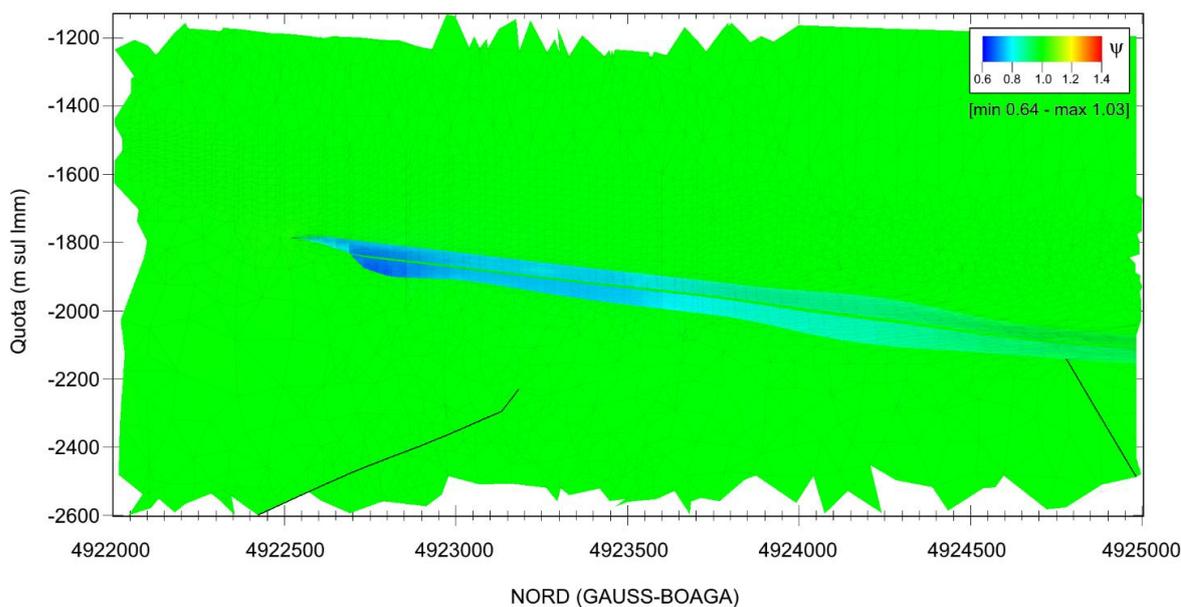


Commessa: M3E I4/17

**Modello dei processi geomeccanici derivanti dallo stoccaggio di gas
naturale nel campo di San Potito.
Fase II.**



Committente: EDISON STOCCAGGIO S.p.A.

Elaborato: REV_00 Relazione Tecnica

Data: Dicembre 2017

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	6
2	MODELLO DI PRODUZIONE CON EROGAZIONE/STOCCAGGIO a $P = 120\%P_i$	7
3	MODELLO STATICO E CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA.....	9
4	MODELLO IDRODINAMICO PER I CICLI DI STOCCAGGIO/EROGAZIONE.....	12
5	PREVISIONI MODELLISTICHE	15
5.1	Spostamenti della superficie del terreno.....	15
5.2	Gradiente dello spostamento.....	19
5.3	Analisi tensionale.....	21
5.4	Integrità meccanica della formazione e del caprock	28
6	CONCLUSIONI.....	32
7	REFERENZE.....	33
	ALLEGATO A: mappe della variazione di tensione durante un ciclo di stoccaggio a $P = 120\% P_i$..	35
	ALLEGATO B: Analisi dell'integrità meccanica della roccia serbatoio/caprock.....	42

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati prevista dal modello fluidodinamico Eclipse durante il periodo dicembre 1988 - marzo 2017.....	7
Figura 2: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati prevista dal modello fluidodinamico Eclipse durante il periodo gennaio 2018 - giugno 2028.	8
Figura 3: Vista prospettica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale.....	9
Figura 4: Particolare della sezione della griglia di calcolo in corrispondenza dei livelli mineralizzati. In nero sono evidenziati i profili delle faglie inserite nel modello geomeccanico e in rosso sono riportate le quote di chiusura della Faglia 2 sul livello BB1L e delle Faglie 4 e 5 sul Pliocene. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale.....	10
Figura 5: Vista in pianta delle faglie e della loro discretizzazione mediante elementi di interfaccia. Le faglie 2, 4 e 5 sono evidenziate in verde, rosso e viola, rispettivamente. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in nero il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico 3D.....	11
Figura 6: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIU durante la fase di stoccaggio tra aprile 2023 e settembre 2023. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.	13
Figura 7: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIU durante la fase di erogazione tra settembre 2023 e marzo 2024. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.	13
Figura 8: Variazione di pressione (bar) nel livello BB1L durante la fase di stoccaggio tra aprile 2023 e settembre 2023. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.	14
Figura 9: Variazione di pressione (bar) nel livello BB1L durante la fase di erogazione tra settembre 2023 e marzo 2024. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.	14
Figura 10: Spostamento verticale (cm) simulato durante il ciclo di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023. In blu è segnata la traccia del giacimento.....	16
Figura 11: Spostamento verticale (cm) simulato durante il ciclo di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In blu è segnata la traccia del giacimento.	16

Figura 12: Andamento temporale dello spostamento verticale massimo sul campo di San Potito durante l'intera vita produttiva del giacimento e la fase previsionale di stoccaggio/erogazione a $P = 120\% P_i$	17
Figura 13: Spostamento orizzontale (cm) simulato durante il ciclo di stoccaggio marzo/aprile 2023 – settembre/ottobre 2023. In blu è segnata la traccia del giacimento.....	18
Figura 14: Spostamento orizzontale (cm) simulato durante il ciclo di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In blu è segnata la traccia del giacimento.	18
Figura 15: Mappa del gradiente dello spostamento (mm/m) durante la fase di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023. In blu è segnata la traccia del giacimento.	20
Figura 16: Mappa del gradiente dello spostamento (mm/m) durante la fase di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In blu è segnata la traccia del giacimento.	20
Figura 17: Variazione di tensione σ_z (bar) nel livello BBIU durante la fase di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In nero è evidenziata la traccia del giacimento. In rosso si riporta la traccia delle sezioni verticali riportate nelle figure che seguono.	21
Figura 18: Variazione di tensione σ_z (bar) nella sezione A-A (Figura 17) nella fase di stoccaggio da aprile 2023 ad ottobre 2023. In nero sono evidenziate le tracce delle faglie.....	22
Figura 19: Variazione di tensione σ_z (bar) nella sezione A-A (Figura 17) nella fase di erogazione da ottobre 2023 ad aprile 2024. In nero sono evidenziate le tracce delle faglie.....	23
Figura 20: Variazione della tensione normale al piano di faglia $\Delta\sigma_N$ (bar) durante la fase di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023: a) vista in pianta; b) vista assometrica.....	24
Figura 21: Variazione della tensione tangenziale al piano di faglia $\Delta\tau$ (bar) durante la fase di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023: a) vista in pianta; b) vista assometrica.....	25
Figura 22: Variazione di tensione normale al piano di faglia $\Delta\sigma_N$ (bar) durante la fase di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024: a) vista in pianta; b) vista assometrica.....	26
Figura 23: Variazione della tensione tangenziale al piano di faglia $\Delta\tau$ (bar) durante la fase di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024: a) vista in pianta; b) vista assometrica.	27
Figura 24. Rappresentazione dello stato tensionale nel piano σ - τ e spostamento dei cerchi di Mohr-Coulomb a seguito dello stoccaggio ($p > p_0$) o erogazione ($p < p_0$) di fluidi dal sottosuolo. .	28

I INTRODUZIONE

Il presente rapporto tecnico descrive i risultati ottenuti dalla modellazione numerica dei possibili processi geomeccanici connessi dallo stoccaggio di gas naturale nel campo di San Potito nell'ambito del programma di esercizio in fase previsionale a $P = 120\% P_i$ (P_i = pressione iniziale).

L'analisi dei processi geomeccanici è stata condotta attraverso un modello numerico agli elementi finiti (FEM) con i seguenti obiettivi: (1) prevedere gli spostamenti superficiali; (2) analizzare il disturbo del regime tensionale naturale indotto dalle attività di erogazione/stoccaggio sulle faglie pre-esistenti in prossimità del giacimento e dell'acquifero in connessione idraulica; (3) analizzare i fattori di sicurezza a sforzo normale e di taglio in giacimento, con particolare attenzione alla zona del caprock. In questa seconda fase del progetto, il modello FEM è stato applicato per i cicli di erogazione/stoccaggio previsti dal 2018 al 2028.

Il rapporto è strutturato come segue. Nel capitolo 2 sono riportati i risultati del modello fluidodinamico di giacimento forniti da EDISON STOCCAGGIO e relativi alla fase previsionale. Un breve riepilogo del modello statico e della caratterizzazione geomeccanica sviluppati nella Fase I sono riportati nel capitolo 3. Nel capitolo 4 sono esposti i risultati del modello idrodinamico nella fase di stoccaggio/erogazione a $P = 120\% P_i$ in termini di variazione di pressione nell'acquifero in connessione idraulica con il giacimento. Il capitolo 5 riassume i risultati del modello geomeccanico FEM in relazione agli spostamenti superficiali (e.g. la subsidenza), il gradiente di spostamento, la propagazione del disturbo tensionale sul sistema di faglie poste in prossimità del giacimento e l'integrità meccanica del giacimento e del caprock durante la produzione primaria e le fasi di erogazione/stoccaggio previsionali. Le considerazioni conclusive sono presentate nel capitolo 6.

2 MODELLO DI PRODUZIONE CON EROGAZIONE/STOCCAGGIO a $P = 120\%P_i$

EDISON STOCCAGGIO ha fornito il modello dinamico di giacimento, sviluppato mediante il software Eclipse, utilizzato per la gestione dei livelli produttivi. Da tale modello si è ricavato l'andamento nel tempo e nello spazio della pressione di strato durante la coltivazione primaria del campo, la seguente ripressurizzazione fino al 2017 (Figura 1) e la prevista fase di erogazione/stoccaggio di gas naturale dal 2017 al 2028 (Figura 2).

La produzione del livello BB1U è iniziata nel dicembre 1988 e si è protratta fino al dicembre del 1991. Nel periodo giugno-dicembre 2013 il pozzo SPTOA1 dir è stato impiegato per condurre delle prove di produzione in entrambi i livelli. Successivamente, tra la fine del 2015 e il 2017 sono state eseguite delle prove di erogazione/stoccaggio con pressione dinamica $P = 110\% P_i$.

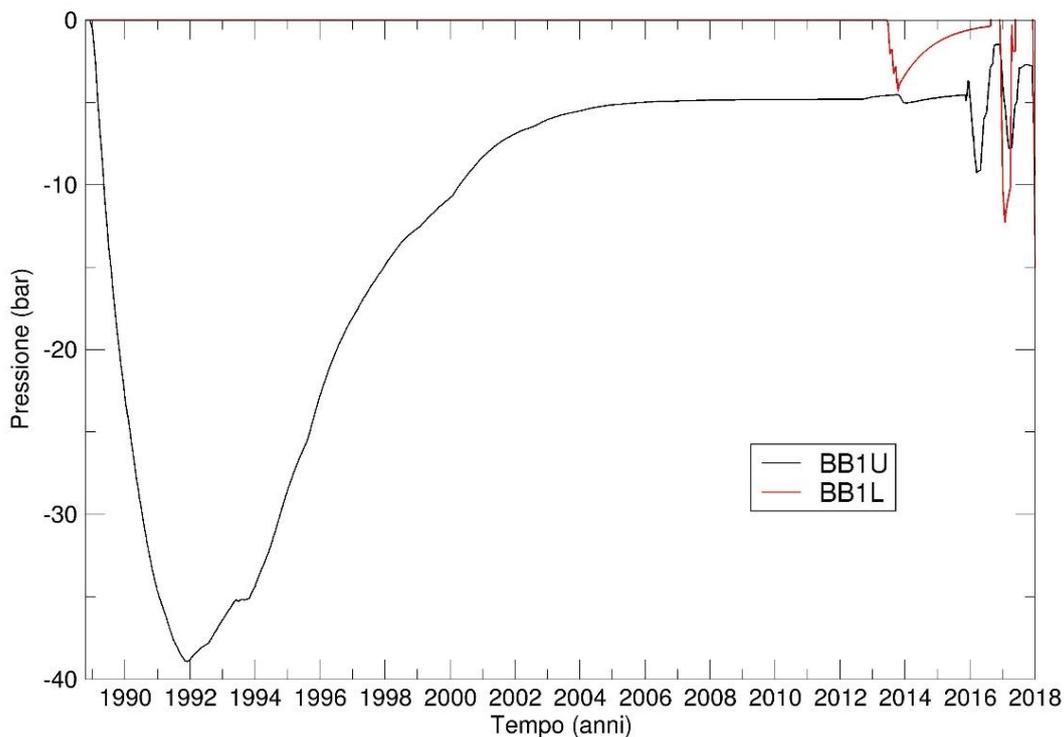


Figura 1: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati prevista dal modello fluidodinamico Eclipse durante il periodo dicembre 1988 - marzo 2017.

Gli andamenti della pressione media nei cicli previsti di stoccaggio/erogazione con pressione dinamica $P = 120\% P_i$ sono riportati in. La variazione di pressione media di giacimento durante ciascun ciclo è pari a circa 70 bar. Tutti i cicli sono sostanzialmente identici; pertanto le simulazioni geomeccaniche sono state condotte per uno solo di essi, rappresentativo dell'intero periodo 2018-2028.

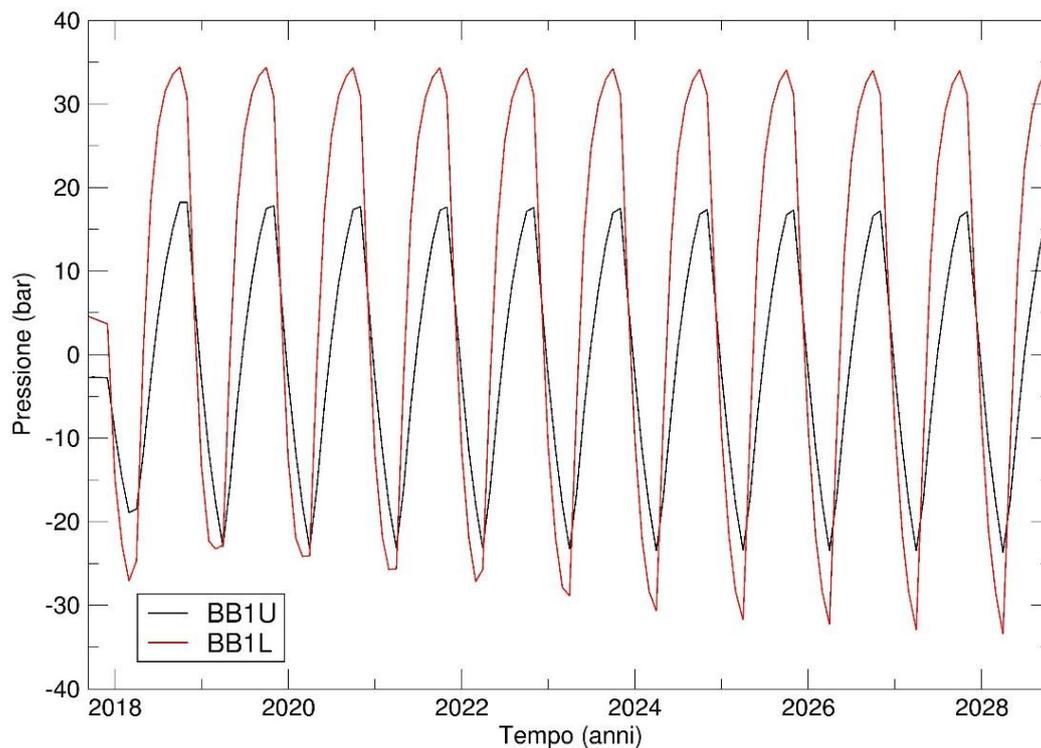


Figura 2: Andamento nel tempo della variazione di pressione media (bar) nei pool mineralizzati prevista dal modello fluidodinamico Eclipse durante il periodo gennaio 2018 - giugno 2028.

3 MODELLO STATICO E CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA

M³E ha sviluppato e mantiene costantemente aggiornato allo stato dell'arte un modello geomeccanico FEM per la simulazione degli spostamenti superficiali indotti dallo sfruttamento di giacimenti di idrocarburi. Il modello risolve le equazioni dell'equilibrio per mezzi porosi sollecitati da pressioni di strato variabili e caratterizzati da un comportamento elasto-plastico o ipo-plastico anche anisotropo mediante un approccio agli elementi finiti (adottando elementi tetraedrici lineari a 4 nodi) ed elementi d'interfaccia.

In questo studio si è impiegato un dominio di calcolo avente un'estensione areale di 45x45 km con il campo di San Potito collocato in posizione pressoché baricentrica. La griglia di calcolo 3D è stata ottenuta utilizzando il generatore automatico di griglia TetGen [Si, 2008], con l'accortezza di vincolare i vari layer di elementi finiti alla geometria degli orizzonti geologici. E' stato così generato un dominio parallelepipedo che ha il basamento posto a 7 km di profondità, è limitato superiormente dalla superficie del terreno ed è discretizzato in modo tale da riprodurre con accuratezza le chiusure a pinch-out, i volumi dei pool mineralizzati, le quote dei GWC e le geometrie dell'acquifero connesso idraulicamente al giacimento. La vista prospettica dell'intera griglia del modello geomeccanico è mostrata in Figura 3.

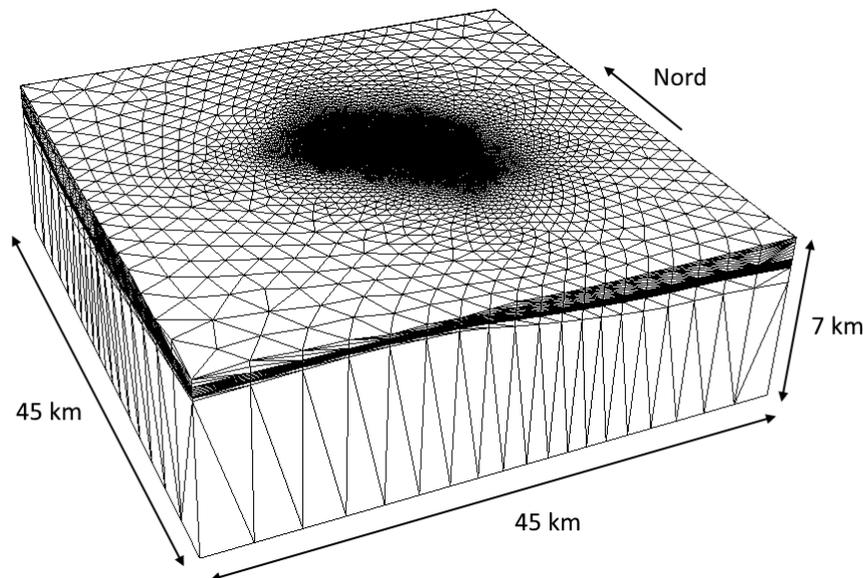


Figura 3: Vista prospettica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale.

Le tre faglie più vicine al giacimento (faglie 2, 4 e 5) e quindi possibilmente interessate da un maggior disturbo tensionale a seguito delle operazioni di produzione e erogazione/stoccaggio sono state inserite nel modello geomeccanico (Figura 4 e Figura 5). Tali discontinuità strutturali sono state rappresentate inserendo all'interno della griglia ad elementi finiti degli appropriati elementi detti "elementi d'interfaccia" che, raddoppiando i nodi giacenti sulla superficie lungo la quale la faglia si sviluppa, permettono la simulazione della possibile riattivazione della discontinuità qualora lo stato tensionale raggiunga un valore critico definito attraverso un criterio alla Mohr-Coulomb [Franceschini *et al.*, 2016]. Sono stati utilizzati 4,939 elementi di interfaccia per simulare il comportamento delle tre faglie. La griglia così generata consiste complessivamente di 1,078,733 nodi e 6,629,877 elementi.

La caratterizzazione geomeccanica del modello è stata eseguita utilizzando una relazione costitutiva che fornisce la compressibilità verticale c_M del mezzo poroso in funzione della tensione verticale efficace σ_z . Nel caso in esame, è stata utilizzata come relazione costitutiva quella ricavata per l'Alto Adriatico [Baù *et al.*, 2002; Ferronato *et al.*, 2013] in base alla quale il legame tra c_M in I ciclo di carico (espressa in MPa^{-1}) e σ_z (espressa in MPa) risulta essere:

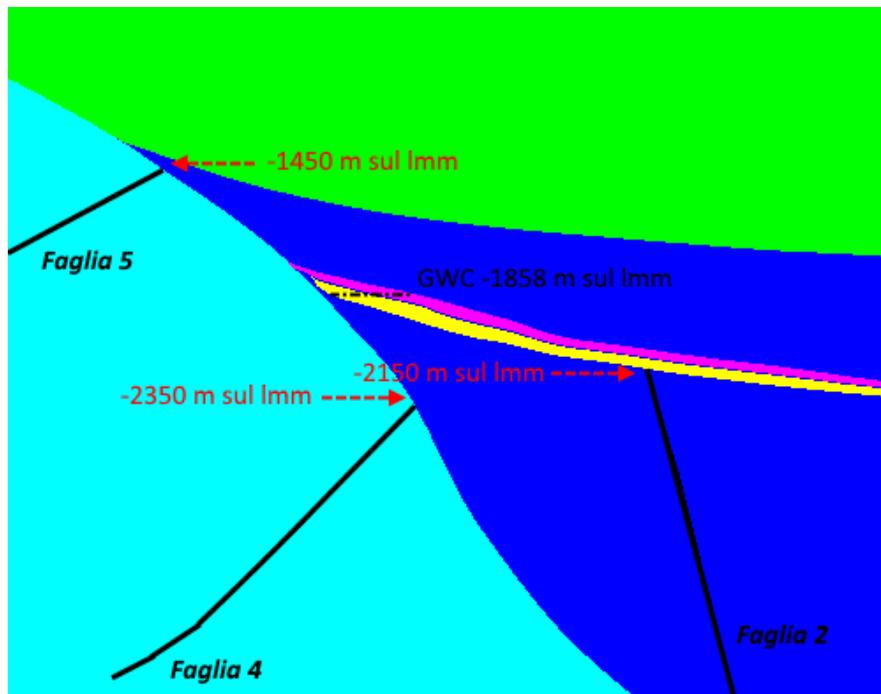


Figura 4: Particolare della sezione della griglia di calcolo in corrispondenza dei livelli mineralizzati. In nero sono evidenziati i profili delle faglie inserite nel modello geomeccanico e in rosso sono riportate le quote di chiusura della Faglia 2 sul livello BBIL e delle Faglie 4 e 5 sul Pliocene. La scala verticale è amplificata 2 volte rispetto a quella orizzontale.

