



Campo di Guendalina

Modello Elasto-Plastico di Subsidenza

Management Summary

Executive Summary

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo al campo di Guendalina, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione del giacimento. Alcuni parametri caratteristici della legge costitutiva adottata per descrivere il comportamento del materiale sono stati calibrati in modo da riprodurre le variazioni altimetriche misurate dalla stazione CGPS installata sulle piattaforma di Guendalina. In particolare sono stati effettuati tre scenari geomeccanici per i quali si ottiene un valore di massima subsidenza al termine della simulazione tra i 6.2 e i 9.8 cm. La distanza minima del fenomeno di subsidenza dalla linea di costa è superiore a 40 km. L'affidabilità del modello geomeccanico è stata verificata confrontando i risultati anche con le misure di compattazione in situ rilevate dai markers radioattivi installati lungo il profilo del pozzo Guendalina 2Dir.

Data

30/11/2018



Indice

1	Introduzione	3
1.1	Il campo di Guendalina	3
1.2	Produzione di Guendalina	4
2	Dati delle stazioni CGPS di Guendalina	5
3	Modello geomeccanico agli elementi finiti	6
3.1	Approccio metodologico	6
3.2	Geometria	6
3.3	Proprietà dei materiali	7
3.3.1	Densità	7
3.3.2	Peso specifico dei fluidi saturanti	8
3.3.3	Proprietà meccaniche	8
3.4	Inizializzazione e storia di pressione	11
3.4.1	Stato tensionale iniziale	11
3.4.2	Storia di pressione	11
4	Risultati delle simulazioni numeriche	12
5	Confronto con i dati CGPS	17
6	Confronto con i dati di compattazione da marker radioattivi	19
	Bibliografia	22

1 Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo al campo di Guendalina, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione del giacimento durante la sua vita produttiva e nei 30 anni successivi alla chiusura dei pozzi.

La valutazione della subsidenza per il campo in esame è stata effettuata con un modello geomeccanico 3D ad elementi finiti (FE) costruito utilizzando il codice di calcolo Abaqus [1]; in tale modello le informazioni relative alla geometria dei giacimenti, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dagli studi fluido-dinamici di giacimento realizzati con il codice di calcolo alle differenze finite (FD) Eclipse [2].

Alcuni parametri caratteristici della legge costitutiva adottata per descrivere il comportamento del materiale sono stati calibrati in modo da riprodurre le variazioni altimetriche misurate dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma di Guendalina (§5).

L'affidabilità del modello geomeccanico è stata verificata confrontando i risultati anche con le misure di compattazione in situ rilevate dai markers radioattivi installati lungo il profilo del pozzo Guendalina 2Dir e registrate nei mesi di giugno 2011 e luglio 2012 (§6).

1.1 Il campo di Guendalina

Il campo di Guendalina è posto nell'offshore Adriatico a circa 45 km dalla costa dell'Emilia-Romagna (Figura 1), con una profondità del fondale marino di circa 42 m.

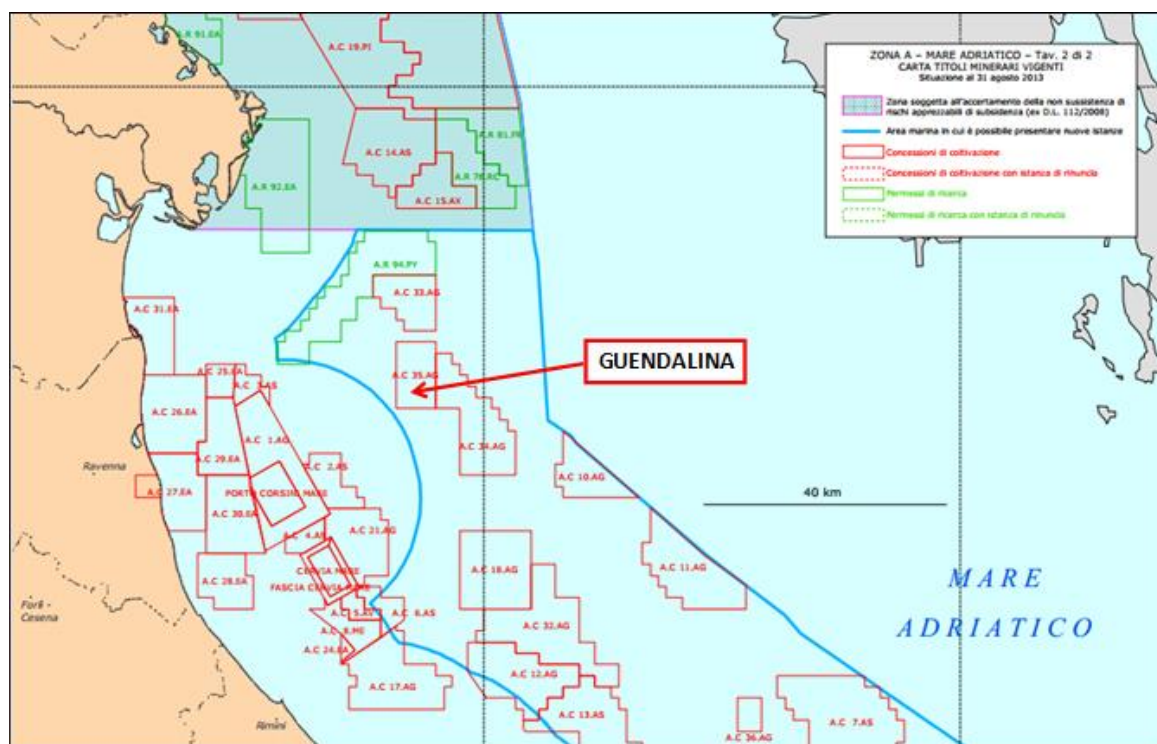


Figura 1 – Ubicazione del campo di Guendalina.

Il giacimento è stato scoperto nel 1998 mediante la perforazione del pozzo esplorativo Guendalina 1. Analogamente a diversi altri giacimenti localizzati in Adriatico, si tratta di un campo costituito da una successione di livelli mineralizzati, idraulicamente indipendenti, ciascuno dei quali è collegato a un acquifero laterale.

1.2 Produzione di Guendalina

La produzione del giacimento di Guendalina è iniziata nell'ottobre del 2011 attraverso i pozzi produttori Guendalina 2dir e Guendalina 3. Il pozzo di più recente perforazione è il pozzo Guendalina-2 Dir A, perforato nel 2015 in seguito alla chiusura del pozzo Guendalina-2 Dir avvenuta per ingresso di sabbia in pozzo. La string lunga del pozzo Guendalina-2 Dir A viene usata anche per il monitoraggio della subsidenza attraverso markers radioattivi.

Il modello fluido-dinamico Eclipse del campo di Guendalina [3] risulta aggiornato a giugno 2018, con una produzione cumulativa di gas pari a 735 MSm³. A partire da fine giugno 2018, sono stati considerati quattro differenti scenari di forecast, per i quali è previsto che la produzione termini nel 2022. I casi simulati sono i seguenti:

- Caso Do-Nothing (DN): la configurazione delle quattro string attualmente in produzione (Guendalina 3 corta e lunga, Guendalina 2DirA corta e lunga) rimane invariata;
- Caso Do Nothing + livello PL3-J (DN_J): apertura a dicembre 2018 del selettivo sulla string lunga di Guendalina 3 con produzione del livello PL3_J in commingle con il livello PL3-J3;
- Caso Do Nothing + lower sea line pressure (DN_MINP): riduzione della pressione di network a gennaio 2019 dagli attuali 20 bar a 8 bar.
- Caso Do Nothing + livello PL3-J + lower sea line pressure (DN_J_MINP): apertura a dicembre 2018 del selettivo sulla string lunga di Guendalina 3 con produzione del livello PL3_J in commingle con il livello PL3-J3 e riduzione della pressione di network a gennaio 2019 dagli attuali 20 bar a 8 bar.

Per ciascun caso di produzione sono stati simulati tre scenari di compressibilità dei sedimenti: uno scenario di compressibilità Upper e due ulteriori scenari denominati rispettivamente GPS e 2Upper, calibrati affinché i risultati del modello geomeccanico riproducessero le misure di spostamento registrate dalla stazione CGPS ubicata sulla piattaforma di Guendalina. In Tabella 1 sono riportate le produzioni cumulative alla fine della fase di forecast rispetto agli scenari di produzione e di compressibilità considerati. In particolare, per gli scenari Upper e 2Upper, si riportano i soli risultati relativi allo scenario di forecast (DN_J_MINP) più conservativo in termini di subsidenza mentre per lo scenario GPS, si riportano i risultati relativi a tutti gli scenari di forecast. Analogamente verrà fatto per i risultati in termini di subsidenza §4.

Tabella 1 – Produzioni cumulative di gas alla fine della fase di forecast rispetto agli scenari di produzione e di compressibilità considerati.

Scenario di produzione	Scenario di compressibilità	Produzione cumulativa di gas @ 2022
		[Msm ³]
DN	GPS	902
DN_MINP	GPS	944
DN_J	GPS	930
DN_J_MINP	GPS	974
DN_J_MINP	Upper	972
DN_J_MINP	2Upper	977

2 Dati della stazione CGPS di Guendalina

La piattaforma di Guendalina risulta strumentata con una stazione CGPS per il monitoraggio continuo degli spostamenti.

La registrazione delle misure è iniziata a settembre 2011 in corrispondenza delle coordinate LAT=44°33'58.8947", LON=12°52'53.0542". Il periodo di osservazione copre un intervallo temporale di circa 7 anni e fornisce un valore di velocità di subsidenza medio pari a circa 6.4 mm/anno (Figura 2).

