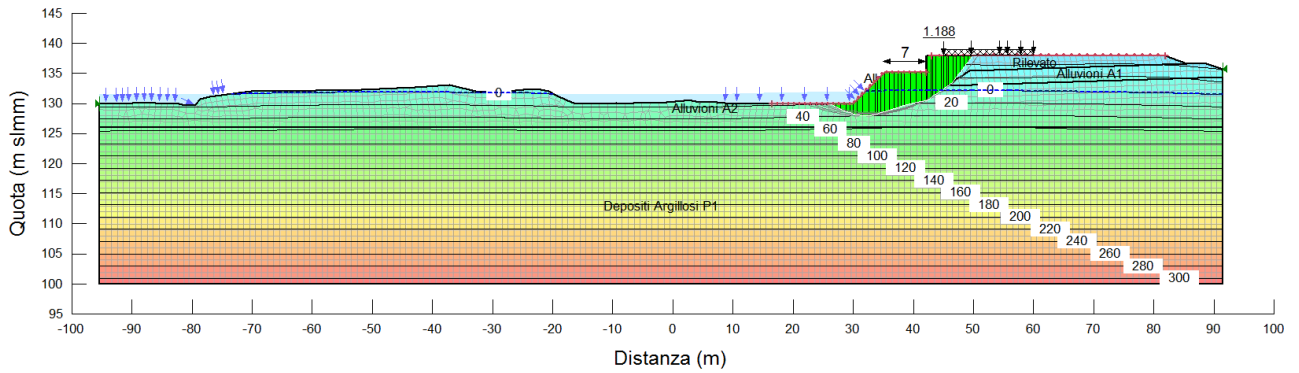


Figura 3.54. Sezione extra_PF4_v3: Analisi di stabilità globale con scalzamento fino a 7 m a 44 h dall'inizio della piena con parametri fattorizzati

3.3 CONCLUSIONI

Per il presente studio, in corrispondenza di quattro sezioni rappresentative, sono state condotte delle analisi di stabilità globale in condizioni di rapido svaso del muro esistente a sostegno del rilevato autostradale.

Nelle analisi il regime delle pressioni interstiziali è stato stimato tramite analisi di filtrazione in transitorio dovuto al passaggio della piena con tempo di ritorno duecentennale.

In corrispondenza della **Sezione 20** e della **Sezione PF4_v1** un ramo del letto "di magra" si trova invece a distanza ravvicinata, mentre in corrispondenza della **Sezione 16** e della **Sezione extra_PF4_v3** il letto "di magra" del fiume si trova attualmente a distanza dal muro. Per queste ultime due sezioni (sezione 16 e extra_PF4_v3), si è determinata la distanza minima tra il letto di magra e il muro stesso, tale per cui siano soddisfatti i requisiti da normativa.

In base alle analisi svolte si rileva quanto segue:

- dove l'Arno scorre vicino all'autostrada (**Sezione 20 e Sezione PF4_v1**), i risultati in termini di stabilità globale non sono sufficienti a garantire il rispetto della Normativa.
- dove l'Arno è più lontano dall'autostrada (**Sezione 16 e Sezione extra_PF4_v3**), la stabilità globale dell'opera è garantita sia alle condizioni attuali sia in condizioni di rapido svaso. Ipotizzando la divagazione dell'alveo con avvicinamento progressivo all'autostrada, avremo:
 - sezione 16 fino ad una distanza di 15 m la stabilità è ancora garantita;
 - sezione extra_PF4_v3 fino ad una distanza di 7m requisiti di normativi sono soddisfatti;
 - per distanze inferiori a quelle sopra indicate la normativa non è più soddisfatta.

Alla luce di quanto esposto si prevedono i seguenti interventi (vedi Figura 3.55):

- nel tratto di muro tra le sez. 22 e 17 (di circa 300 m) è prevista un'opera di presidio al piede del muro esistente. L'opera è costituita da una paratia discontinua di diaframmi in cemento armato (1000x3000mm) con interasse pari a 3m, disposti trasversalmente al flusso idraulico di sub-alveo, come meglio dettagliato al capitolo 5; il progetto dell'opera sarà recepito nei lavori previsti per l'ampliamento alla terza corsia del tratto Incisa - Valdarno.
- nel tratto successivo, tra le sez. 17 e 14 si prevede un sistema di monitoraggio al fine di controllare, nel tempo, l'evoluzione dell'asta fluviale del fiume; con particolare attenzione alla divagazione della stessa verso la sede autostradale; il sistema dovrà prevedere una procedura di intervento nel caso la distanza tra il letto di magra e la sede autostradale fosse inferiore a 15m: sarà quindi predisposto il progetto di prolungamento dell'opera di presidio da realizzare in funzione dell'esito del monitoraggio.

