



Campo di Bonaccia

Modello Geomeccanico di Subsidenza

Management summary

Executive Summary

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo ai campi a gas di Bonaccia (Main), Bonaccia Nord-Ovest e Bonaccia Est, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dall'attività estrattiva.

Il modello geomeccanico utilizzato è 3D agli elementi finiti e per descrivere il comportamento del materiale si è adottata una legge costitutiva elasto-viscoplastica, i cui parametri sono stati calibrati sui dati GPS registrati sia in corrispondenza della piattaforma Main che della piattaforma Nord Ovest.

A fine simulazione, nel 2070, 30 anni dopo la fine della produzione, la massima subsidenza attesa è pari a 141 cm nello scenario di sviluppo *do-nothing* e a 144 cm nel caso di sviluppo del campo con un pozzo nella zona est; in entrambi i casi, la distanza minima del fenomeno dalla linea di costa risulta superiore ai 40 km.

Data

19/12/2022

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Produzione	4
2	Dati CGPS.....	5
3	Modello geomeccanico agli elementi finiti.....	6
3.1	Approccio metodologico.....	6
3.2	Geometria e griglia.....	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.....	12
4	Risultati delle simulazioni numeriche.....	13
5	Confronto con i dati CGPS	16
6	Confronto con i dati di compattazione da marker radioattivi	19
7	Bibliografia	21

1 Introduzione

Lo studio geomeccanico illustrato nel presente documento ha avuto come obiettivo la valutazione quantitativa della subsidenza indotta dalla coltivazione dei campi a gas di Bonaccia (Main), Bonaccia Nord-Ovest (NW) e Bonaccia Est, sia durante la loro vita produttiva che negli anni successivi alla chiusura dei loro pozzi.

Questi tre campi sono operati da Eni, che ne detiene il 100% delle quote, e sono ubicati nell'offshore Adriatico (concessione mineraria B.C 17.TO), a circa 57 km in direzione Est dal promontorio del Monte Conero (Figura 1).

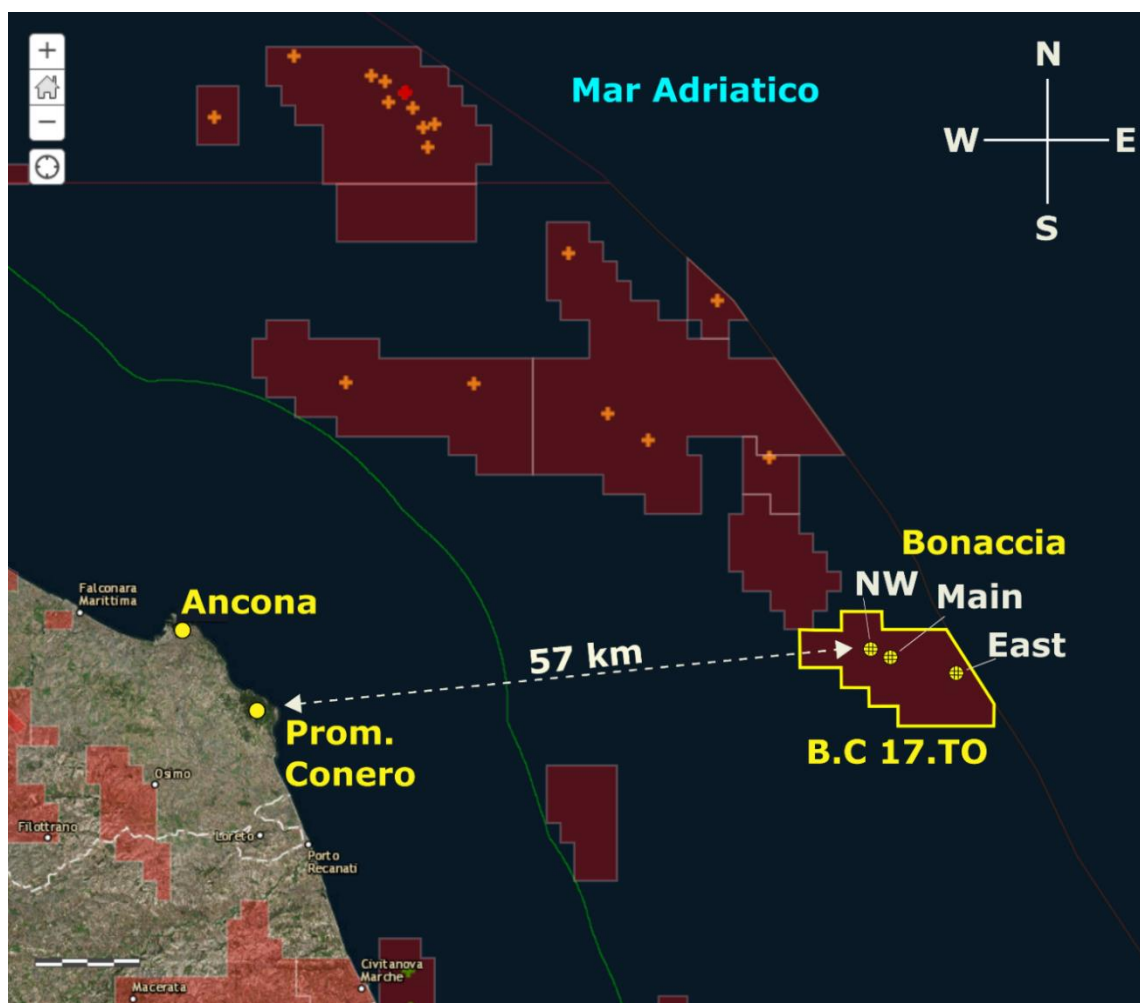


Figura 1 – Ubicazione del titolo minerario B.C 17.TO e dei campi di Bonaccia (Main), Bonaccia Nord-Ovest (NW) e Bonaccia Est. La presente mappa è un'elaborazione dell'originale pubblicata dal MISE.

L'evoluzione della subsidenza è stata stimata attraverso un modello numerico 3D costruito con il codice di calcolo agli elementi finiti AbaqusTM [1]. Le informazioni relative alla geometria del giacimento, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dal modello fluido-dinamico di giacimento [2], realizzato con il simulatore ai volumi finiti Eclipse [3].

Alcuni parametri caratteristici della legge costitutiva adottata per descrivere il comportamento del materiale sono stati calibrati in modo da riprodurre le variazioni altimetriche misurate dalle stazioni CGPS installate sulla piattaforma Bonaccia Main e sulla piattaforma Bonaccia NW (§2).

L'affidabilità del modello geomeccanico è stata inoltre verificata confrontandone i risultati con le misure di compattazione registrate in situ a partire dal 2015, lungo il pozzo Bonaccia NW 1 Dir. Tali misure sono state ottenute acquisendo annualmente la quota di 56 marker radioattivi sparati nella parete del pozzo (§6).

1.1 Produzione

Il dominio del modello fluido-dinamico di Bonaccia [2] include i 3 campi oggetto del presente studio geomeccanico (Figura 2): infatti, si è voluto descrivere sia la possibile comunicazione idraulica tra i livelli produttivi dei 3 campi sia la distribuzione del disturbo di pressione trasmesso attraverso gli acquiferi connessi.

L'avvio della produzione è avvenuto nel 1998 per i pozzi di Bonaccia Main, nel 2010 per quelli di Bonaccia Est e nel 2015 per quelli di Bonaccia NW.

In seguito all'aggiornamento produttivo e all'analisi dei dati di pressione e di produzione di tutte le stringhe, il volume di gas inizialmente in posto (GOIP) è pari a 15.8 GS_m³.

Alla fine della fase di *history match* (HM, 31 agosto 2022), quando risultano in produzione 12 stringhe da 10 pozzi, la produzione cumulativa di gas è pari a 6.94 GS_m³ con *recovery factor* (RF) del 44%.

Con il modello fluido-dinamico sono stati simulati 2 scenari di *forecast*: lo scenario "DoNothing" che prevede il mantenimento dei completamenti aperti a fine HM, senza ulteriori interventi di sviluppo; lo scenario "4Est" (DoNothing+1pozzo) che prevede un nuovo pozzo con testa sottomarina in Bonaccia Est.