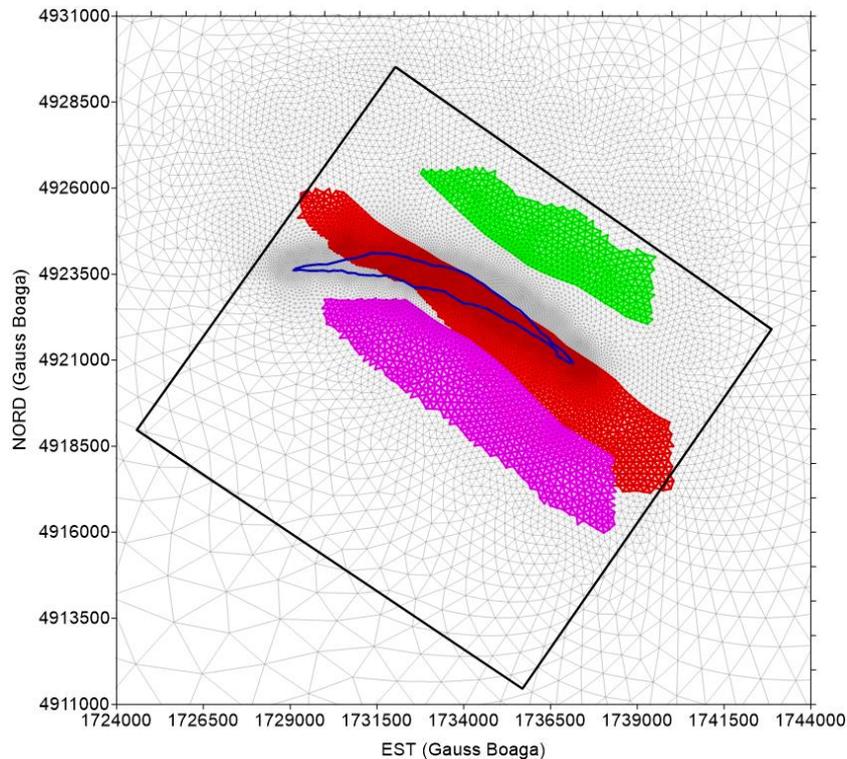


Figura 5: Vista in pianta delle faglie e della loro discretizzazione mediante elementi di interfaccia. Le faglie 2, 4 e 5 sono evidenziate in verde, rosso e viola, rispettivamente. In blu è evidenziata la traccia del giacimento e in nero il perimetro dell'area interessata dal rilievo sismico 3D.

$$c_M = 0.01004 \times \sigma_z^{-1.1347} \quad (1)$$

La legge è stata ottenuta a partire a misure di compattazione in-situ attraverso la tecnica dei marker radioattivi. Durante i cicli di erogazione/stoccaggio la deformazione del mezzo poroso è governata dalla compressibilità verticale c_M in II ciclo di carico. Per determinarne il valore, è necessario conoscere il rapporto s tra la compressibilità verticale in I e in II ciclo al momento dell'inversione del carico. Una volta transitata in II ciclo, la c_M può ancora essere descritta da una funzione esponenziale di σ_z utilizzando la procedura riportata in Baù *et al.* [2000]. Per s si è assunto un valore pari a 3 come adottato per altri campi del bacino padano [Teatini *et al.*, 2011; Janna *et al.*, 2012]. Per il modulo di Poisson è stato utilizzato il valore $\nu = 0.3$ sulla base dei dati di bibliografia. Infine, per il calcolo dello stato tensionale iniziale è stato utilizzato il gradiente di overburden già utilizzato per ricavare la legge dell'Alto Adriatico ottenuto dal density log del pozzo Amelia-21:

$$obg(z) = 10^{-6} \times (3270.8771 + 2415.588 \times \ln z)$$

con obg espresso in MPa/m e la profondità z in m.

4 MODELLO IDRODINAMICO PER I CICLI DI STOCCAGGIO/EROGAZIONE

Utilizzando il modello idrodinamico FEM messo a punto nella fase precedente dello studio [M3E, 2017], è stato ricostruito l'andamento della pressione in acquifero durante la fase previsionale di erogazione/stoccaggio con pressione dinamica $P = 120\% P_i$.

Di seguito vengono riportate le mappe di variazione della pressione in giacimento e nell'acquifero in contatto idraulico:

- durante la fase di stoccaggio marzo/aprile 2023 – settembre/ottobre 2023 per il livello BBIU (Figura 6);
- durante la fase di erogazione settembre/ottobre 2023 – marzo/aprile 2024 per il livello BBIU (Figura 7);
- durante la fase di stoccaggio marzo/aprile 2023 – settembre/ottobre 2023 per il livello BBIL (Figura 8);
- durante la fase di erogazione settembre/ottobre 2023 – marzo/aprile 2024 per il livello BBIL (Figura 9);

Durante ciascun ciclo di erogazione/stoccaggio si ha un'escursione di pressione tra il massimo (settembre/ottobre) e minimo (marzo/aprile) di circa 70 bar. Tale variazione di pressione rimane per lo più localizzata in giacimento e si propaga limitatamente nell'acquifero circostante a seguito della frequente variazione da valori negativi (erogazione) a positivi (stoccaggio). Si noti che nel livello BBIU la zona interessata dalle operazioni di erogazione/stoccaggio è delimitata in modo netto verso sud-est in seguito all'inserimento di una barriera idraulica nel modello Eclipse.

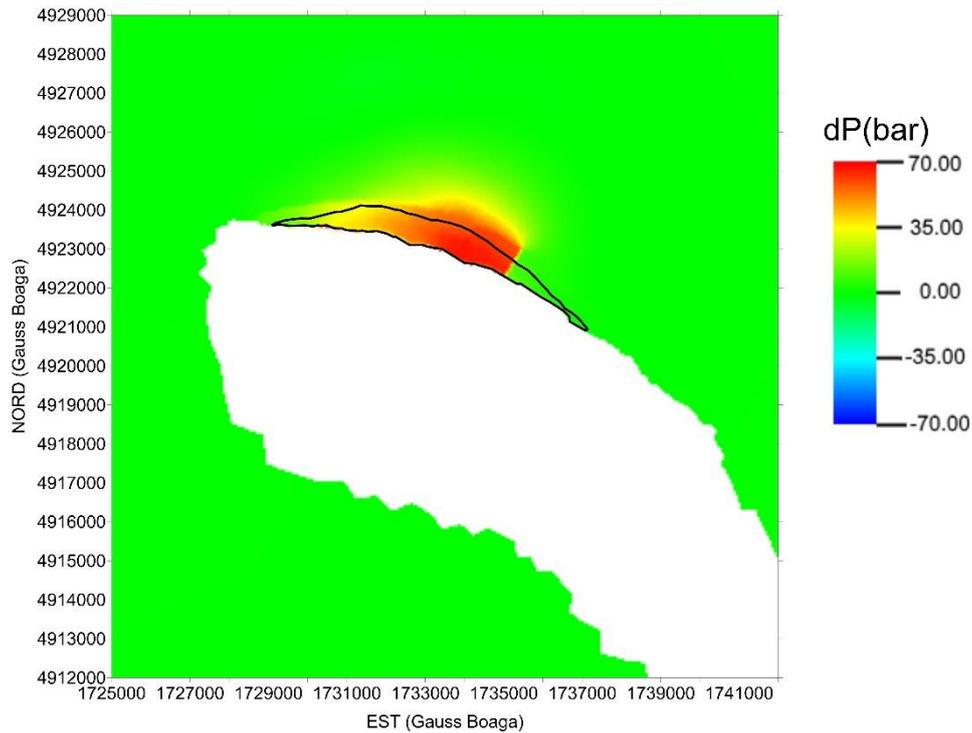


Figura 6: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIU durante la fase di stoccaggio tra inizio aprile 2023 e ed inizio ottobre 2023. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

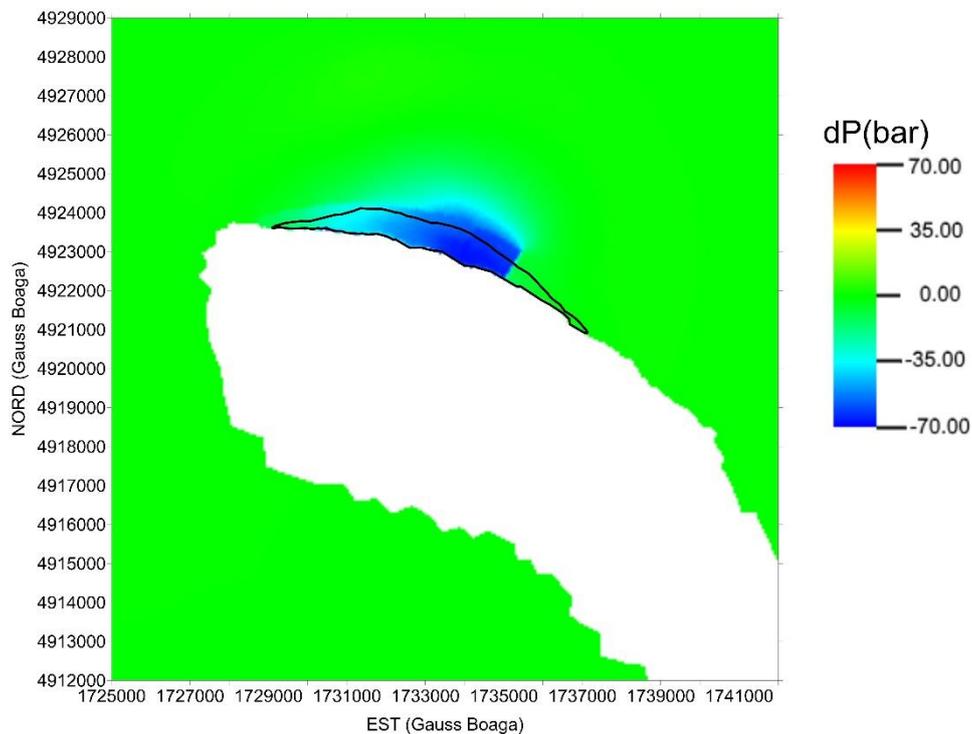


Figura 7: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIU durante la fase di erogazione tra inizio ottobre 2023 e inizio aprile 2024. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

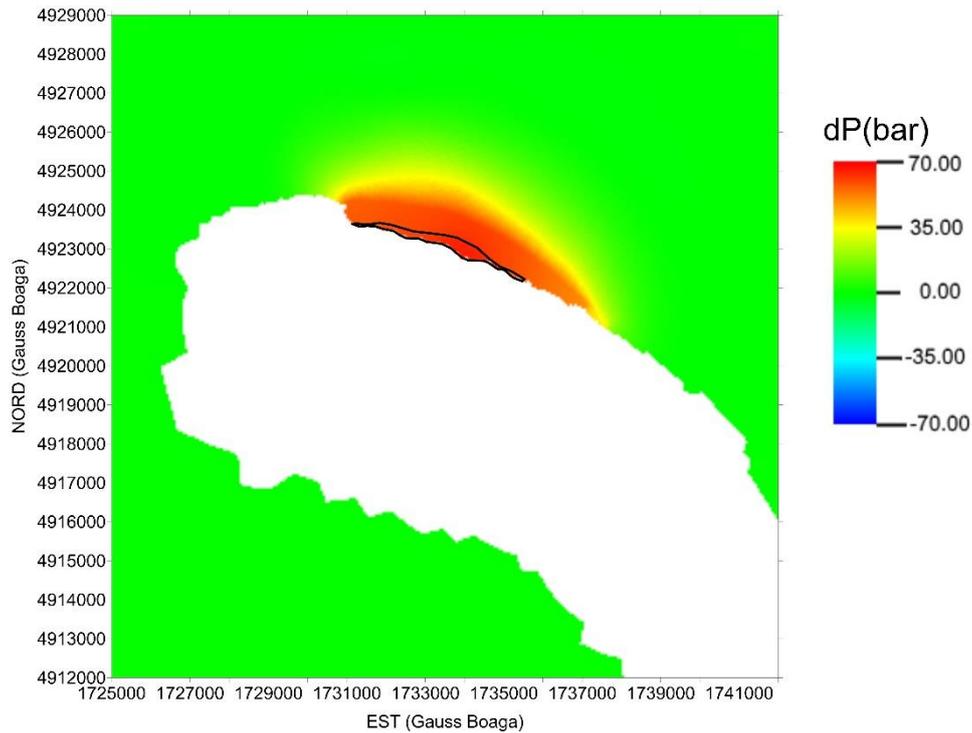


Figura 8: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIL durante la fase di stoccaggio tra inizio aprile 2023 e inizio ottobre 2023. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

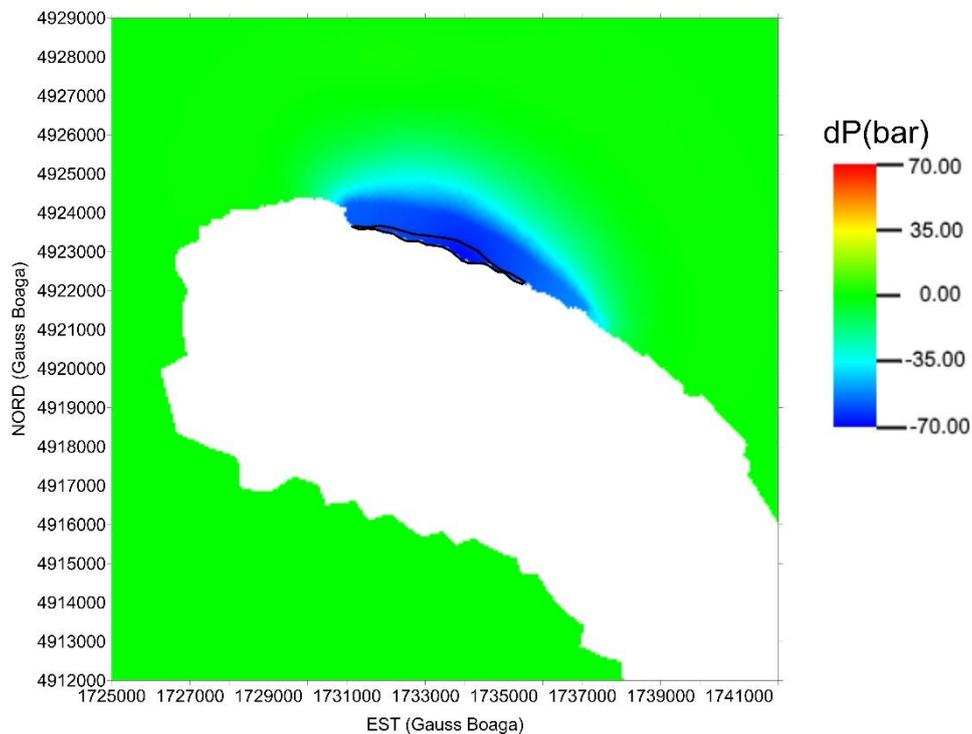


Figura 9: Variazione di pressione (bar) nel livello BBIL durante la fase di erogazione tra inizio ottobre 2023 e inizio aprile 2024. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

5 PREVISIONI MODELLISTICHE

5.1 Spostamenti della superficie del terreno

Il modello FEM geomeccanico è stato utilizzato per simulare gli spostamenti del suolo causati dalle attività di stoccaggio/erogazione previste nel giacimento di San Potito. Data la non linearità della legge costitutiva adottata, la storia di deformazione e lo stato tensionale nel campo sono state simulate dall'inizio della coltivazione primaria (1988) al fine di riprodurre correttamente le condizioni iniziali necessarie per la simulazione degli scenari di sviluppo previsionale. Sono stati valutati gli spostamenti verticali e orizzontali per un ciclo di stoccaggio/erogazione con $P=120\%P_i$ compresi tra aprile 2023 e aprile 2024, ovvero la differenza tra gli spostamenti che si manifestano tra un minimo di pressione ed il successivo massimo e viceversa. Poiché la variazione di pressione attesa in giacimento si ripete in modo sostanzialmente identico in tutti i cicli simulati di stoccaggio ed erogazione, con un comportamento del mezzo poroso sostanzialmente elastico in Il ciclo di carico, i movimenti della superficie che si producono ad ogni ciclo sono tutti sostanzialmente uguali.

In Figura 10 e Figura 11 è riportato lo spostamento verticale durante un ciclo di stoccaggio ed erogazione, rispettivamente. Gli spostamenti risultano identici in modulo, con valori massimi (in modulo) pari a circa 1.2 cm. In Figura 12 è mostrato l'andamento temporale dello spostamento verticale spostamento.

Analogamente a quanto fatto per gli spostamenti verticali, la Figura 13 e la Figura 14 mostrano lo spostamento orizzontale nella direzione Ovest-Est previsto dal modello nei periodi aprile 2023 – ottobre 2023 e ottobre 2023 – aprile 2024, rispettivamente. Gli spostamenti orizzontali massimi, in modulo, hanno valori confrontabili con quelli ottenuti per gli spostamenti verticali.

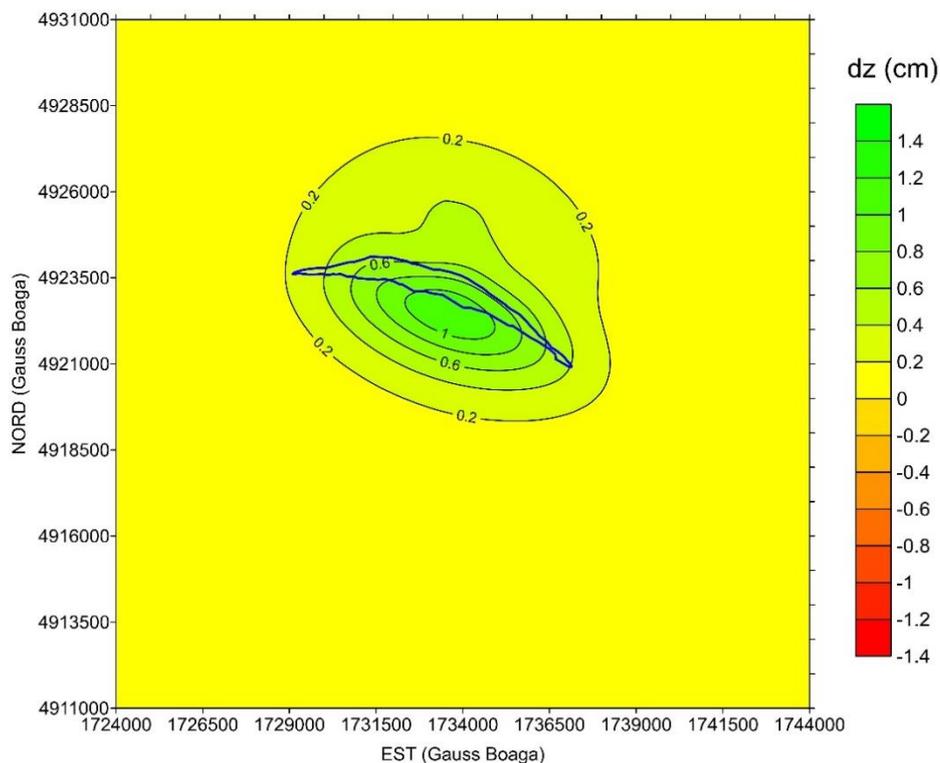


Figura 10: Spostamento verticale (cm) simulato durante il ciclo di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023. In blu è segnata la traccia del giacimento.

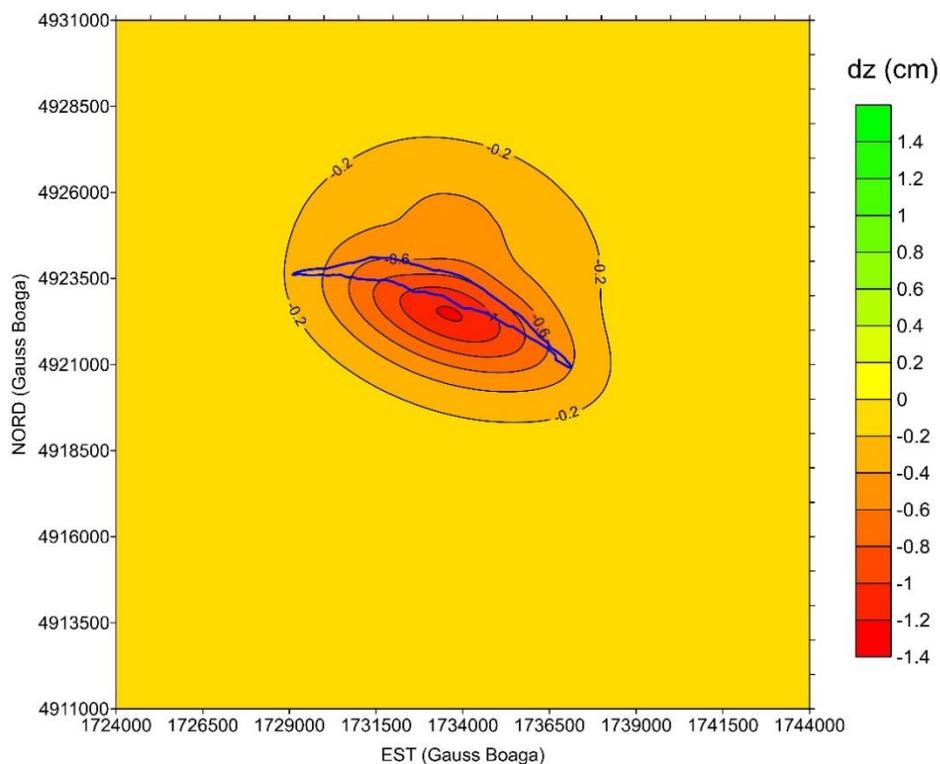


Figura 11: Spostamento verticale (cm) simulato durante il ciclo di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In blu è segnata la traccia del giacimento.