Durante i lavori previsti per l'ampliamento alla terza corsia del tratto Incisa – Valdarno dovrà essere indagato il piede del muro di sostegno autostradale, con particolare riferimento alla presenza di contrafforti evidenziati dalle foto aeree del 1965 tra le sezioni 14 e 17: di tale opera si dovrà definire la geometria ed estensione con saggi localizzati. La nuova opera di presidio dovrà tenere conto dei risultati di tali indagini.

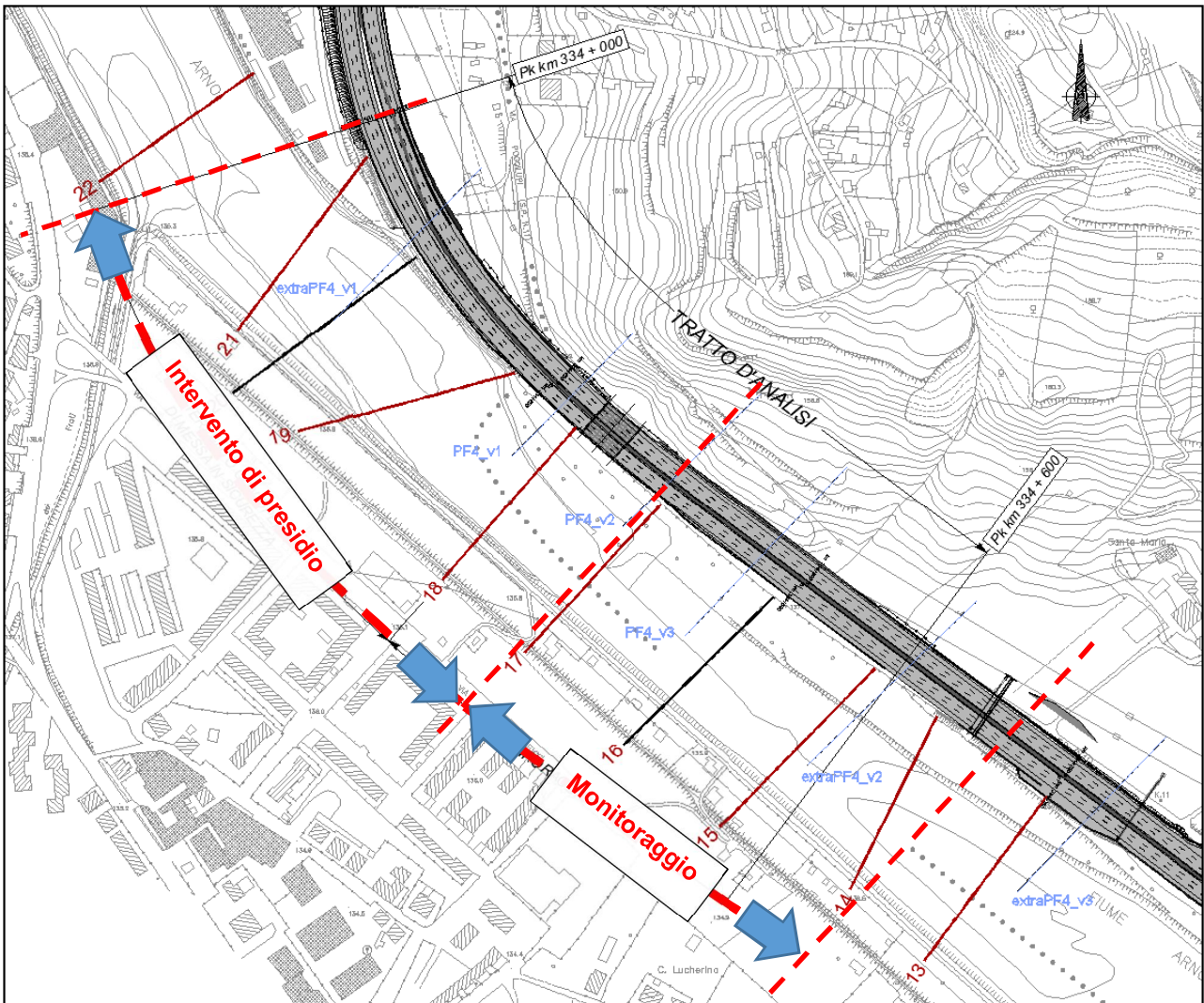


Figura 3.55. Planimetria interventi previsti

4 MONITORAGGIO

4.1 PREMESSA

Nel presente capitolo sono discussi due possibili strategie di monitoraggio da concordare con il gestore dell'infrastruttura, l'Autorità di Bacino ed il Genio Civile.

Il monitoraggio delle sponde del fiume Arno nei tratti in cui il fiume rimane in affiancamento all'autostrada si pone la finalità di verificare, nel tempo e sempre dopo eventi eccezionali o particolarmente intensi di piena del fiume Arno, il rispetto della distanza minima e la variazione della distanza tra l'argine e l'autostrada.

In particolare, come descritto nei capitoli precedenti:

- tra il km 334+300 e il km 334+600 dovrà essere verificato che venga garantita una distanza minima dell'ordine di 15 m dal piede del rilevato autostradale all'argine del fiume;