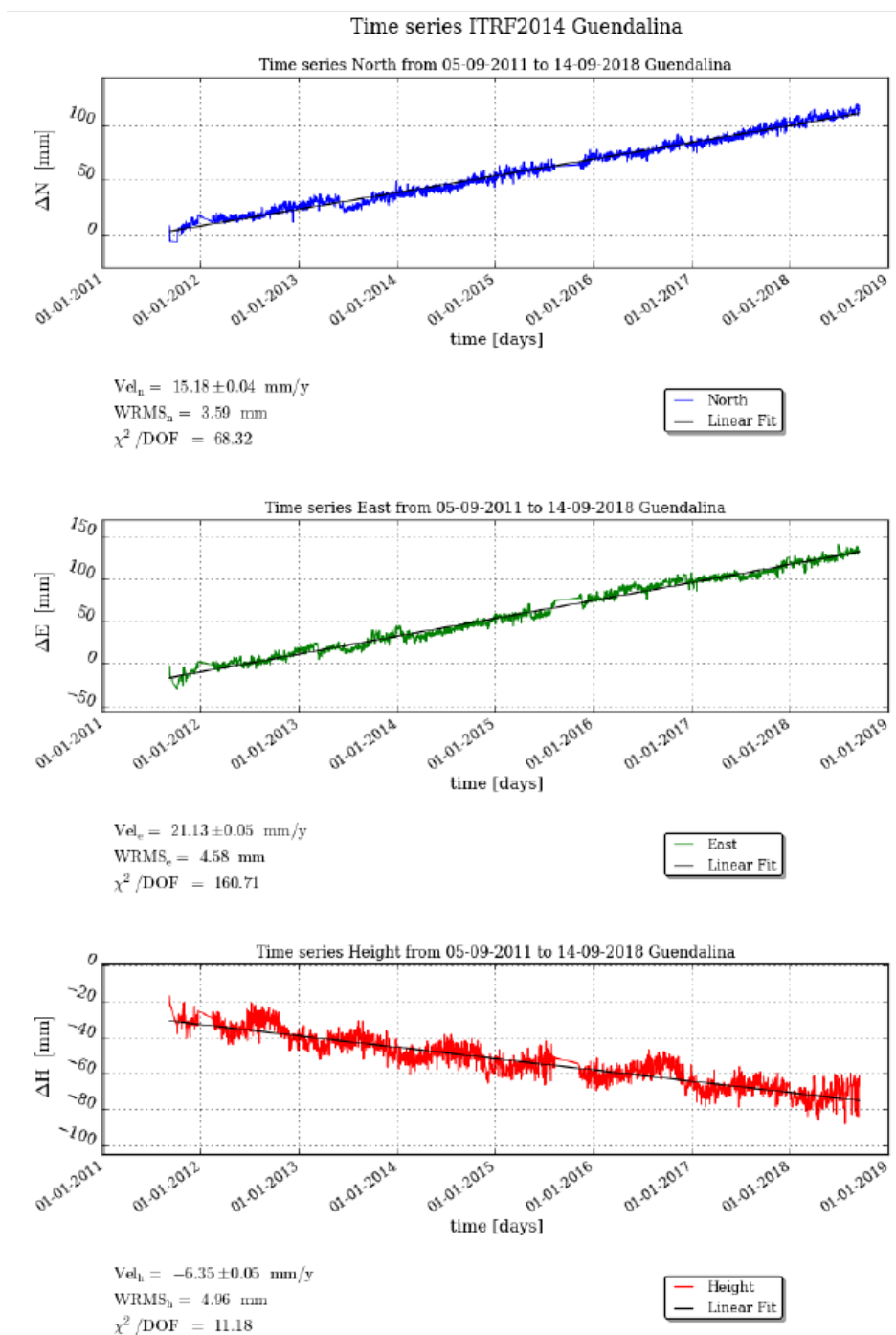


Figura 2 – Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Guendalina, aggiornate al 14/09/2018.

3 Modello geomeccanico agli elementi finiti

Lo studio geomeccanico è stato svolto con un modello numerico 3D agli elementi finiti (FE), costruito utilizzando il codice di calcolo Abaqus [1] (denominato modello Abaqus nel seguito).

3.1 Approccio metodologico

La costruzione del modello Abaqus è stata basata sulle seguenti informazioni:

- mappe geologiche dei livelli interessati dal giacimento, estese in misura tale da descrivere interamente non solo le zone mineralizzate ma anche gli acquiferi laterali idraulicamente connessi agli strati produttivi;
- dettagliata descrizione di geometria e geologia dei livelli mineralizzati e degli acquiferi ad essi connessi idraulicamente, riprodotti con accuratezza dalla maglia di calcolo numerica;
- distribuzione di pressione nei livelli mineralizzati e negli acquiferi ad essi connessi idraulicamente.
- proprietà meccaniche della roccia descritte con una legge costitutiva del tipo Cam Clay Modificato, che tiene conto non solo della variazione della comprimibilità uniassiale (c_m) con lo stress efficace, ma modella accuratamente anche gli eventuali fenomeni di espansione dei sedimenti soggetti a ripressurizzazione;
- calcolo della compattazione dei livelli mineralizzati e degli acquiferi connessi basato sullo spessore *gross* degli stessi e sulla più aggiornata stima della comprimibilità uniassiale, ottenuta da misure in situ effettuate nei pozzi equipaggiati con markers nell'offshore Adriatico, ulteriormente calibrata sui dati di monitoraggio nel pozzo Guendalina 2dir e sulle misure da CGPS disponibili.

È importante precisare che sia le simulazioni fluido-dinamiche sia le simulazioni geomeccaniche sono state prolungate fino al 2055. Infatti, con le prime si è voluto valutare la ripressurizzazione del giacimento dopo la fine della produzione per effetto all'acquifero circostante, mentre con le seconde l'evoluzione della subsidenza nei 30 anni successivi alla chiusura dei pozzi.

3.2 Geometria

Il modello Eclipse è composto da 162x170x27 celle nelle direzioni I, J e K rispettivamente, per un totale di 743580 celle, di cui circa 500000 attive, per un'estensione areale di circa 16x16 km².

Per non risentire dell'influenza delle condizioni al contorno imposte ai bordi, il modello geomeccanico è stato esteso lateralmente (*sideburden*) fino a ricoprire un'area di circa 23x23 km². Data l'estensione risultante, è stato necessario effettuare un processo di upscaling nella direzione orizzontale per limitare il numero dei gradi di libertà, unendo tra loro un differente numero di celle a seconda della distanza dal centro del giacimento.

La griglia originale, inoltre, è stata estesa verticalmente in modo da comprendere la regione che va dal fondo del mare (42 metri) fino ad una profondità di 8000 m. Il modello è stato diviso in 10 livelli dal top del giacimento fino al fondo del mare (*overburden*) e in 10 livelli dal bottom del giacimento fino alla base (*underburden*), come mostrato in Figura 3.

La griglia FE risulta così costituita da 815121 elementi e 845184 nodi per un totale di quasi tre milioni di variabili.

Le condizioni al contorno assegnate al modello sono di spostamento nullo alla base della griglia e spostamento orizzontale impedito lateralmente.

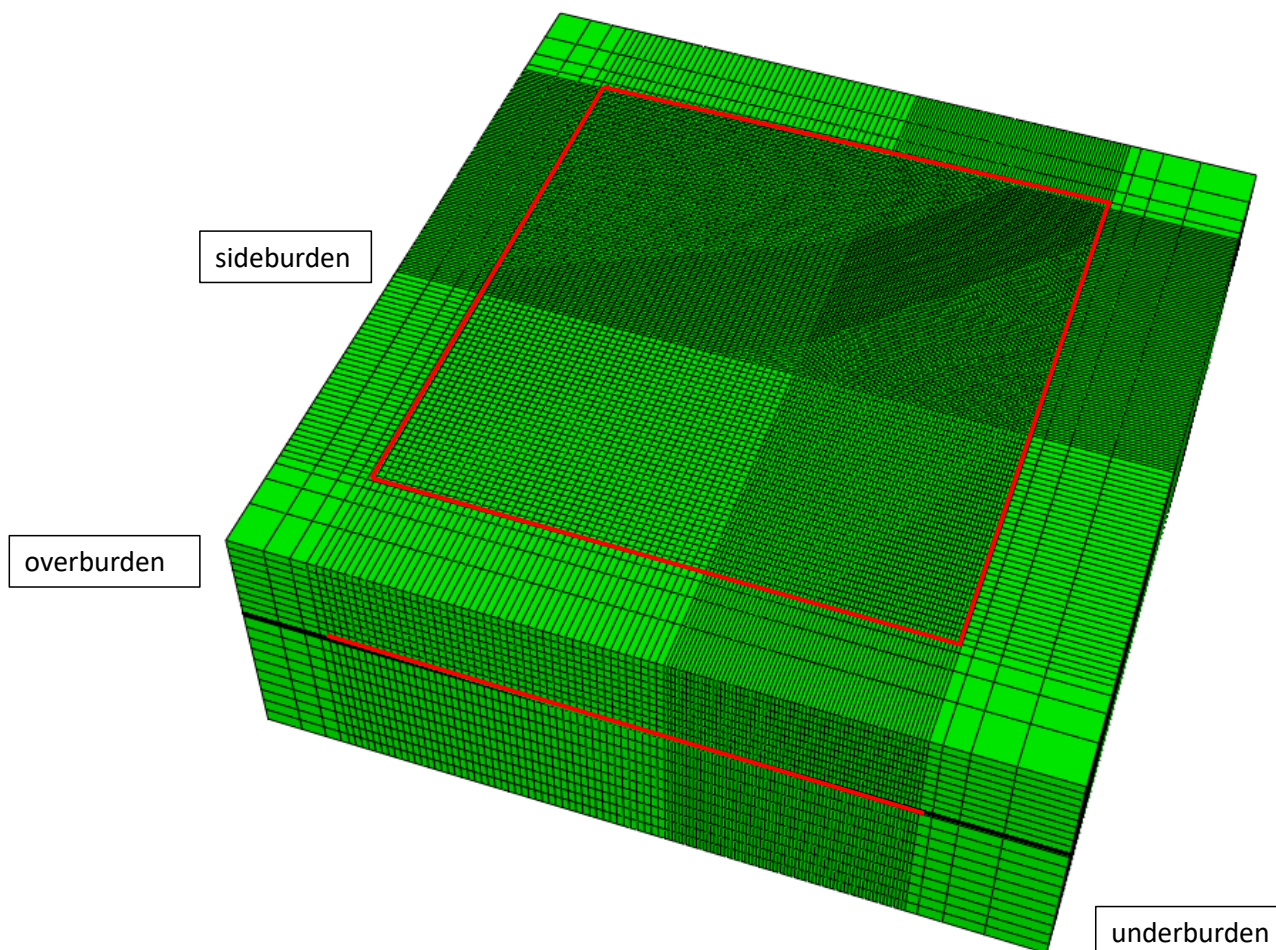


Figura 3 – Confronto tra l'estensione del modello geomeccanico e del modello fluido-dinamico (riquadro rosso).