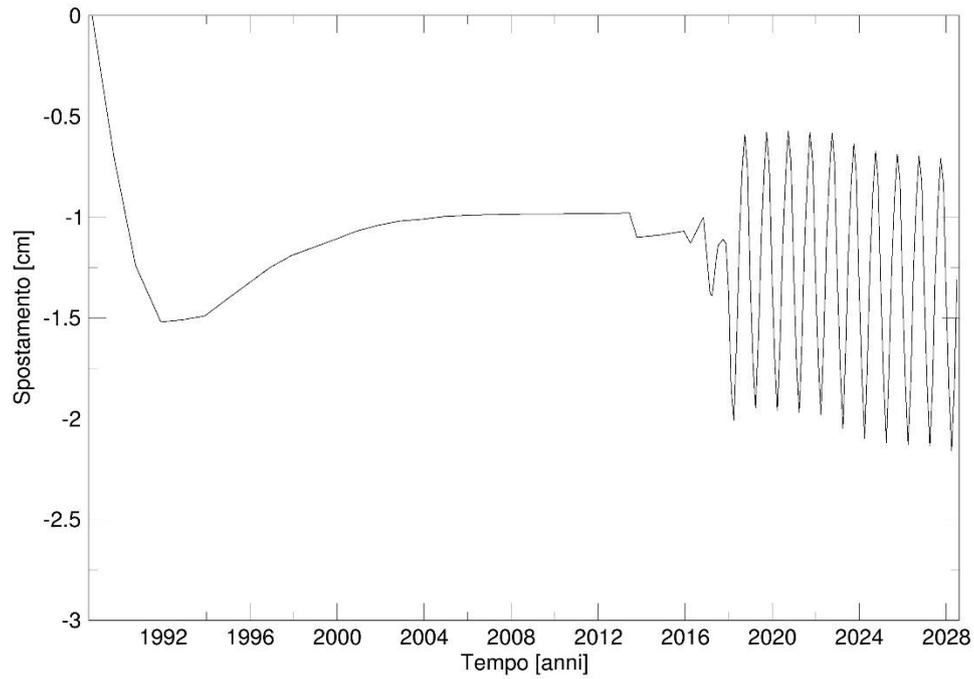


Figura 12: Andamento temporale dello spostamento verticale massimo sul campo di San Potito durante l'intera vita produttiva del giacimento e la fase previsionale di stoccaggio/erogazione a $P = 120\% P_i$.

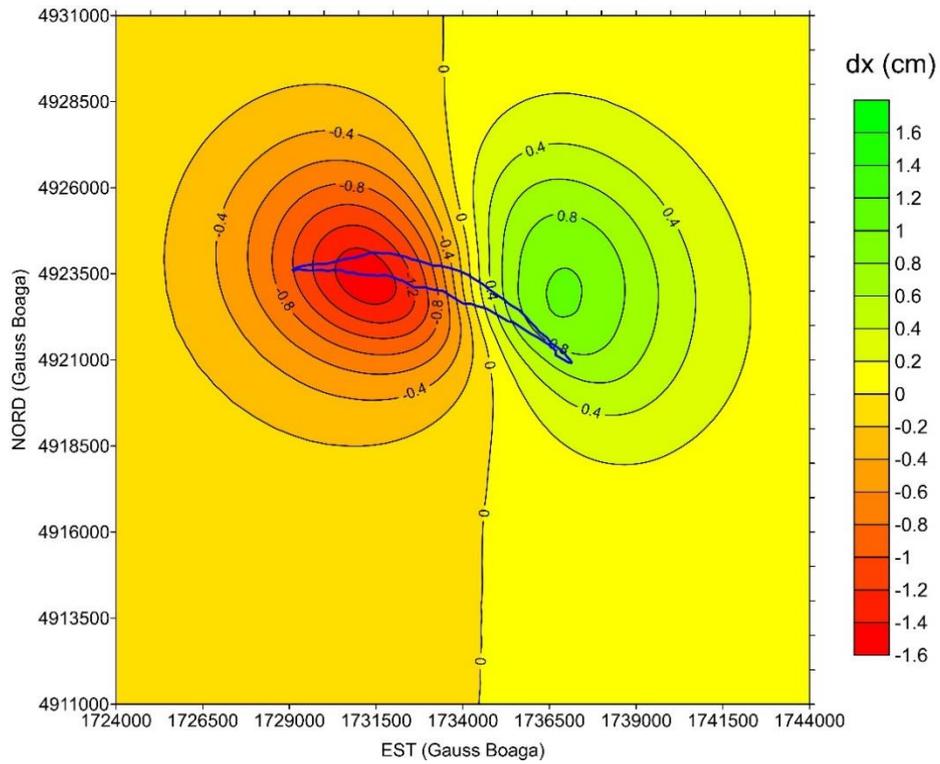


Figura 13: Spostamento orizzontale (cm) simulato durante il ciclo di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023. In blu è segnata la traccia del giacimento.

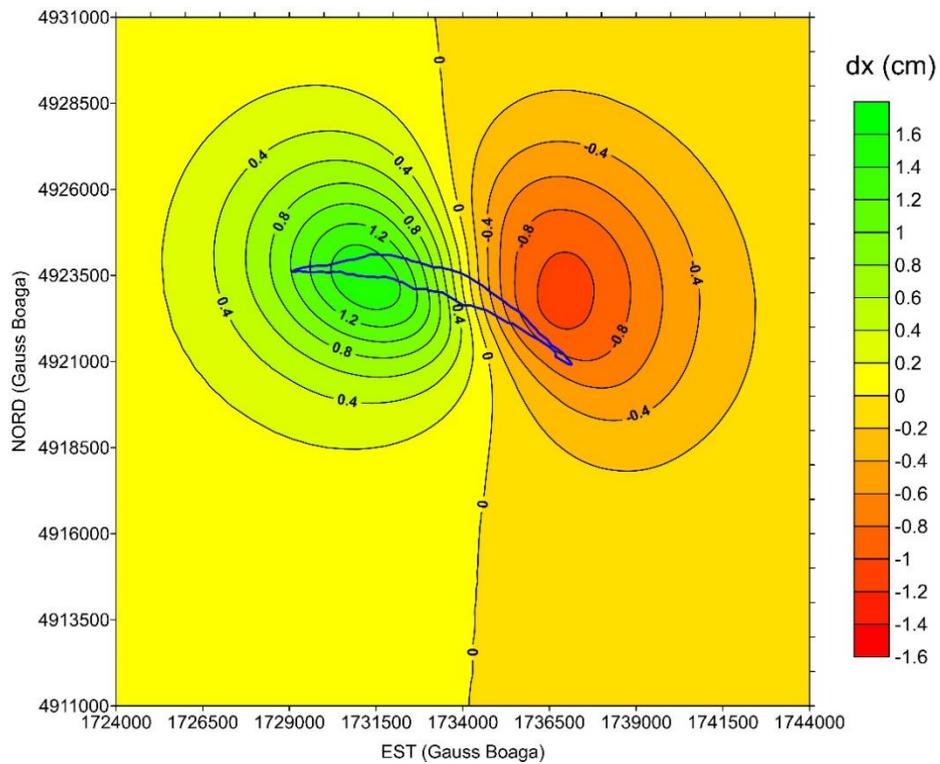


Figura 14: Spostamento orizzontale (cm) simulato durante il ciclo di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In blu è segnata la traccia del giacimento.

5.2 Gradiente dello spostamento

L'impatto della subsidenza su un territorio, ovvero la sua sostenibilità in relazione alla coltivazione di un giacimento di idrocarburi, non può essere quantificato in termini assoluti, ma va valutato in rapporto alle specificità ambientali, sociali ed economiche della realtà territoriale coinvolta che ne definiscono la vulnerabilità rispetto al possibile abbassamento. L'area soggetta allo spostamento connesso con la coltivazione del campo di San Potito non possiede caratteristiche tali da risultare vulnerabile a spostamenti inferiori a 2 cm (Figura 12).

Pertanto, risulta di maggiore interesse la valutazione delle possibili conseguenze dei cedimenti differenziali. In linea di principio la generazione di cedimenti e/o spostamenti differenziali può indebolire la capacità portante dei manufatti interessati, causando l'insorgere di fessurazioni o deformazioni inaccettabili in relazione all'integrità della struttura. Tale eventualità va indagata con particolare attenzione nel caso in cui sul territorio siano presenti infrastrutture di elevata importanza sociale e/o storico-culturale per evitare un eventuale danneggiamento. I cedimenti differenziali si misurano come variazione dell'abbassamento per metro di lunghezza ed i manufatti più sensibili sotto questo aspetto sono gli edifici multipiano in laterizio. A partire dalle mappe di spostamento ottenute dal modello, il calcolo del degli spostamenti differenziali si esegue con una semplice operazione "gradiente". In Figura 15 e Figura 16 sono riportati i risultati ottenuti rispettivamente durante il ciclo di stoccaggio ed erogazione. Il massimo gradiente di spostamento verticale si registra nella zona centrale della traccia del giacimento ed è pari a 0.0056 mm/m , cioè 0.56×10^{-5} , durante la fase di stoccaggio. Praticamente identico è il gradiente massimo registrato nella fase di erogazione. Tale gradiente è stato confrontato con le distorsioni massime ammissibili per strutture di superficie. Le strutture multipiano in muratura sono le più sensibili agli spostamenti differenziali, con il limite più cautelativo per i gradienti di deformazione verticale fissato in 50×10^{-5} , vale a dire 5 cm su 100 m [Viggiani, 2003]. I limiti ammissibili consigliati per tutti gli altri tipi di struttura sono superiori a quest'ultimo [Simeoni et al., 2017], anche di 100 volte per fabbricati flessibili come quelli realizzati in acciaio. I risultati delle simulazioni indicano quindi che i previsti cicli di stoccaggio/erogazione a $P = 120\% P_i$ causeranno degli spostamenti differenziali ampiamente al di sotto del limite di sicurezza.

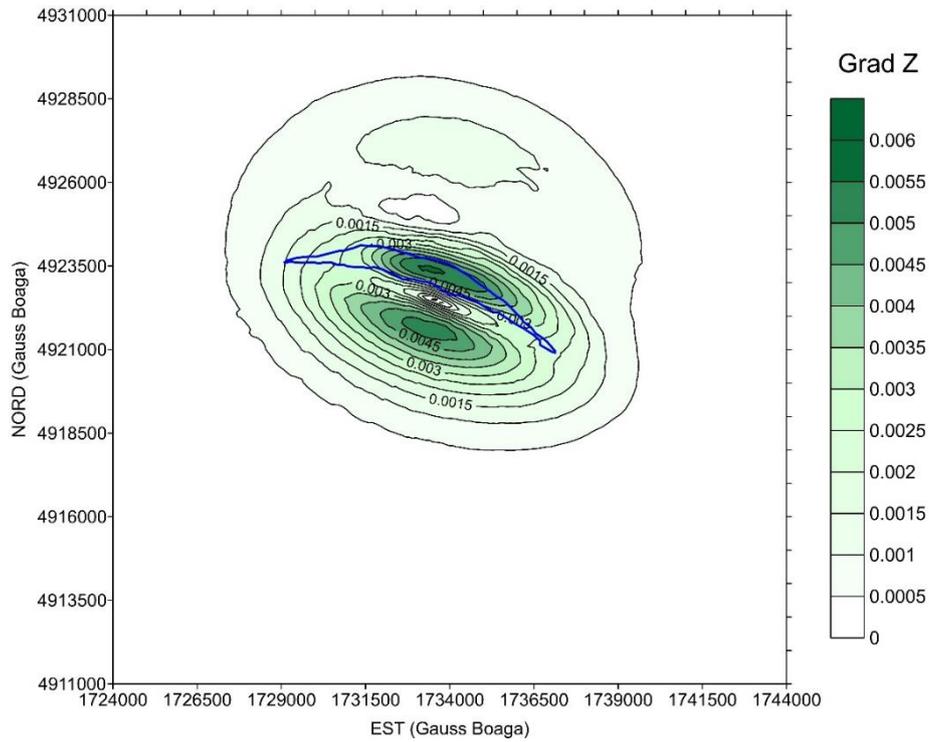


Figura 15: Mappa del gradiente dello spostamento (mm/m) durante la fase di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023. In blu è segnata la traccia del giacimento.

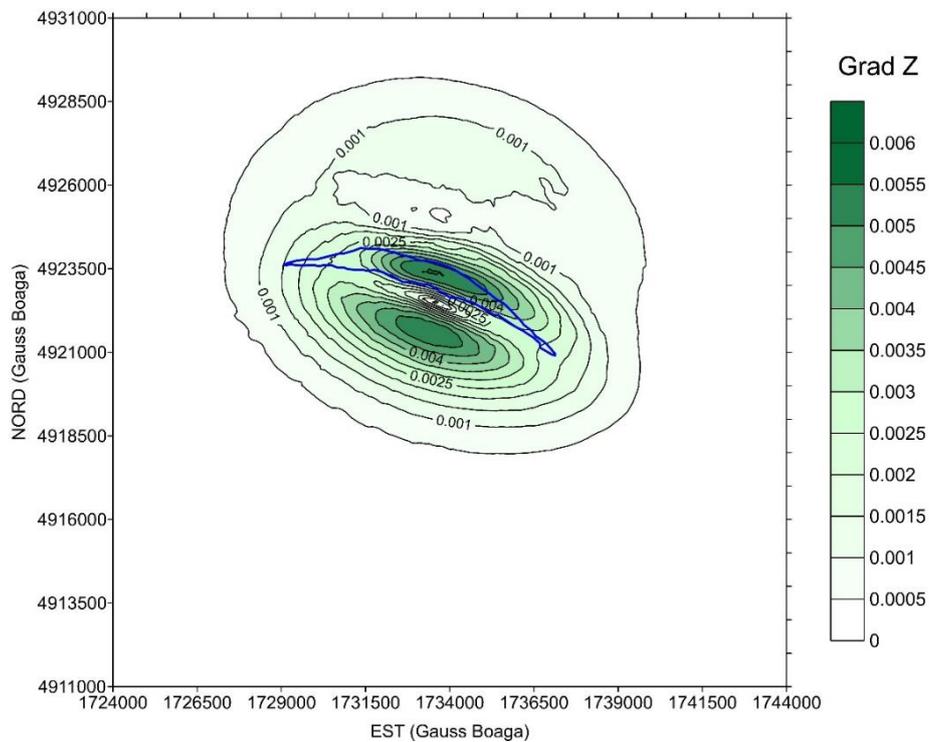


Figura 16: Mappa del gradiente dello spostamento (mm/m) durante la fase di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In blu è segnata la traccia del giacimento.

5.3 Analisi tensionale

E' stata quantificata la variazione delle componenti normali della tensione lungo gli assi verticale (z), Ovest-Est (x) e Sud-Nord (y) attesa durante i cicli di stoccaggio/erogazione. La variazione di tensione verticale $\Delta\sigma_z$ in giacimento e nell'acquifero circostante è coerente con la variazione della pressione di strato (Figura 17). La perturbazione dello stato tensionale rimane circoscritta negli strati del giacimento e non si trasferisce, se non con valori assai modesti, nel caprock e negli strati sottostanti. Ciò è ben evidente dalle immagini di Figura 18 e Figura 19 nelle quali la variazione della tensione verticale durante le fasi di stoccaggio ed erogazione è rappresentata lungo la sezione verticale passante per il campo riportata in Figura 17. La variazione di tensione lungo x e y ha lo stessa distribuzione di quella lungo z, ma con valori circa dimezzati, come visibile dalle mappe di tensione riportate in Allegato A.

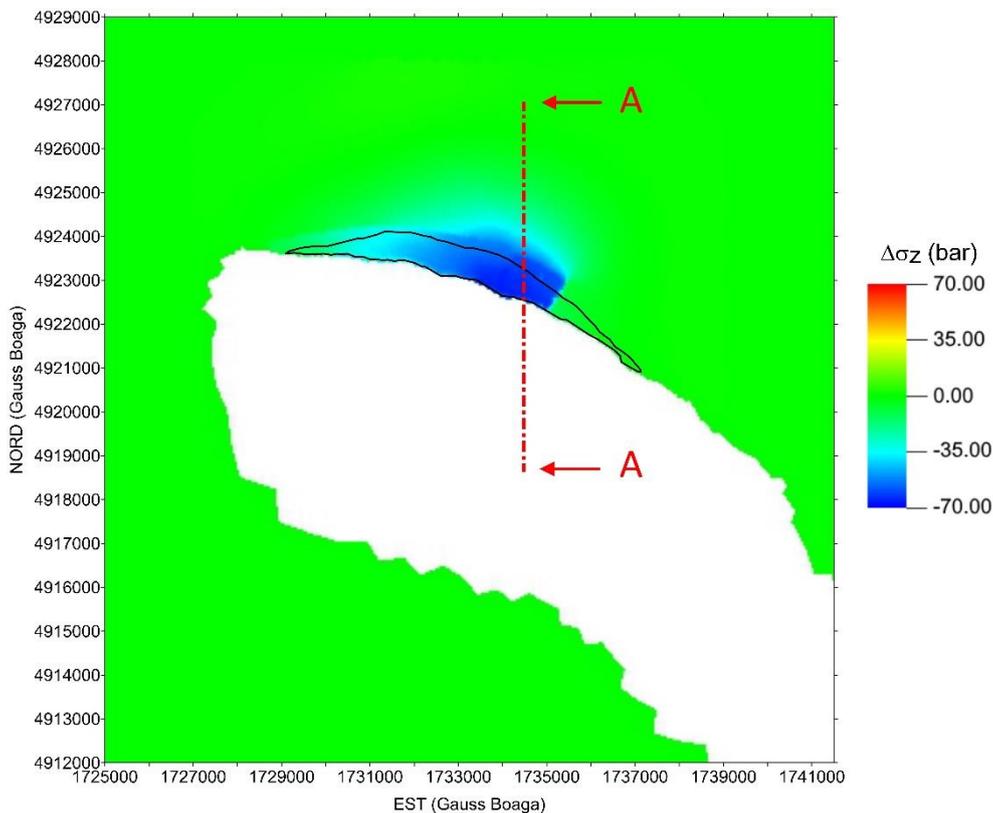


Figura 17: Variazione di tensione σ_z (bar) nel livello BBIU durante la fase di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In nero è evidenziata la traccia del giacimento. In rosso si riporta la traccia delle sezioni verticali riportate nelle figure che seguono.

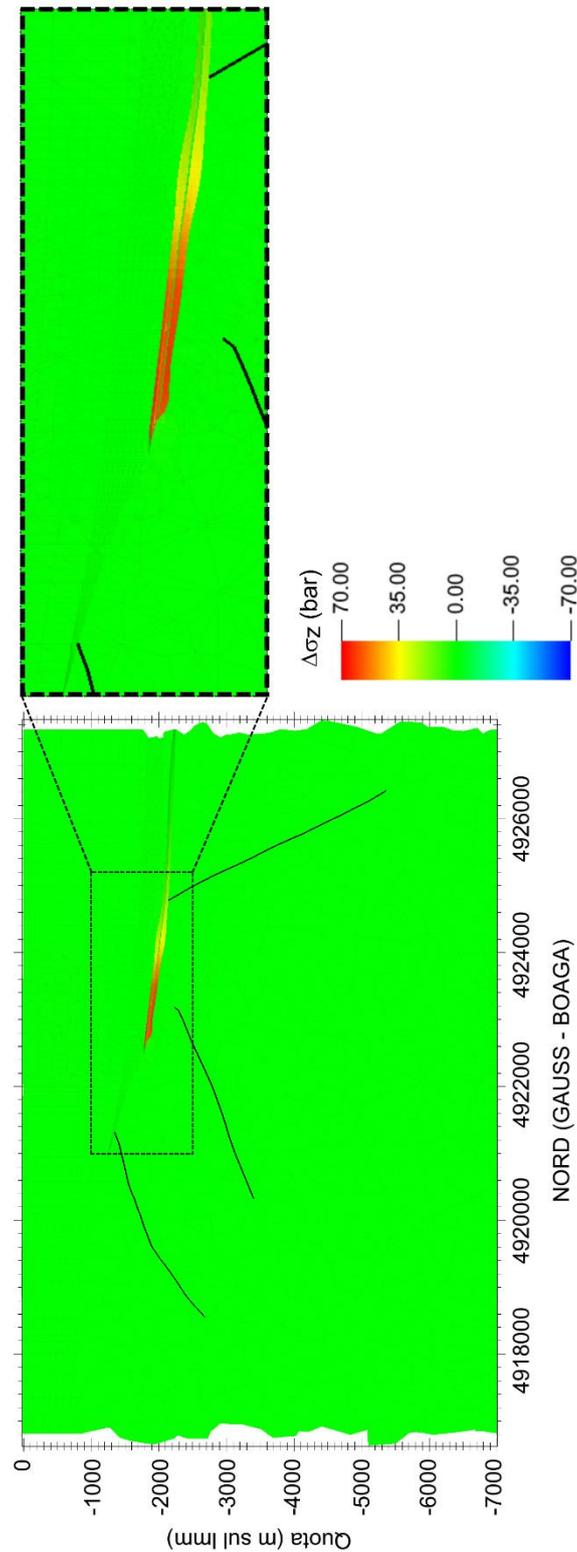


Figura 18: Variazione di tensione σ_z (bar) nella sezione A-A (Figura 17) nella fase di stoccaggio da aprile 2023 ad ottobre 2023. In nero sono evidenziate le tracce delle faglie.

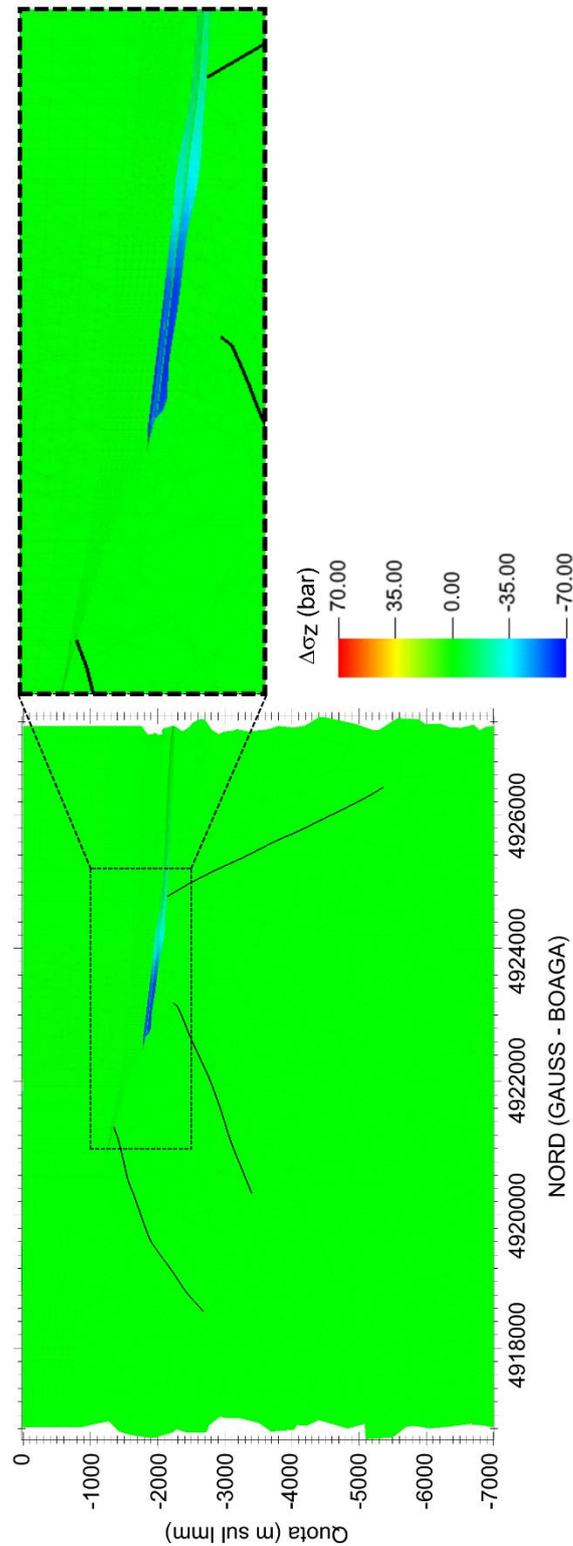


Figura 19: Variazione di tensione σ_z (bar) nella sezione A-A (Figura 17) nella fase di erogazione da ottobre 2023 ad aprile 2024. In nero sono evidenziate le tracce delle faglie.