- frequenza di controllo annuale o dopo particolari eventi di piena ritenuti eccezionali dopo la chiusura dei lavori per minimo di 3 anni. Successivamente sono richiesti controlli garantendo una periodicità (minimo ogni 3 anni) e comunque dopo ogni evento di piena ritenuto significativo (evento dopo il quale si percepiscono visivamente variazioni plano-altimetriche dell'alveo).

4.2 TIPOLOGIA DI MONITORAGGIO

Per la valutazione delle possibili variazioni degli aspetti morfologici naturali (variazione della distanza tra l'argine e piede del rilevato autostradale) il monitoraggio potrà prevedere due strategie di rilievo differenti, sotto descritte:

- A. **Misure e osservazioni dirette sul terreno mediante sezioni topografiche di controllo** – Installazione sul muro esistente di postazioni di misura ove effettuare periodicamente sezioni topografiche, mediante rilievo topografico, allo scopo di valutare, nel tempo la possibile divagazione trasversale dell'asta fluviale. Nella Figura 4.1 un esempio rappresentativo di possibile "sezione di controllo". Saranno predisposte sezioni topografiche di controllo ogni 50m con esecuzione del rilievo nella fase ante-operam e a chiusura dei lavori e comunque a seguito di eventi di piena importanti.

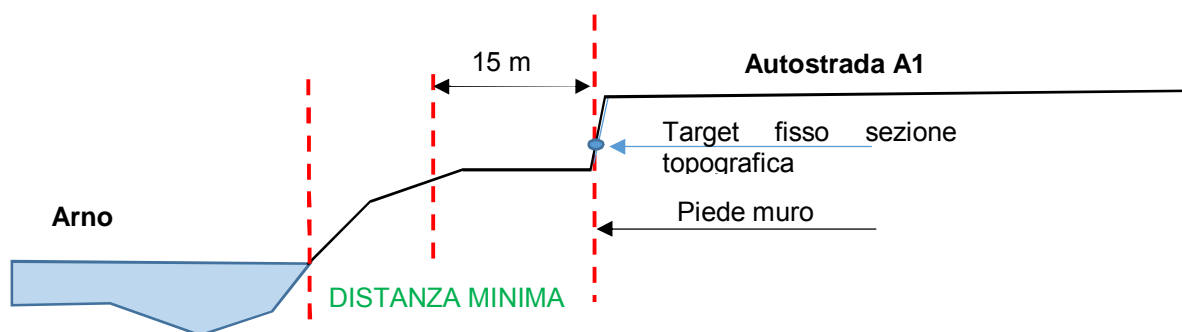


Figura 4.1. Sezione di controllo

Questo sistema ha il vantaggio di essere economico e di facile attuazione, anche in tempi brevi dopo particolari eventi eccezionali

- B. **Misure da immagini e analisi GIS** da effettuare sugli interi tratti di interesse, attraverso l'analisi multi-temporale di rilievi LIDAR, tali da mappare eventuali arretramenti.