Per lo scenario DN il termine della produzione è previsto a febbraio 2030, quando la produzione cumulativa avrà raggiunto 7.3 GS_m³ con *recovery factor* (RF) del 46.2%. Invece, per lo scenario 4EST è previsto a dicembre 2040, quando la produzione cumulativa avrà raggiunto 7.9 GS_m³ con RF del 50%.

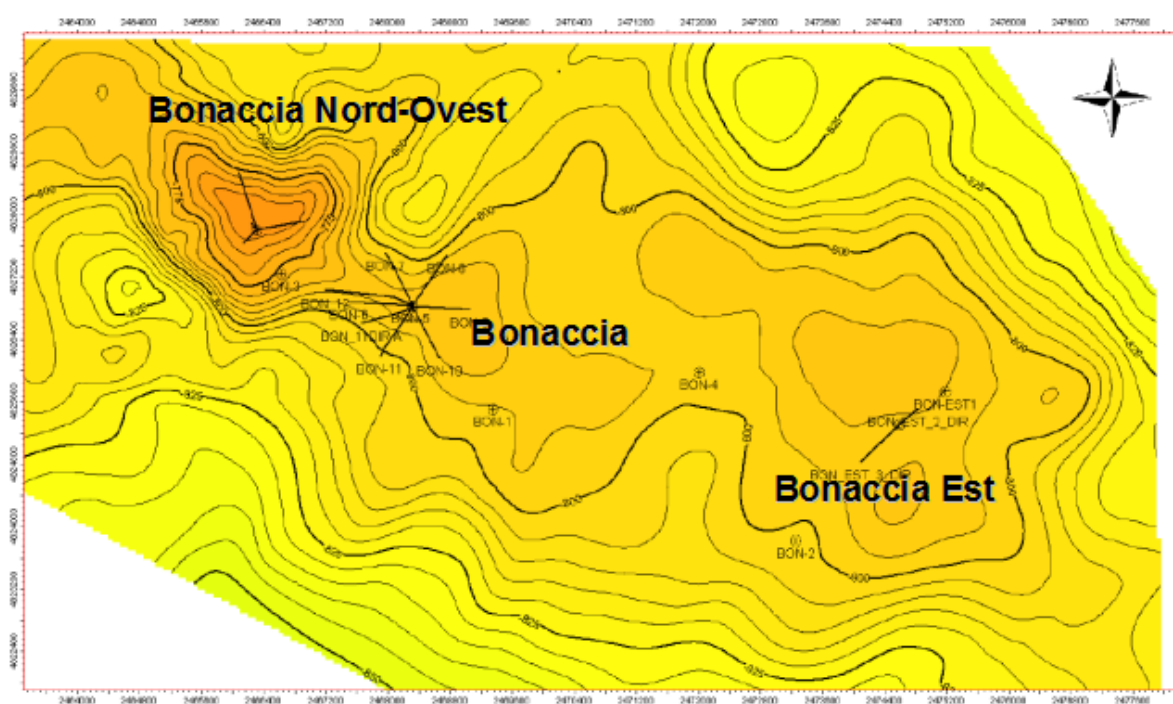


Figura 2 – Mappa strutturale del livello PLQ1-A1 in cui sono visibili le culmine dei campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest.

2 Dati CGPS

Mentre il campo di Bonaccia Est ha solamente teste pozzo sottomarine, Bonaccia (Main) e Bonaccia NW hanno piattaforme strumentate con una stazione CGPS per il monitoraggio continuo degli spostamenti.

Nel 2007 la registrazione delle misure è stata avviata sulla piattaforma Main (coordinate piane Gauss-Boaga Roma40: 2468307 m E, 4826828 m N, elevazione tavola rotary di 39 m e altezza d'acqua di 85 m); poi, nel 2015 anche sulla piattaforma NW (2466392 m E, 4827655 m N, altezza tavola rotary di 58 m e altezza d'acqua di 87 m) (Figura 3).

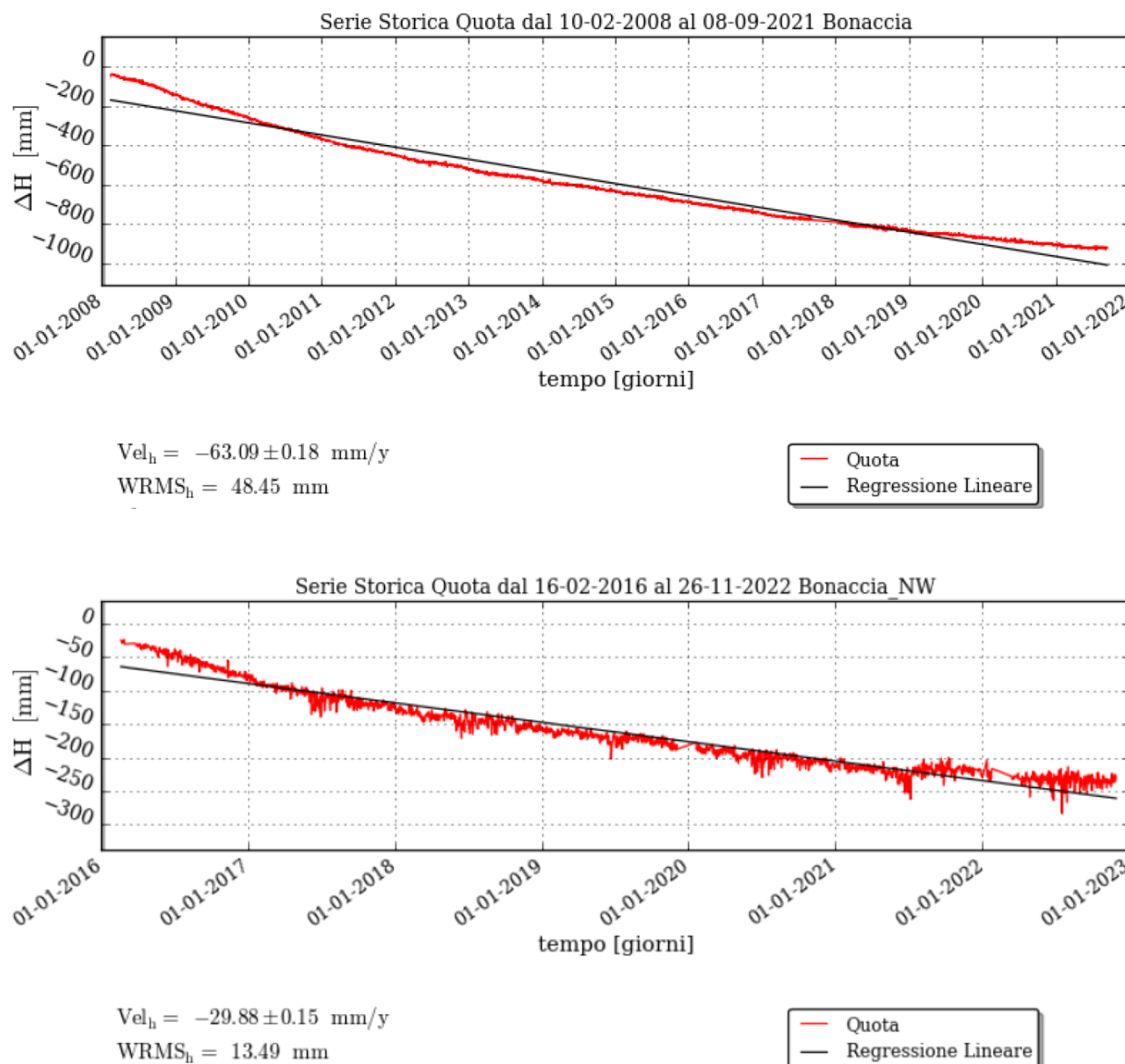



Figura 3 – Serie storiche di spostamenti verticali registrati dalle stazioni CGPS, aggiornate al giorno 08/09/2021 per la piattaforma MAIN (in alto) e al giorno 26/11/2022 per la piattaforma NW (in basso).

	Eni S.p.A.	Campo di Bonaccia - Modello Geomeccanico di Subsidenza Management Summary	Pagina 6 di 20
---	-------------------	--	----------------

3 Modello geomeccanico agli elementi finiti

Lo studio geomeccanico è stato svolto con un modello 3D agli elementi finiti, costruito utilizzando il codice di calcolo Abaqus [1].