Va posto l'accento, infine, sul fatto che le faglie in prossimità del campo non saranno interessate da un significativo disturbo tensionale durante i cicli di stoccaggio/erogazione. In Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23 è mostrata la variazione di tensione normale $\Delta\sigma_N$ e tangenziale $\Delta\tau$ al piano di faglia durante le fasi di stoccaggio ed erogazione. Nel caso più gravoso, il disturbo tensionale è pari allo 0.29% e 0.44% delle tensioni iniziali, rispettivamente per la tensione normale e la tensione tangenziale.

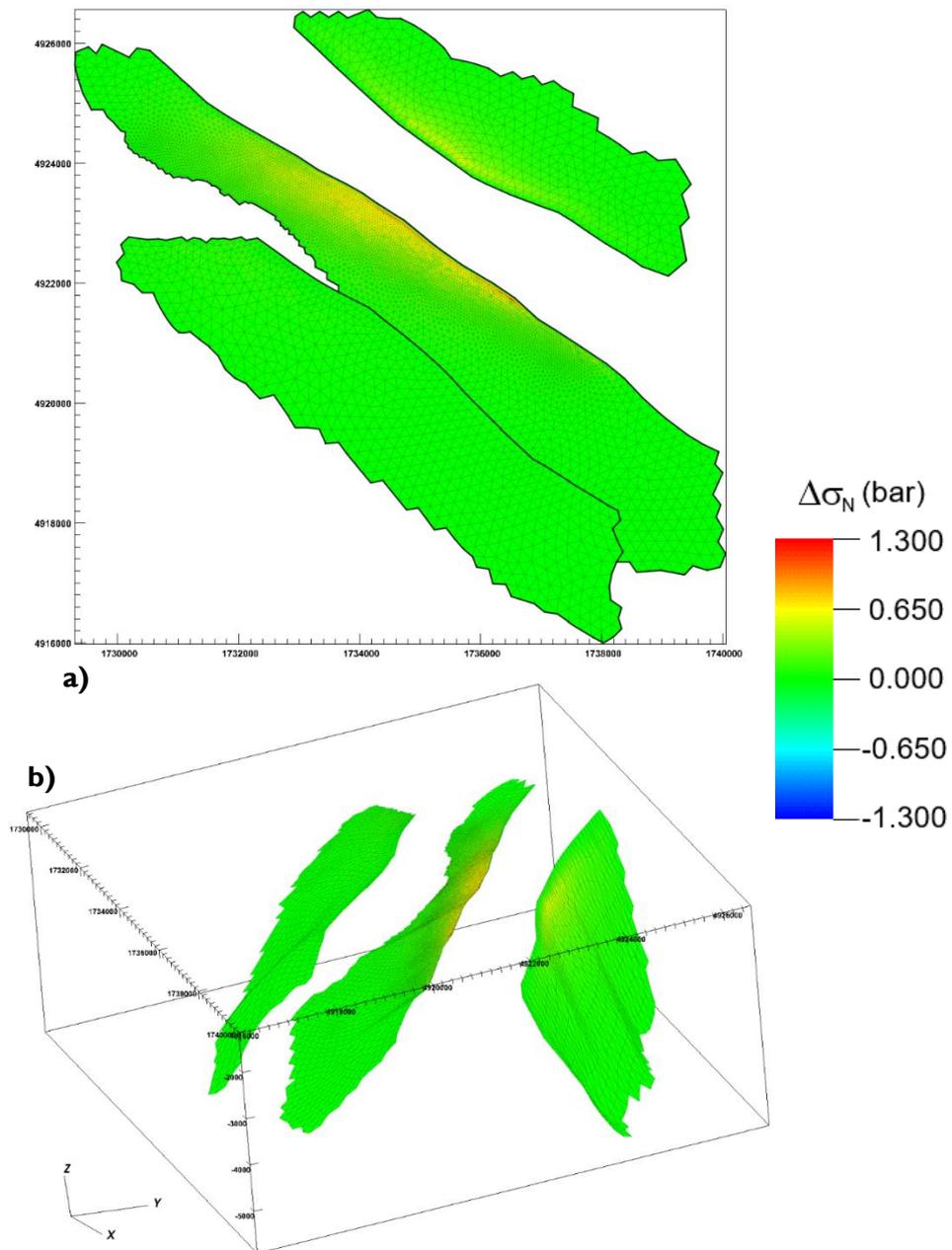


Figura 20: Variazione della tensione normale al piano di faglia $\Delta\sigma_N$ (bar) durante la fase di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023: a) vista in pianta; b) vista assometrica.

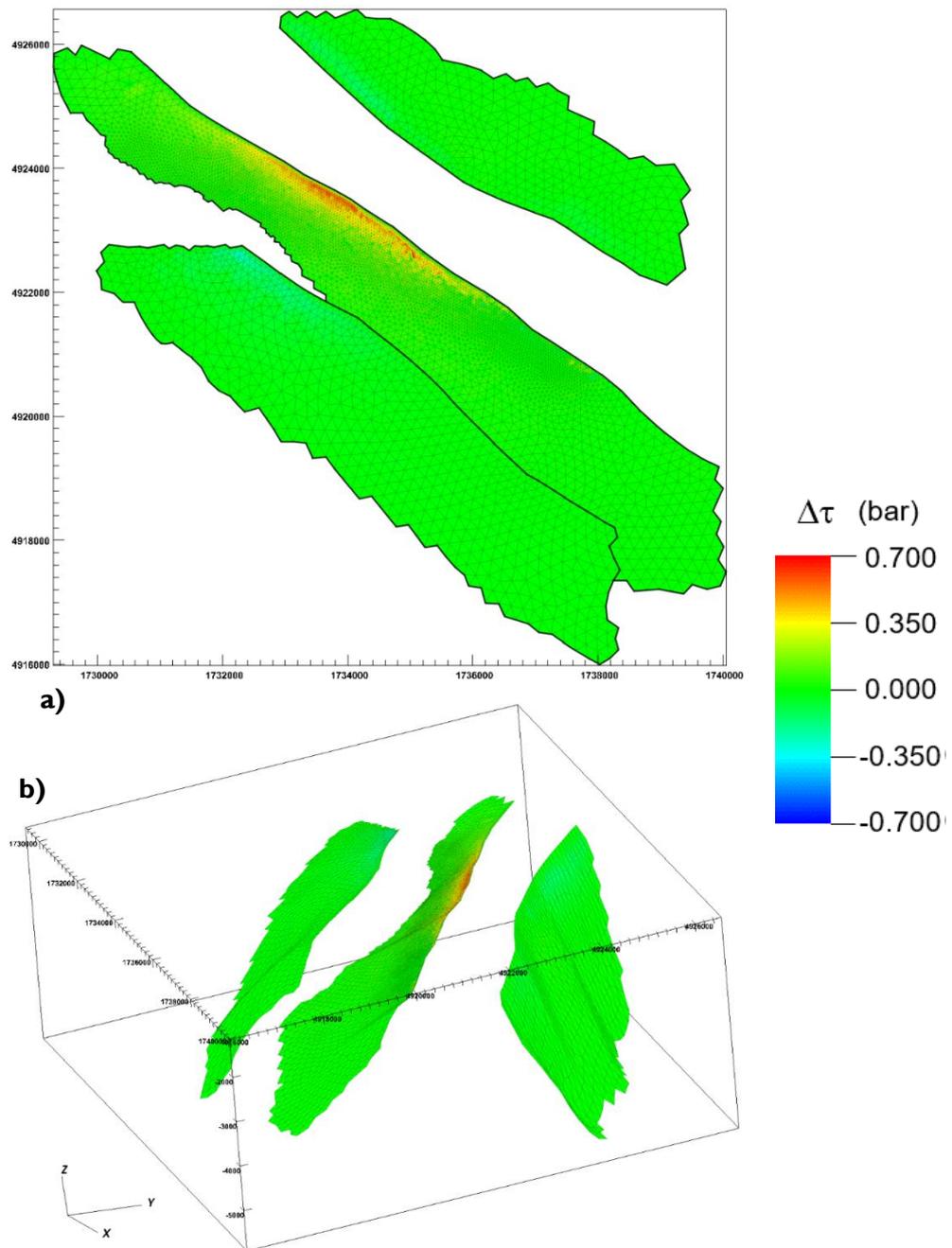


Figura 21: Variazione della tensione tangenziale al piano di faglia $\Delta\tau$ (bar) durante la fase di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023: a) vista in pianta; b) vista assometrica.

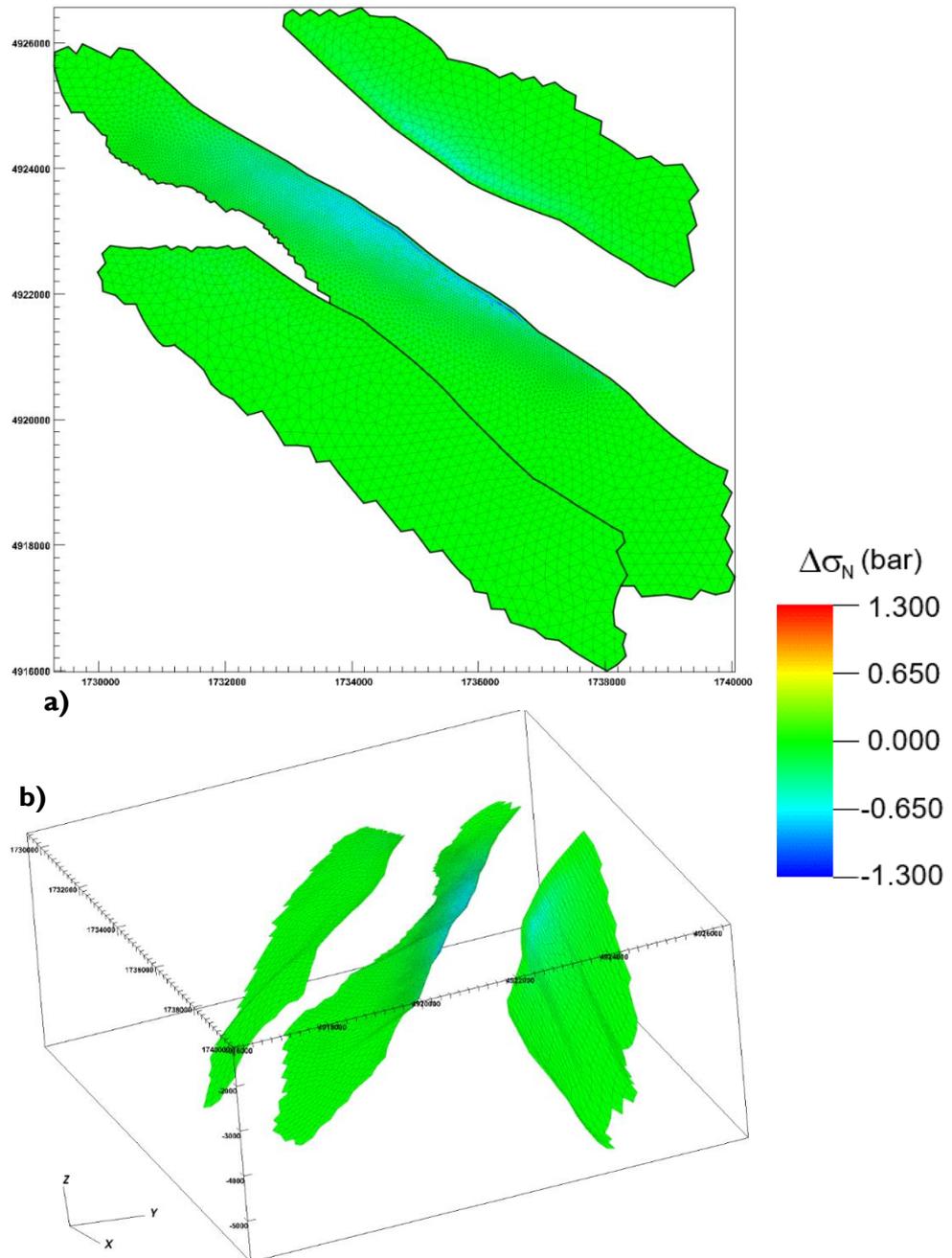


Figura 22: Variazione di tensione normale al piano di faglia $\Delta\sigma_N$ (bar) durante la fase di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024: a) vista in pianta; b) vista assometrica.

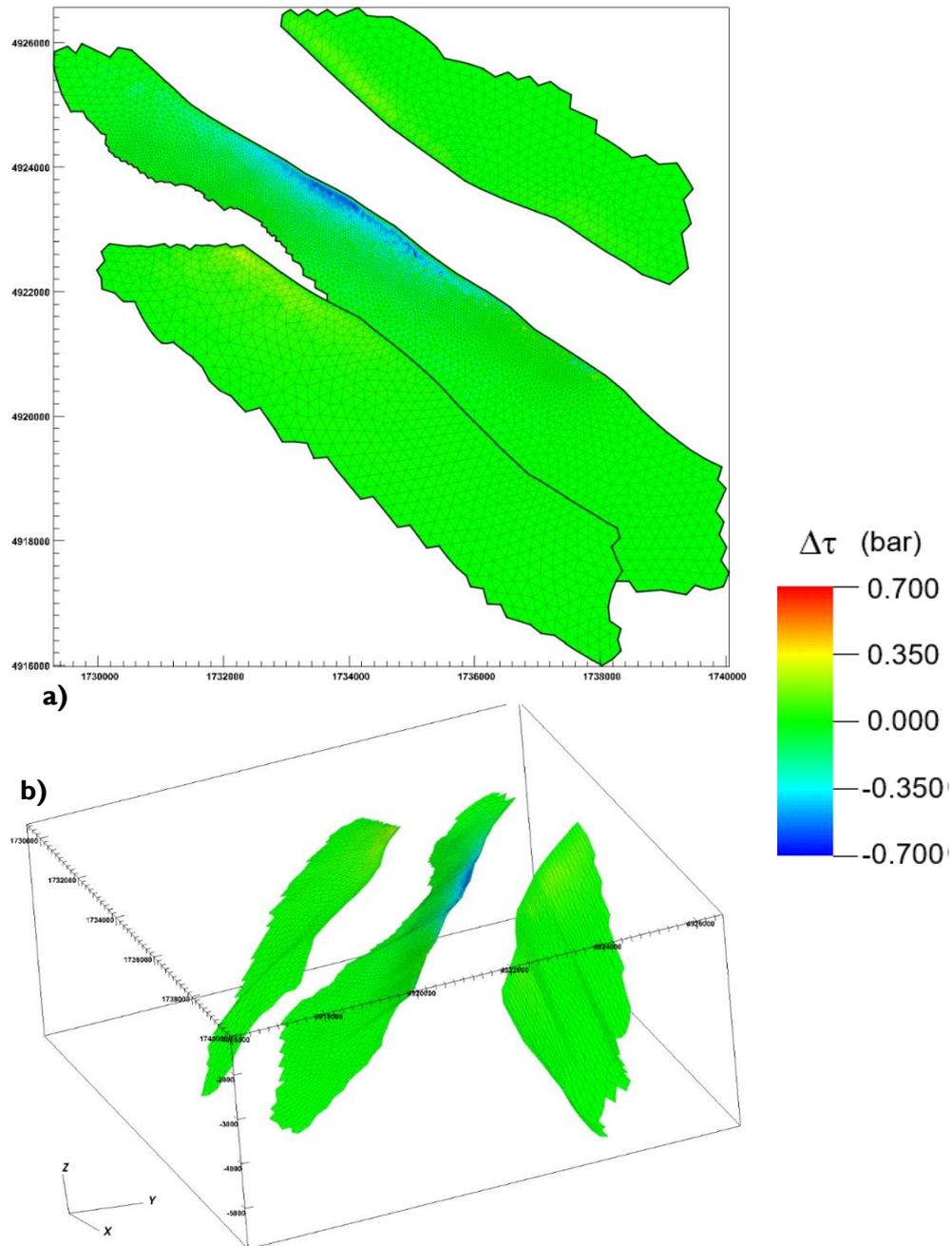


Figura 23: Variazione della tensione tangenziale al piano di faglia $\Delta\tau$ (bar) durante la fase di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024: a) vista in pianta; b) vista assonometrica.

I risultati ottenuti evidenziano pertanto che la fase di utilizzo del campo a $P = 120\% P_i$ non indurrà alcun rischio di riattivazione delle faglie analizzate.

5.4 Integrità meccanica della formazione e del caprock

Lo stoccaggio e l'erogazione di gas inducono una variazione del regime tensionale naturale nella formazione e, in parte, nella roccia di copertura. Risulta quindi importante valutare se tale perturbazione possa compromettere l'integrità meccanica di questi orizzonti geologici, generando fratture che possano potenzialmente causare micro-sismicità o limitare la tenuta del caprock. I meccanismi di rottura che possono innescarsi sono legati al tipo di sollecitazione esercitata sulle rocce; ciò è usualmente analizzato attraverso la rappresentazione grafica e i criteri limite di rottura tipo quello di Mohr-Coulomb. Uno schema indicativo di come i cerchi di Mohr-Coulomb variano in funzione della pressione neutra è riportato in Figura 24, ove si è utilizzata la convenzione di indicare come verso crescente di σ quello corrispondente ad un aumento della compressione, in coerenza con le notazioni tipicamente utilizzate nella letteratura geomeccanica. Si individuano con σ_1 la tensione principale massima e con σ_3 quella minima.

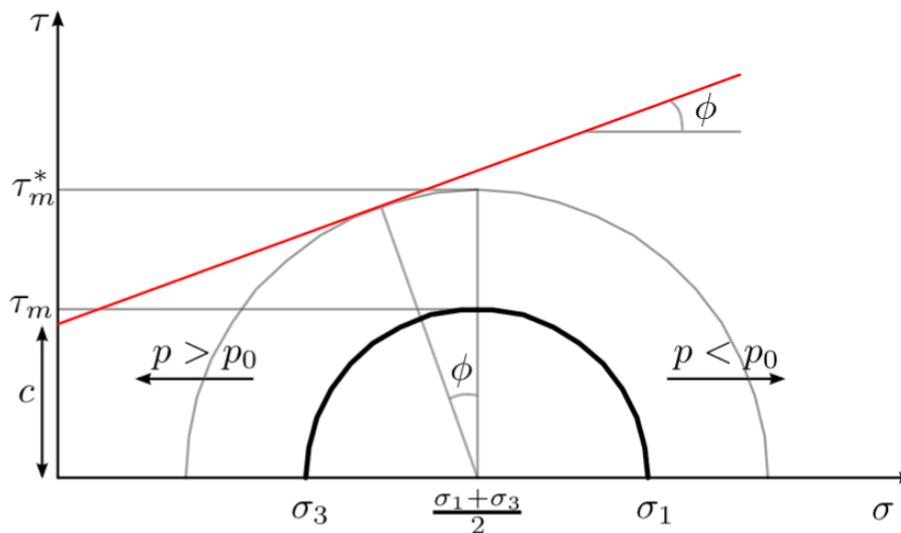


Figura 24. Rappresentazione dello stato tensionale nel piano σ - τ e spostamento dei cerchi di Mohr-Coulomb a seguito dello stoccaggio ($p > p_0$) o erogazione ($p < p_0$) di fluidi dal sottosuolo.

Durante l'erogazione di fluidi la pressione di strato diminuisce con un progressivo trasferimento di stress alla matrice porosa. Lo stato tensionale viene quindi descritto da un cerchio di Mohr che nel piano σ - τ di Figura 24 tende a spostarsi verso destra, cioè tende ad allontanarsi dall'involuppo a rottura secondo Mohr-Coulomb. Per tale motivo, in fase di produzione la roccia non presenta

generalmente problemi di rottura per taglio o per trazione se non quando le variazioni di σ_1 e σ_3 siano molto diverse (con $\sigma_1 \gg \sigma_3$) per cui il diametro del cerchio di Mohr aumenta in modo così significativo che toccando la superficie limite può generarsi rottura a taglio. Viceversa, durante l'iniezione di fluidi la pressione di strato aumenta ed il cerchio di Mohr nel piano σ - τ tende a spostarsi verso sinistra (Figura 24), cioè tende ad avvicinarsi all'involuppo a rottura secondo Mohr-Coulomb ed al limite tensionale ammesso in trazione. Possono pertanto insorgere situazioni che avvicinano la roccia a condizioni di rottura per trazione o per taglio. Le rocce a copertura del giacimento risultano particolarmente sensibili a questi rischi, in quanto la generazione di punti di debolezza nel materiale potrebbe indurre una diminuzione della capacità di tenuta del serbatoio. La distanza dello stato tensionale generato nella formazione mineralizzata e nel caprock dalle condizioni limite di rottura per trazione e per taglio viene quantificata utilizzando due appropriati coefficienti di sicurezza [Castelletto et al., 2013; Teatini et al., 2014]. Il coefficiente di sicurezza ψ rispetto alla rottura per trazione viene definito come:

$$\psi = \frac{\sigma_3}{\sigma_{3,0}} \quad (2)$$

dove $\sigma_{3,0}$ rappresenta la tensione di minima compressione in condizioni indisturbate. Tanto più il coefficiente ψ si avvicina allo 0, tanto più sono prossime le condizioni di rottura per trazione. Viceversa, con ψ prossimo all'unità, il rischio di rottura per trazione è nullo. Si noti che, poiché la coesione c in bacini sedimentari è generalmente limitata, nell'equazione (2) si assume $c = 0$ a favore di sicurezza. Pertanto il coefficiente ψ non cambia al variare di c .