Il telerilevamento di prossimità o a bassa quota (LARS, Low Altitude Remote Sensing) è un insieme di tecniche di raccolta dati attraverso l'uso di sensori di varia natura (ottici, ecc.) montati su vettori

(droni, elicotteri radiocomandati con un sistema ricevente digitale) che operano a poche centinaia di metri di quota.

I rilievi Lidar, i cui vantaggi sono molteplici e, nello specifico, riguardano:

- la facilità di impiego della tecnologia;
- i costi contenuti;
- l'ampia ripetibilità dei rilievi;
- la rapidità di intervento e di esecuzione del monitoraggio in aree inaccessibili o in condizioni emergenziali;
- l'ampia disponibilità di sensori ottici;
- la buona copertura spaziale del dato.

Attraverso l'utilizzo per esempio di Spatial Analyst verrà creato raster corrispondente alla differenza ottenuta cella per cella tra le griglie relative ai rilievi che si susseguiranno nel tempo con frequenze minime annuali e sicuramente dopo eventi eccezionali o particolarmente intensi di piena del fiume Arno.

Di seguito si riporta un esempio di trattazione delle immagini.

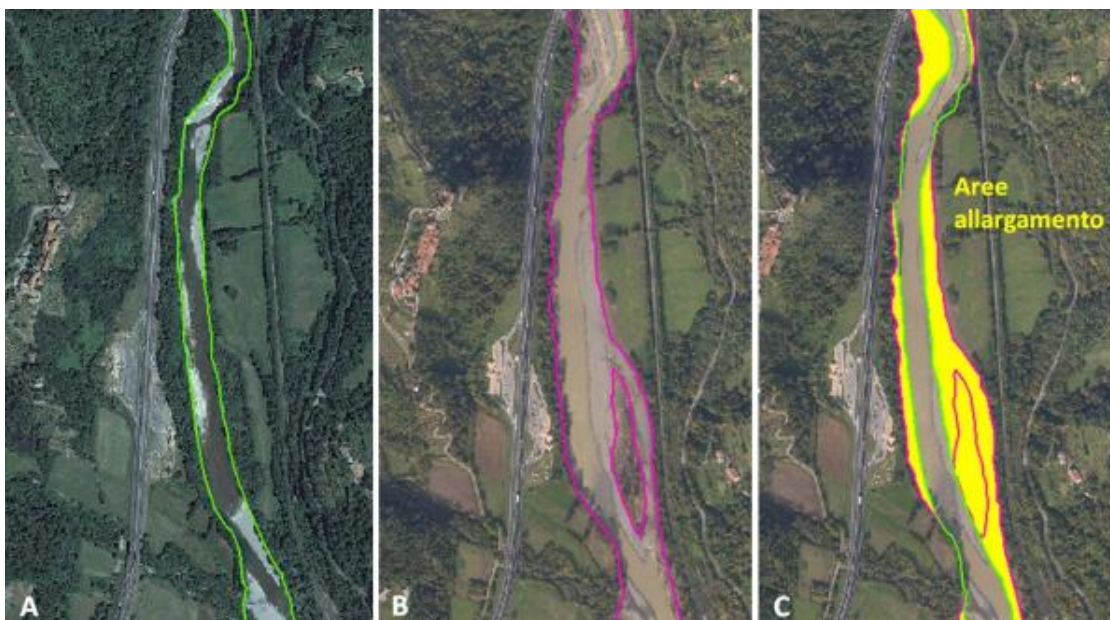


Figura 4.2. Esempio elaborazioni immagini

Nella figura precedente è rappresentato la sequenza delle elaborazioni da svolgere per la definizione delle possibili variazioni del profilo morfologico dell'Arno.

Con la lettera "A" si identifica lo stato iniziale, nella tratta di riferimento, al tempo t_0 (avvio delle attività di monitoraggio), la lettera "B" rappresenta il rilievo eseguito con frequenza stabilita (annuale o dopo eventi rilevanti) al tempo t_i , la lettera C rappresenta il risultato del confronto "B" – "A" attraverso il quale sarà possibile valutare la variazione della distanza tra l'argine e l'autostrada.

Si prevede un rilievo LIDAR (DTM primo e ultimo impulso) in fase ante opera, accompagnato da rilievo topografico di cui al punto A. Durante l'esecuzione dei lavori il monitoraggio topografico dovrà essere eseguito nel caso vi sia evidenza di erosione o smantellamento delle barre laterali o a seguito di eventi particolarmente intensi con lettura aggiuntive funzionali ai lavori e all'affidabilità dei rilievi.