3.3 Proprietà dei materiali

3.3.1 Densità

Per ricostruire il profilo di densità ρ sono stati utilizzati i density log e i sonic log acquisiti nei pozzi Guendalina 1 (267-3106 m TVDSS), Guendalina 1dir (2783-3113 m TVDSS), Guendalina 2dir (1366-3188 m TVDSS) e Guendalina 3 (1266-3133 m TVDSS). Per praticità, tale profilo può essere rappresentato attraverso la sua regressione effettuata mediante la seguente funzione:

$$\rho(z) = 1.4111 \cdot (z - z_{fm})^{0.0622} \quad (1)$$

con z misurata in metri TVDSS (True Vertical Depth Sub Sea) e ρ in g/cm^3 , mentre la profondità del fondale marino z_{fm} è pari a 42 m. Per la densità dell'acqua marina è stato assunto il valore di

1030.0 kg/m³. Il profilo di densità così ottenuto è stato integrato per ottenere un profilo di sforzo totale verticale σ_v :

$$\sigma_v(z) = 0.130323 (z - z_{fm})^{1.0622} + 10^{-5} \rho_w g z_{fm} \quad (2)$$

dove σ_v è lo sforzo totale verticale (in bar), ρ_w è la densità dell'acqua e g è l'accelerazione di gravità assunta pari a 9.807 m/sec².

3.3.2 Peso specifico dei fluidi saturanti

Viene fornito al modello Abaqus il valore del peso specifico dei fluidi saturanti. Per ogni regione idromeccanica il valore di γ_f (relativo al gas o all'acqua) è stato considerato costante. Esso è stato determinato partendo dalla profondità del contatto gas-acqua e dalla distribuzione iniziale delle pressioni calcolata dal modello Eclipse.

3.3.3 Proprietà meccaniche

Il parametro geomeccanico chiave nelle simulazioni di subsidenza è la compressibilità uniassiale c_m del materiale. E' oggi comunemente accettato [4] che i valori più attendibili di questo parametro, generalmente funzione non lineare dello stress efficace, siano quelli ottenuti dalle misure *in situ* tramite markers.

Si è, quindi, utilizzata per la stima della compressibilità una correlazione regionale ricavata da uno studio statistico basato sui valori di compressibilità calcolati su campi dell'Adriatico dotati di marker radioattivi. Tale correlazione tra c_m e tensione verticale efficace σ'_v è stata proposta da Hueckel *et al.* [5] ed è riportata in Figura 4 ove sono rappresentate la miglior stima

$$c_m = 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \quad (3)$$

ed il quantile superiore al 97.5%. Nella relazione (3) σ'_v è la tensione efficace verticale espressa in bar e c_m è espresso in bar⁻¹. Inoltre in Figura 4 la relazione di Hueckel *et al.* [5] è messa a confronto con quella di Baù *et al.* [4]; si può osservare come le due risultino analoghe.

Si segnala che studi successivi [6] hanno evidenziato come, sia la correlazione di Baù *et al.* [4] sia quella di Hueckel *et al.* [5], tendano a sottostimare la compressibilità uniassiale dei sedimenti posti a meno di 1500 m di profondità. Per tener conto di ciò, ovvero per profondità inferiori a 1500 m, Ferronato *et al.* [6] hanno proposto che, in via cautelativa, il valore di c_m ottenuto dalle precedenti correlazioni sia moltiplicato per 2. Si ottiene così la legge relativa al "middle scenario":

$$c_m = \begin{cases} 2 \cdot 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} & z < 1500m \\ 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} & z \geq 1500m \end{cases} \quad (4)$$

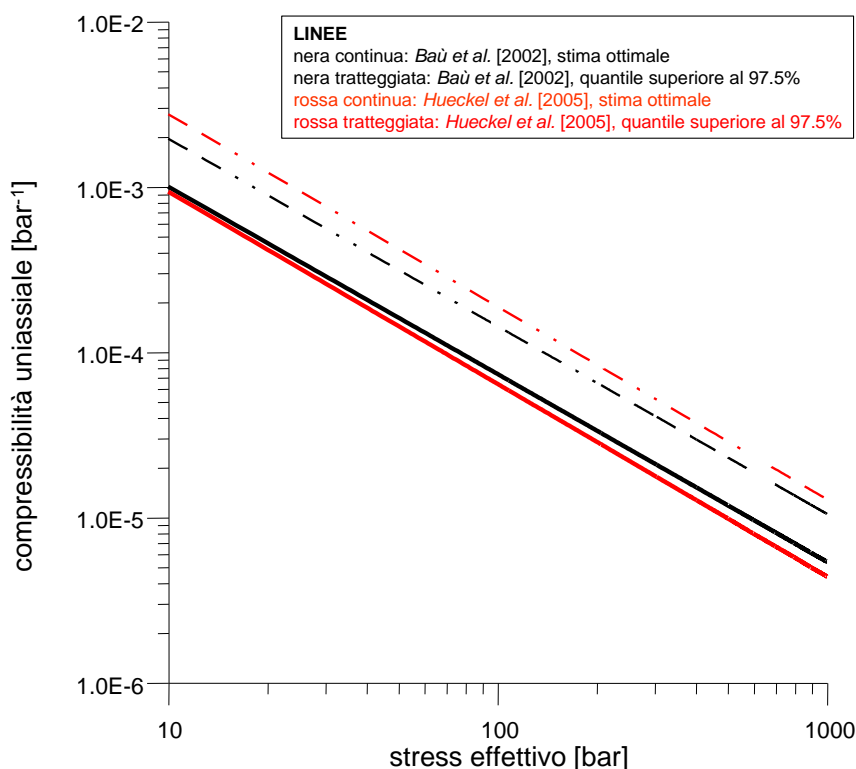


Figura 4 – Correlazione tra la compressibilità uniaassiale c_m e lo stress efficace *in situ*, derivata da misure su marker nei campi a gas del bacino nord Adriatico (da [5]).

Al fine di tener conto del grado di incertezza dei dati utilizzati, è possibile definire differenti scenari di compressibilità: il più probabile, chiamato “*middle scenario*” e descritto dalla relazione (4); il quantile superiore o “*upper scenario*” (5); il quantile inferiore o “*lower scenario*” (6):

$$c_m^{upper} = 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \cdot 10^{0.467} \quad (5)$$

$$c_m^{lower} = 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \cdot 10^{-0.467} \quad (6)$$

Partendo dalla legge (6), attraverso la quale i risultati del modello geomeccanico più si avvicinavano alle misure di spostamento registrate, sono stati definiti altri due scenari in cui si è calibrata la legge di compressibilità in modo da riprodurre i dati registrati dalla stazione CGPS (§5) ubicata sulla piattaforma di Guendalina:

$$c_m^{gps} = 0.01367 \cdot 1.6 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \cdot 10^{0.467} \quad (7)$$

$$c_m^{2Upper} = 0.01367 \cdot 2 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \cdot 10^{0.467} \quad (8)$$

Le leggi (5), (7) e (8) sono quindi state utilizzate per la caratterizzazione dei materiali nella regione del giacimento.

I valori di tensione verticale efficace necessari per le stime di c_m sono stati calcolati tramite:

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad (9)$$

dove σ_v è la tensione verticale totale e p la pressione dei pori. Quest'ultima è stata estratta dallo studio fluido-dinamico alle profondità di riferimento, mentre σ_v è stata calcolata a partire dalla densità del materiale come riportato nel paragrafo 3.3.1.

In Tabella 2 sono riportati i valori di profondità media, tensione verticale totale σ_v , pressione dei pori iniziale p , tensione verticale efficace σ'_v , coefficiente di Poisson ν , compressibilità uniaassiale c_m , adottati livello per livello nei differenti scenari analizzati.

Tabella 2 – Proprietà assegnate, regione per regione, nei diversi scenari analizzati.

