



# **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 sulla piattaforma di Guendalina. In particolare, il valore di massima subsidenza ottenuto al termine della simulazione (gennaio 2053) risulta pari a circa 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**

31/12/2022



## Indice

1	Introduzione .....	3
1.1	Il campo di Guendalina .....	3
1.2	Produzione di Guendalina .....	4
2	Dati della stazione 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 .....	15
6	Confronto con i dati di compattazione da marker radioattivi .....	17
	Bibliografia .....	20

## 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.

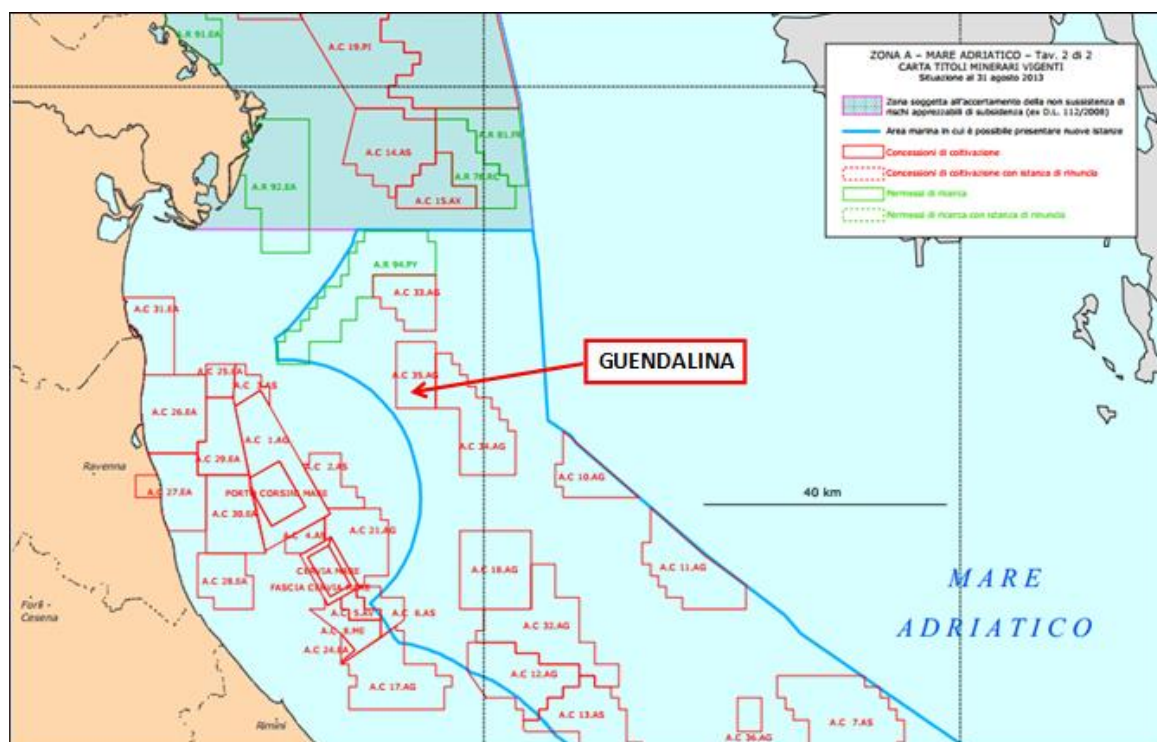
La valutazione della subsidenza per il campo in esame è stata effettuata con un modello geomeccanico 3D ad elementi finiti (FE) costruito utilizzando il codice di calcolo Abaqus [1]; in tale modello le informazioni relative alla geometria dei giacimenti, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle 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 (§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 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 compattazione attraverso markers radioattivi.

Il modello fluido-dinamico Eclipse del campo di Guendalina [3] risulta aggiornato ad agosto 2022, data di chiusura del campo alla quale si registra una produzione cumulativa di gas pari a 835 MSm<sup>3</sup>. A partire da agosto 2022 è stata effettuata una sola simulazione a pozzi chiusi fino al 01/01/2053 per tenere conto di un eventuale effetto di ripressurizzazione dell'acquifero.

## 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". Le misurazioni si fermano al 10 maggio 2021, data alla quale la memoria del ricevitore è risultata saturata per cui non è stato più possibile acquisire temporaneamente ulteriori misure. Il periodo di osservazione copre un intervallo temporale di circa 10 anni e fornisce un valore di velocità di subsidenza medio pari a circa 6 mm/anno (Figura 2).