Ulteriori rilievi LIDAR saranno necessari a conclusione dei lavori in alveo a chiusura dei lavori di ampliamento alla terza corsia nel tratto (quindi tre voli sicuri). Successivamente ulteriori due voli opzionali saranno richiesti nel caso di eventi di piena importanti o con effetti diffusi di erosione di sponda.

5 SOLUZIONE PROGETTUALE OPERA DI PRESIDIO

5.1 DESCRIZIONE DELL'OPERA

L'intervento di messa in sicurezza dell'attuale argine del fiume Arno prevede la realizzazione di una paratia discontinua di diaframmi in cemento armato scavati e gettati in opera, disposti trasversalmente al flusso idraulico di sub-alveo.

L'opera sarà realizzata mediante moduli verticali in c.a. affiancati e posti ad interasse di 3.0 m, con profondità di infissione pari a 20.0 m. Strutturalmente, i moduli saranno caratterizzati da una sezione rettangolare a spessore costante pari a 0.8 m e larghezza totale pari a 3.0 m e solidarizzati tramite un cordolo di collegamento in testa.

Nelle figure seguenti si riportano le immagini più significative del progetto.

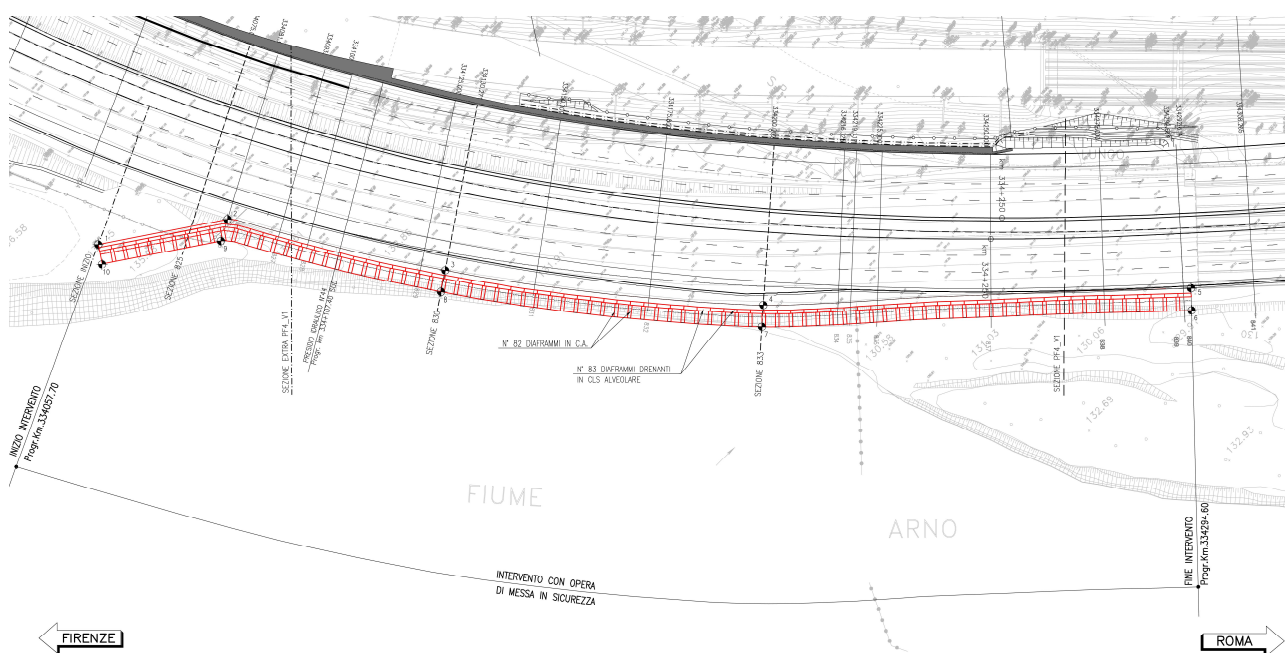


Figura 5.1. Planimetria di progetto

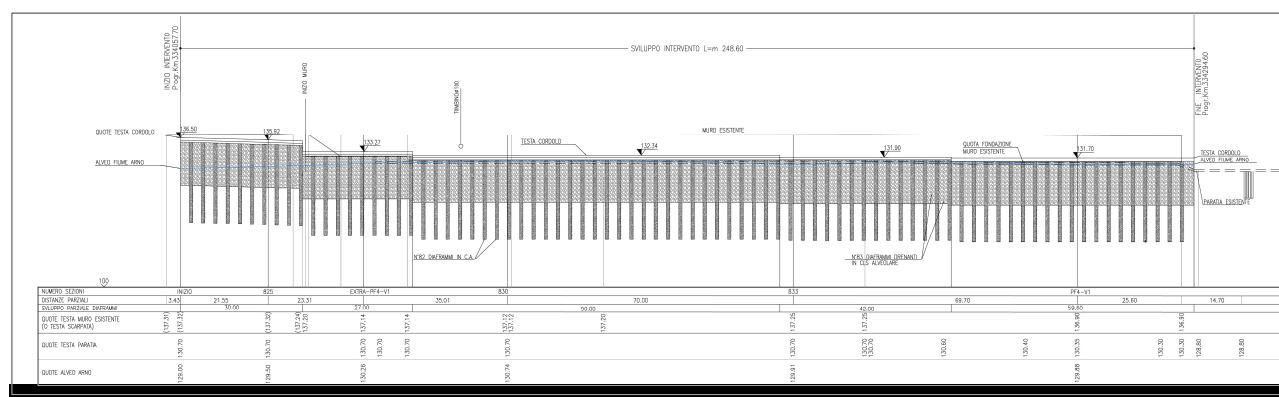


Figura 5.2. Sviluppata

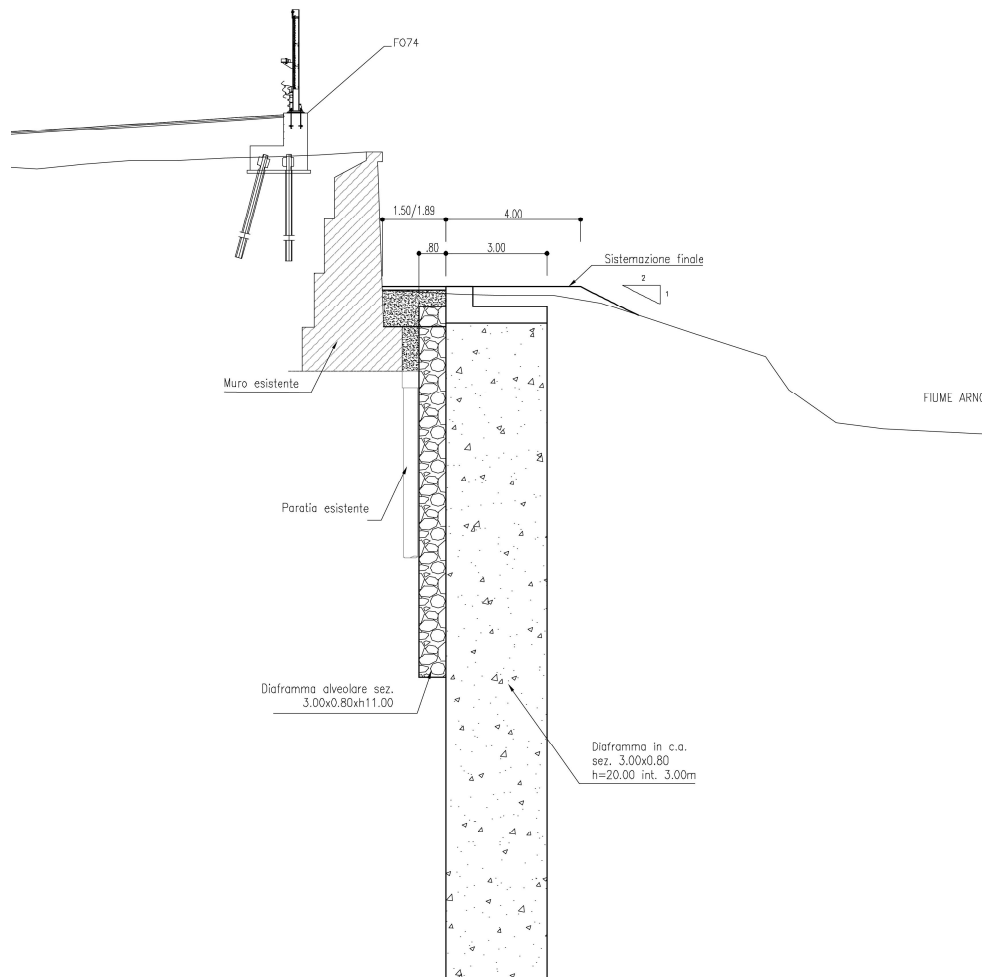


Figura 5.3. Sezione tipo di progetto

5.2 ANALISI DI STABILITÀ POST-OPERA

Con riferimento alla sezione 20 (cautelativa) si riportano nel seguito i risultati delle verifiche di stabilità globale del sistema opera-terreno.