3.1 *Approccio metodologico*

La costruzione del modello geomeccanico ha necessitato le seguenti informazioni dal modello fluido-dinamico [2]:

- mappe geologiche dei livelli interessati dal campo, estese in misura tale da descrivere interamente, non solo la zona mineralizzata, ma anche gli acquiferi laterali idraulicamente connessi agli strati produttivi;
- dettagliata descrizione di geometria, geologia e petrofisica dei livelli mineralizzati e degli acquiferi ad essi connessi idraulicamente, riprodotte con accuratezza dalla griglia di calcolo numerica;
- distribuzione ed evoluzione temporale della pressione nei livelli mineralizzati e negli acquiferi ad essi connessi idraulicamente.

Per la stima dei parametri caratterizzanti il comportamento meccanico della roccia secondo la legge costitutiva adottata nel modello geomeccanico (§3.3.3), sono stati utilizzate 2 tipi di informazione:

- risultati di prove di compressione eseguite in laboratorio su campioni di formazione geologica prelevati dal pozzo Bonaccia Est 3dir (§3.3.3), per una prima stima diretta;
- variazioni altimetriche registrate dalle stazioni CGPS installate sulla piattaforma Main (§2), per la successiva calibrazione.

È importante precisare che sia le simulazioni fluido-dinamiche sia le simulazioni geomeccaniche sono state prolungate fino al 2070, ben oltre la data prevista per la fine della produzione. Infatti, con le prime si è voluto valutare la ripressurizzazione del giacimento per effetto all'acquifero circostante, mentre con le seconde l'evoluzione della subsidenza a pozzi chiusi.

3.2 *Geometria e griglia*

Il dominio del modello geomeccanico è stato ottenuto da quello del modello fluido-dinamico (Figura 4). Quest'ultimo si estende per circa 42 km lungo la direzione X, circa 36 km lungo la direzione Y e circa 435 m lungo la direzione verticale Z. La griglia risulta composta da 365 celle lungo X, 248 celle lungo Y e 85 livelli lungo Z, per un totale di 7694200 celle, di cui 6698480 attive.

Affinché le condizioni al contorno imposte nel modello geomeccanico (spostamento nullo alla base e spostamento orizzontale impedito ai lati della griglia) non influenzino la soluzione fornita in corrispondenza del giacimento, il dominio del modello geomeccanico è stato ottenuto estendendo lateralmente quello del modello fluido-dinamico con 1 elemento di *side-burden* per ogni lato e raggiungendo così un'estensione di 84 km lungo X e 76 km lungo Y. Per lo stesso motivo, mentre la base del modello fluido-dinamico si trova ad una profondità di circa 1210 m e corrisponde alla base del giacimento, quella del modello geomeccanico è posta a 5000 m; tale estensione verso il basso è stata discretizzata con 5 livelli di *under-burden*. Analogamente, mentre la sommità del modello

fluido-dinamico si trova ad una profondità di circa 775 m e corrisponde alla sommità del giacimento, quella del modello geomeccanico è posta in corrispondenza del fondale marino, a circa 86 m; anche tale estensione verso l'alto è stata discretizzata con 5 livelli di *over-burden*.

Al fine di limitare il numero di gradi di libertà del modello geomeccanico, è stata effettuata un'operazione di *upscaling* nel piano orizzontale unendo tra loro celle del modello fluido-dinamico: alle 365 celle lungo X corrispondono 166 elementi, mentre alle 108 celle lungo Y corrispondono 56 elementi. Verticalmente sono stati accorpati solo due livelli in modo da ottenere 83 layer.

La griglia del modello geomeccanico risulta, quindi, costituita da 168x110x93 (1718640) elementi, per un totale di 6819090 gradi di libertà.

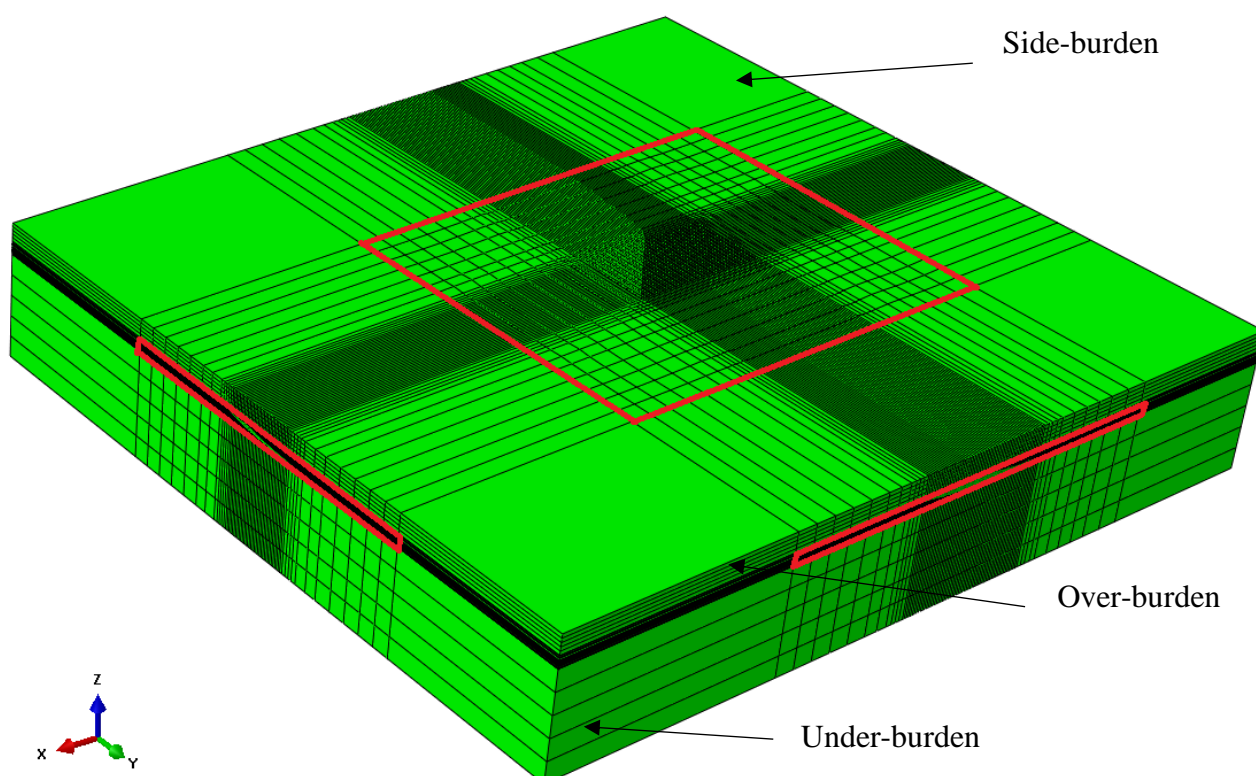


Figura 4 – Confronto tra l'estensione del modello geomeccanico e del modello fluido-dinamico (riquadri rossi). Per una migliore visualizzazione, le distanze lungo asse Z sono state amplificate di 3 volte.