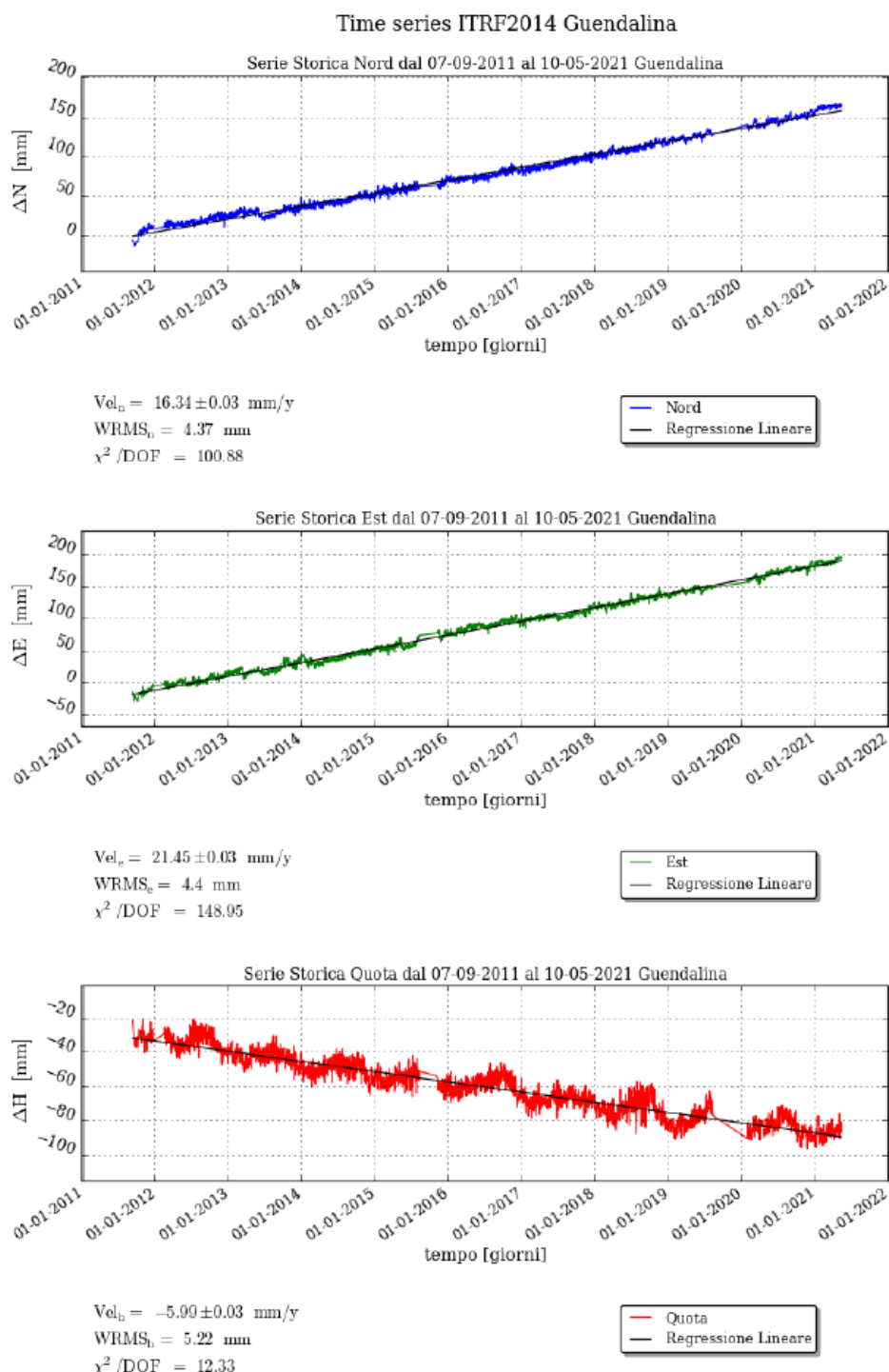


Figura 2 – Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Guendalina, aggiornate al 10/05/2021.

### 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 2053. 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 km<sup>2</sup>.

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 km<sup>2</sup>. 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.

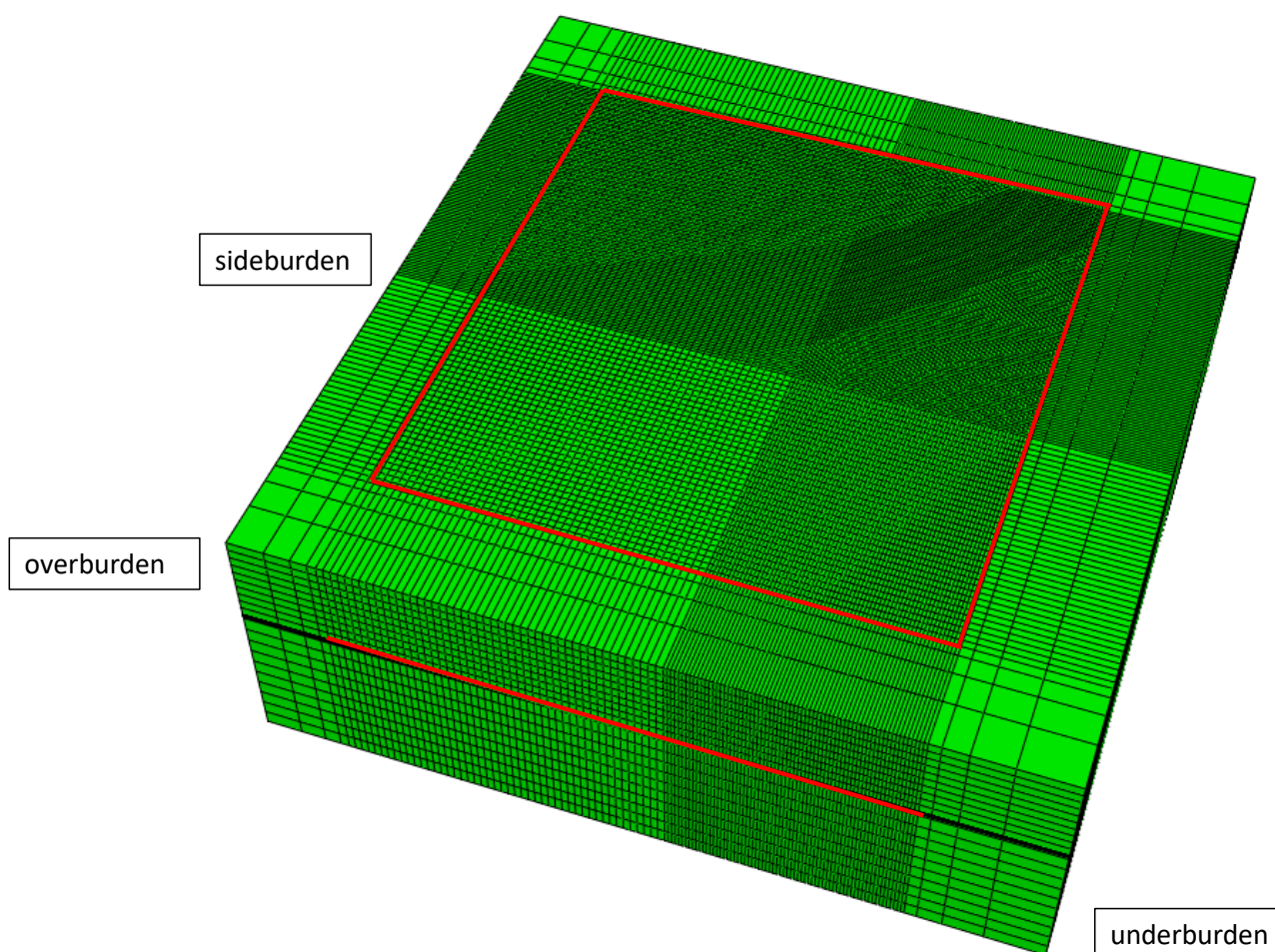


Figura 3 – Confronto tra l'estensione del modello geomeccanico e del modello fluido-dinamico (riquadro rosso).