Layer	z media [m]	σ_w [bar]	p [bar]	σ'_v [bar]	ν -	c_m "upper" [bar ⁻¹]	c_m "GPS" [bar ⁻¹]	c_m "2upper" [bar ⁻¹]
Overburden 1	192.00	30.94	19.40	11.54	0.3	2.32E-03	3.72E-03	4.65E-03
Overburden 2	492.00	90.00	49.71	40.29	0.3	5.42E-04	8.67E-04	1.08E-03
Overburden 3	792.00	151.78	80.03	71.76	0.3	2.77E-04	4.43E-04	5.53E-04
Overburden 4	1092.00	215.17	110.34	104.83	0.3	1.78E-04	2.85E-04	3.56E-04
Overburden 5	1392.00	279.71	140.65	139.05	0.3	1.28E-04	2.05E-04	2.56E-04
Overburden 6	1692.00	345.15	170.96	174.18	0.3	9.85E-05	1.58E-04	1.97E-04
Overburden 7	1992.00	411.34	201.28	210.06	0.3	7.92E-05	1.27E-04	1.58E-04
Overburden 8	2292.00	478.17	231.59	246.58	0.3	6.57E-05	1.05E-04	1.31E-04
Overburden 9	2592.00	545.56	261.90	283.65	0.3	5.58E-05	8.93E-05	1.12E-04
Overburden 10	2892.00	613.44	292.22	321.22	0.3	4.83E-05	7.73E-05	9.66E-05
Reservoir 1	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	4.94E-05	7.90E-05	9.88E-05
Reservoir 2	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	4.94E-05	7.90E-05	9.88E-05
Reservoir 3	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	4.94E-05	7.90E-05	9.88E-05
Reservoir 4	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	4.94E-05	7.90E-05	9.88E-05
Reservoir 5	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	4.94E-05	7.90E-05	9.88E-05
Reservoir 6	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	4.94E-05	7.90E-05	9.88E-05
Reservoir 7	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	4.94E-05	7.90E-05	9.88E-05
Reservoir 8	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	4.94E-05	7.90E-05	9.88E-05
Reservoir 9	3076.30	655.37	338.70	316.67	0.3	4.91E-05	7.86E-05	9.82E-05
Reservoir 10	3076.30	655.37	338.70	316.67	0.3	4.91E-05	7.86E-05	9.82E-05
Reservoir 11	3076.30	655.37	338.70	316.67	0.3	4.91E-05	7.86E-05	9.82E-05
Reservoir 12	3076.30	655.37	338.70	316.67	0.3	4.91E-05	7.86E-05	9.82E-05
Reservoir 13	3086.70	657.74	340.30	317.44	0.3	4.90E-05	7.84E-05	9.80E-05
Reservoir 14	3086.70	657.74	340.30	317.44	0.3	4.90E-05	7.84E-05	9.80E-05
Reservoir 15	3097.70	660.25	341.24	319.01	0.3	4.87E-05	7.79E-05	9.74E-05
Reservoir 16	3097.70	660.25	341.24	319.01	0.3	4.87E-05	7.79E-05	9.74E-05
Reservoir 17	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	4.83E-05	7.73E-05	9.66E-05
Reservoir 18	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	4.83E-05	7.73E-05	9.66E-05
Reservoir 19	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	4.83E-05	7.73E-05	9.66E-05
Reservoir 20	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	4.83E-05	7.73E-05	9.66E-05
Reservoir 21	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	4.83E-05	7.73E-05	9.66E-05
Reservoir 22	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	4.83E-05	7.73E-05	9.66E-05
Reservoir 23	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	4.83E-05	7.73E-05	9.66E-05
Reservoir 24	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	4.83E-05	7.73E-05	9.66E-05
Reservoir 25	3150.80	672.36	347.00	325.36	0.3	4.76E-05	7.61E-05	9.52E-05
Reservoir 26	3150.80	672.36	347.00	325.36	0.3	4.76E-05	7.61E-05	9.52E-05
Reservoir 27	3150.80	672.36	347.00	325.36	0.3	4.76E-05	7.61E-05	9.52E-05
Underburden 1	3440.00	738.57	347.59	390.98	0.3	3.84E-05	6.15E-05	7.69E-05
Underburden 2	3920.00	849.21	396.09	453.12	0.3	3.24E-05	5.18E-05	6.47E-05
Underburden 3	4400.00	960.72	444.59	516.13	0.3	2.78E-05	4.45E-05	5.56E-05
Underburden 4	4880.00	1072.99	493.09	579.90	0.3	2.43E-05	3.89E-05	4.86E-05
Underburden 5	5360.00	1185.95	541.59	644.36	0.3	2.15E-05	3.44E-05	4.30E-05
Underburden 6	5840.00	1299.56	590.09	709.47	0.3	1.92E-05	3.07E-05	3.84E-05
Underburden 7	6320.00	1413.75	638.59	775.16	0.3	1.73E-05	2.77E-05	3.46E-05
Underburden 8	6800.00	1528.49	687.09	841.39	0.3	1.57E-05	2.52E-05	3.15E-05
Underburden 9	7280.00	1643.73	735.59	908.14	0.3	1.44E-05	2.30E-05	2.88E-05
Underburden 10	7760.00	1759.45	784.09	975.36	0.3	1.33E-05	2.12E-05	2.65E-05

3.4 Inizializzazione e storia di pressione

3.4.1 Stato tensionale iniziale

Per il campo di Guendalina lo sforzo totale verticale è stato calcolato dal gradiente di overburden definito a partire dai density log come descritto nel paragrafo 3.3.1. Lo sforzo orizzontale σ'_h è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico definite come:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (10)$$

dove K_0 rappresenta il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.429 coerentemente con il coefficiente di Poisson adottato.

3.4.2 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale del campo di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dai modelli fluido-dinamici Eclipse, è stata imposta come condizione forzante nei nodi del modello FE corrispondenti ai livelli dei giacimenti e degli acquiferi connessi.

Le pressioni sono state importate con passo temporale annuale fino al 2025 (nonostante la chiusura dei pozzi sia nel 2022) e poi con passo temporale quinquennale fino alla fine della simulazione (gennaio 2055), per un numero totale di step temporali della simulazione geomeccanica pari a 22.

4 Risultati delle simulazioni numeriche

Il presente paragrafo riporta i risultati delle previsioni di subsidenza per i sei scenari considerati. In particolare, in Tabella 3 sono riportati i valori di massima subsidenza e l'estensione del fenomeno (calcolata come massima distanza del punto di massima subsidenza dalla linea di iso-subsidenza dei 2 cm), ad alcune date significative, cioè al termine della produzione (2022) e alla fine della simulazione (2055). Si ricorda infatti che le simulazioni sono state protrate fino al 2055 (a pozzi chiusi) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione.

Tabella 3 – Risultati finali: massima subsidenza ed estensione del fenomeno per gli scenari considerati.

Scenario di produzione	Scenario di compressibilità	Fine produzione (2022)		Fine simulazione (2055)	
		subsidenza (cm)	estensione (km)	subsidenza (cm)	estensione (km)
DN	GPS	-6.1	2	-7.9	3
DN_MINP	GPS	-6.2	2	-8.2	3
DN_J	GPS	-6.2	2	-8.2	3
DN_J_MINP	Upper	-4.7	2	-6.2	3.5
DN_J_MINP	GPS	-6.4	2	-8.5	3.5
DN_J_MINP	2Upper	-7.4	3	-9.8	4

Il punto di massima subsidenza risulta localizzato in $X=2350896.42$ $Y=4936371.03$ per lo scenario GPS, in $X=2350796.92$ $Y=4936271.44$ per lo scenario Upper e in $X=2350995.93$ $Y=4936470.61$ per lo scenario 2Upper. La Figura 5 mostra l'evoluzione nel tempo della subsidenza in questi punti di massimo per gli scenari analizzati.

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza previsto è pari a 9.8 cm per lo scenario 2Upper e scenario di produzione DN_J_MINP che risulta il più pessimistico tra quelli analizzati. Tale valore viene raggiunto al termine della simulazione;
- il valore di massima subsidenza per lo scenario GPS risulta pari a 8.5 cm, raggiunto al termine della simulazione per lo scenario di produzione DN_J_MINP;
- il valore di massima subsidenza per lo scenario Upper risulta pari a 6.2 cm, raggiunto al termine della simulazione per lo scenario di produzione DN_J_MINP;
- al termine della produzione per lo scenario 2Upper relativo allo scenario di produzione DN_J_MINP, la massima estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm risulta pari a circa 3 km (Figura 6). Tale distanza si assesta a 4 km a fine simulazione (Figura 7); le curve di iso-subsidenza per lo scenario GPS e per lo scenario Upper relative allo scenario di produzione DN_J_MINP al termine della produzione sono riportate rispettivamente in Figura 8 e Figura 10. Al termine della simulazione in Figura 9 e Figura 11;

- l'evoluzione nel tempo della linea di iso-subsidenza dei 2 cm per lo scenario 2Upper relativo allo scenario di produzione DN_J_MINP è riportata in Figura 12;
- il fenomeno si esaurisce a oltre 40 km dalla linea di costa per tutti gli scenari considerati.

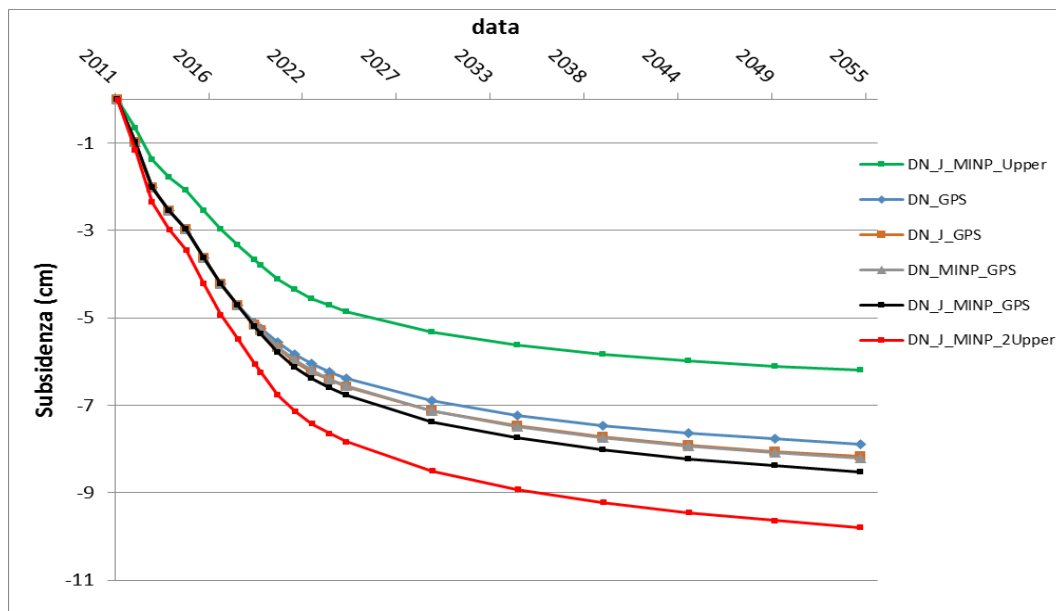


Figura 5 – Evoluzione della subsidenza nel punto di massimo.