Il coefficiente di sicurezza χ rispetto alla rottura per taglio viene definito come:

$$\chi = 1 - \frac{\tau_s}{\tau_s^*} \quad (3)$$

dove τ_s è la tensione tangenziale massima che si sviluppa in un determinato regime tensionale e τ_s^* è la distanza minima del centro del cerchio di Mohr corrente dall'involuppo a rottura. In funzione delle tensioni principali, τ_s e τ_s^* risultano:

$$\tau_s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (4)$$

$$\tau_s^* = c \cos \phi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi \quad (5)$$

dove ϕ è l'angolo d'attrito della formazione. L'interpretazione grafica nel piano σ - τ delle (4) e (5) risulta immediata. Analogamente a ψ , le condizioni di rottura a taglio si avvicinano tanto più quanto più il coefficiente di sicurezza χ si avvicina allo 0. Il valore di χ in condizioni indisturbate, tuttavia, può essere generalmente già ben al di sotto dell'unità.

I valori minimi dei coefficienti di sicurezza χ e ψ ottenuti dal modello sono riportati rispettivamente in Tabella 1 e Tabella 2; si forniscono i valori in condizioni indisturbate (1988), al termine della produzione primaria (1991) e nelle condizioni di minimo (2023.25 – aprile 2023) e massimo (2023.75 – ottobre 2023) volume immagazzinato durante uno dei cicli di stoccaggio/erogazione. Sulla base di informazioni di letteratura e di studi pregressi condotti nella stessa area si è stato utilizzato $\phi = 30^\circ$, e sono stati considerati tre scenari in relazione al valore della coesione c : $c = 10$ bar (scenario atteso), $c = 1$ bar (scenario intermedio) e $c = 0$ bar (scenario conservativo).

Tabella 1 Valore minimo dei coefficienti di sicurezza χ alla rottura per taglio nelle rocce di copertura della formazione San Potito.

c \ anno	0 bar (conservativo)	1 bar (intermedio)	10 bar (atteso)
1988	0.200	0.207	0.264
1991	0.140	0.152	0.245
2023.25	0.137	0.149	0.242
2023.75	-0.006	0.011	0.142

Tabella 2 Valore minimo dei coefficienti di sicurezza ψ alla rottura per trazione nelle rocce di copertura della formazione San Potito.

c \ anno	0 bar (conservativo)	1 bar (intermedio)	10 bar (atteso)
1988	1.000		
1991	0.932		
2023.25	0.917		
2023.75	0.639		

I coefficienti ottenuti evidenziano come il livello di sicurezza dello stoccaggio a $P = 120\% P_i$ per quanto concerne l'integrità meccanica della formazione e delle rocce di copertura sia generalmente elevato, anche nelle condizioni di maggior rischio quando la pressione in giacimento raggiunge i valori massimi. Il coefficiente di sicurezza per la rottura a trazione ψ , sono ampiamente superiori al limite a rottura $\psi = 0$. Ciò vale anche per la rottura a taglio nello scenario realistico ($c = 10$ bar). Valori di χ ovunque positivi si riscontrano fintantoché la formazione è caratterizzata da una coesione anche molto piccola (1 bar). Solo nello scenario estremo, in cui la coesione è ipotizzata pari a 0 bar, il valore limite di χ risulta negativo. Un'indagine accurata dei risultati ha evidenziato che tale valore si riscontra in un unico elemento, per altro "fortemente distorto" in quanto ubicato in corrispondenza ad una zona di pinch-out dove la soluzione numerica in termini di stato tensionale può essere meno accurata. L'andamento dei due fattori di sicurezza lungo la sezione verticale identificata in Figura 17 è riportato in Allegato B. Si può anche in questo caso notare la corrispondenza fra l'andamento spaziale di tali coefficienti e quello della pressione di strato.

6 CONCLUSIONI

Sono stati analizzati e utilizzati i dati forniti da EDISON STOCCAGGIO per la simulazione dei principali processi geomeccanici a seguito della prevista fase di stoccaggio ed erogazione nel campo di San Potito a $P = 120\% P_i$.

Le simulazioni geomeccaniche sono state condotte utilizzando i risultati del modello di produzione messo a disposizione dal committente e i modelli messi a punto nella Fase I dello studio; in particolare la calibrazione del modello fluidodinamico dell'acquifero in contatto idraulico con il campo la calibrazione del modello geomeccanico.

Nel complesso, il database analizzato appare adeguato per l'esecuzione delle simulazioni geomeccaniche previste dallo studio, in particolare per la previsione degli spostamenti verticali sia assoluti che differenziali. I risultati ottenuti per i cicli di stoccaggio a $P = 120\% P_i$ possono essere così sintetizzati:

1. l'escursione massima verticale ottenuta durante la fase di stoccaggio risulta pari a 1.2 cm. Analogo valore di spostamento (ma di abbassamento e non di innalzamento) è calcolato per la fase di erogazione;
2. il massimo gradiente dello spostamento risulta pari a 0.56×10^{-5} , cioè 0.56 mm su 100 m, circa 100 volte inferiore al limite più restrittivo raccomandato nella letteratura di settore con riferimento alla stabilità strutturale delle opere murarie multipiano;
3. le variazioni dello stato tensionale rimane sostanzialmente confinata alla profondità del giacimento e non sono tali da indurre stati critici (rottura) nella formazione in cui è collocato il giacimento. La propagazione della tensione nel caprock e nell'underburden è stata assai limitata, con valori inferiori a pochi punti percentuali dei valori massimi previsti nel campo;
4. le faglie ubicate in prossimità del campo non vengono interessate da variazioni tensionali apprezzabili.

7 REFERENZE

- Baù, D., Gambolati, G., Teatini, P. (2000). Waterdrive dynamics and enhanced land subsidence over productive gas fields: application to Dosso degli Angeli reservoir, Ravenna, Italy. In: Theory, Modeling and Field Investigation in Hydrology: A Special Volume in Honor of Shlomo P. Neuman's 60th Birthday, D. Zhang and C. L. Winter eds., Geological Society of America, Special Paper 348, 129-149.
- Baù, D., Ferronato, M., Gambolati, G., Teatini, P. (2002). Basin-scale compressibility of the Northern Adriatic by the radioactive marker technique. *Geotechnique*, 52(8), 605-616.
- Castelletto, N., G. Gambolati and P. Teatini, Geological CO₂ sequestration in multi-compartment reservoirs: Geomechanical challenges, *J. Geophys. Res - Solid Earth*, 118, 2417-2428, doi:10.1002/jgrb.50180, 2013.
- Ferronato, M., Castelletto, N., Gambolati, G., Janna C., Teatini, P. (2013). Il cycle compressibility estimate from satellite measurements. *Geotechnique*, doi:10.1680/geot.11.P.149.
- Franceschini, A., Ferronato, M., Janna, C., Teatini, P. (2016). A novel Lagrangian approach for the stable numerical simulation of fault and fracture mechanics. *J. of Computational Physics*, 341, 503-521.
- Janna, C., N. Castelletto, M. Ferronato, G. Gambolati and P. Teatini (2012). A geomechanical transversely isotropic model of the Po River basin using PSInSAR derived horizontal displacement, *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, 51, 105-118.
- M³E S.r.l. (2017). Modello dei processi geomeccanici derivanti dallo stoccaggio di gas naturale nel campo di San Potito. Fase I.
- Si, H. (2008). Adaptive tetrahedral mesh generation by constrained Delaunay refinement, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 75, 856-880.
- Simeoni, U., U. Tessari, C. Corbau, O. Tosatto, P. Polo, P. Teatini (2017). Impact of land subsidence due to residual gas production on surficial infrastructures: the Dosso degli Angeli field study (Ravenna, Northern Italy), *Engineering Geology*, doi:10.1016/j.enggeo.2017.09.008.
- Teatini, P., N. Castelletto, M. Ferronato, G. Gambolati, C. Janna, E. Cairo, D. Marzorati, D. Colombo, A. Ferretti, A. Bagliani and F. Bottazzi (2011). Geomechanical response to seasonal

gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy, *J. Geophys. Res.*, 116, F02002, doi:10.1029/2010JF001793.

Teatini, P., N. Castelletto, and G. Gambolati, 3D geomechanical modeling for CO₂ geological storage in faulted formations. A case study in an offshore northern Adriatic reservoir, Italy, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 22, 63-76, 2014.

Viggiani, C. (2003). *Fondazioni*. Helvelius Edizioni, Benevento, Italy.

ALLEGATO A: mappe della variazione di tensione durante un ciclo di stoccaggio a $P = 120\% P_i$

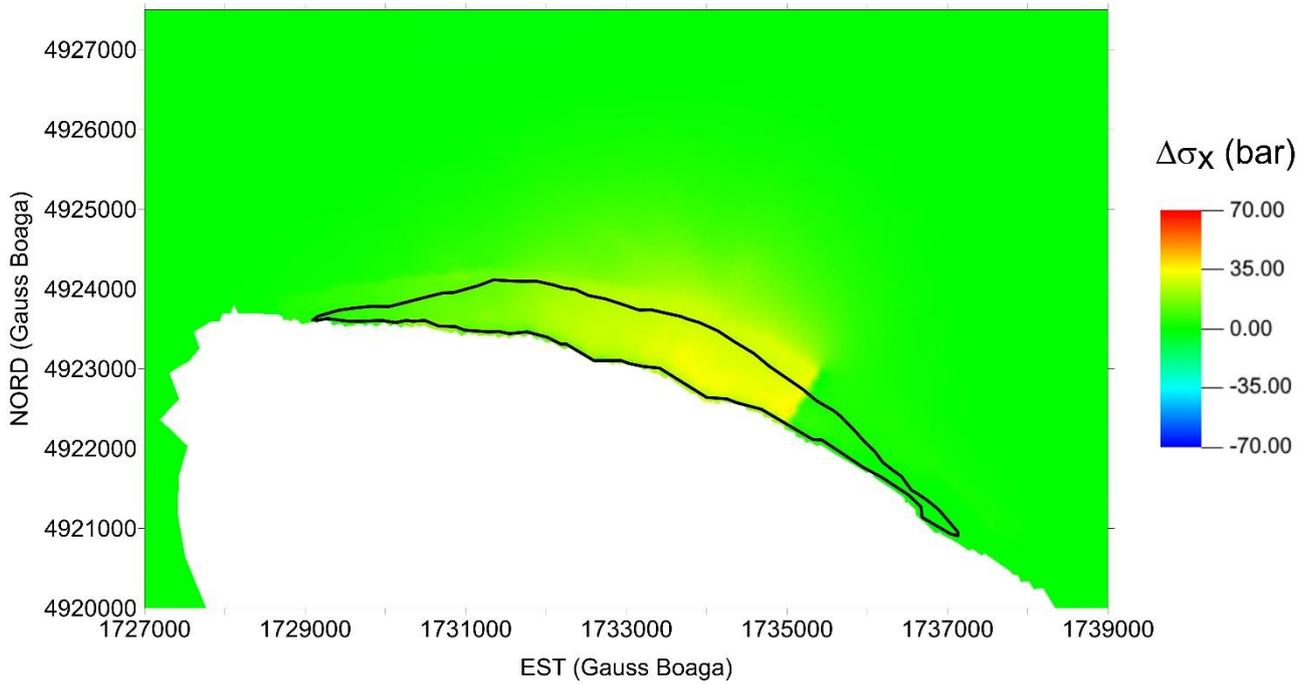


Figura A 1: Variazione della tensione σ_x (bar) nel livello BBIU durante il ciclo di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

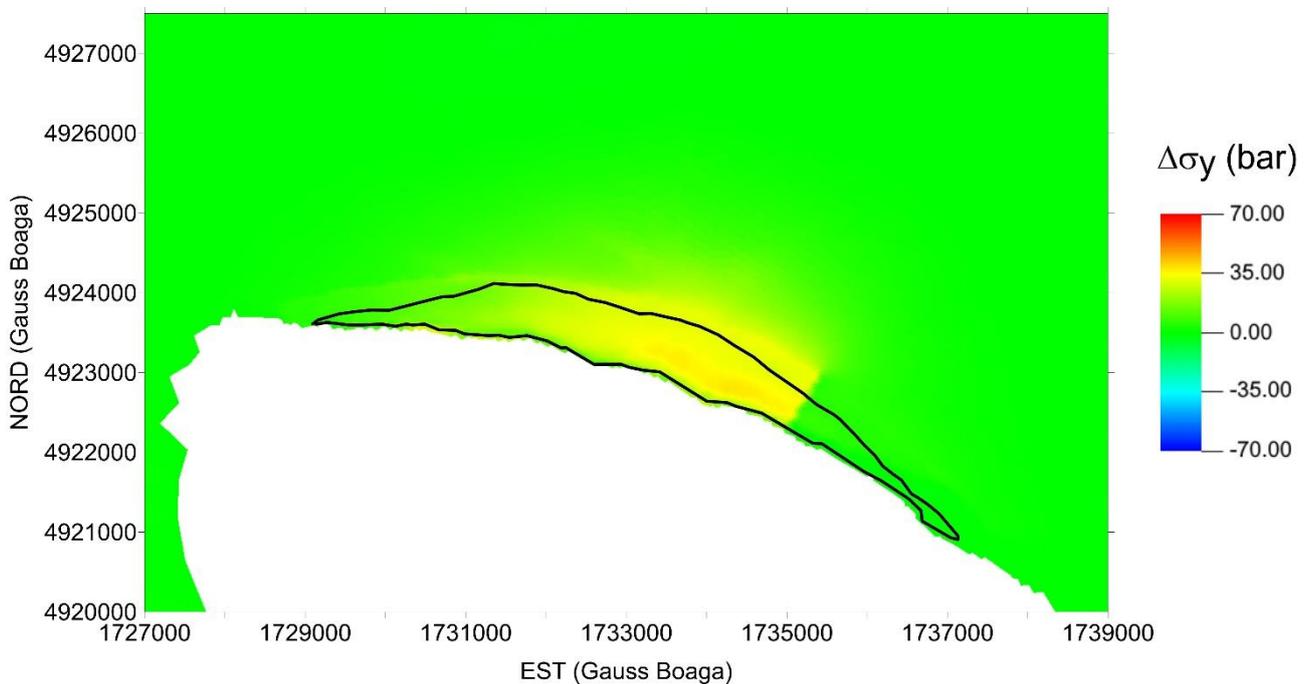


Figura A 2: Variazione della tensione σ_y (bar) nel livello BBIU durante il ciclo di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

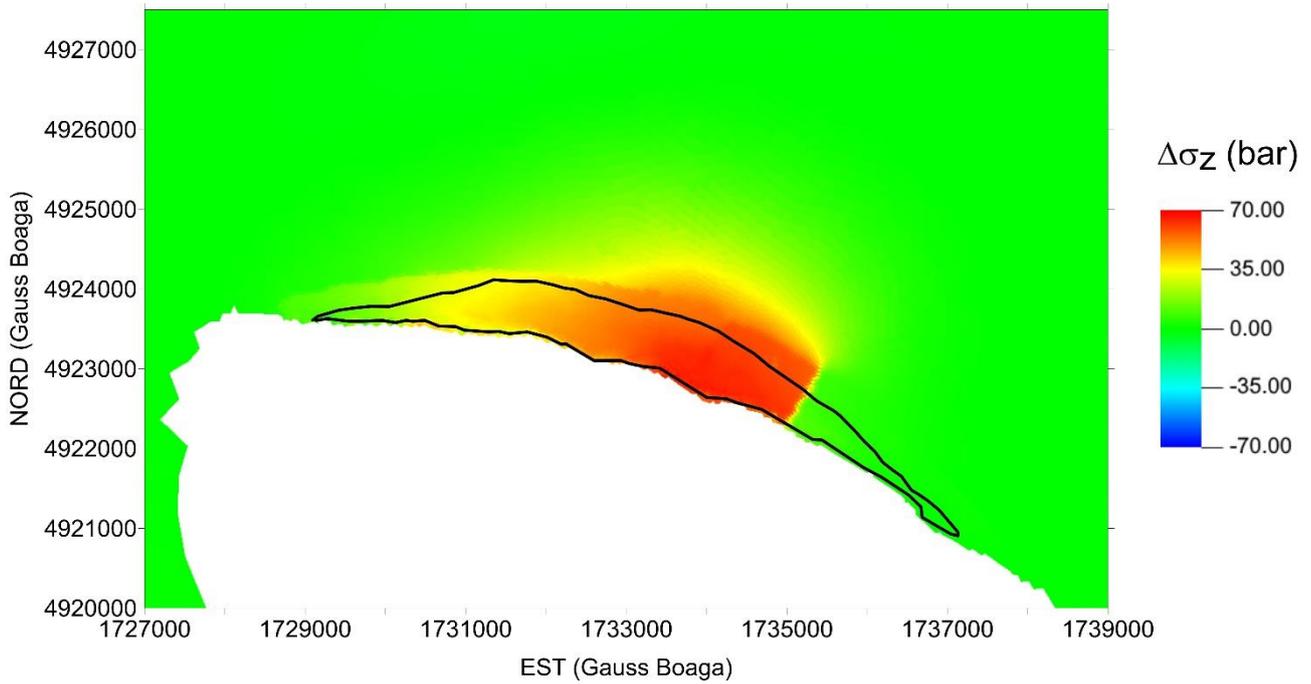


Figura A 3: Variazione della tensione σ_z (bar) nel livello BBIU durante il ciclo di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

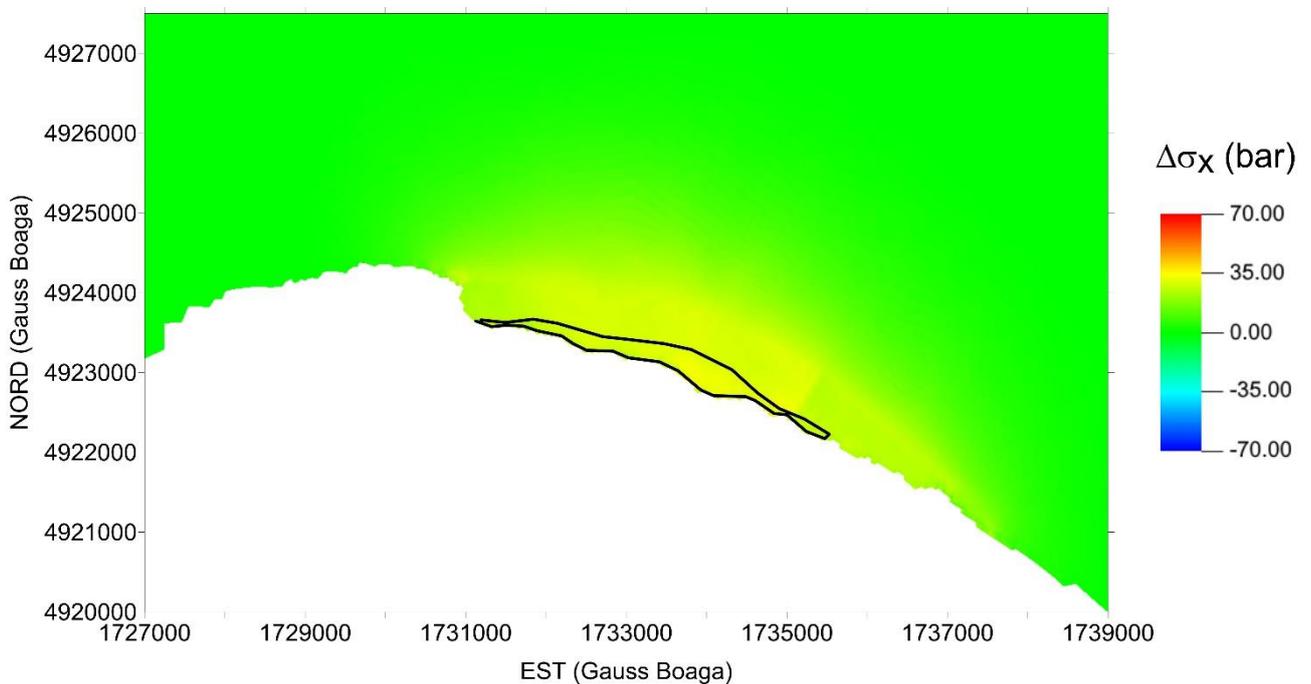


Figura A 4: Variazione della tensione σ_x (bar) nel livello BBIL durante il ciclo di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

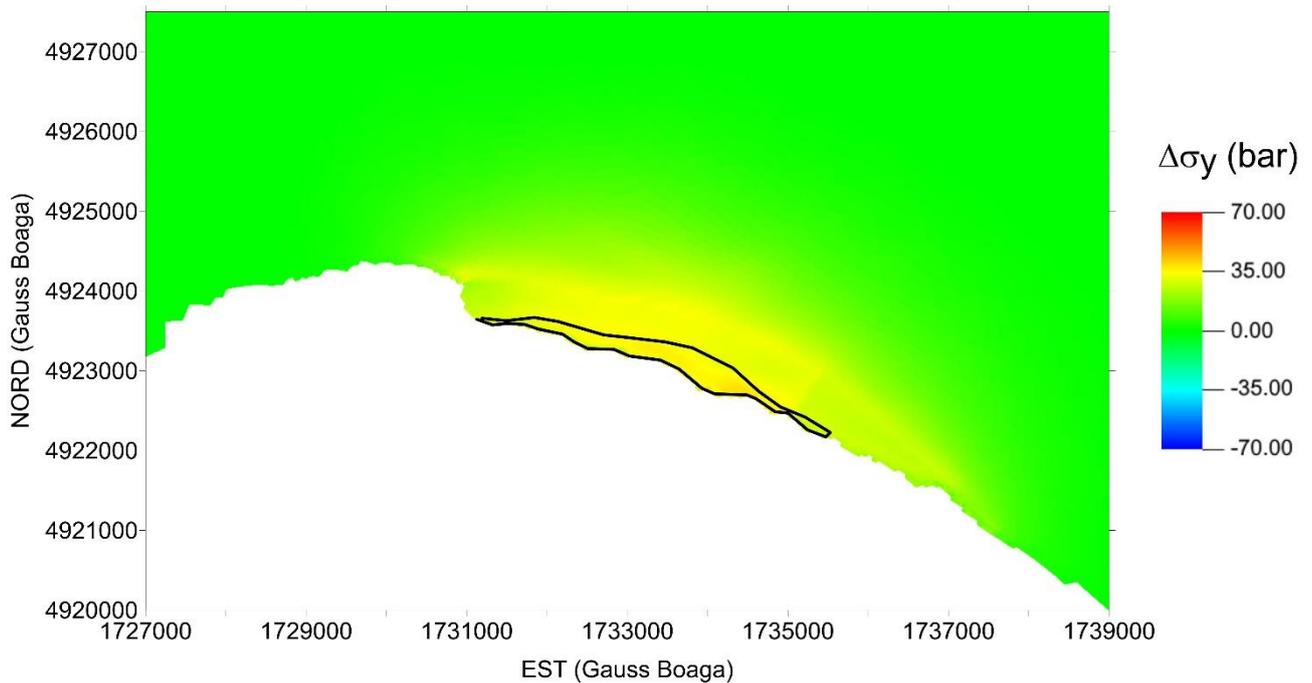


Figura A 5: Variazione della tensione σ_y (bar) nel livello BBIL durante il ciclo di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