3.3 Proprietà dei materiali

3.3.1 Densità

A partire dai log sonici e dai log di densità registrati lungo i pozzi Bonaccia 1, Bonaccia 2, Bonaccia 3, Bonaccia 4 e Bonaccia Sud 1, si è utilizzato l'approccio di Gardner et al. [4] per calcolare un profilo continuo di densità della roccia (Figura 5). Esso è stato interpolato attraverso la seguente relazione:

$$\rho(g/m^3) = 1.3126 \cdot z^{0.0718} \quad z_{fm} \leq z \quad [\text{Eq. 3.1}]$$

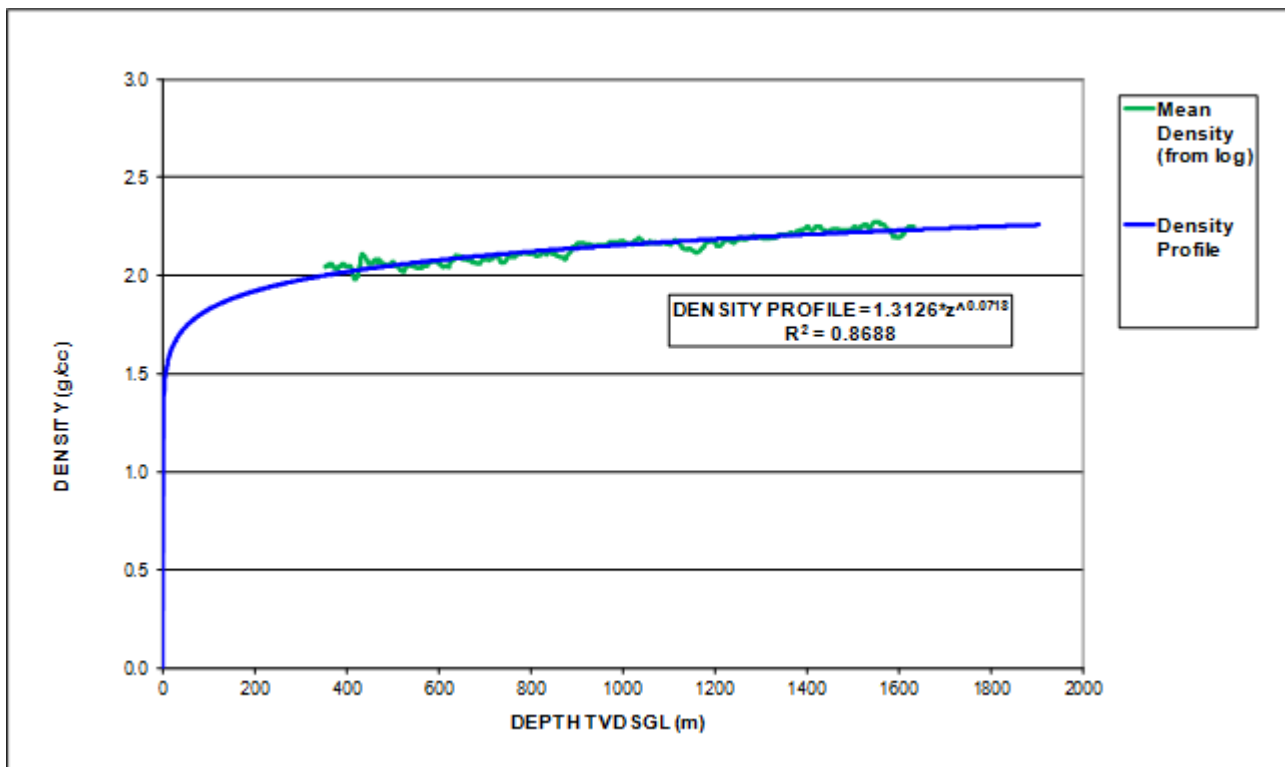


Figura 5 - Profilo di densità media da log e profilo di densità interpolato.

dove la profondità (z) è misurata in metri TVDSS (*True Vertical Depth Sub Sea*), mentre z_{fm} indica la profondità del fondale marino ed è pari a 86 metri.

La curva analitica così ottenuta fornisce un'ottima approssimazione della densità misurata ed è stata implementata in formato tabulare nel modello geomeccanico.

Attraverso un'operazione di integrazione della densità lungo la verticale, si è ottenuto il seguente profilo della tensione totale verticale σ_v :

$$\sigma_v(\text{bar}) = 1.2247 \cdot (z - z_{fm})^{1.0718} \cdot 9.81/100 + 8.69 \quad z_{fm} \leq z \quad [\text{Eq. 3.2}]$$

in cui si è tenuto conto del peso dei circa 86 metri d'acqua sopra il fondale marino.

3.3.2 Peso specifico dei fluidi saturanti

Viene fornito al modello geomeccanico 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 fluido-dinamico.

3.3.3 Proprietà meccaniche

Il comportamento meccanico del materiale costituente le formazioni geologiche è stato descritto secondo la legge costitutiva elasto-viscoplastica 'Soft-Soil-Creep' [5] (VNM), che è stata formulata arricchendo il classico modello elasto-plastico 'Modified Cam-Clay Model'[6] (MCCM) con la componente viscosa della deformazione. Evidenze sperimentali mostrano infatti che materiali come

quelli dei giacimenti dell'area adriatica possono presentare una risposta di tipo elasto-viscoplastico alle variazioni di sforzo efficace [7].

I seguenti parametri del VNM hanno un chiaro significato fisico e, fatta eccezione per l'indice di creep, sono analoghi a quelli del MCCM:

- λ^* indice di compressione modificato;
- κ^* indice di ricompressione modificato;
- μ^* indice di creep modificato;
- ν rapporto di Poisson;
- M pendenza della retta di stato critico;
- $pseudo-OCR_{ini-rif}$ grado di sovraconsolidazione iniziale.

Al parametro ν è stato assegnato il valore di 0.3, mentre M è stata posta pari a 1.33 [8].

Invece, data l'impossibilità di stimare $pseudo-OCR_{ini-rif}$ da prove di laboratorio, si è assunto che la velocità di deformazione sia stata costante durante tutto il periodo di sedimentazione e si è ottenuta una stima analitica pari a 1.357.

I valori dei parametri λ^* , κ^* e μ^* sono stati ottenuti direttamente dall'interpretazione dei risultati di prove di laboratorio effettuate su 10 campioni prelevati dal pozzo Bonaccia Est 3dir [9] e sono pari a: 7.10e-2, 6.13e-3 e 1.38e-3, rispettivamente.

Successivamente, al fine di riprodurre con la maggior accuratezza possibile le misure registrate dalle stazioni CGPS installate sulla piattaforma Bonaccia Main e sulla piattaforma Bonaccia NW (§2), i valori di λ^* e κ^* sono stati calibrati, diventando 7.46e-2 e 6.43e-3 (variazione di circa il 5%). Il valore di μ^* è stato diminuito a 1.3e-3 (variazione di circa il 6%).

Il parametro geomeccanico chiave negli studi di subsidenza è la comprimibilità edometrica c_m del materiale, calcolata come segue, per la fase di scarico-ricarico:

$$c_{m-sr} = \kappa^* / \sigma'_v \quad [\text{Eq. 3.3}]$$

e per la fase di carico:

$$c_{m-c} = \lambda^* / \sigma'_v \quad [\text{Eq. 3.4}]$$

dove σ'_v è la tensione efficace verticale, definita come la differenza tra la tensione totale verticale e la pressione dei pori p derivata dal modello fluido-dinamico:

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad [\text{Eq. 3.5}]$$

Si sottolinea che le simulazioni fluido-dinamiche sono state realizzate utilizzando valori di comprimibilità dei pori coerenti con quelli della comprimibilità edometrica c_m del modello geomeccanico. Si precisa che i livelli inattivi nel modello fluido-dinamico e le regioni di over-burden, under-burden e side-burden sono descritti come mezzi elastici lineari non porosi, approssimazione più che sufficiente data l'assunzione che in tali intervalli non vi siano variazioni di pressione dovute alla produzione.

Nella Tabella 1 si riportano i valori di compressibilità per tutti i livelli del modello geomeccanico. In particolare, per i livelli inattivi del modello fluido-dinamico è stata utilizzata in via cautelativa la stessa comprimibilità del livello attivo immediatamente superiore.