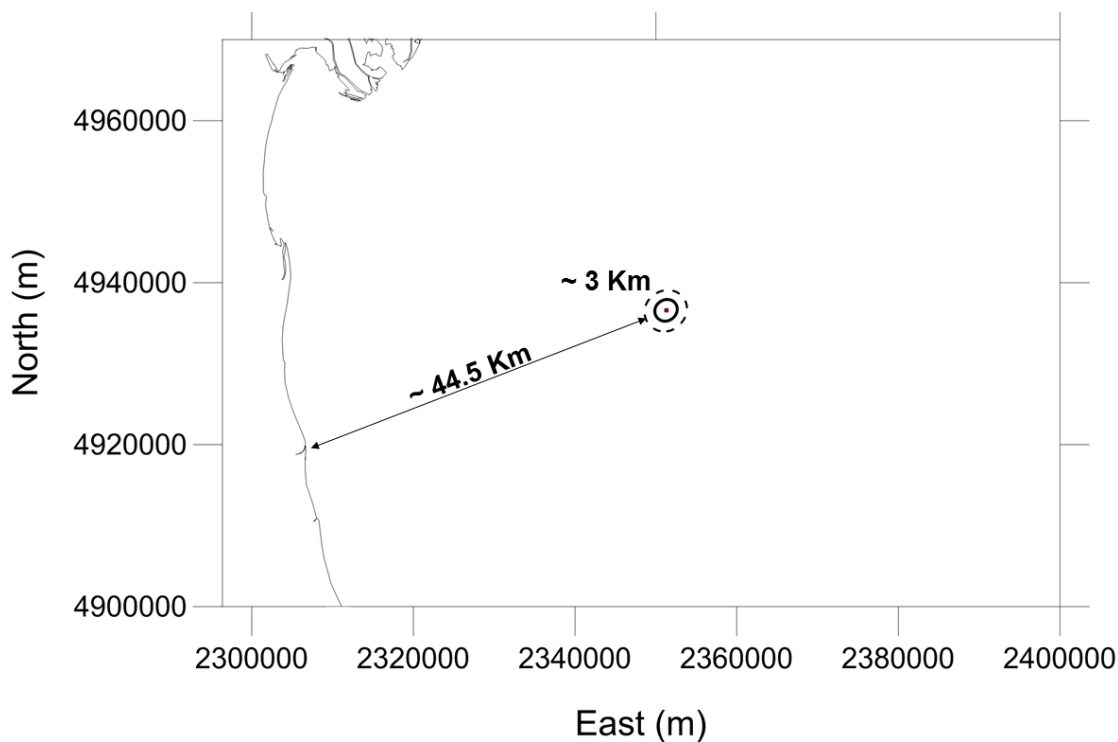


Figura 6 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario 2Upper, caso DN_J_MINP, a fine produzione (2022). Sono riportate le iso-linee dei 5 cm e dei 2 cm (linea tratteggiata).

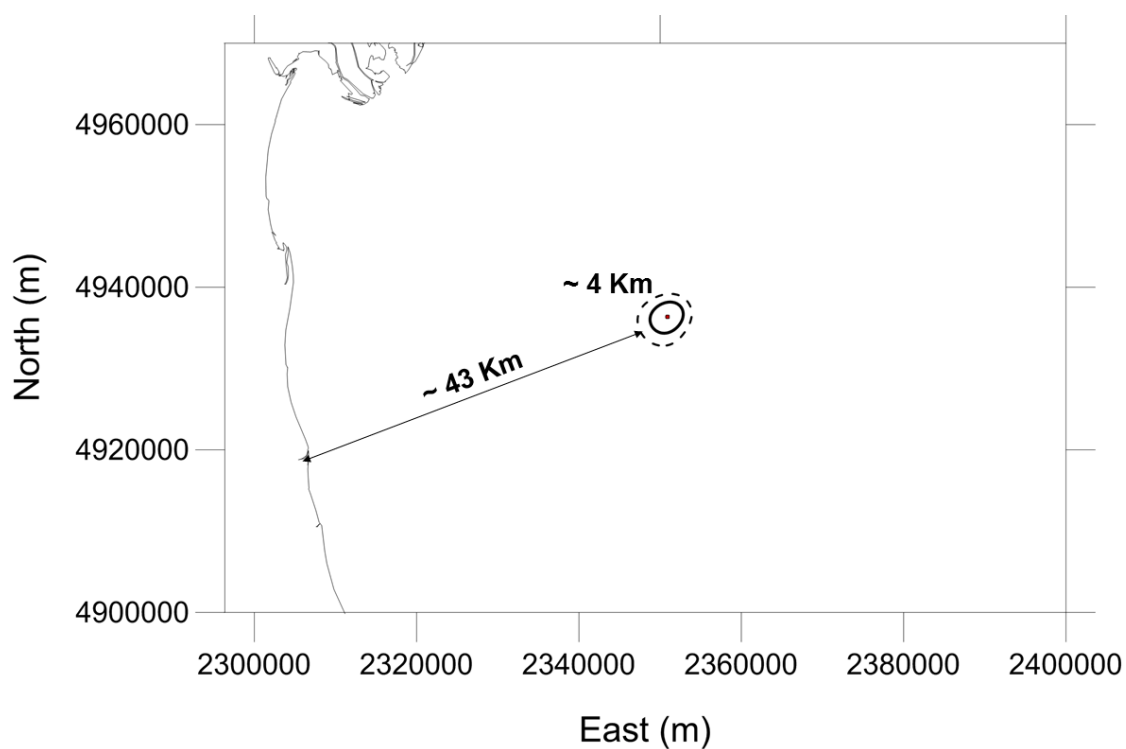


Figura 7 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario 2Upper, caso DN_J_MINP, a fine simulazione (2055). Sono riportate le iso-linee dei 5 cm e dei 2 cm (linea tratteggiata).

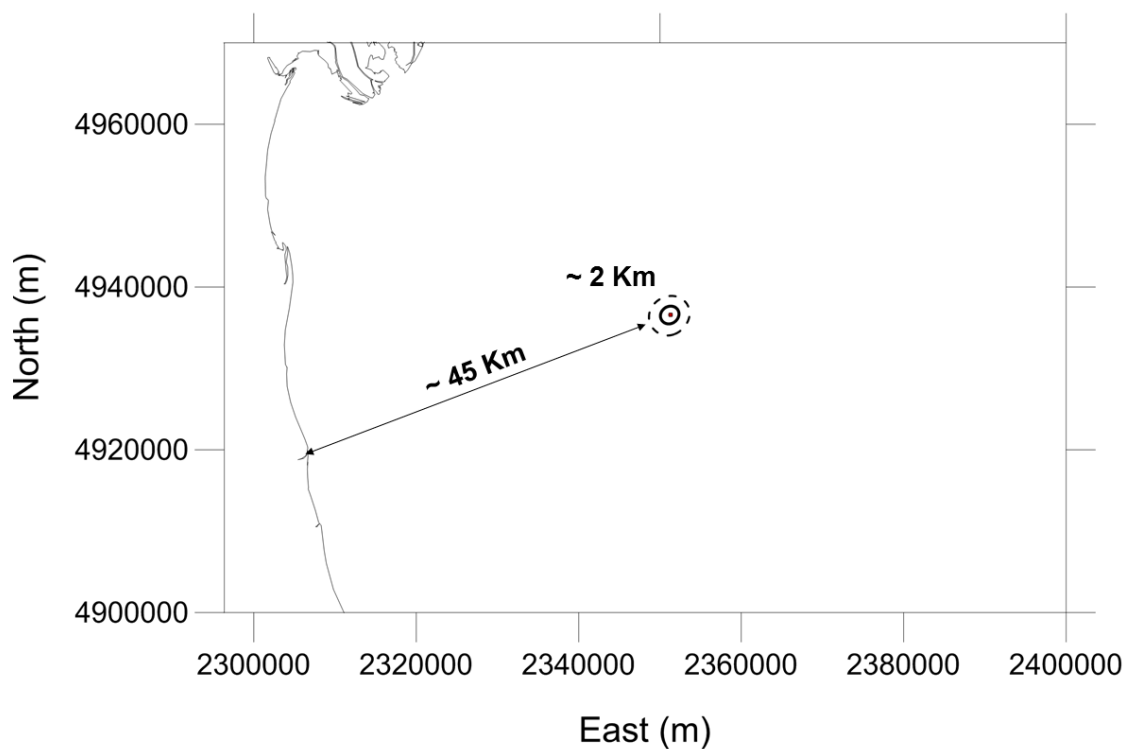


Figura 8 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario GPS, caso DN_J_MINP, a fine produzione (2022). Sono riportate le iso-linee dei 5 cm e dei 2 cm (linea tratteggiata).

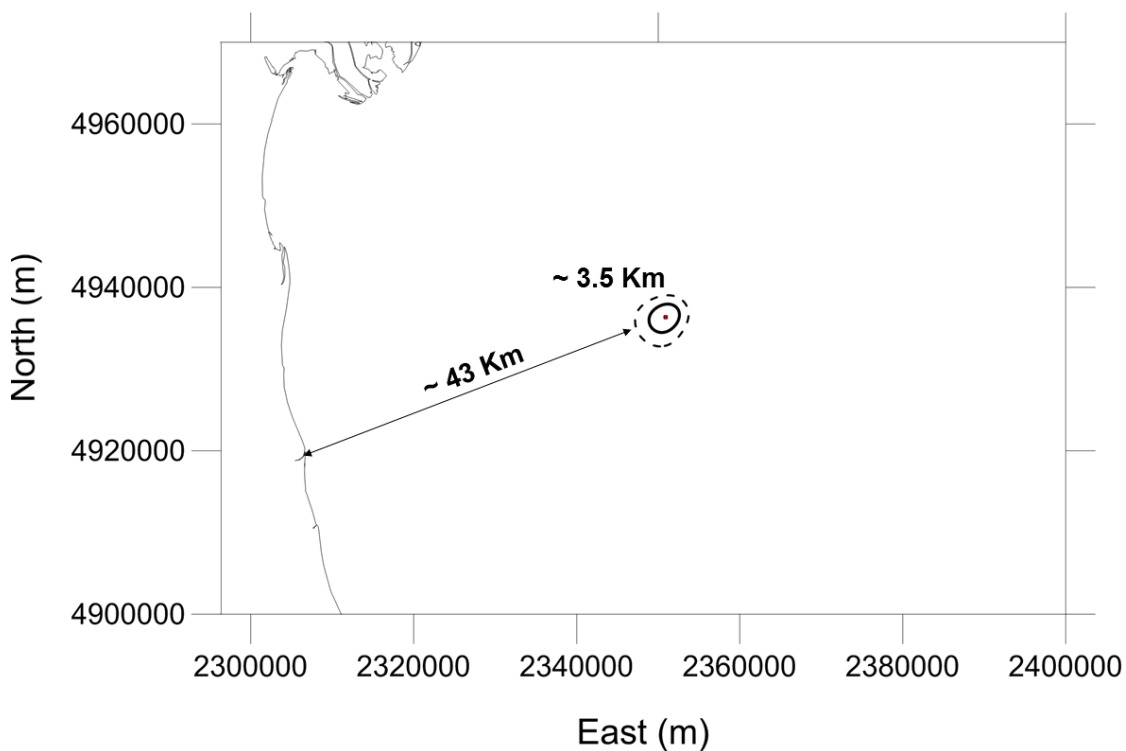


Figura 9 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario GPS, caso DN_J_MINP, a fine simulazione (2055). Sono riportate le iso-linee dei 5 cm e dei 2 cm (linea tratteggiata).