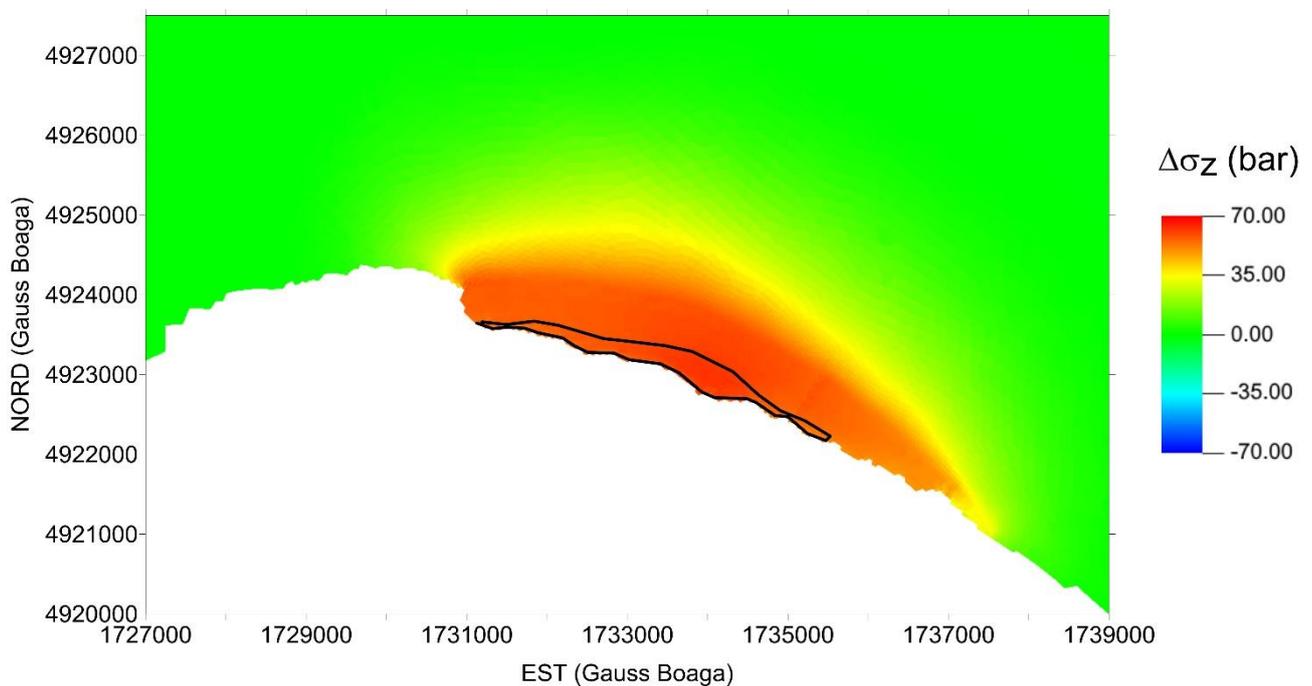


Figura A 6: Variazione della tensione σ_z (bar) nel livello BBIL durante il ciclo di stoccaggio aprile 2023 – ottobre 2023. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

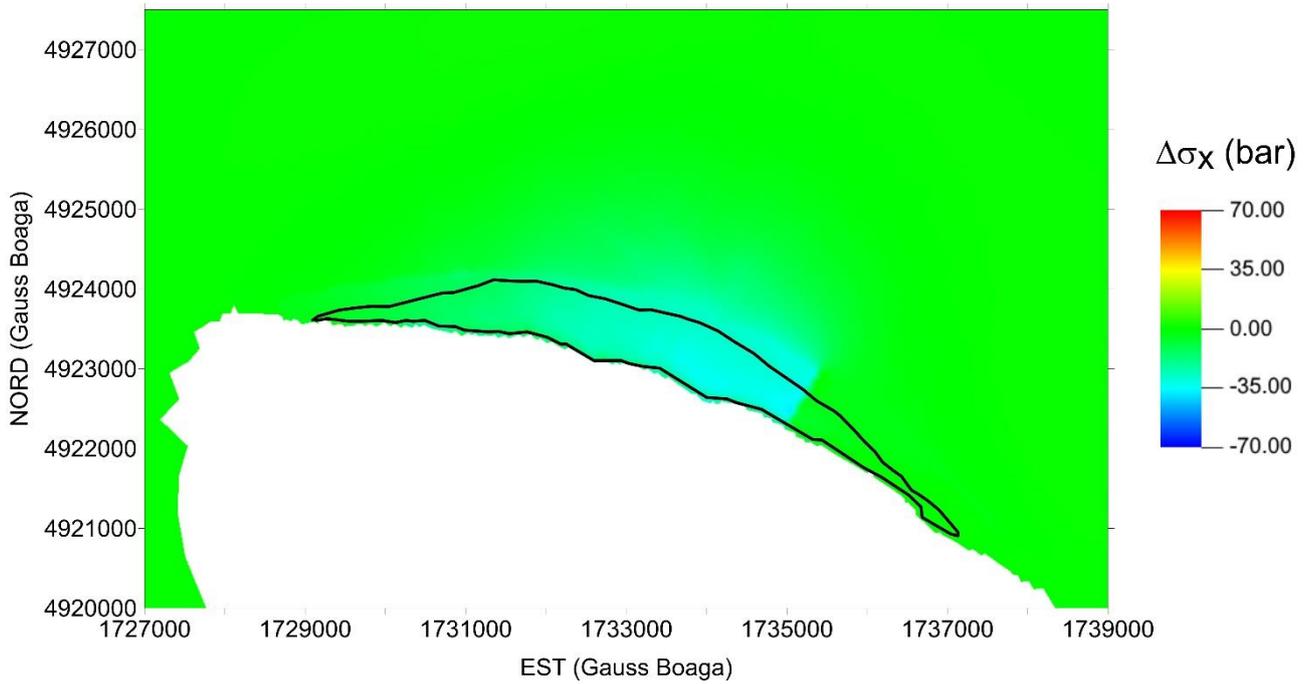


Figura A 7: Variazione della tensione σ_x (bar) nel livello BBIU durante il ciclo di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

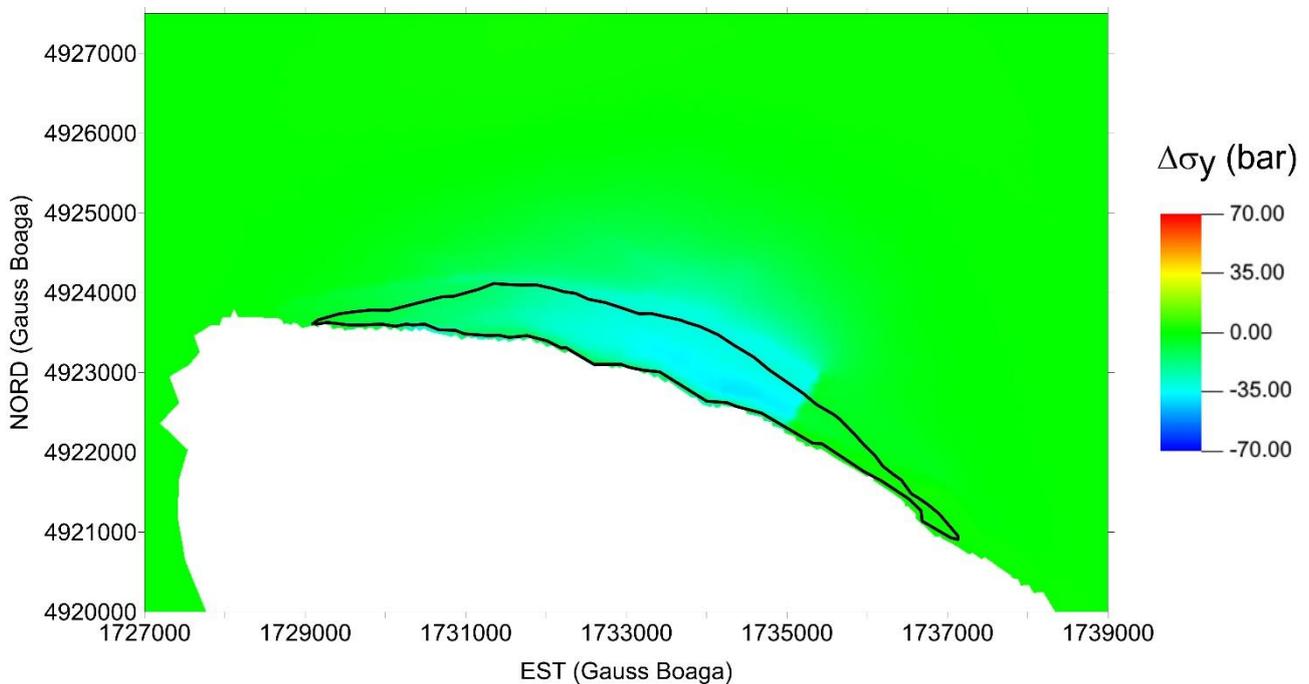


Figura A 8: Variazione della tensione σ_y (bar) nel livello BBIU durante il ciclo di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

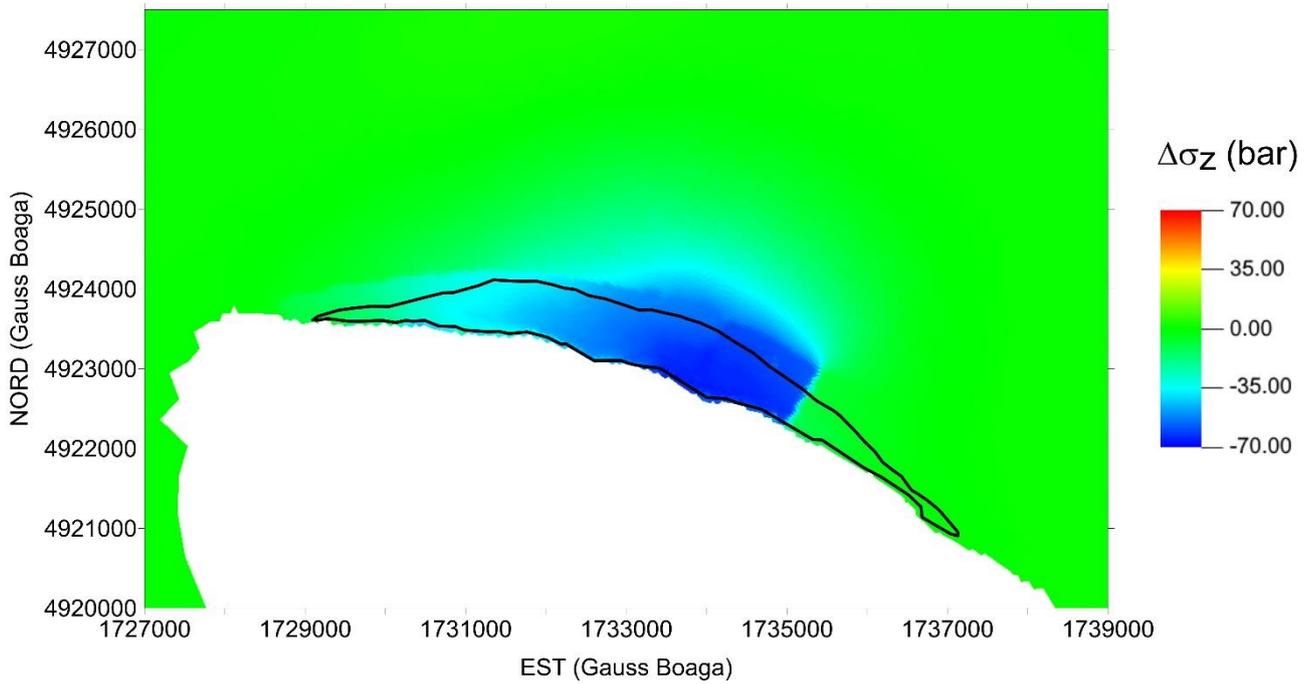


Figura A 9: Variazione di tensione σ_z (bar) nel livello BBIU durante il ciclo di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

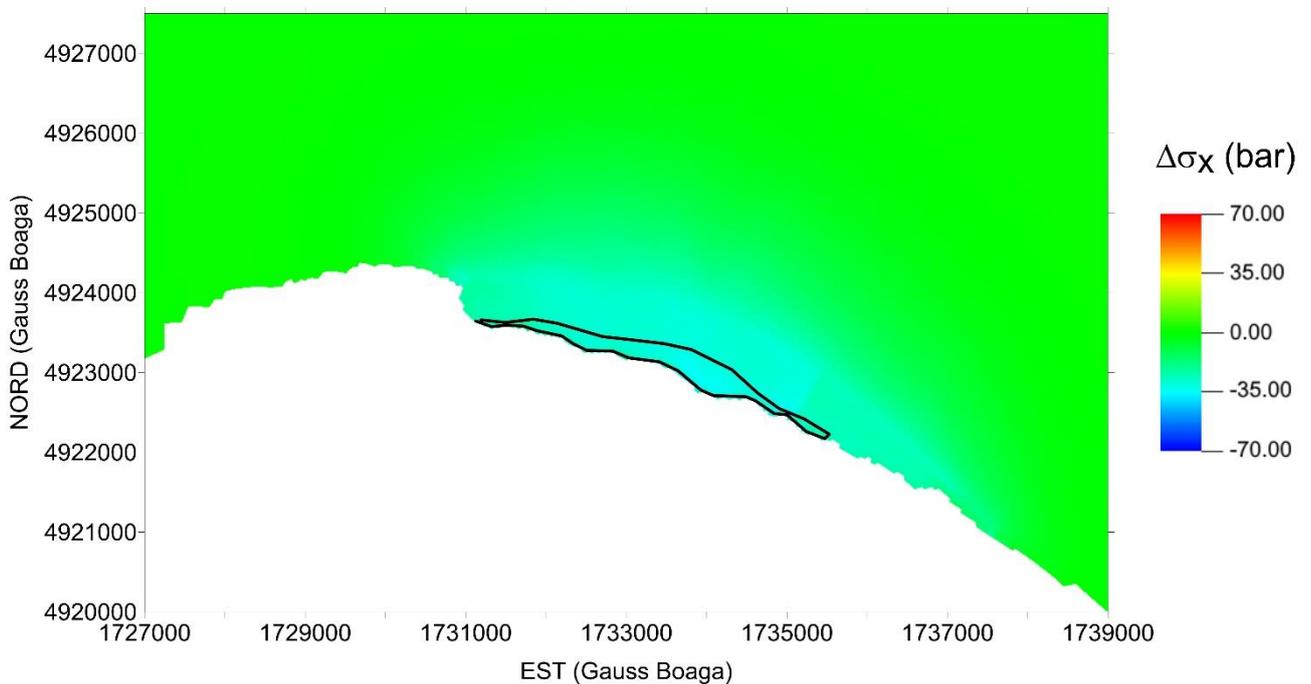


Figura A 10: Variazione della tensione σ_x (bar) nel livello BBIL durante il ciclo di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

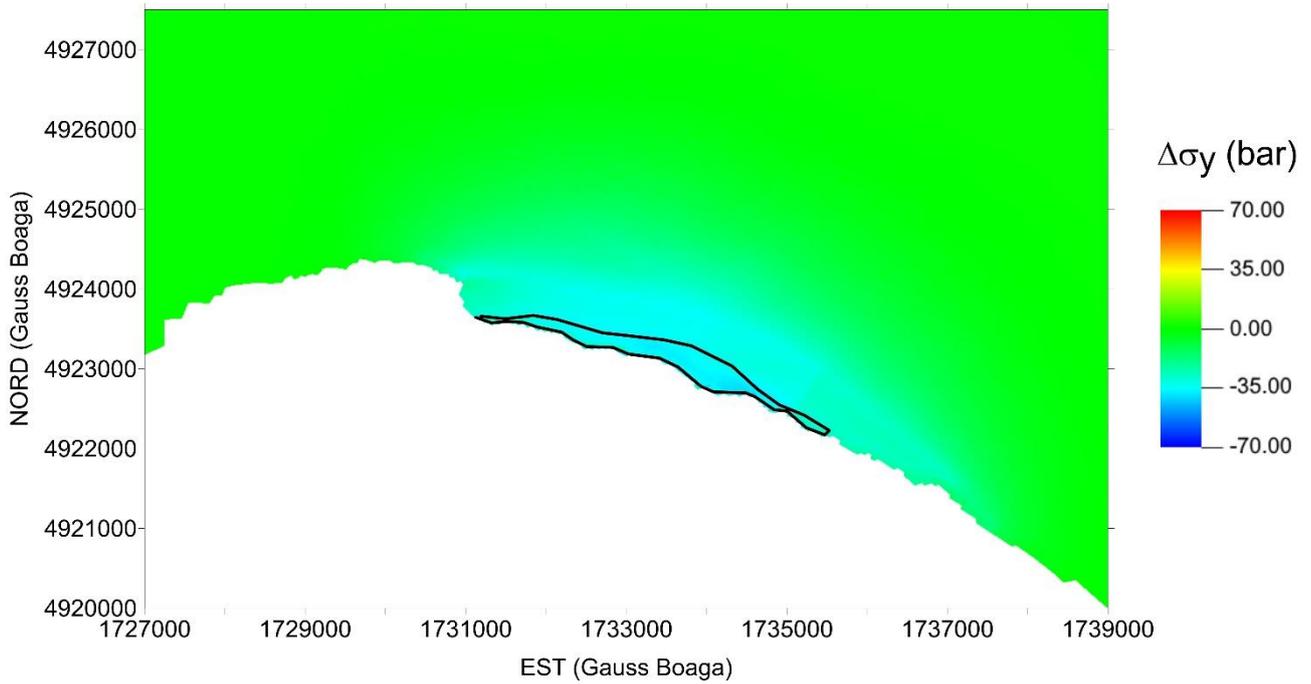


Figura A 11: Variazione della tensione σ_y (bar) nel livello BBIL durante il ciclo di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

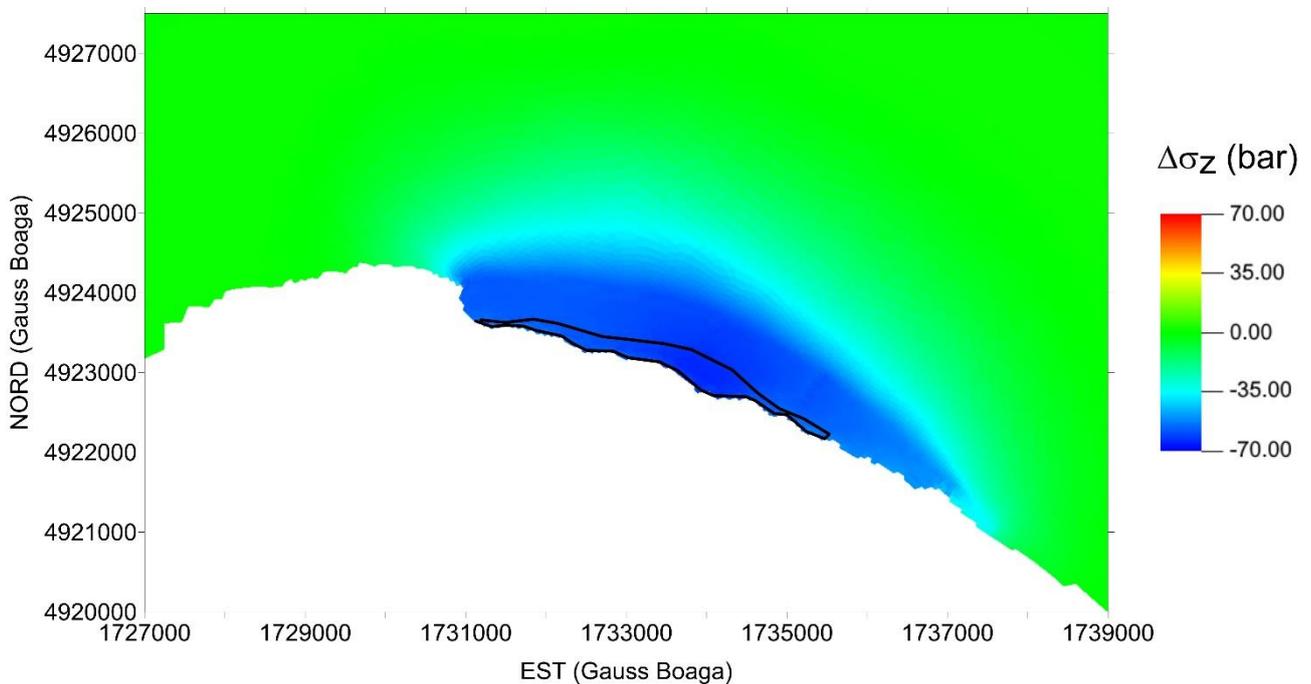


Figura A 12: Variazione della tensione σ_z (bar) nel livello BBIL durante il ciclo di erogazione ottobre 2023 – aprile 2024. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