### 3.3 Proprietà dei materiali

#### 3.3.1 Densità

Per ricostruire il profilo di densità  $\rho$  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  $\rho$  in  $\text{g/cm}^3$ , 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/m<sup>3</sup>. Il profilo di densità così ottenuto è stato integrato per ottenere un profilo di sforzo totale verticale  $\sigma_v$ :

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

dove  $\sigma_v$  è lo sforzo totale verticale (in bar),  $\rho_w$  è la densità dell'acqua e  $g$  è l'accelerazione di gravità assunta pari a 9.807 m/sec<sup>2</sup>.

### 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  $\gamma_f$  (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. È 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  $\sigma'_v$  è stata proposta da Hueckel *et al.* [5] ed è riportata in Figura 4 ove sono rappresentate la miglior stima

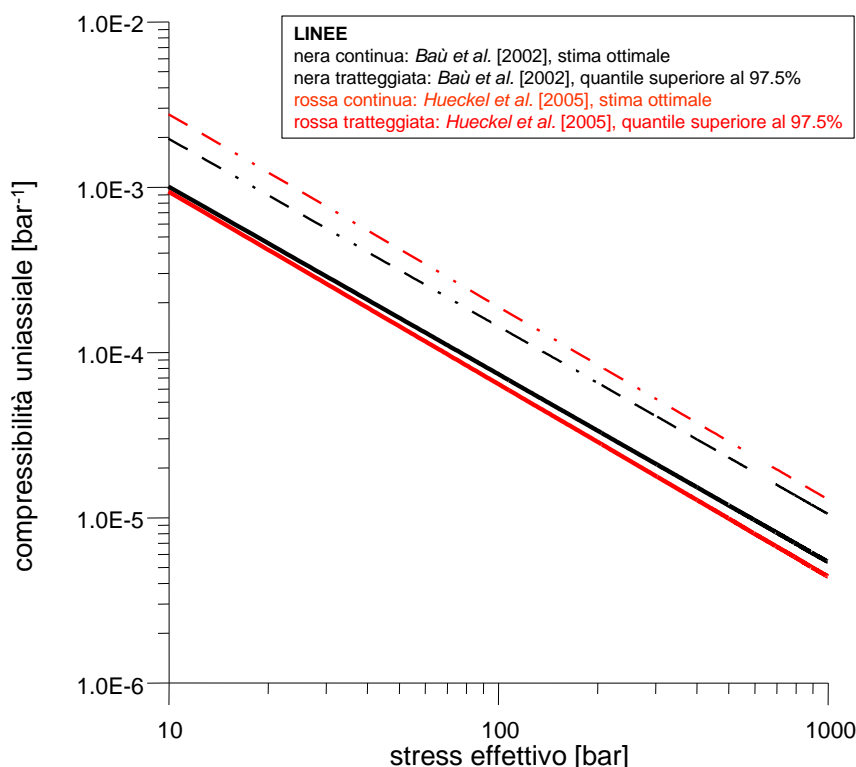
$$c_m = 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \quad (3)$$

ed il quantile superiore al 97.5%. Nella relazione (3)  $\sigma'_v$  è la tensione efficace verticale espressa in bar e  $c_m$  è espresso in bar<sup>-1</sup>. 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, è stato definito lo scenario di riferimento 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:

$$c_m^{2Upper} = 0.01367 \cdot 2 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \cdot 10^{0.467} \quad (7)$$

La legge (7) è stata quindi utilizzata 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:

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad (8)$$

dove  $\sigma_v$  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  $\sigma_v$  è stata calcolata a partire dalla densità del materiale come riportato nel paragrafo 3.3.1.

In Tabella 1 sono riportati i valori di profondità media, tensione verticale totale  $\sigma_v$ , pressione dei pori iniziale  $p$ , tensione verticale efficace  $\sigma'_v$ , coefficiente di Poisson  $\nu$ , compressibilità uniassiale  $c_m$ , adottati livello per livello per lo scenario geomeccanico analizzato.

**Tabella 1 – Proprietà assegnate ad ogni regione del modello geomeccanico.**

Layer	$z$ media [m]	$\sigma_w$ [bar]	$p$ [bar]	$\sigma'_v$ [bar]	$\nu$ -	$c_m$ "2Upper" [bar <sup>-1</sup> ]
Overburden 1	192.00	30.94	19.40	11.54	0.3	4.65E-03
Overburden 2	492.00	90.00	49.71	40.29	0.3	1.08E-03
Overburden 3	792.00	151.78	80.03	71.76	0.3	5.53E-04
Overburden 4	1092.00	215.17	110.34	104.83	0.3	3.56E-04
Overburden 5	1392.00	279.71	140.65	139.05	0.3	2.56E-04
Overburden 6	1692.00	345.15	170.96	174.18	0.3	1.97E-04
Overburden 7	1992.00	411.34	201.28	210.06	0.3	1.58E-04
Overburden 8	2292.00	478.17	231.59	246.58	0.3	1.31E-04
Overburden 9	2592.00	545.56	261.90	283.65	0.3	1.12E-04
Overburden 10	2892.00	613.44	292.22	321.22	0.3	9.66E-05
Reservoir 1	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	9.88E-05
Reservoir 2	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	9.88E-05
Reservoir 3	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	9.88E-05
Reservoir 4	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	9.88E-05
Reservoir 5	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	9.88E-05
Reservoir 6	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	9.88E-05
Reservoir 7	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	9.88E-05
Reservoir 8	3057.50	651.08	335.90	315.18	0.3	9.88E-05
Reservoir 9	3076.30	655.37	338.70	316.67	0.3	9.82E-05
Reservoir 10	3076.30	655.37	338.70	316.67	0.3	9.82E-05
Reservoir 11	3076.30	655.37	338.70	316.67	0.3	9.82E-05
Reservoir 12	3076.30	655.37	338.70	316.67	0.3	9.82E-05
Reservoir 13	3086.70	657.74	340.30	317.44	0.3	9.80E-05
Reservoir 14	3086.70	657.74	340.30	317.44	0.3	9.80E-05
Reservoir 15	3097.70	660.25	341.24	319.01	0.3	9.74E-05
Reservoir 16	3097.70	660.25	341.24	319.01	0.3	9.74E-05
Reservoir 17	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	9.66E-05
Reservoir 18	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	9.66E-05
Reservoir 19	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	9.66E-05
Reservoir 20	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	9.66E-05
Reservoir 21	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	9.66E-05
Reservoir 22	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	9.66E-05
Reservoir 23	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	9.66E-05
Reservoir 24	3116.80	664.60	343.40	321.20	0.3	9.66E-05
Reservoir 25	3150.80	672.36	347.00	325.36	0.3	9.52E-05
Reservoir 26	3150.80	672.36	347.00	325.36	0.3	9.52E-05
Reservoir 27	3150.80	672.36	347.00	325.36	0.3	9.52E-05
Underburden 1	3440.00	738.57	347.59	390.98	0.3	7.69E-05
Underburden 2	3920.00	849.21	396.09	453.12	0.3	6.47E-05
Underburden 3	4400.00	960.72	444.59	516.13	0.3	5.56E-05
Underburden 4	4880.00	1072.99	493.09	579.90	0.3	4.86E-05
Underburden 5	5360.00	1185.95	541.59	644.36	0.3	4.30E-05
Underburden 6	5840.00	1299.56	590.09	709.47	0.3	3.84E-05
Underburden 7	6320.00	1413.75	638.59	775.16	0.3	3.46E-05
Underburden 8	6800.00	1528.49	687.09	841.39	0.3	3.15E-05
Underburden 9	7280.00	1643.73	735.59	908.14	0.3	2.88E-05
Underburden 10	7760.00	1759.45	784.09	975.36	0.3	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  $\sigma'_h$  è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico definite come:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (9)$$