Per le fasi progettuali di calcolo sono state eseguite nell'ordine le seguenti analisi:

- 1) Analisi accoppiata "Steady-State Seepage" e "InSitu" per avere una prima valutazione dell'andamento delle pressioni interstiziali e per stabilire lo stato di stress iniziale sull'opera sotto i soli carichi gravitazionali.
- 2) Analisi di filtrazioni in transitorio (Seep/W Analysis) post intervento per valutare l'andamento delle pressioni interstiziali durante l'evento di piena con tempo di ritorno $T=200$ anni, secondo le modalità descritte ai capitoli precedenti.
- 3) Analisi "Load/Deformation" per l'evento di piena del fiume Arno e scalzamento del fondo alveo, analizzando alcuni istanti salienti al fine di avere una stima degli sforzi agenti sulla struttura indotti dall'evento di piena.
- 4) Analisi di stabilità globale

Nel modello di calcolo FEM, il terreno viene simulato attraverso elementi elastoplastici monodimensionali e criterio di rottura alla Mohr-Coulomb connessi ai nodi della paratia in diaframmi.

I parametri geotecnici, le curve di permeabilità e di immagazzinamento per i terreni sono stati stimati secondo quanto riportato al paragrafo 3.1.1.

Per quanto riguarda la porzione di terreno interessata dal diaframma di spessore pari a 3.0 m, i parametri geotecnici e la permeabilità sono stati definiti mediante una media ponderata tra lo strato molto permeabile di terreno e il setto in calcestruzzo.

Tabella 5.1: Parametri geotecnici caratteristici