**Tabella 1 – Corrispondenza livelli Eclipse e Abaqus. Profondità, stress totale, pressione, stress efficace e comprimibilità edometrica.**

Layer Abaqus	Layer iniz Eclipse	Layer finale Eclipse	Depth (m)	σ_v (bar)	p (bar)	σ'_v (bar)	cm (1/bar)
Overburden layer 1			195.7	27.15	19.8	7.38	1.01E-02
Overburden layer 2			305.3	47.49	30.8	16.64	4.48E-03
Overburden layer 3			415.0	68.61	41.9	26.68	2.79E-03
Overburden layer 4			524.6	90.25	53.0	37.24	2.00E-03
Overburden layer 5			634.3	112.28	64.1	48.20	1.55E-03
1	1	1	739.6	133.76	75.1	58.66	1.27E-03
2	2	2	739.6	133.76	75.1	58.66	1.27E-03
3	3	3	739.6	133.76	75.1	58.66	1.27E-03
4	4	4	739.6	133.76	75.1	58.66	1.27E-03
5	5	5	739.6	133.76	75.1	58.66	1.27E-03
6	6	6	739.6	133.76	75.1	58.66	1.27E-03
7	7	7	769.4	139.88	78.7	61.18	1.22E-03
8	8	8	769.4	139.88	78.7	61.18	1.22E-03
9	9	9	769.4	139.88	78.7	61.18	1.22E-03
10	10	10	769.4	139.88	78.7	61.18	1.22E-03
11	11	11	769.4	139.88	78.7	61.18	1.22E-03
12	12	12	769.4	139.88	78.7	61.18	1.22E-03
13	13	13	795.7	145.30	87.5	57.80	1.29E-03
14	14	14	795.7	145.30	87.5	57.80	1.29E-03
15	15	15	795.7	145.30	87.5	57.80	1.29E-03
16	16	16	803.7	146.95	83.0	63.95	1.17E-03
17	17	17	803.7	146.95	83.0	63.95	1.17E-03
18	18	18	803.7	146.95	83.0	63.95	1.17E-03
19	19	19	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
20	20	20	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
21	21	21	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
22	22	22	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
23	23	23	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
24	24	24	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
25	25	25	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
26	26	26	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
27	27	27	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
28	28	28	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
29	29	29	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
30	30	30	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
31	31	31	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
32	32	32	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
33	33	33	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
34	34	34	848.8	156.28	86.3	69.98	1.07E-03
35	35	35	899.3	166.78	91.7	75.08	9.93E-04
36	36	36	899.3	166.78	91.7	75.08	9.93E-04
37	37	37	899.3	166.78	91.7	75.08	9.93E-04
38	38	38	899.3	166.78	91.7	75.08	9.93E-04
39	39	39	899.3	166.78	91.7	75.08	9.93E-04
40	40	40	899.3	166.78	91.7	75.08	9.93E-04
41	41	41	913.7	169.78	93.0	76.78	9.71E-04
42	42	42	913.7	169.78	93.0	76.78	9.71E-04
43	43	43	924.3	171.98	94.4	77.58	9.61E-04
44	44	44	924.3	171.98	94.4	77.58	9.61E-04
45	45	45	924.3	171.98	94.4	77.58	9.61E-04

46	46	46	932.8	173.77	95.0	78.77	9.46E-04
47	47	47	944.4	176.19	96.2	79.99	9.32E-04
48	48	48	944.4	176.19	96.2	79.99	9.32E-04
49	49	49	944.4	176.19	96.2	79.99	9.32E-04
50	50	50	948.5	177.05	96.7	80.35	9.28E-04
51	51	51	955.9	178.60	97.5	81.10	9.19E-04
52	52	52	955.9	178.60	97.5	81.10	9.19E-04
53	53	53	955.9	178.60	97.5	81.10	9.19E-04
54	54	54	967.3	181.00	98.1	82.90	8.99E-04
55	55	55	987.9	185.31	105.8	79.51	9.38E-04
56	56	56	966.6	180.84	106.0	74.84	9.96E-04
57	57	57	998.9	187.62	106.1	81.52	9.15E-04
58	58	58	1000.9	188.04	106.3	81.79	9.11E-04
59	59	59	1004.8	188.86	107.6	81.30	9.17E-04
60	60	60	1007.9	189.51	107.9	81.65	9.13E-04
61	61	61	1017.5	191.53	108.5	83.03	8.98E-04
62	62	62	1018.8	191.80	108.6	83.20	8.96E-04
63	63	63	1022.2	192.52	108.7	83.82	8.89E-04
64	64	64	1022.2	192.52	108.7	83.82	8.89E-04
65	65	65	1026.2	193.36	109.2	84.16	8.86E-04
66	66	66	1029.4	194.03	109.6	84.43	8.83E-04
67	67	67	1041.9	196.67	110.2	86.51	8.62E-04
68	68	68	1042.6	196.81	110.5	86.31	8.64E-04
69	69	69	1083.9	205.53	110.2	95.36	7.82E-04
70	70	70	1083.9	205.53	110.2	95.36	7.82E-04
71	71	71	1083.9	205.53	110.2	95.36	7.82E-04
72	72	72	1083.9	205.53	110.2	95.36	7.82E-04
73	73	73	1059.1	200.29	115.1	85.21	8.75E-04
74	74	74	1063.8	201.29	115.3	85.99	8.67E-04
75	75	75	1063.8	201.29	115.3	85.99	8.67E-04
76	76	76	1063.8	201.29	115.3	85.99	8.67E-04
77	77	77	1081.8	205.09	117.4	87.72	8.50E-04
78	78	78	1081.8	205.09	117.4	87.72	8.50E-04
79	79	79	1081.8	205.09	117.4	87.72	8.50E-04
80	80	80	1081.8	205.09	117.4	87.72	8.50E-04
81	81	81	1123.0	213.81	126.2	87.61	8.51E-04
82	82	82	1128.0	214.87	126.5	88.34	8.44E-04
83	83	83	1131.7	215.66	126.6	89.09	8.37E-04
84	84	84	1132.5	215.83	126.7	89.15	8.36E-04
85	85	85	1133.9	216.12	126.7	89.42	8.34E-04
Underburden layer 1			1767.6	353.06	178.6	174.46	4.27E-04
Underburden layer 2			2414.1	496.72	243.9	252.79	2.95E-04
Underburden layer 3			3060.6	643.31	309.2	334.06	2.23E-04
Underburden layer 4			3707.0	792.22	374.6	417.65	1.78E-04
Underburden layer 5			4353.5	943.06	439.9	503.17	1.48E-04


3.4 Inizializzazione e storia di pressione

3.4.1 Stato tensionale iniziale

Per il campo di Bonaccia, lo sforzo totale verticale σ_v è stato calcolato dal gradiente di over-burden definito a partire da log sonici e di densità, come descritto in §3.3.1.

Invece, lo sforzo efficace σ'_h è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad [\text{Eq. 3.6}]$$

	Eni S.p.A.	Campo di Bonaccia - Modello Geomeccanico di Subsidenza Management Summary	Pagina 12 di 20
--	-------------------	--	-----------------

dove K_0 rappresenta il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.54 [8]. Inoltre, si è assunto che lo stato tensionale sia isotropo nel piano orizzontale.

3.4.2 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello fluido-dinamico, è stata importata nel modello agli elementi finiti.

Le pressioni sono state importate con passo temporale biennale o annuale (a seconda delle date delle misurazioni dei marker) fino alla chiusura dei pozzi (dicembre 2040) e poi con passo temporale pluriennale fino alla fine della simulazione (gennaio 2070).

Inoltre, al fine di confrontare i risultati forniti dal modello geomeccanico con i dati di compattazione da markers radioattivi (§6), sono state estratte le pressioni anche in corrispondenza delle 7 date di acquisizione di tali misure, per un totale di 28 step temporali della simulazione geomeccanica.

4 Risultati delle simulazioni numeriche

In questo paragrafo si presentano i risultati forniti dalle simulazioni geomeccaniche agli elementi finiti. Il fenomeno di subsidenza viene descritto sinteticamente attraverso tre grandezze:

1. la subsidenza massima;
2. l'estensione massima, definita come la massima distanza del punto di massimo dalla linea di iso-subsidenza dei 2 cm – considerata come limite areale del fenomeno;
3. la distanza minima della linea di iso-subsidenza dei 2 cm dalla costa.

Nella Tabella 2 si riportano i valori di tali grandezze per i 2 possibili scenari di sviluppo dei campi a gas di Bonaccia. Sono state scelte 4 date significative: la fine della fase di *history* del modello fluido-dinamico (31 agosto 2022), il termine della produzione per lo scenario DoNothing (febbraio 2030), il termine della produzione per lo scenario 4EST (dicembre 2040) e la fine della simulazione (gennaio 2070). Quest'ultima data è stata fissata oltre 30 anni dopo la chiusura dei pozzi prevista nello scenario 4EST, al fine di valutare l'influenza della ri-pressurizzazione sull'evoluzione della subsidenza.

Tabella 2 – Indici caratteristici del fenomeno di subsidenza previsto dal modello geomeccanico.