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 alla data di chiusura del campo (agosto 2022) e poi con passo temporale quinquennale fino alla fine della simulazione (gennaio 2053), per un numero totale di step temporali della simulazione geomeccanica pari a 20.

## 4 Risultati delle simulazioni numeriche

Il presente paragrafo riporta i risultati delle previsioni di subsidenza per lo scenario considerato. In particolare, in Tabella 2 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 dell'history match che coincide con la fine della produzione del campo (agosto 2022) e alla fine della simulazione (gennaio 2053). Si ricorda infatti che la simulazione è stata protratta fino al 2053 (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 2 – Risultati finali: massima subsidenza ed estensione del fenomeno.**

Scenario di compressibilità	Fine Produzione (gennaio 2024)		Fine simulazione (gennaio 2053)	
	Subsidenza (cm)	Estensione (km)	Subsidenza (cm)	Estensione (km)
2Upper	-6.4	3	-7.9	4

Il punto di massima subsidenza risulta localizzato in  $X=2350896.42$   $Y=4936371.03$ . La Figura 5 mostra l'evoluzione nel tempo della subsidenza nel punto di massimo.

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza risulta pari a 7.9 cm, raggiunto al termine della simulazione;
- al termine della produzione il valore di massima subsidenza risulta pari a 6.4 cm e la massima estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm risulta pari a circa 3 km (Figura 6). Tale estensione si assesta a 4 km a fine simulazione (Figura 7);
- l'evoluzione nel tempo della linea di iso-subsidenza dei 2 cm è riportata in Figura 8;
- il fenomeno si esaurisce a oltre 40 km dalla linea di costa.

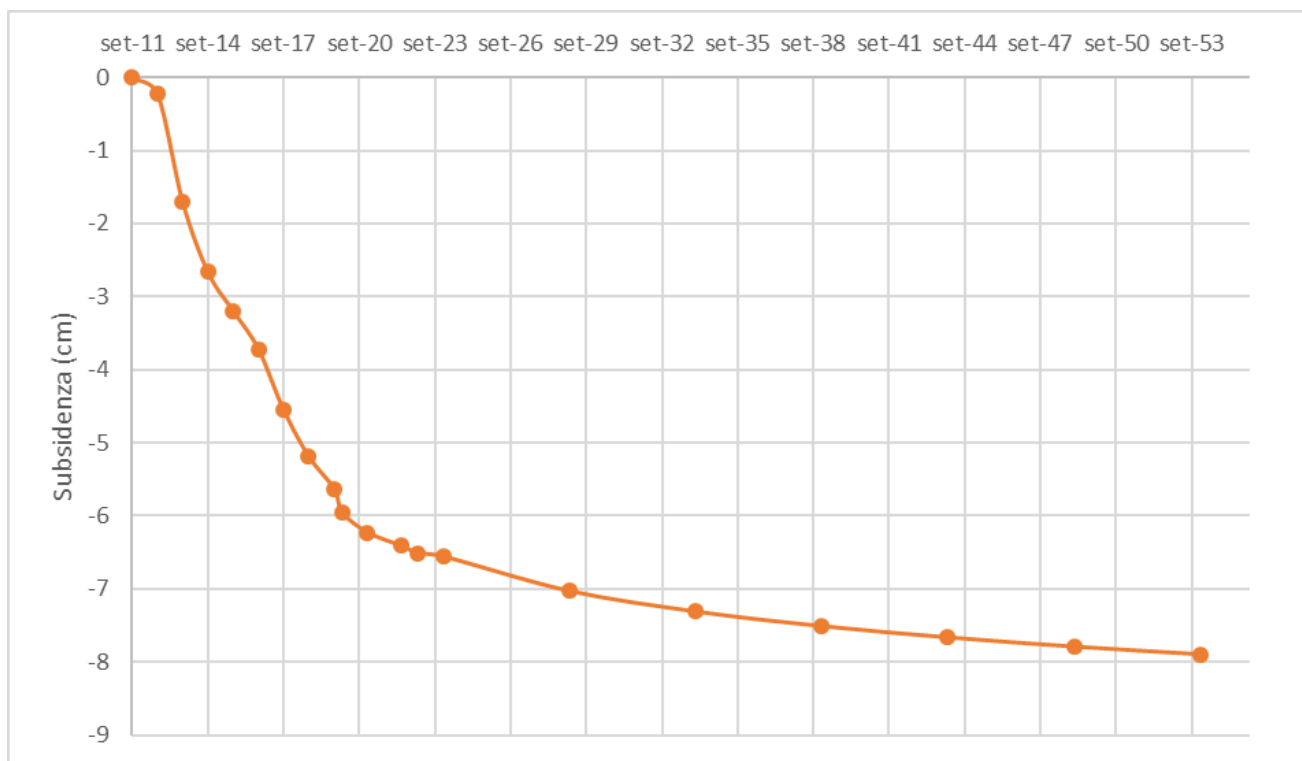


Figura 5 – Evoluzione della subsidenza nel punto di massimo.