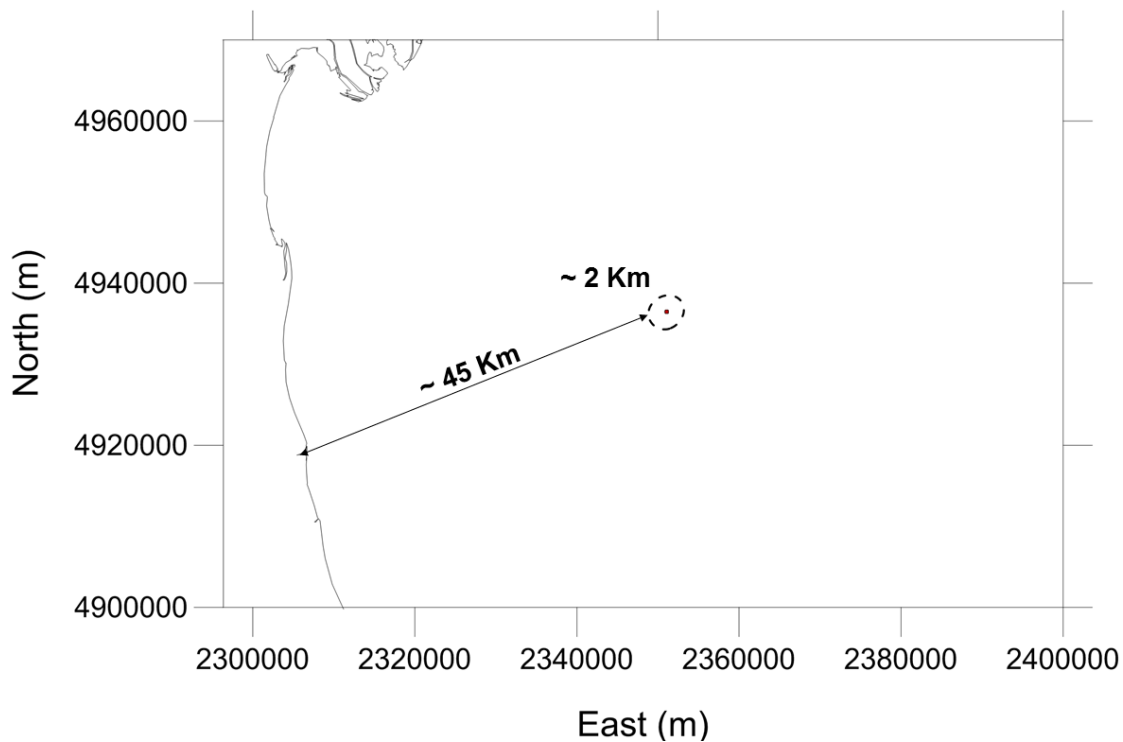


Figura 10 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Upper, caso DN_J_MINP, a fine produzione (2022). E' riportata la iso-linea dei 2 cm (linea tratteggiata).

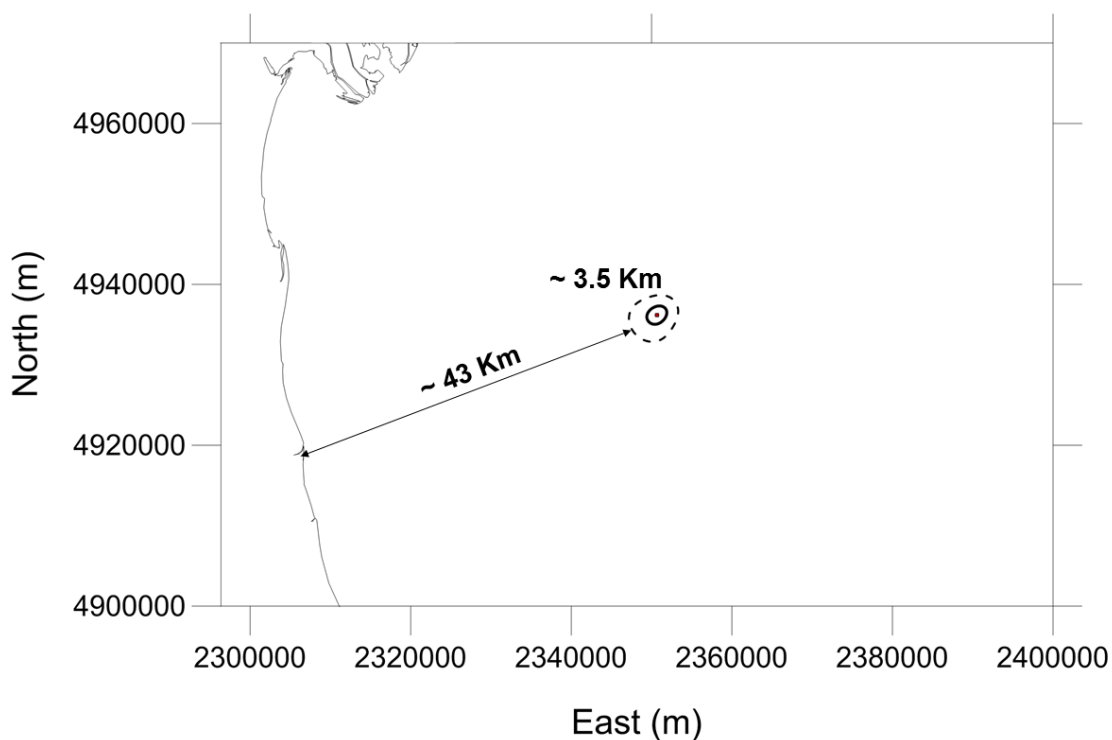


Figura 11 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Upper, caso DN_J_MINP, a fine simulazione (2055). Sono riportate le iso-linee dei 5 cm e dei 2 cm (linea tratteggiata).

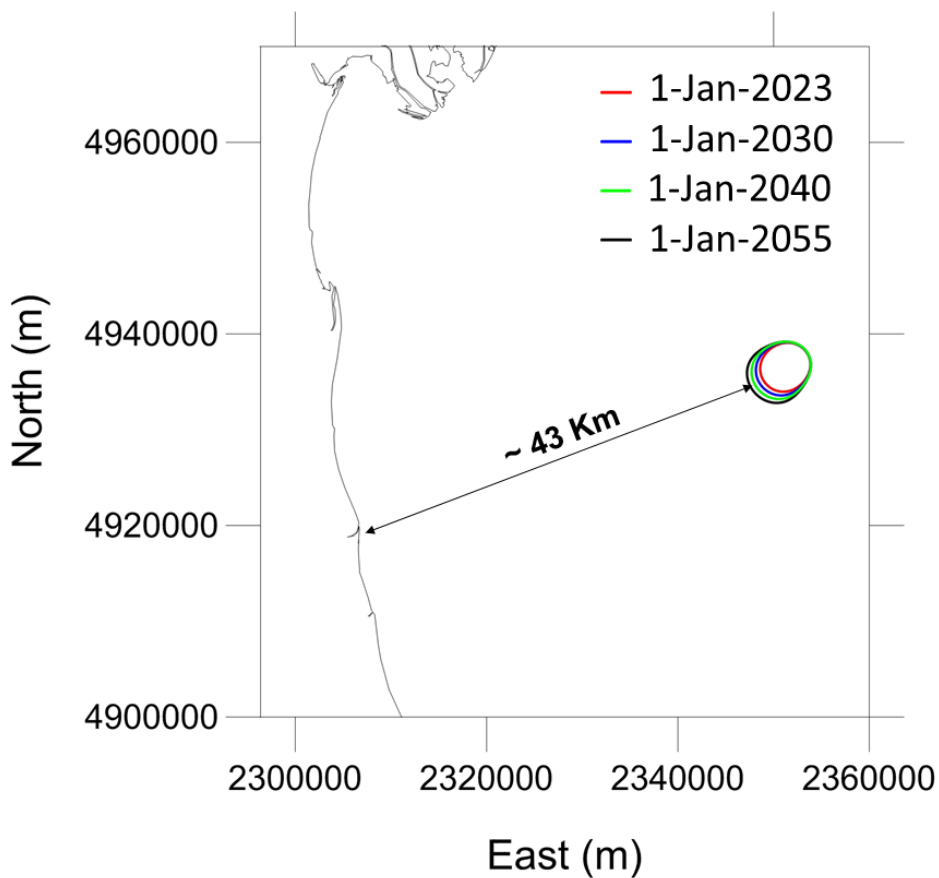


Figura 12 – Evoluzione delle isolinee dei 2 cm per lo scenario 2Upper, caso DN_J_MINP.

5 Confronto con i dati CGPS

I risultati del modello numerico sono stati confrontati con i dati di spostamento misurati dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma di produzione di Guendalina e con le misure di compattazione rilevate dai markers radioattivi lungo il pozzo Guendalina 2dir.

Il periodo di osservazione copre un intervallo temporale di circa 7 anni e fornisce un valore di velocità di subsidenza medio pari a circa 6.3 mm/anno. Il confronto tra i risultati ottenuti con i tre scenari di compressibilità e la serie storica misurata dal CGPS è mostrato in Figura 13. Si può osservare come sia lo scenario 2upper che lo scenario GPS, entrambi calibrati su tale dato, riproducano con accuratezza la subsidenza rilevata dalla stazione CGPS. In Figura 14 è riportato il confronto tra l'andamento del GPS e i tre scenari simulati per l'intera simulazione.