Unità geotecnica	γ	ϕ_k	c'_k	E	ν	K_0
	(kN/m ³)	(°)	(kN/m ²)	kPa	-	
Alluvionali A1 a grana fine	19	30	0	17500	0.33	0.50
Alluvioni A2 a grana grossa	19	32	0	55000	0.32	0.47
Depositi Argillosi P1	20	24	5	200000	0.37	0.59
Rilevato	19	35	0	40000	0.30	0.43
Diaframma alveolare 0.8x11	20	35	0	30000	0.30	0.43
Diaframma 3.0x20	20.60	35.47	53.33	8307000	0.27	0.42

Tabella 5.2: Coefficienti di permeabilità K

Unità geotecnica	K (at saturation)	Residual Water Content
	m/sec	m ³ /m ³
Diaframma alveolare 0.8x11	0.001	0.03
Diaframma 3.0x20	7.33E-04	0.02

La paratia in diaframmi in c.a. viene modellata come una serie di elementi trave (beam) il cui comportamento sarà caratterizzato da una rigidezza flessionale EJ e una rigidezza assiale EA. Nel caso specifico vengono introdotte delle rigidzze equivalenti a quella di un diaframma continuo valutate tenendo conto della spaziatura fra i singoli elementi (3.0 m).

Nella figura seguente si riporta il modello di calcolo bidimensionale implementato e relativa mesh di calcolo. La mesh di calcolo dell'intero modello è stata definita con un grado di infittimento generale ad elementi quadrati di 1.0m.

Le analisi sono state svolte utilizzando il metodo di Morgenstern-Price e imponendo il passaggio delle superfici per il rilevato autostradale. Nella figura, le linee in rosso rappresentano i punti di partenza e di arrivo da cui sono state create le superfici di scivolamento per la verifica di stabilità.