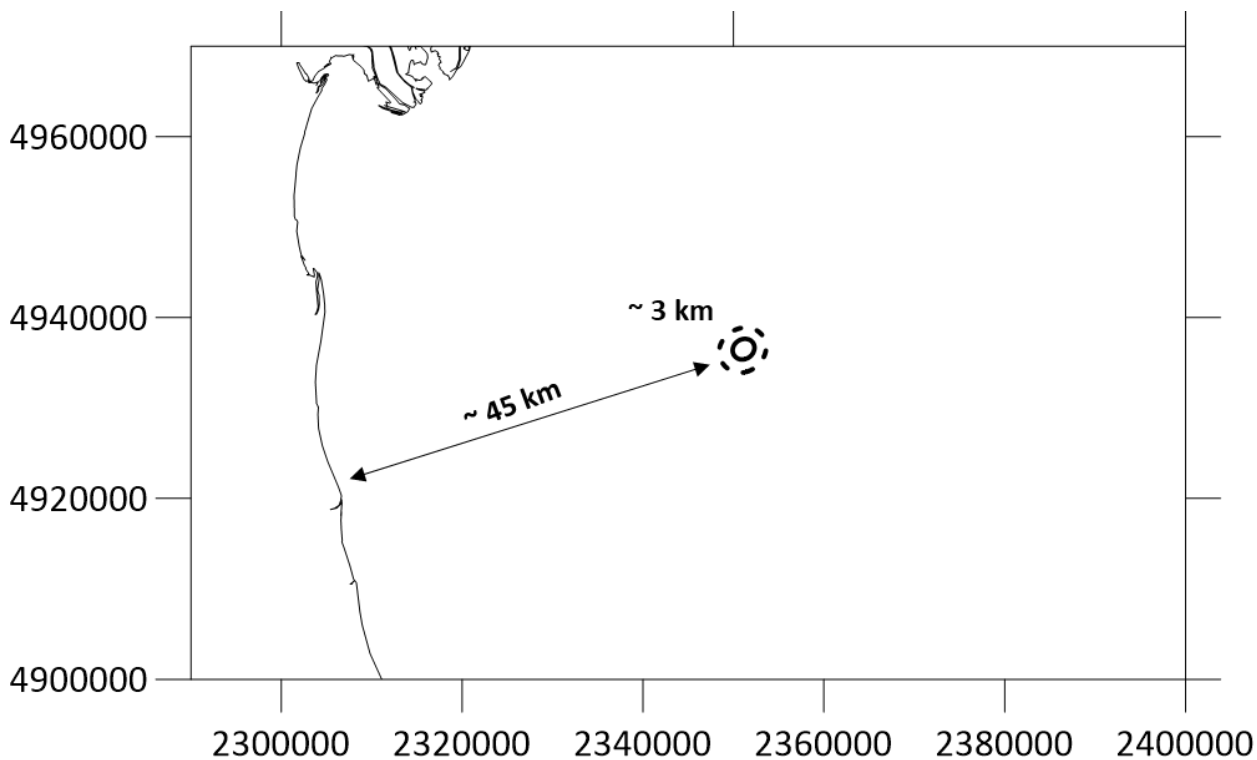


Figura 6 – Curve di iso-subsidenza a fine produzione (2024). Sono riportate le iso-linee dei 5 cm e dei 2 cm (linea tratteggiata). L'estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm dal punto di massimo in direzione costa è pari a circa 3 km.

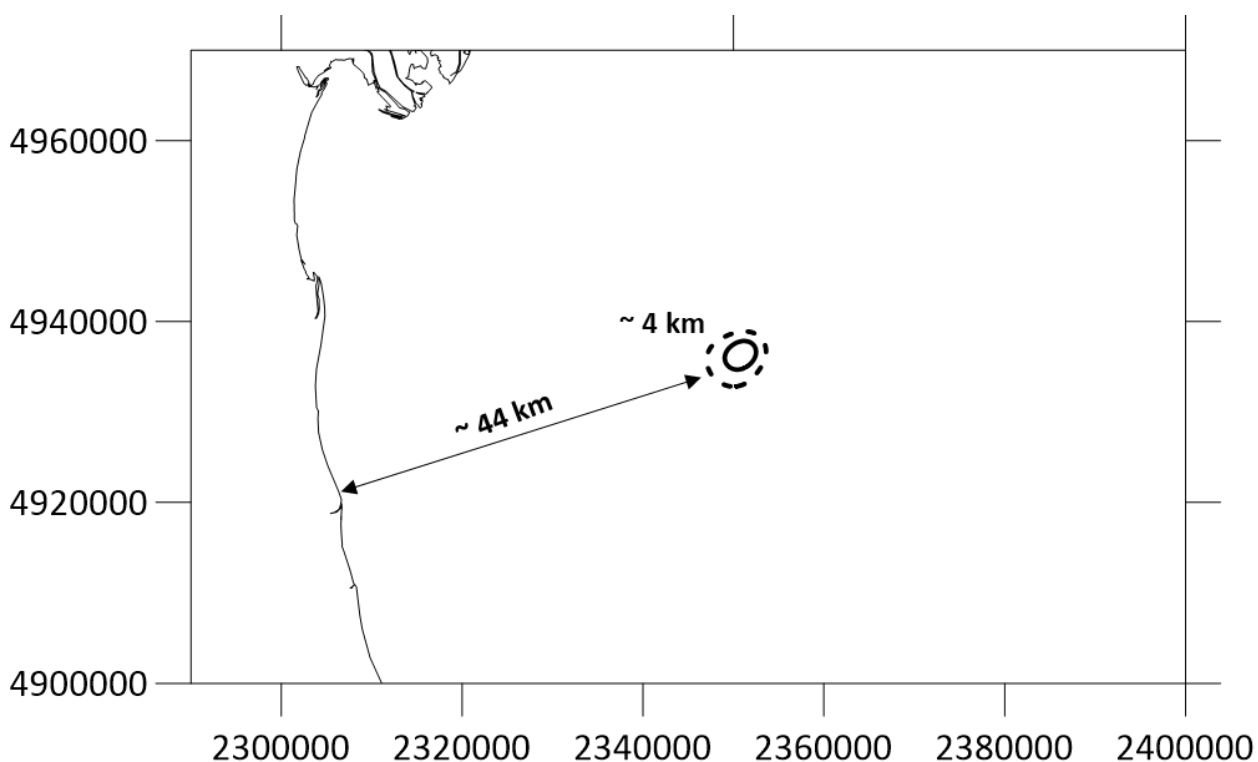


Figura 7 – Curve di iso-subsidenza a fine simulazione (2053). Sono riportate le iso-linee dei 5 cm e dei 2 cm (linea tratteggiata). L'estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm dal punto di massimo in direzione costa è pari a circa 4 km.