ALLEGATO B: Analisi dell'integrità meccanica della roccia serbatoio/caprock

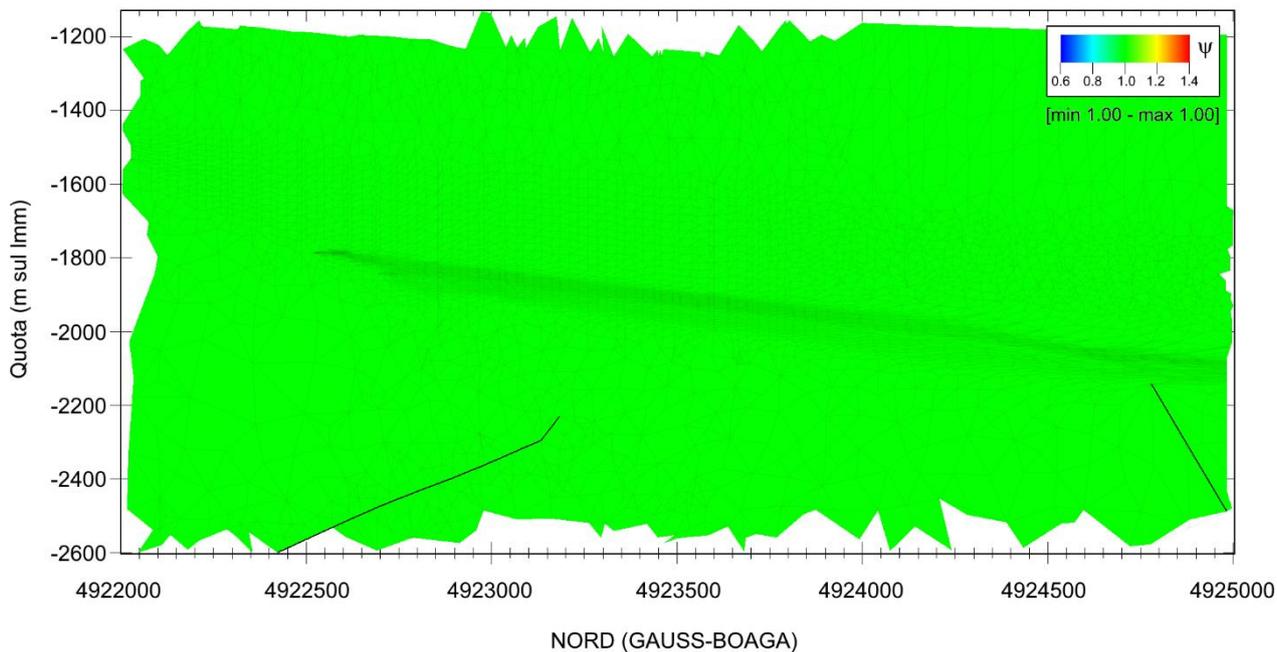


Figura B 1: Fattore di sicurezza ψ alla rottura a trazione in condizioni indisturbate (1988). In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

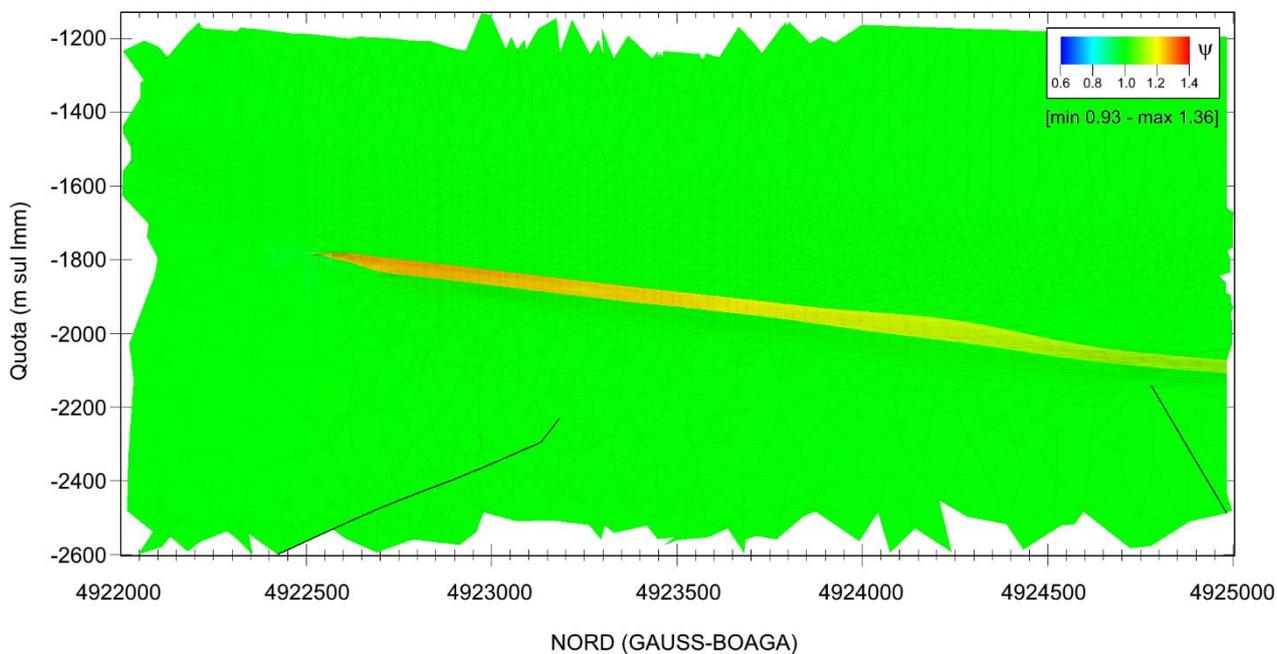


Figura B 2: Fattore di sicurezza ψ alla rottura a trazione al termine della produzione primaria (1991). In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

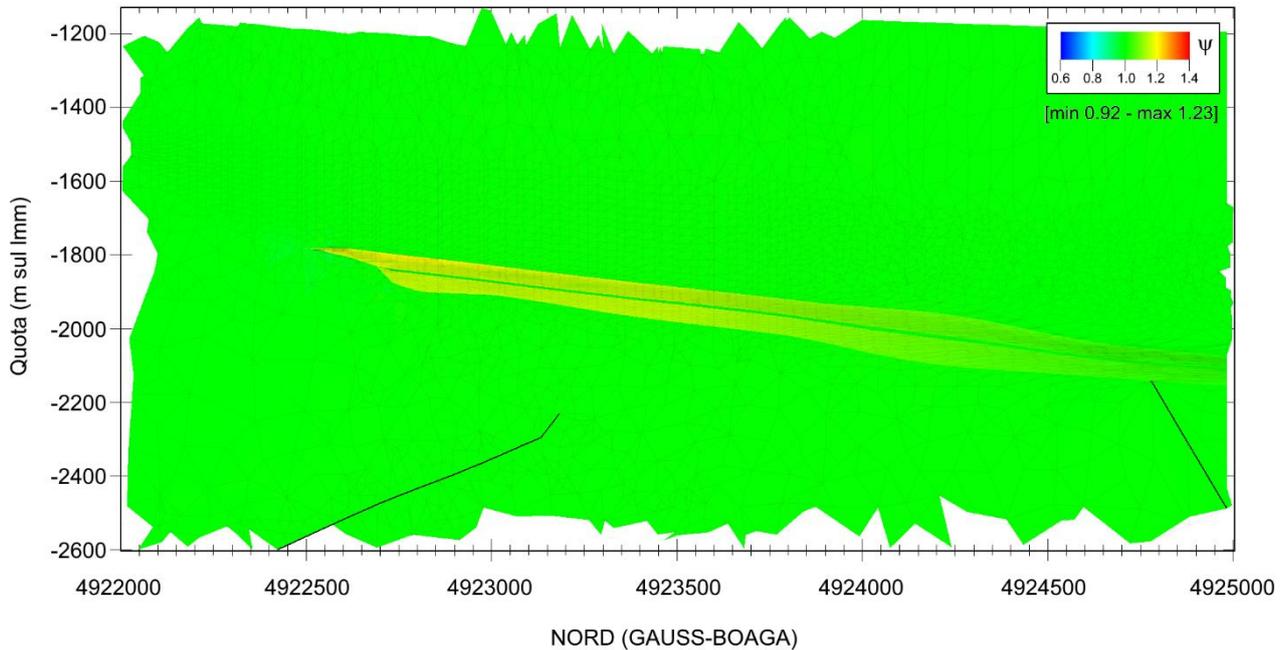


Figura B 3: Fattore di sicurezza ψ alla rottura a trazione al termine della fase di stoccaggio con $P = 120\% P_i$ (ottobre 2023). In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

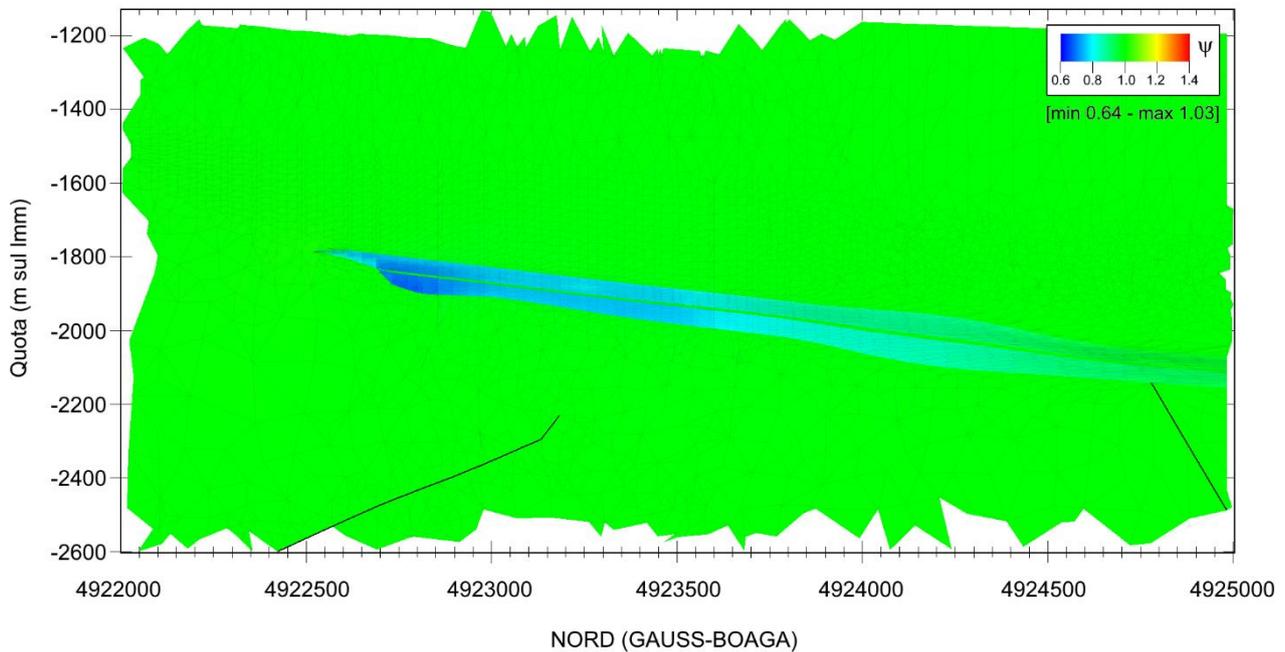


Figura B 4: Fattore di sicurezza ψ alla rottura a trazione al termine della fase di erogazione con $P = 120\% P_i$ (aprile 2024). In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

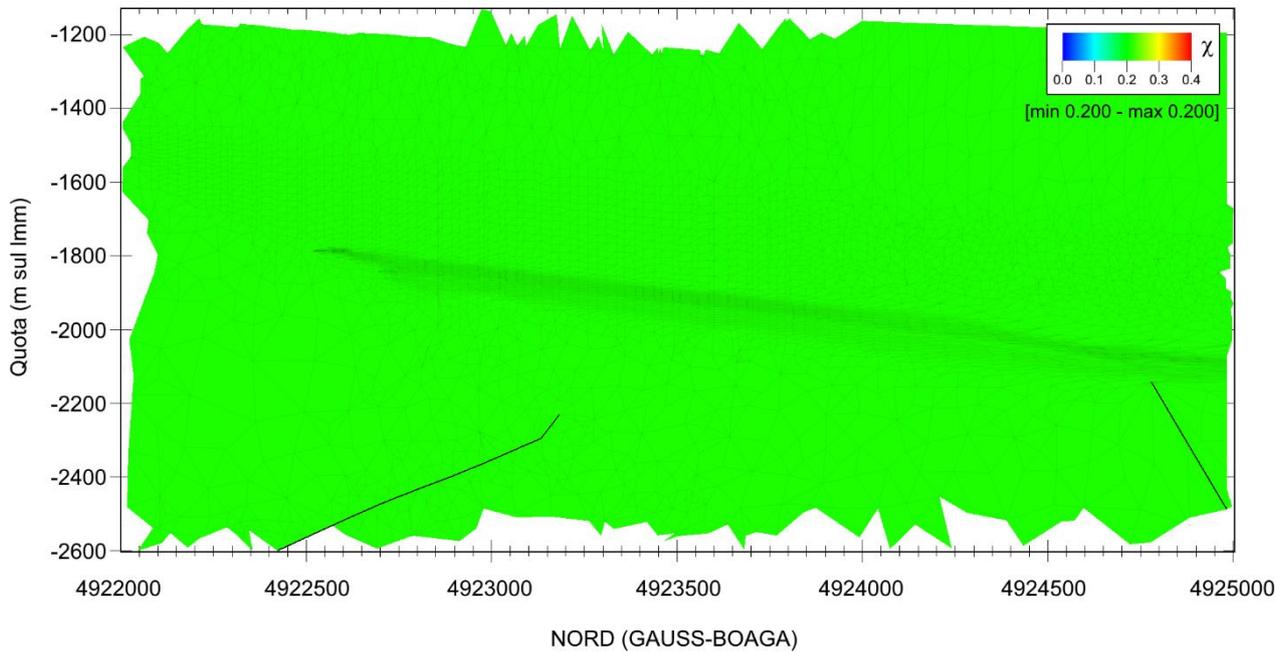


Figura B 5: Fattore di sicurezza χ alla rottura a taglio in condizioni indisturbate (1988) per lo scenario con coesione pari a 0 bar. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

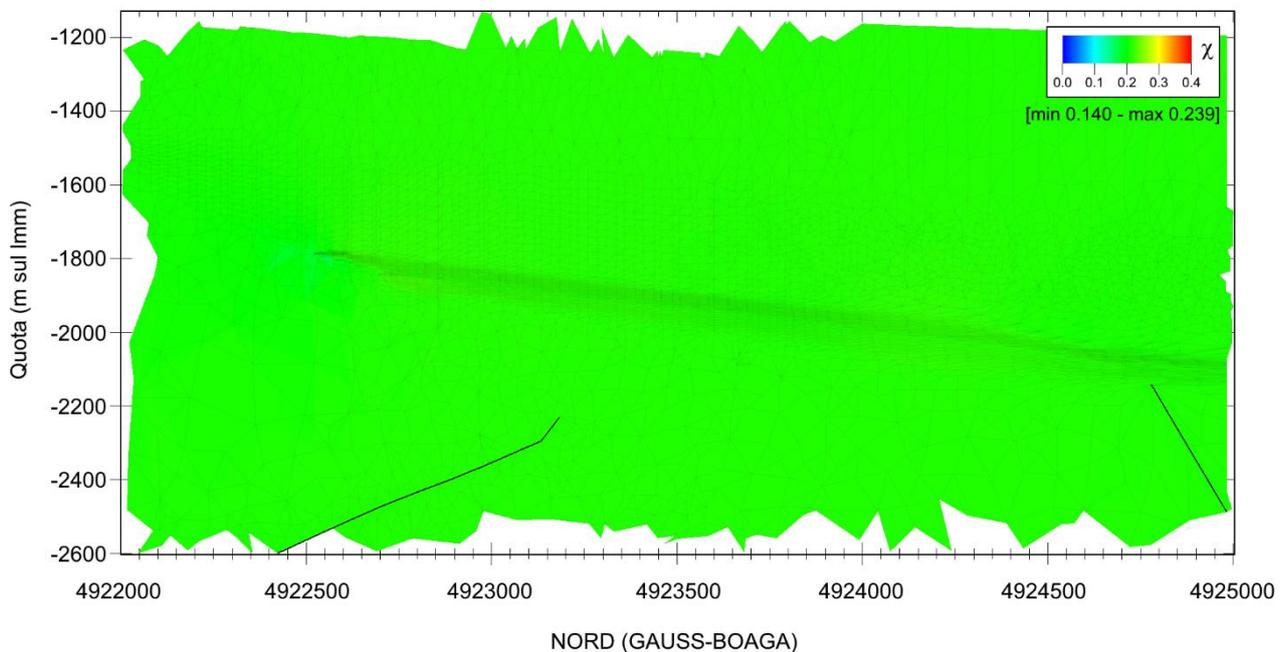


Figura B 6: Fattore di sicurezza χ alla rottura a taglio al termine della produzione primaria (1991) per lo scenario con coesione pari a 0 bar. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

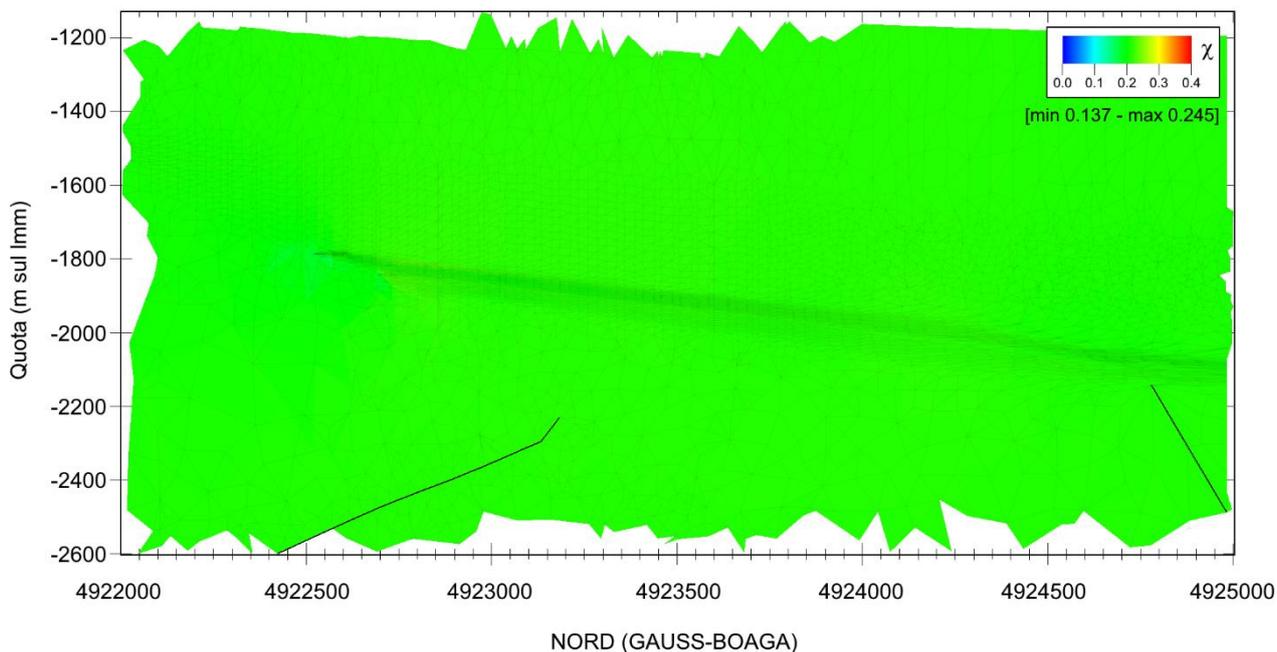


Figura B 7: Fattore di sicurezza χ alla rottura a taglio al termine della fase di stoccaggio con $P = 120\% P_i$ (ottobre 2023) per lo scenario con coesione pari a 0 bar. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

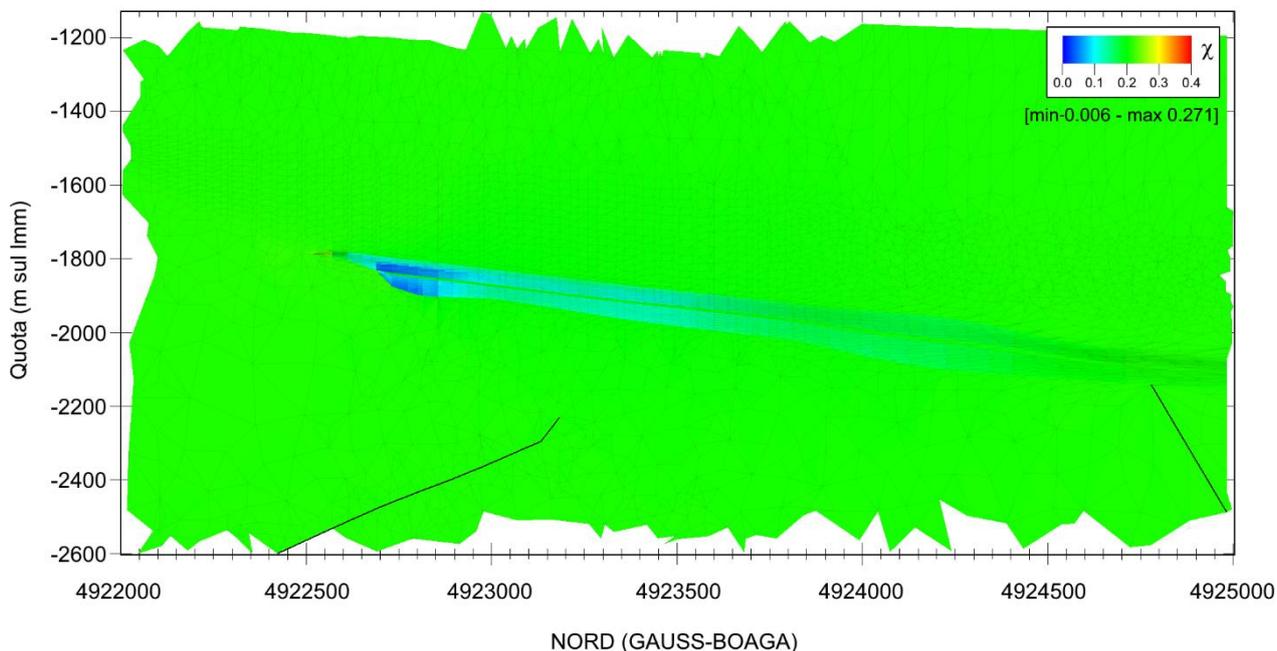


Figura B 8: Fattore di sicurezza χ alla rottura a taglio al termine della fase di erogazione con $P = 120\% P_i$ (aprile 2024) per lo scenario con coesione pari a 0 bar. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