Data	Scenario di Sviluppo	Subsidenza Punto di Max (cm)	Estensione Max (km)	Distanza Min da Costa (km)
31-ago-22	\	133	14	45
01-feb-30	DN	141	16	44
01-gen-43		142	17	43
01-gen-70		141	21	41
01-gen-32	4EST	142	17	44
01-dic-40		144	18	43
01-gen-70		144	23	41

Dall'analisi dei risultati segue che:

- in entrambi gli scenari di sviluppo, la massima subsidenza risulta localizzata in corrispondenza del punto di coordinate X=2467982 Y=4826903 situato in prossimità della piattaforma Bonaccia MAIN;
- in corrispondenza del punto di massima subsidenza, il modello geomeccanico prevede: i) nello scenario DoNothing, una subsidenza di 142 cm a fine produzione e di 141 cm a fine simulazione; ii) nello scenario 4EST, 144 cm di subsidenza a fine produzione che rimane invariata fino alla fine della simulazione (Figura 6).
- in entrambi i casi, a fine simulazione, si ha minima distanza dalla costa superiore a 40 km. In Figura 7 e Figura 8, per il caso DoNothing, si riportano le mappe di subsidenza a fine produzione e a fine simulazione. Come dimostra l'analisi dell'evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm (Figura 9), a fine simulazione l'estensione dell'area interessata dal fenomeno risulta in fase di stabilizzazione nella direzione della costa.

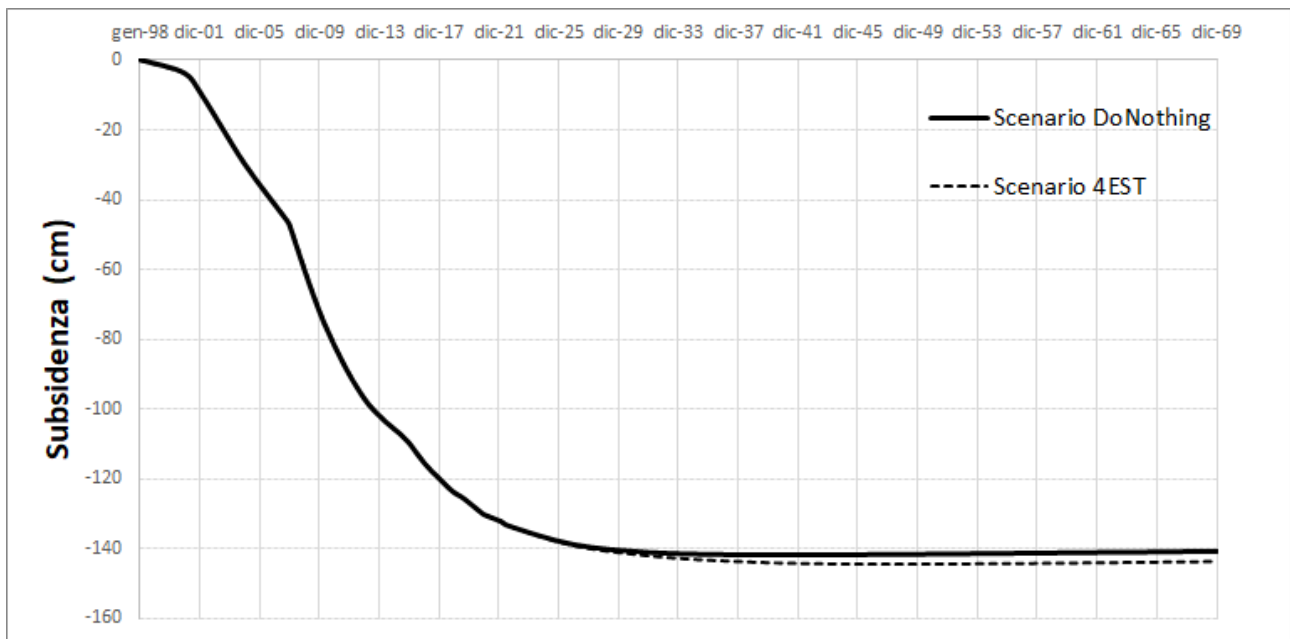


Figura 6 – Evoluzione temporale della subsidenza nel punto di massimo.

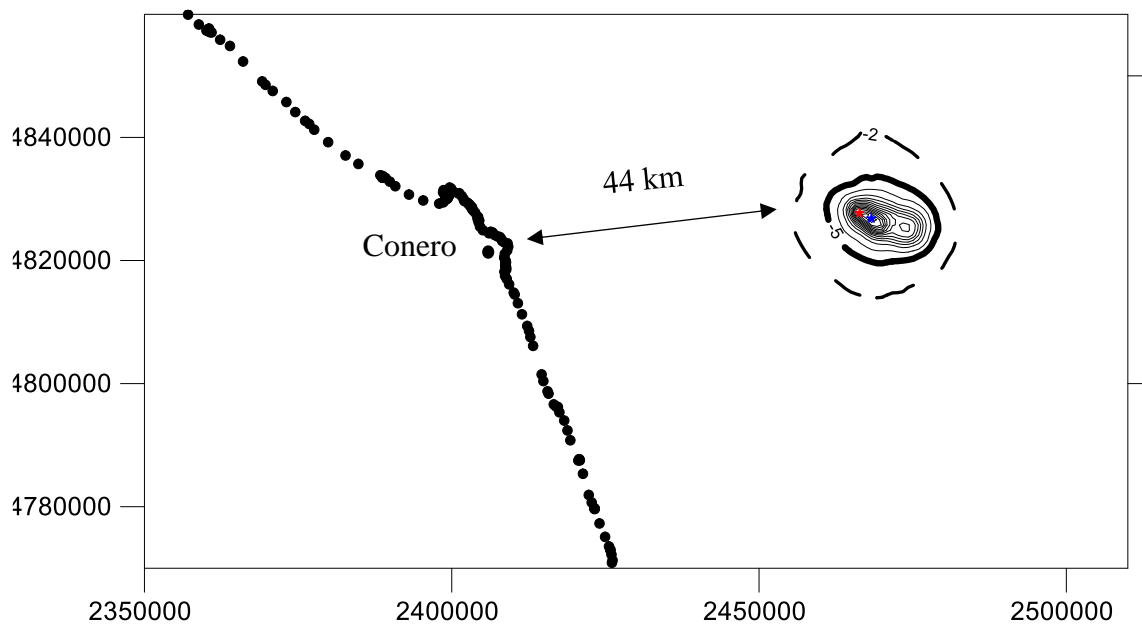


Figura 7 – Linee di iso-subsidenza dei 2 cm (linea tratteggiata) e 5 cm (linea continua) al termine della produzione (caso DoNothing), febbraio 2030. La stella nera indica la piattaforma Main, quella rossa la NW.

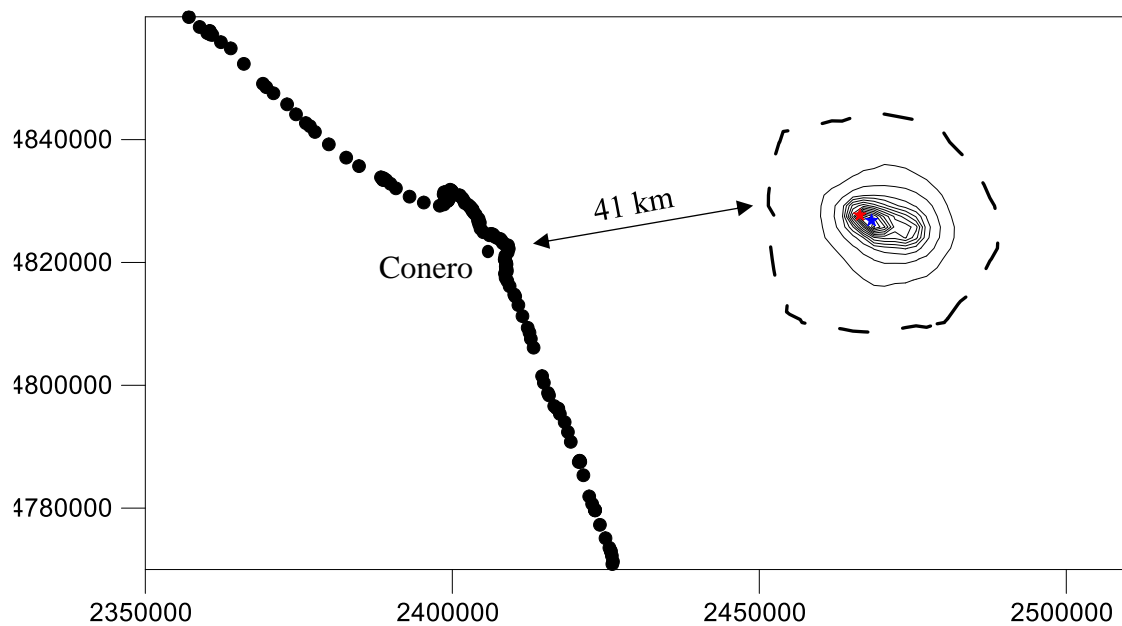


Figura 8 – Linee di iso-subsidenza dei 2 cm (linea tratteggiata) e 5 cm (linea continua) a fine simulazione (caso DoNothing), gennaio 2070. La stella nera indica la piattaforma Main, quella rossa la NW.