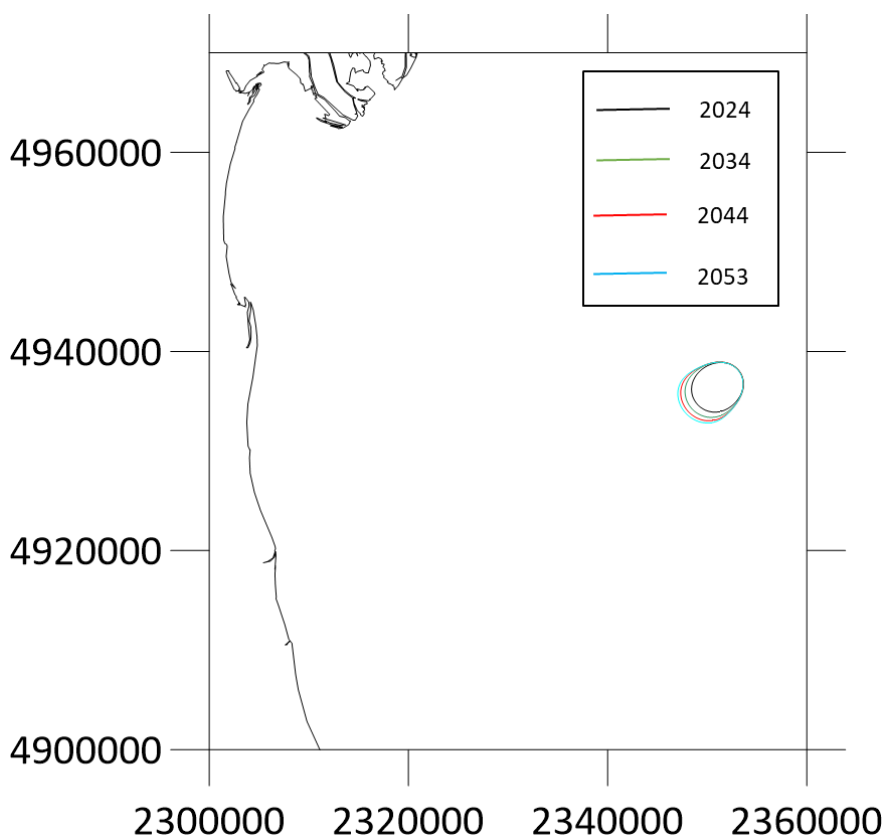


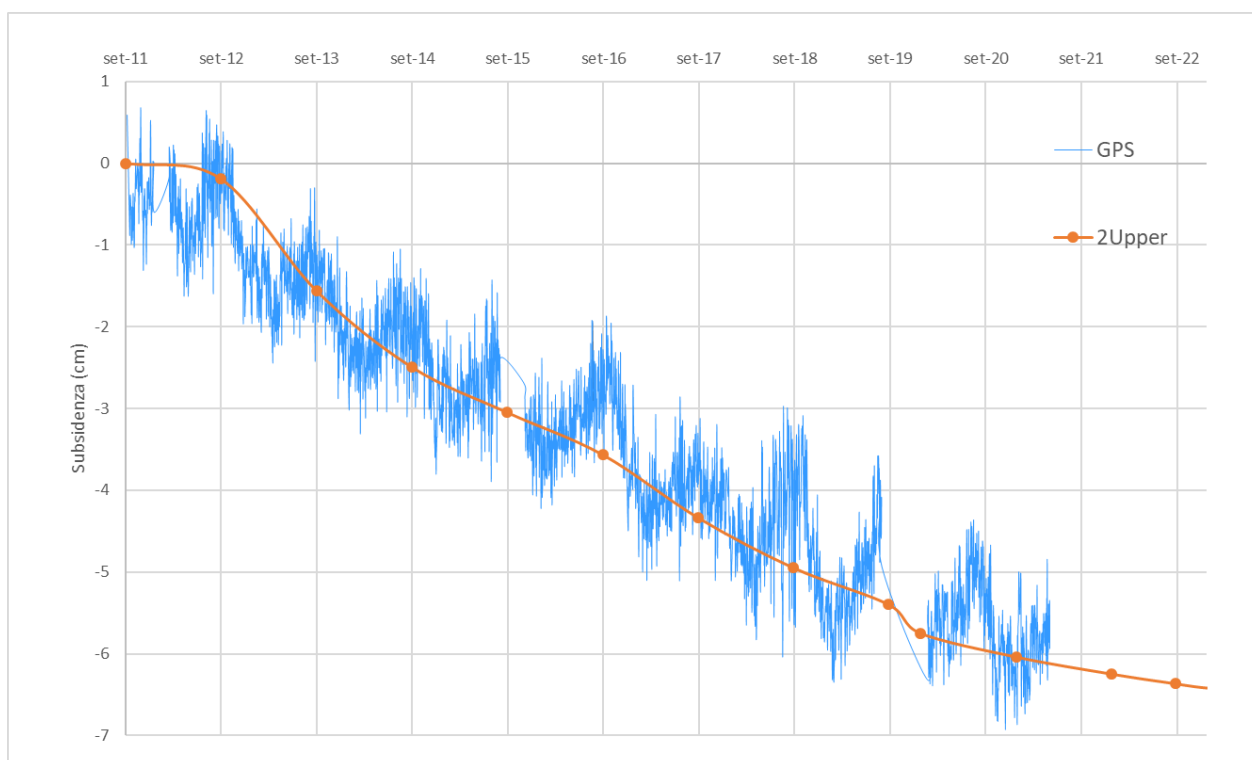
Figura 8 – Evoluzione delle isolinee dei 2 cm.