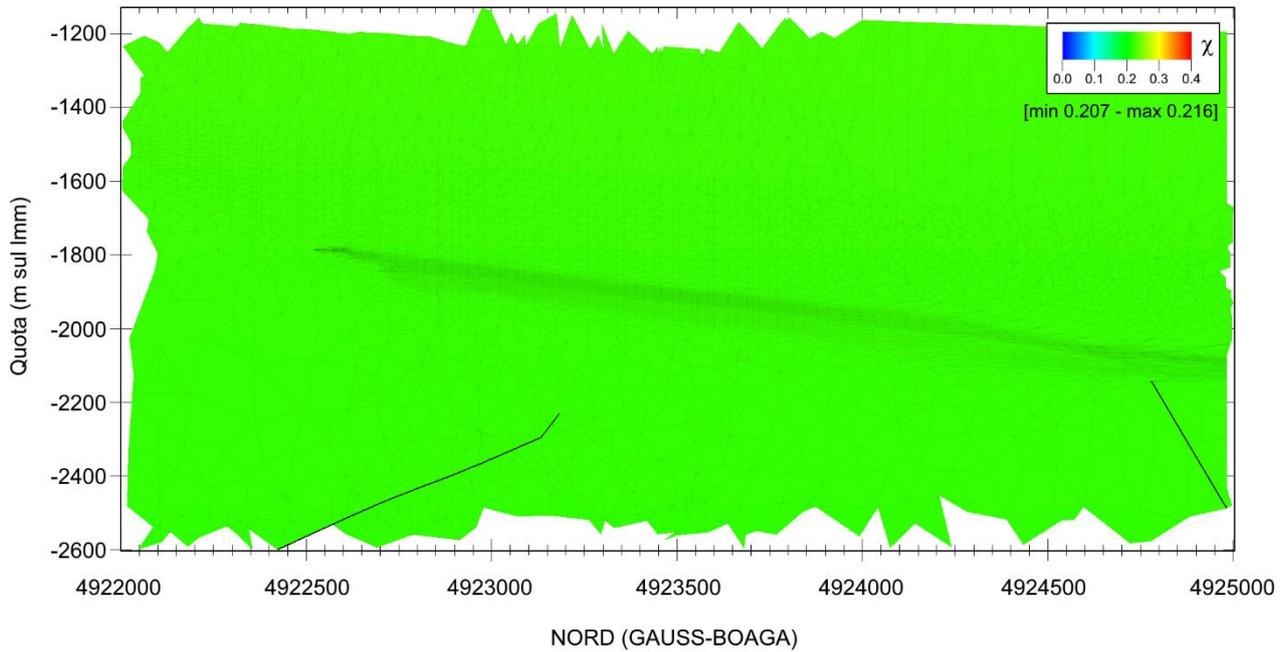


Figura B 9: Fattore di sicurezza χ alla rottura a taglio in condizioni indisturbate (1988) per lo scenario con coesione pari a 1 bar. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

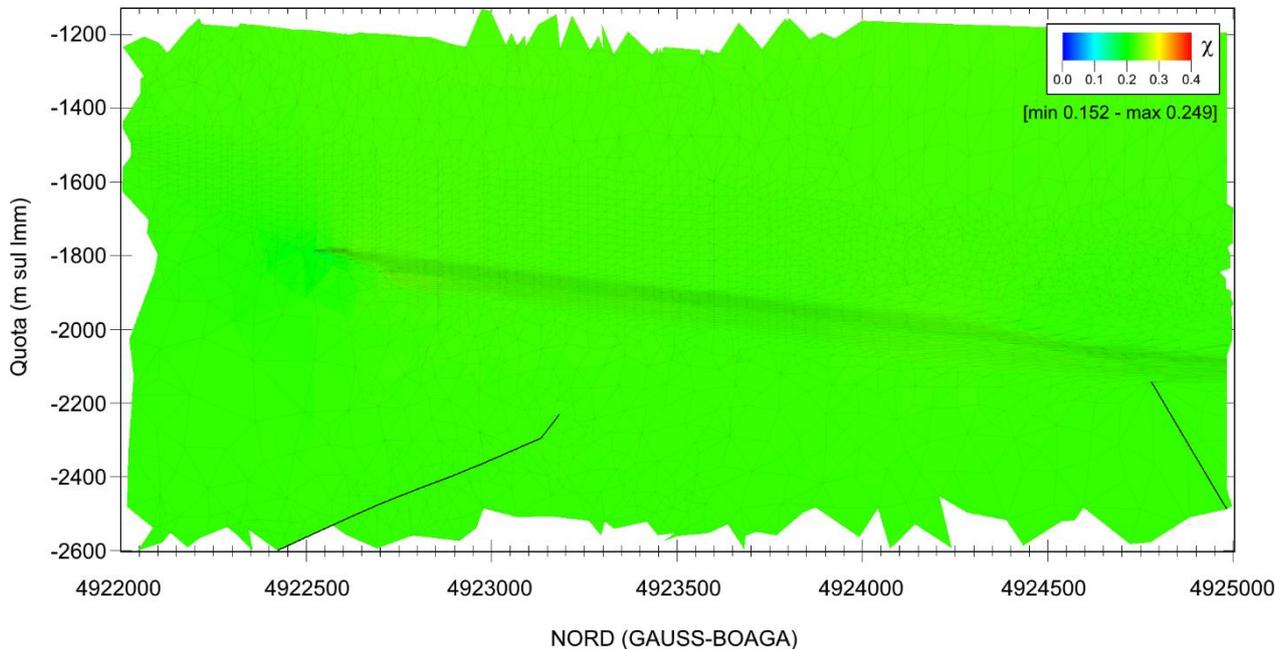


Figura B 10: Fattore di sicurezza χ alla rottura a taglio al termine della produzione primaria (1991) per lo scenario con coesione pari a 1 bar. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

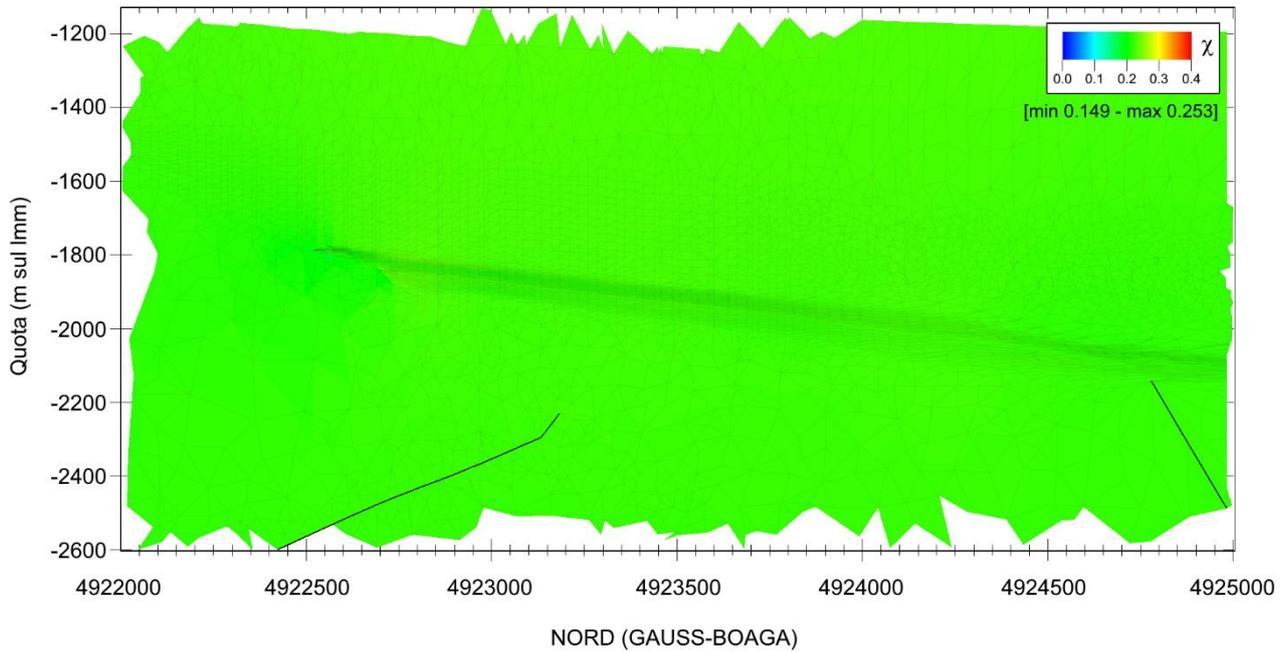


Figura B 11: Fattore di sicurezza χ alla rottura a taglio al termine della fase di stoccaggio con $P = 120\% P_i$ (ottobre 2023) per lo scenario con coesione pari a 1 bar. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

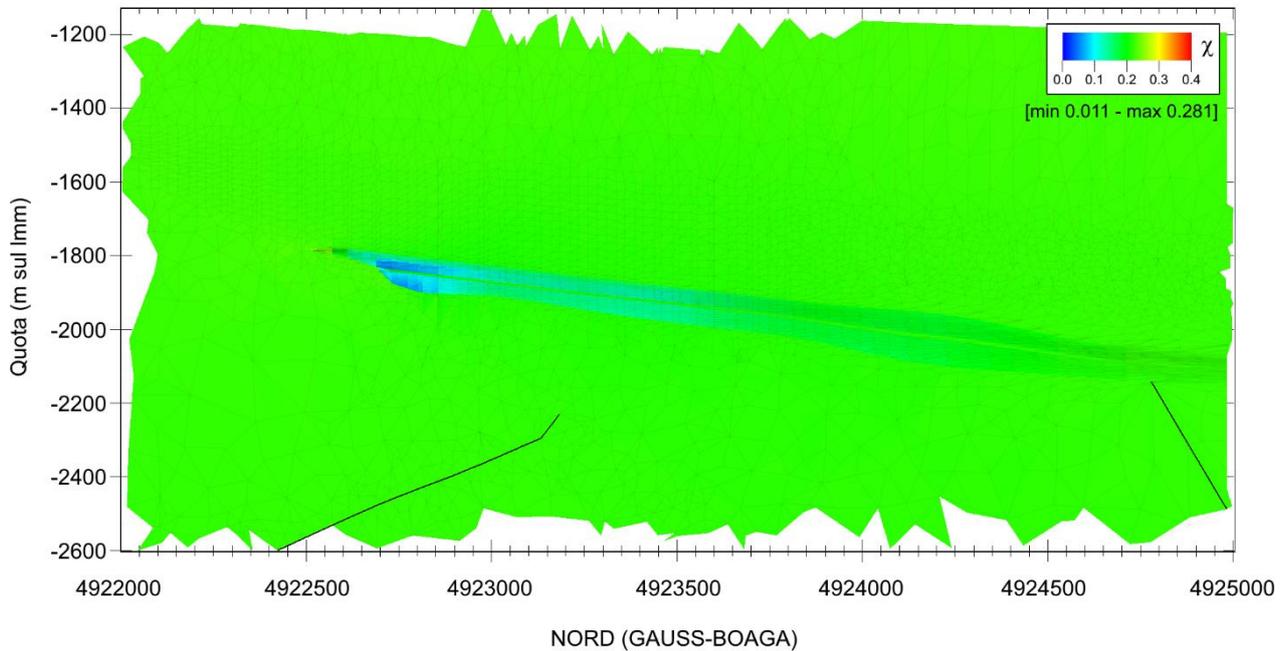


Figura B 12: Fattore di sicurezza χ alla rottura a taglio al termine della fase di erogazione con $P = 120\% P_i$ (aprile 2024) per lo scenario con coesione pari a 1 bar. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

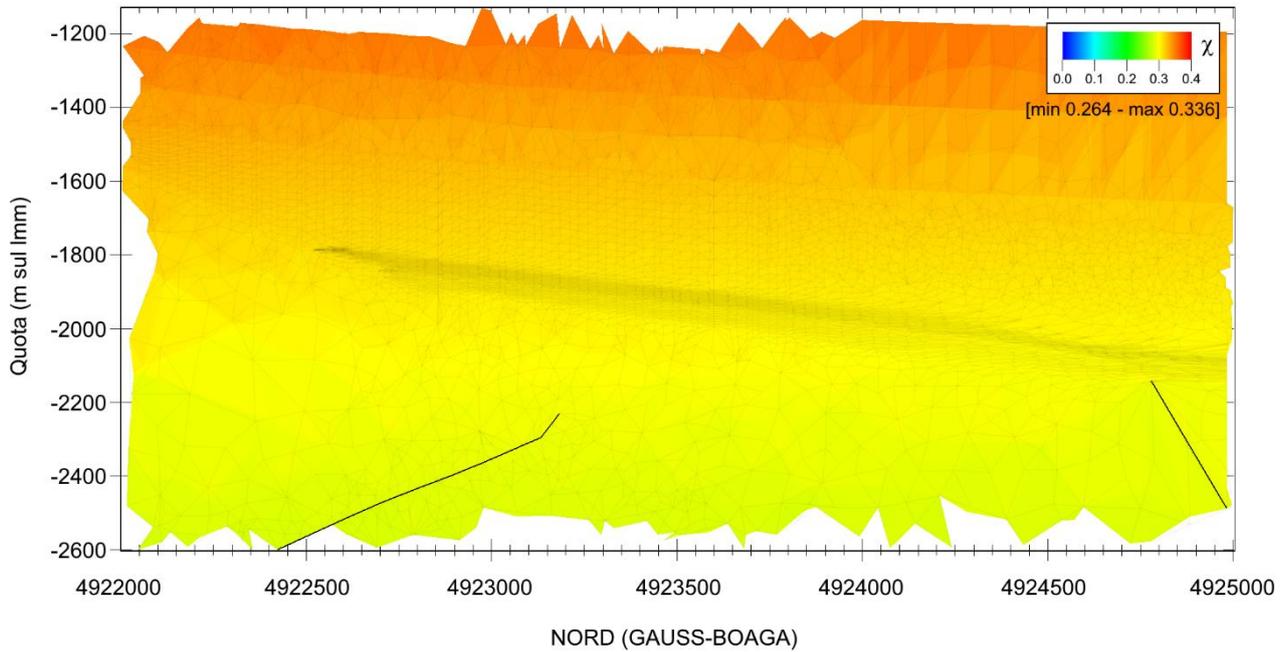


Figura B 13: Fattore di sicurezza χ alla rottura a taglio in condizioni indisturbate (1988) per lo scenario con coesione pari a 10 bar. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

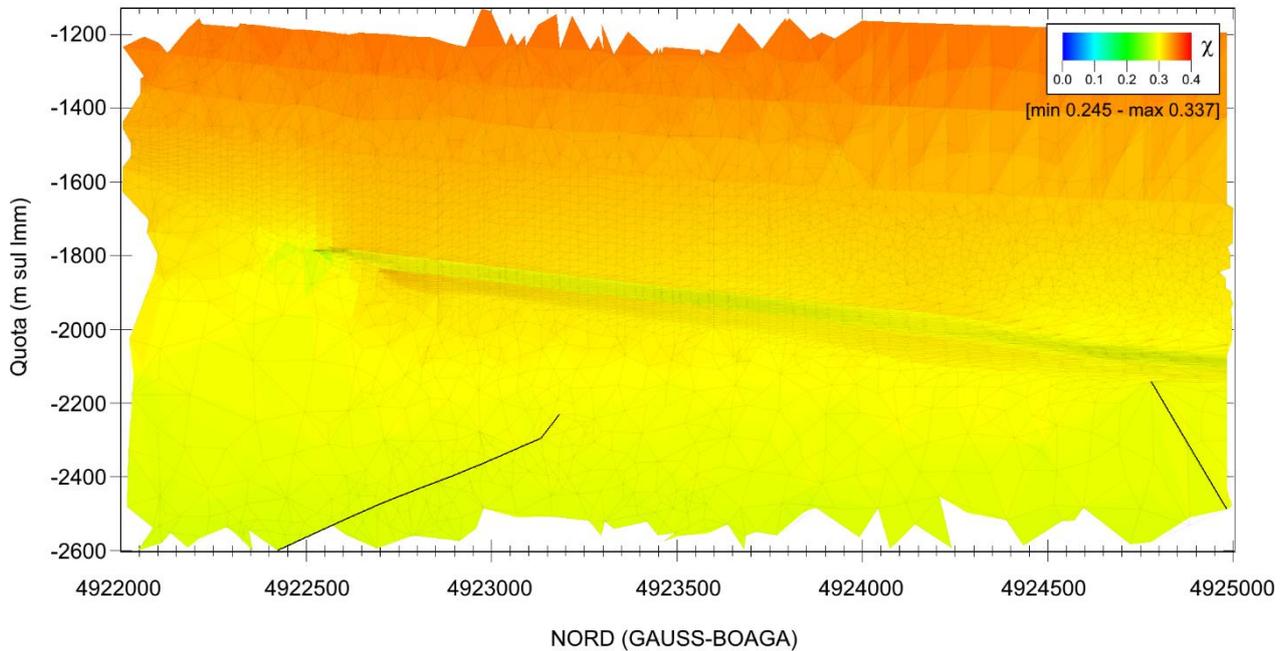


Figura B 14: Fattore di sicurezza χ alla rottura a taglio al termine della produzione primaria (1991) per lo scenario con coesione pari a 10 bar. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

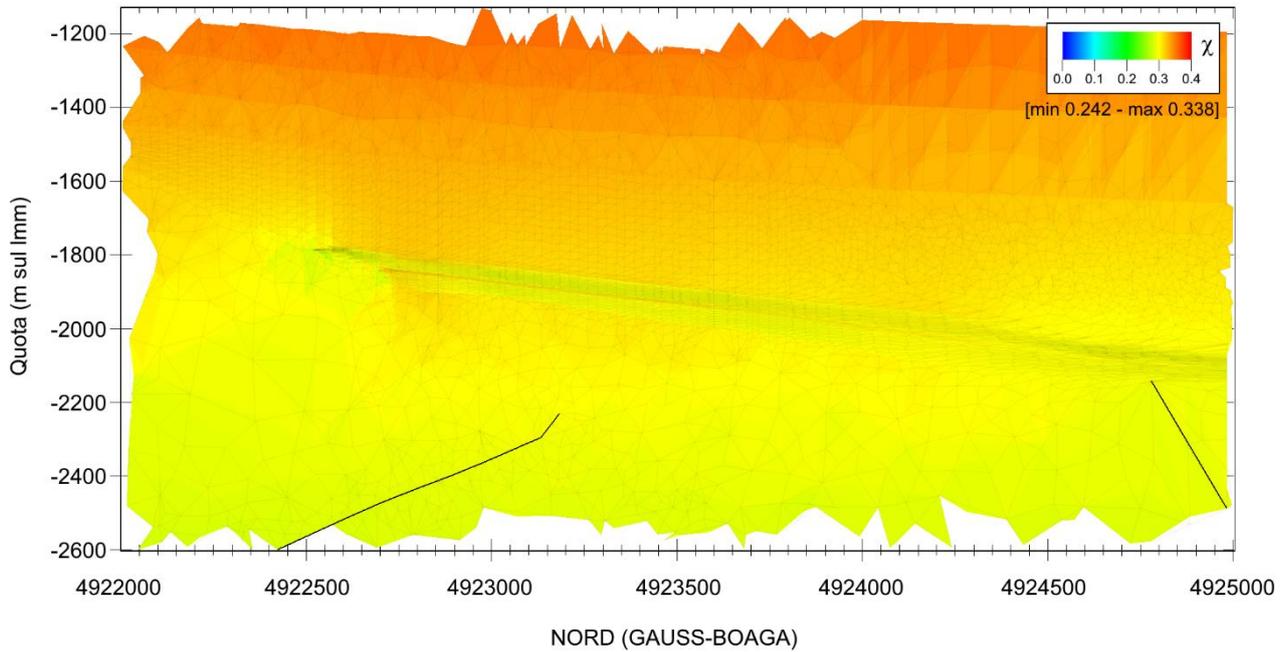


Figura B 15: Fattore di sicurezza χ alla rottura a taglio al termine della fase di stoccaggio con $P = 120\% P_i$ (ottobre 2023) per lo scenario con coesione pari a 10 bar. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.

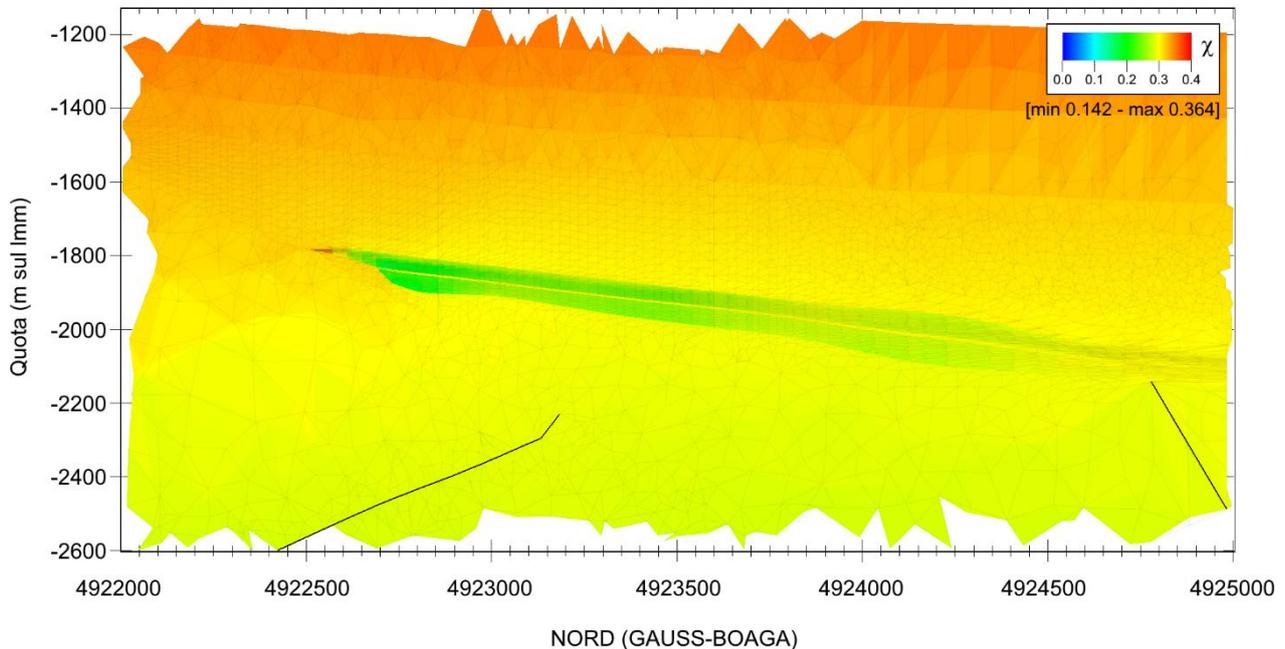


Figura B 16: Fattore di sicurezza χ alla rottura a taglio al termine della fase di erogazione con $P = 120\% P_i$ (aprile 2024) per lo scenario con coesione pari a 10 bar. In nero è evidenziata la traccia del giacimento.