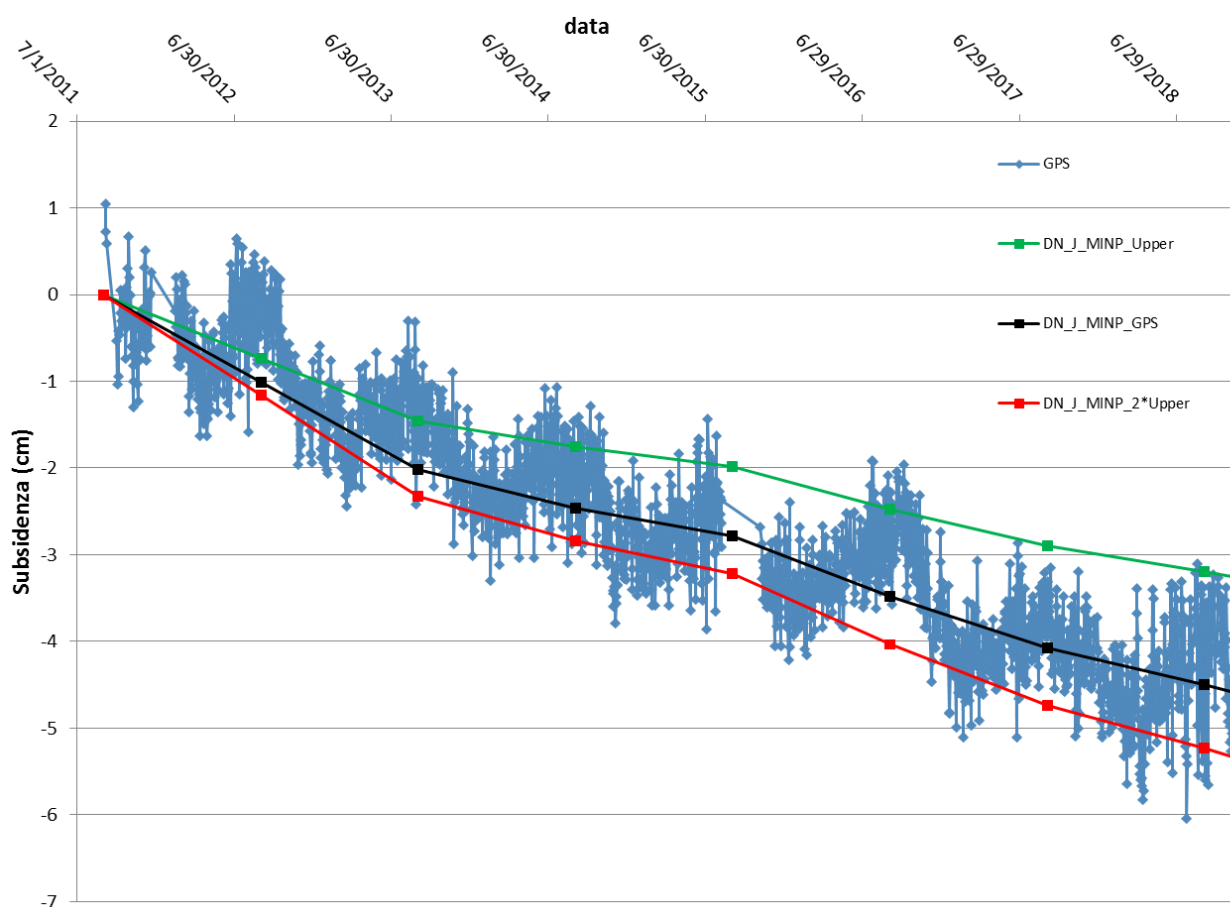


Figura 13 – Spostamento misurato e calcolato in corrispondenza della stazione CGPS di Guendalina.

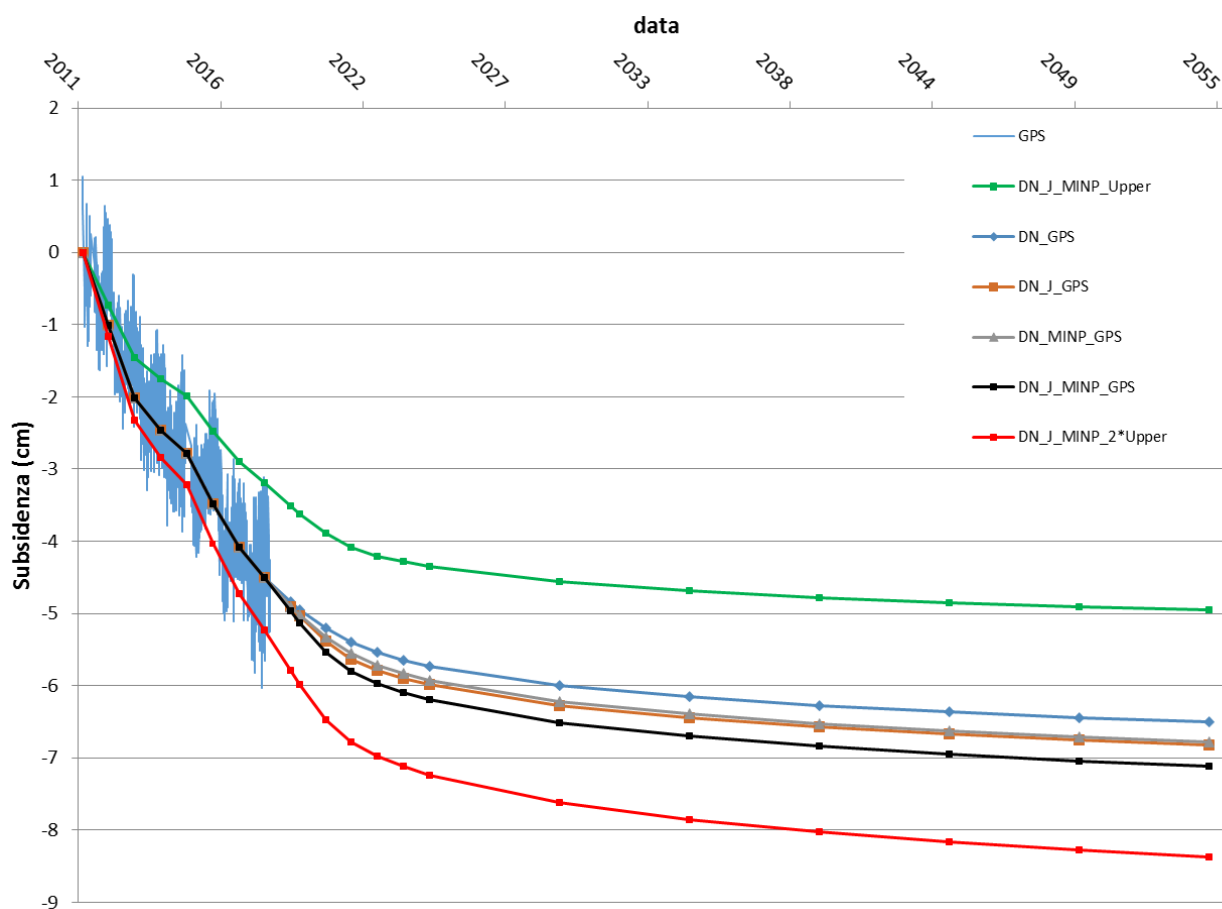


Figura 14 – Spostamento misurato e calcolato fino alla fine della simulazione in corrispondenza della stazione CGPS di Guendalina.

6 Confronto con i dati di compattazione da marker radioattivi

In corrispondenza del pozzo Guendalina 2dir sono disponibili delle misure di compattazione rilevate dai markers radioattivi installati lungo il profilo del pozzo stesso. In particolare, lungo il tratto compreso tra le profondità 3008 e 3084 m TVDSS, sono stati sparati 15 marker con distanza nominale pari a 5 m circa (eccetto uno la cui distanza è di 10 m). In Tabella 4 sono riassunte le misure di compattazione rilevate tra i mesi di giugno 2011 e luglio 2012 insieme alla corrispondenza tra indice dei markers e indice degli spacing. Poiché la sonda di logging ha i rilevatori a distanza di 10 m, le misurazioni di deformazione (compattazione se negativa ed espansione se positiva) si sono potute rilevare per intervalli di tre markers consecutivi (eccetto per lo spacing #6 che ha dimensione pari a 10 m).

Tabella 4 – Misure di deformazione registrate nel pozzo Guendalina 2dir tra luglio 2012 e giugno 2011. Valori negativi indicano compattazione e positivi espansione.

Spacing	Marker top	Marker bottom	TOP REF QUOTA				BOTTOM REF QUOTA				Deformazione luglio 2012 - giugno 2011
			MD	TVDSS	X	Y	MD	TVDSS	X	Y	
#	#	#	m	m	m	m	m	m	m	m	mm
16	1	3	3096.75	3007.89	2351317.63	4936753.94	3107.25	3018.08	2351315.39	4936752.79	6.38
15	2	4	3102.00	3012.98	2351316.51	4936753.37	3112.50	3023.18	2351314.27	4936752.21	0.51
14	3	5	3107.25	3018.08	2351315.39	4936752.79	3117.75	3028.27	2351313.15	4936751.64	-4.60
13	4	6	3112.50	3023.18	2351314.27	4936752.21	3123.00	3033.37	2351312.04	4936751.06	-1.89
12	5	7	3117.75	3028.27	2351313.15	4936751.64	3128.25	3038.47	2351310.92	4936750.48	1.98
11	6	8	3123.00	3033.37	2351312.04	4936751.06	3133.50	3043.57	2351309.80	4936749.91	3.01
10	7	9	3128.25	3038.47	2351310.92	4936750.48	3138.75	3048.66	2351308.68	4936749.33	0.45
9	8	10	3133.50	3043.57	2351309.80	4936749.91	3144.00	3053.76	2351307.56	4936748.75	-1.79
8	9	11	3138.75	3048.66	2351308.68	4936749.33	3149.25	3058.86	2351306.44	4936748.18	6.93
6	11	12	3149.25	3058.86	2351306.44	4936748.18	3159.75	3069.05	2351304.20	4936747.02	-16.67
4	12	14	3159.75	3069.05	2351304.20	4936747.02	3170.25	3079.24	2351301.97	4936745.87	-3.36
3	13	15	3165.00	3074.15	2351303.09	4936746.45	3175.50	3084.34	2351300.85	4936745.29	-3.30

Prima di iniziare l'analisi si è proceduto con il corretto posizionamento dei marker rispetto al layering del campo: la Figura 15 evidenzia la zona del modello in cui viene registrata la compattazione da marker.