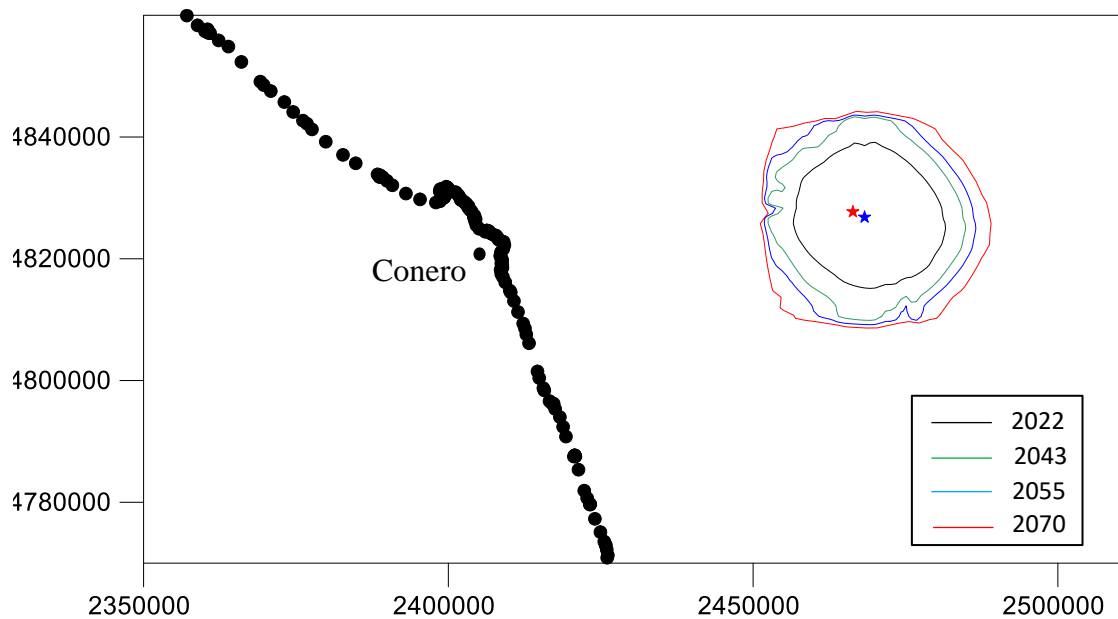


Figura 9 – Evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm (caso DoNothing).

5 Confronto con i dati CGPS

La Tabella 3 riporta la subsidenza calcolata in corrispondenza delle 2 piattaforme del campo di Bonaccia. Nelle Figure 10, 11, 12 e 13 si mostra il confronto tra la subsidenza stimata dal modello geomeccanico e la serie storica di spostamenti verticali registrati dalle stazioni CGPS in corrispondenza delle 2 piattaforme. Si nota come il modello geomeccanico sia in buon accordo con le misure da GPS per entrambe le piattaforme.

Tabella 3 – Risultati del modello geomeccanico in corrispondenza delle piattaforme del campo di Bonaccia.

Data	Subsidenza (cm)			
	Main		NW	
	DN	DN+4EST	DN	DN+4EST
31-ago-22	133		120	
01-gen-32	140	141	128	128
01-gen-43	141	144	129	131
01-gen-70	140	143	128	131