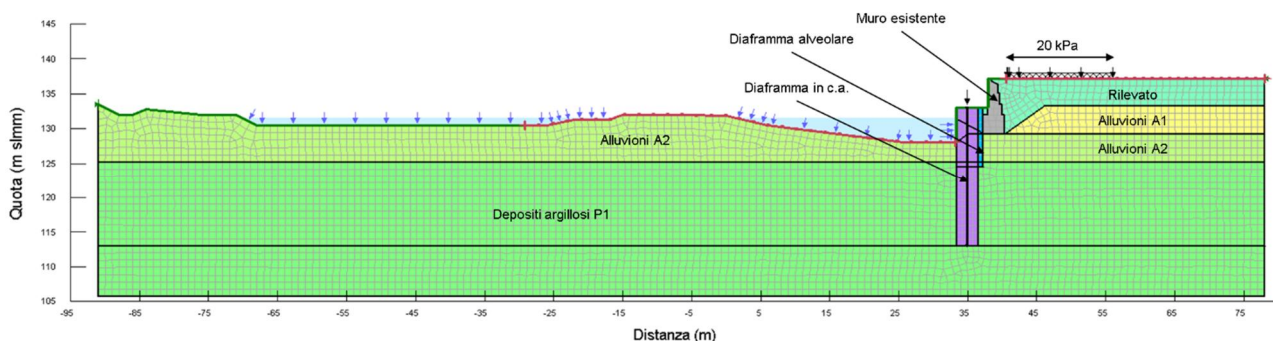


Figura 5.4. Modello di calcolo

A seguito dell'evento di piena, dai risultati delle analisi post intervento e delle possibili superfici di scorrimento critiche si ottengono dei fattori di sicurezza pari a:

$F_s = 2.360 > 1.25 \times 1.1 = 1.375$ (comb. Statica SLU-GEO)

di contro al fattore di sicurezza ottenuto dalle analisi pre-intervento pari a $F_s = 1.051$.

Le verifiche sono dunque soddisfatte.

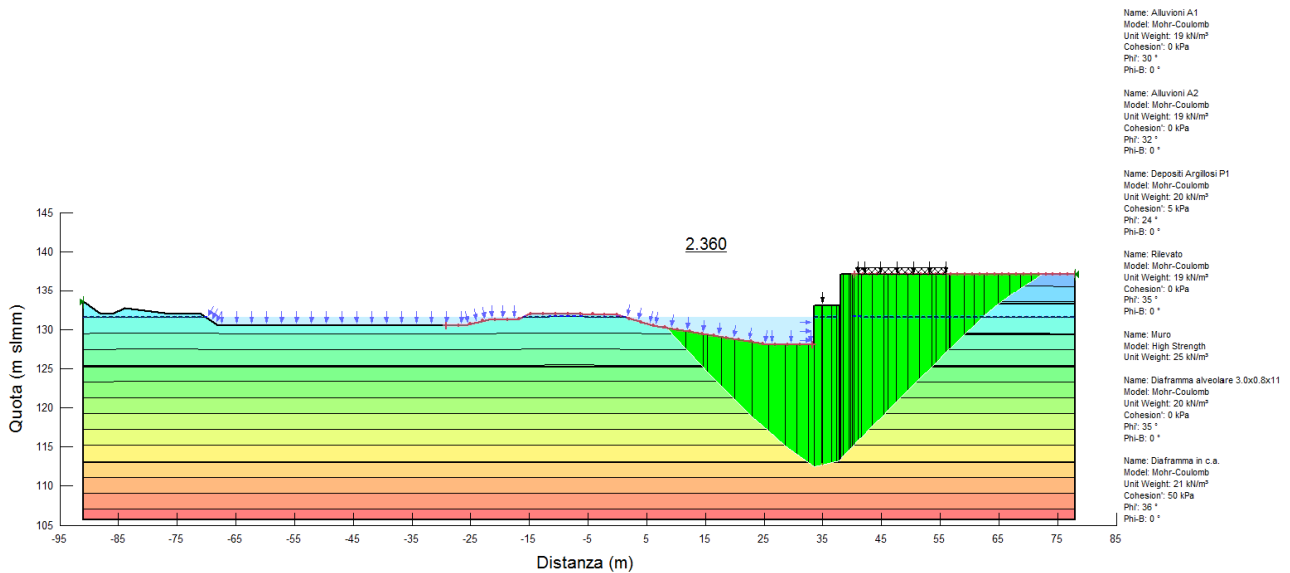


Figura 5.5. Risultati stabilità globale in condizioni statiche - Post evento di piena - $F_s = 2.360$