## 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.

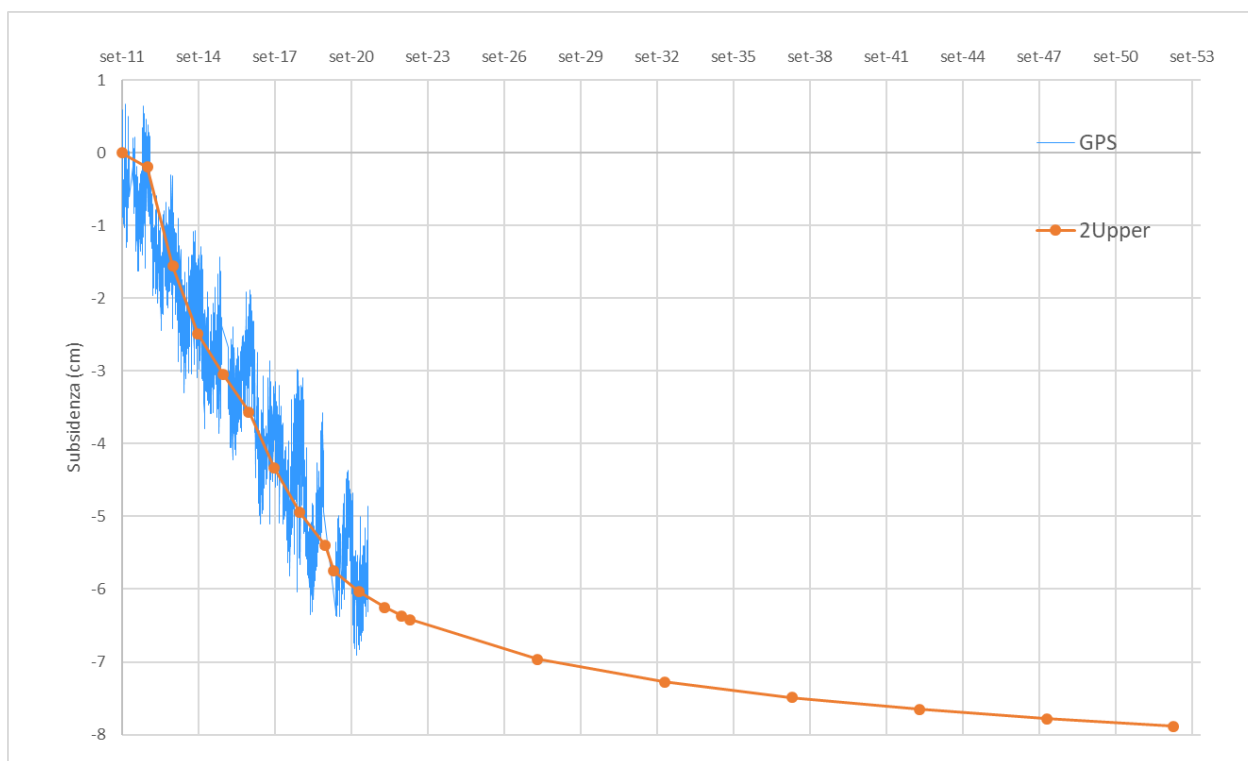
Il periodo di osservazione copre un intervallo temporale di circa 10 anni e fornisce un valore di velocità di subsidenza medio pari a circa 6 mm/anno. Il confronto tra i risultati ottenuti con il modello geomeccanico e la serie storica misurata dal CGPS è mostrato in Figura 9.

Si può osservare come il modello geomeccanico, calibrato su tale dato, riproduca con accuratezza la subsidenza rilevata dalla stazione CGPS: in Figura 10 è riportato il confronto tra l'andamento del GPS e il modello geomeccanico per l'intera simulazione.



**Figura 9 – Spostamento misurato e calcolato in corrispondenza della stazione CGPS di Guendalina.**





**Figura 10 – Spostamento misurato e calcolato fino alla fine della simulazione in corrispondenza della stazione CGPS di Guendalina.**

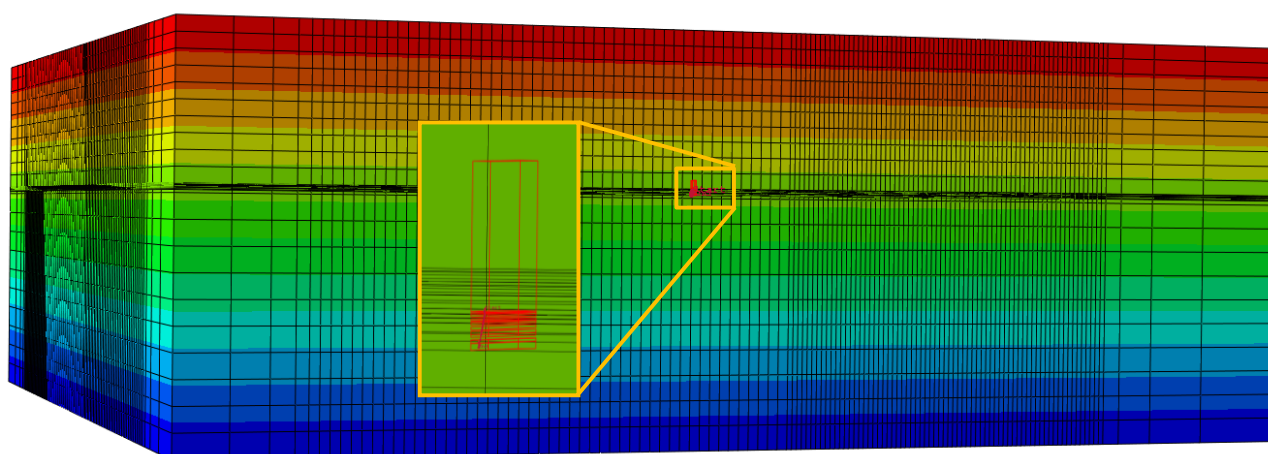
## 6 Confronto con i dati di compattazione da marker radioattivi

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 3 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 3 – Misure di deformazione registrate nel pozzo Guendalina 2dir tra luglio 2012 e giugno 2011. Valori negativi indicano compattazione e positivi espansione.**