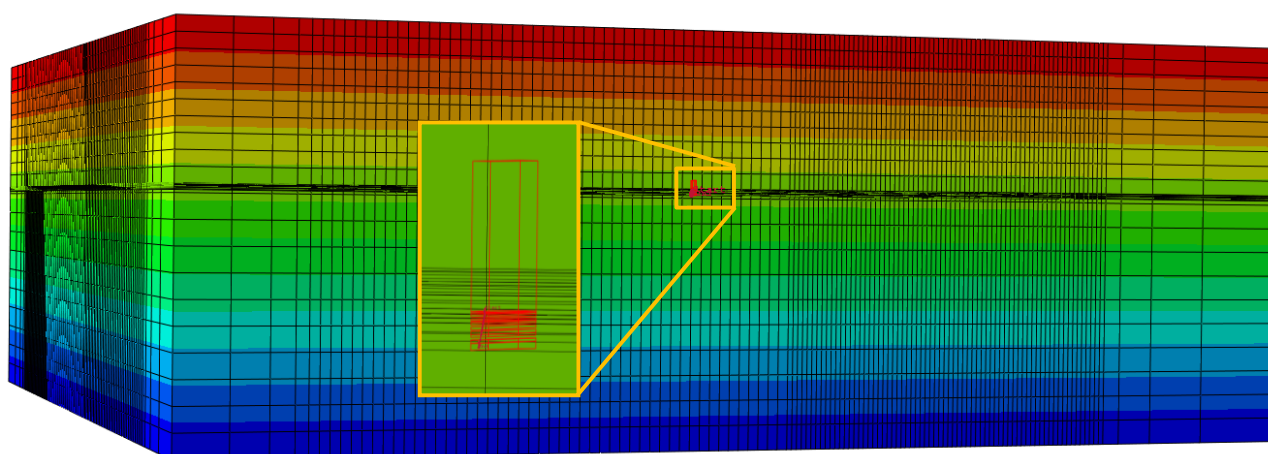


Figura 15 – Regione del modello di Guendalina interessata dai markers.

In particolare, in Figura 16 è riportata l'esatta posizione dei marker nei layer del modello e nelle zone mineralizzate a gas (verde), ad acqua (blu) o non porose (overburden in grigio). Il marker #1 è l'unico sparato nell'overburden, i marker dal #2 al #10 e #14 e #15 si trovano in giacimento ma nella zona di acquifero mentre i marker dal #11 al #13 nella zona a gas.

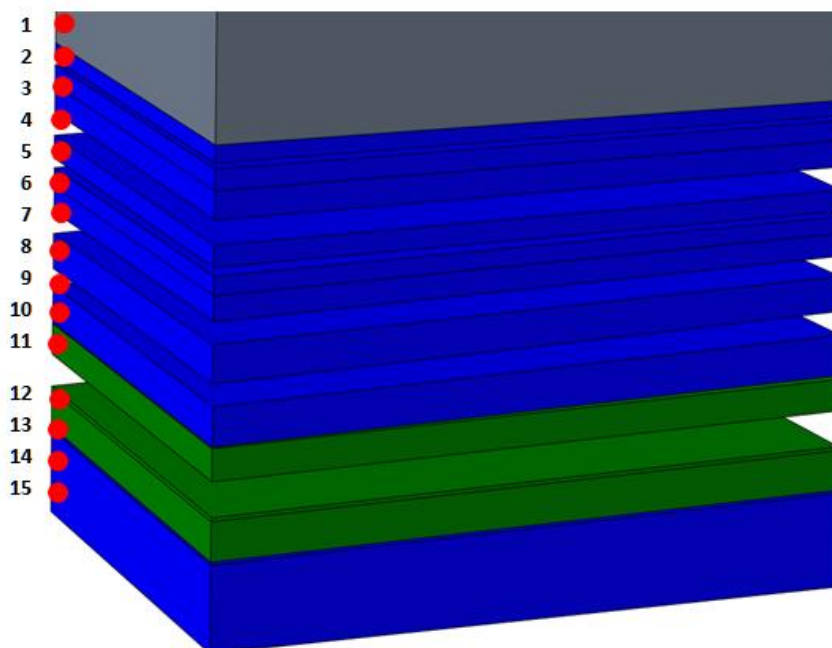


Figura 16 – Posizione dei markers rispetto al layering del campo. In grigio l’overburden mentre in blu la zona mineralizzata ad acqua e in verde la zona mineralizzata a gas.

Il confronto tra la compattazione calcolata e misurata negli spacing è stato condotto interpolando linearmente i valori dello spostamento dei nodi della griglia più vicini ai marker per ottenere lo spostamento/deformazione in corrispondenza alla posizione dei marker stessi. I risultati sono riportati in Tabella 5.

Tabella 5 – Confronto tra la deformazione simulata dai vari scenari e quella misurata nel periodo giugno 2011 e luglio 2012. Valori positivi indicano espansione, negativi compattazione.

spacing	Deformazione (mm)				
	#	Upper scenario	GPS scenario	2Upper scenario	Misurata
16		-2.97	-3.84	-4.28	6.38
15		-4.92	-6.31	-6.96	0.51
14		-4.56	-5.78	-6.29	-4.60
13		-2.88	-3.57	-3.87	-1.89
12		-0.13	-0.05	-0.03	1.98
11		1.11	1.51	1.71	3.01
10		1.11	1.52	1.71	0.45
9		1.48	2.01	2.27	-1.79
8		-0.03	-0.20	-0.35	6.93
6		-22.25	-32.80	-38.61	-16.67
4		-17.86	-24.77	-28.19	-3.36
3		-16.43	-21.80	-24.10	-3.30

E’ stata in seguito condotta un’analisi incrociata della deformazione e della variazione di pressione per ciascuno spacing. Le misure registrate, infatti, evidenziano come gli spacing #8 – #16 siano caratterizzati da alternate compattazioni/espansioni, dell’ordine di pochi millimetri, che non sono

consistenti con l'avvenuta depressurizzazione o l'assenza di variazione di pressione. E' per altro già stato osservato in studi precedenti [5], come le misurazioni fornite dai marker siano poco affidabili qualora si riferiscono a spacing con variazioni di pressione limitate quali le zone interessate da tali markers. In Figura 17 è riportato il confronto tra compattazioni/espansioni misurate con le deviazioni standard associate e le compattazioni/espansioni ottenute dai modelli geomeccanici simulati. In generale si è ottenuto un buon match, soprattutto considerando gli spacing #3, #4 e #6 (marker #11 – #15) che sono stati ritenuti i più significativi in quanto posti nel livello PL3-J3 e validati da una deviazione standard più bassa rispetto alle altre misurazioni. Per tali spacing si è ottenuto un risultato conservativo del modello geomeccanico rispetto a quanto misurato: nei tre spacing la compattazione da modello sovrastima infatti quanto misurato dai markers.

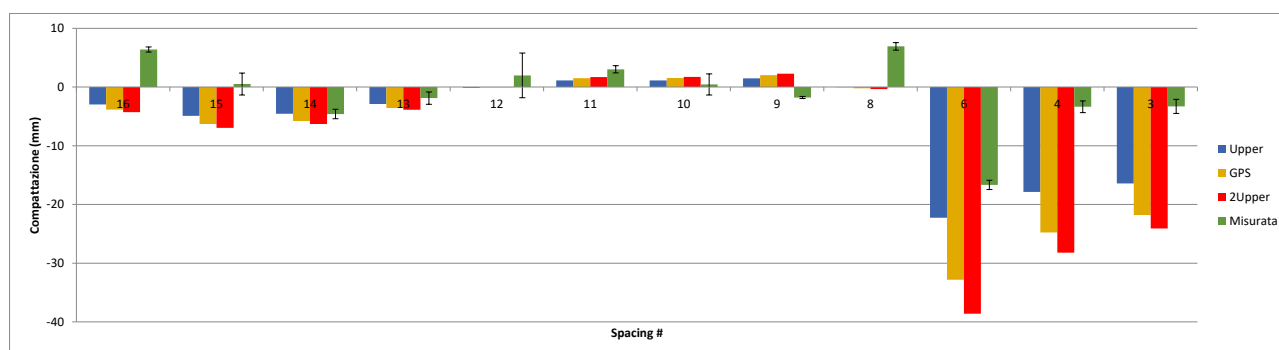


Figura 17 – Confronto tra la deformazione simulata dai vari scenari e quella misurata nel periodo giugno 2011 e luglio 2012. Valori positivi indicano espansione, negativi compattazione. Sono riportate anche le deviazioni standard relative all'errore sulla misura.

A causa di problemi meccanici che hanno impedito la discesa in pozzo della strumentazione di misura (insabbiamento del fondo pozzo e rottura della string corta) non è stato possibile acquisire i survey annuali del 2013 e 2014. Tuttavia, nel corso di un intervento di work-over eseguito nel 2015 sono stati reinstallati nuovi markers di controllo nel pozzo Guendalina 2 dirA, perforato in side-track da Guendalina 2 dir che è poi stato chiuso minerariamente. Si segnala che per ovviare alla mancata infissione di diversi markers in formazione, si sono anche inserite apposite fascette radioattive (pip tag) sui collari del casing. Le misurazioni acquisite sono caratterizzate da una elevata deviazione standard e, nell'ambito di questo studio, non sono state considerate sufficientemente attendibili.



Bibliografia

1. AbaqusTM, Simulia, versione 6.18.
2. EclipseTM, Schlumberger, versione 2016.2.
3. IPET-4DC25805-0 Campo di Guendalina Studio di Giacimento
4. D. Baù, M. Ferronato, G. Gambolati and P. Teatini: *Basin-scale compressibility of the northern Adriatic by the radioactive marker technique*. Géotechnique 52, No. 8, 605–616, 2002.
5. T. Hueckel, G. Cassiani, J.H. Prévost and D.A. Walters: *Field Derived Compressibility of Deep Sediments of the Northern Adriatic*. *Land Subsidence*, Special Volume, Proc. 7th Int. Symp. on Land Subsidence, Shanghai, 2005.
6. M. Ferronato, G. Gambolati, P. Teatini and D. Baù: *Interpretation of Radioactive Marker Measurements To Evaluate Compaction in the Northern Adriatic Gas Field*, SPE Evaluation & Engineering, December 2003.