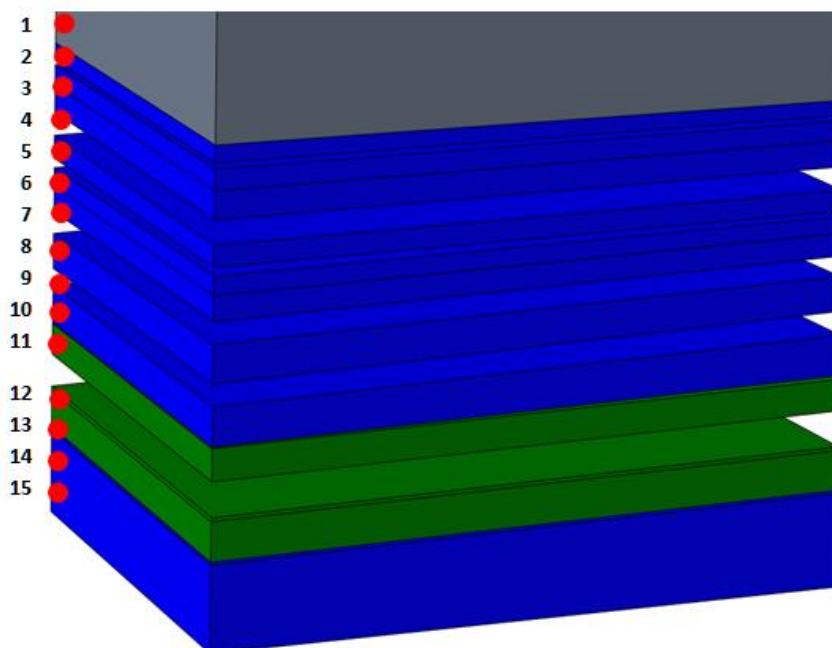
Spacing	Marker top	Marker bottom	TOP REF QUOTA				BOTTOM REF QUOTA				Deformazione luglio 2012 - giugno 2011
			MD	TVDSS	X	Y	MD	TVDSS	X	Y	
#	#	#	m	m	m	m	m	m	m	m	mm
16	1	3	3096.75	3007.89	2351317.63	4936753.94	3107.25	3018.08	2351315.39	4936752.79	6.38
15	2	4	3102.00	3012.98	2351316.51	4936753.37	3112.50	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 11 evidenzia la zona del modello in cui viene registrata la compattazione da marker.



**Figura 11 – Regione del modello di Guendalina interessata dai markers.**

In particolare, in Figura 12 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 12 – 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.**

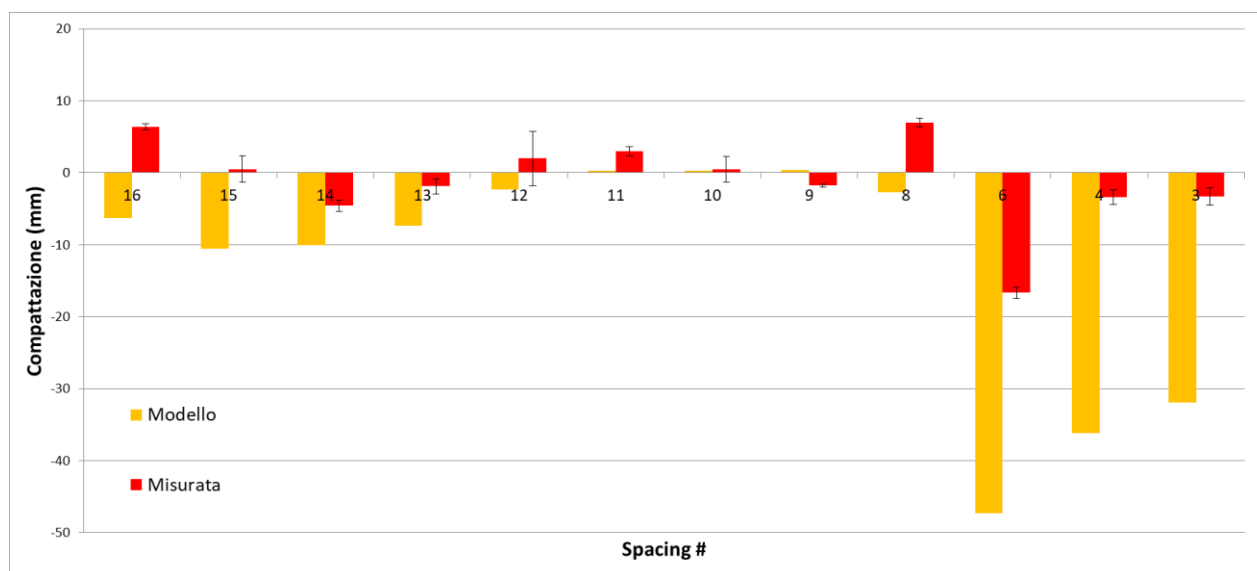
Il confronto tra la compattazione calcolata e misurata negli spacing è stato condotto interpolando linearmente i valori dello spostamento dei nodi della griglia più vicini ai marker per ottenere lo spostamento/deformazione in corrispondenza alla posizione dei marker stessi. I risultati sono riportati in Tabella 4.

spacing		
#	Modello	Misurata
16	-6.29	6.38
15	-10.55	0.51
14	-10.08	-4.60
13	-7.40	-1.89
12	-2.29	1.98
11	0.26	3.01
10	0.27	0.45
9	0.36	-1.79
8	-2.76	6.93
6	-47.32	-16.67
4	-36.21	-3.36
3	-31.92	-3.30

**Tabella 4 – Confronto tra la deformazione simulata e quella misurata nel periodo giugno 2011 e luglio 2012. Valori positivi indicano espansione, negativi compattazione.**

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. È per altro già stato osservato in studi precedenti [5], come le misurazioni fornite dai marker siano poco affidabili per la stima della comprimibilità qualora si riferiscano a spacing con variazioni di pressione limitate, quali le zone interessate da tali markers. In Figura 13 è riportato il confronto tra

compattazioni/espansioni misurate con le deviazioni standard associate e le compactazioni/espansioni ottenute dal modello geomeccanico. 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 compactazione da modello sovrastima infatti quanto misurato dai markers.



**Figura 13 – Confronto tra la deformazione simulata e quella misurata nel periodo giugno 2011 e luglio 2012. Valori positivi indicano espansione, negativi compactazione. 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 dal 2013. 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 però caratterizzate da una elevata deviazione standard e, nell'ambito di questo studio, non sono state considerate sufficientemente attendibili.



## Bibliografia

1. Abaqus<sup>TM</sup>, Simulia, versione 6.19.
2. Eclipse<sup>TM</sup>, Schlumberger, versione 2021.2.
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.