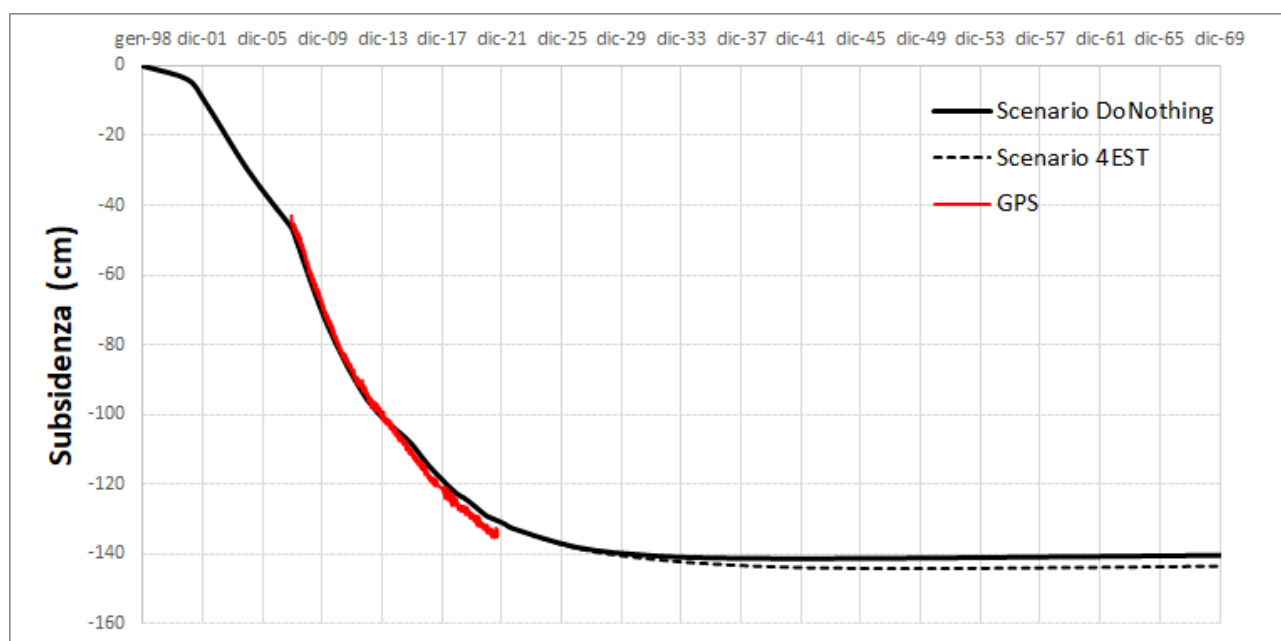
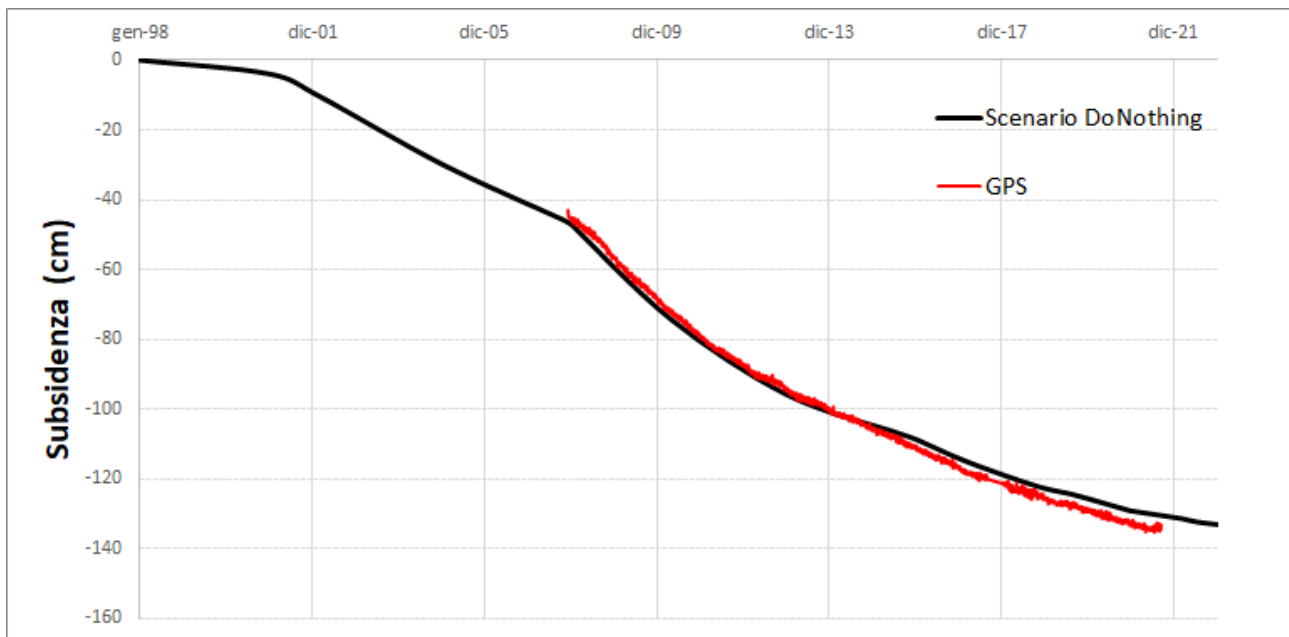
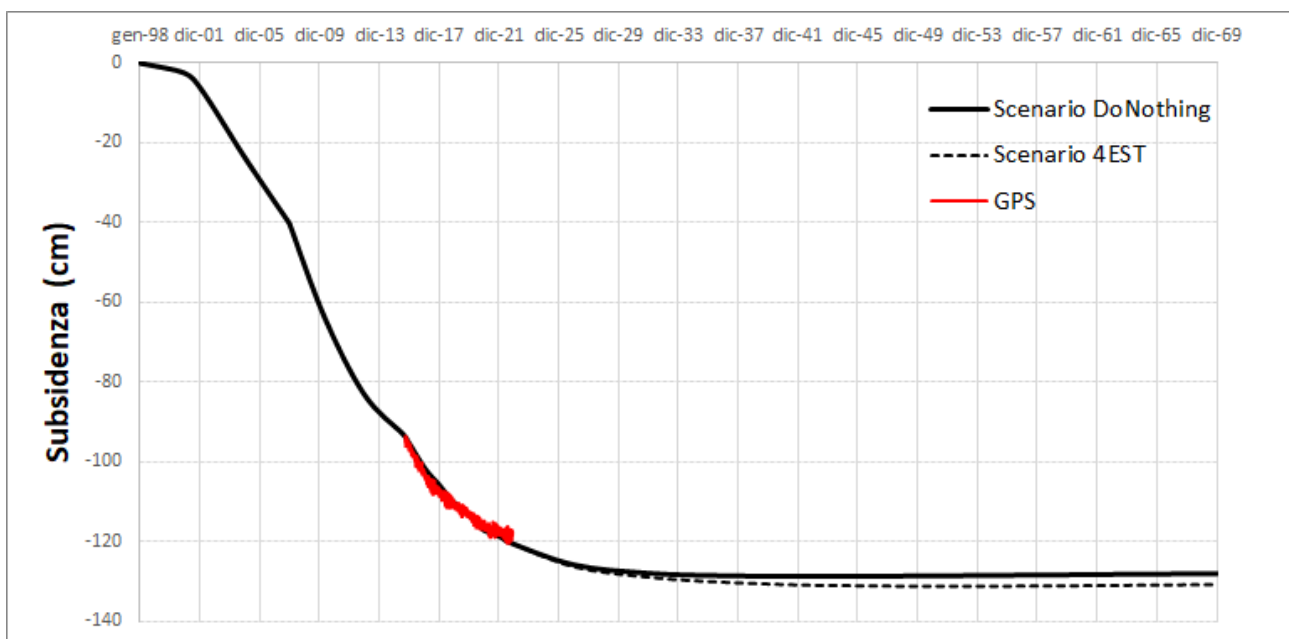


Figura 10 – Confronto tra spostamento verticale misurato e simulato alla piattaforma Bonaccia Main.

**Figura 11 – Ingrandimento della Figura 10.****Figura 12 – Confronto tra spostamento verticale misurato e simulato alla piattaforma Bonaccia NW.**

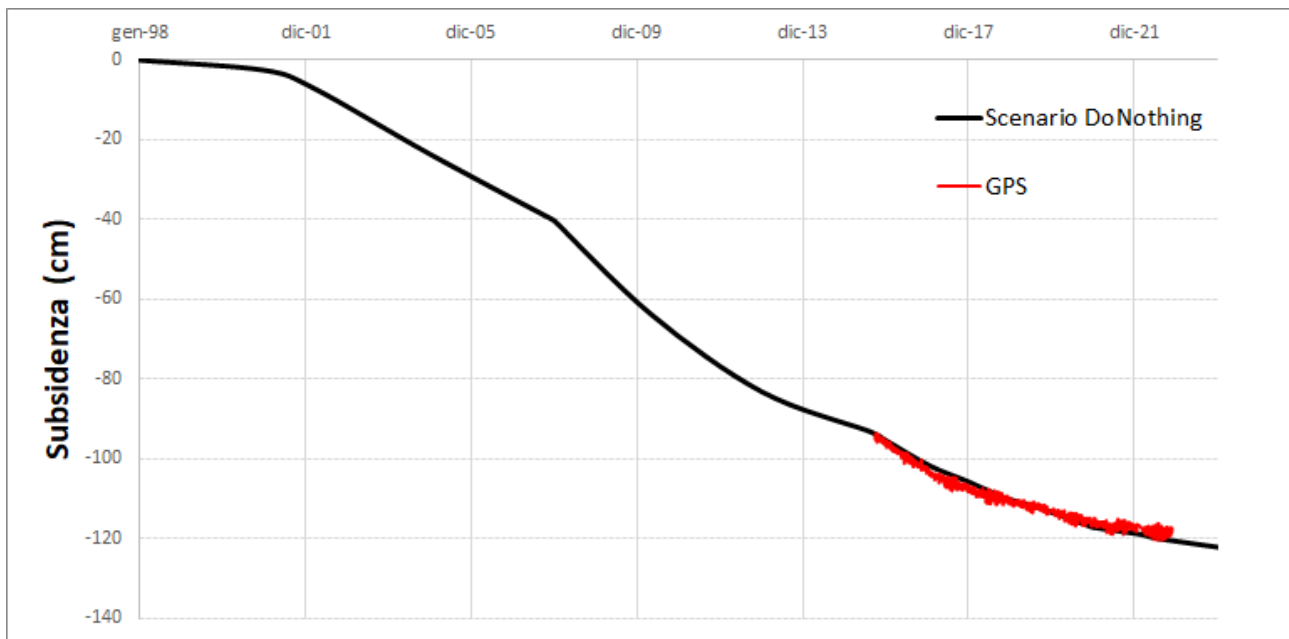


Figura 13 – Ingrandimento della Figura 12.

6 Confronto con i dati di compattazione da marker radioattivi

Al fine di misurare *in situ* la compattazione indotta dalla produzione, l'intervallo che va da 709 a 1150 m di profondità è monitorato attraverso 56 marker radioattivi sparati in formazione lungo la parete del pozzo Bonaccia NW 1dir. In occasione dei sondaggi annuali è stata rilevata la posizione di 51 dei 56 markers: il livello di emissioni radioattive dei 5 markers al di sotto di 1103 m MD è risultato, infatti, troppo basso. Le misure dell'ampiezza degli intervalli (*marker spacing*) definiti dai 51 markers rilevati sono riportate in Tabella 4.

In Figura 14 si mostra il confronto tra le misure acquisite e le stime fornite dal modello per la variazione di ampiezza dei marker spacing, rispetto al primo sondaggio del 2015. Per le misure viene mostrata anche la barra di confidenza o errore, la cui ampiezza è pari a 3 volte la deviazione standard, tale da includere il 99.7% delle misure disponibili. Si nota un buon accordo con le misure di compattazione disponibili, confermato dai dati CGPS registrati in corrispondenza delle piattaforme (§5).

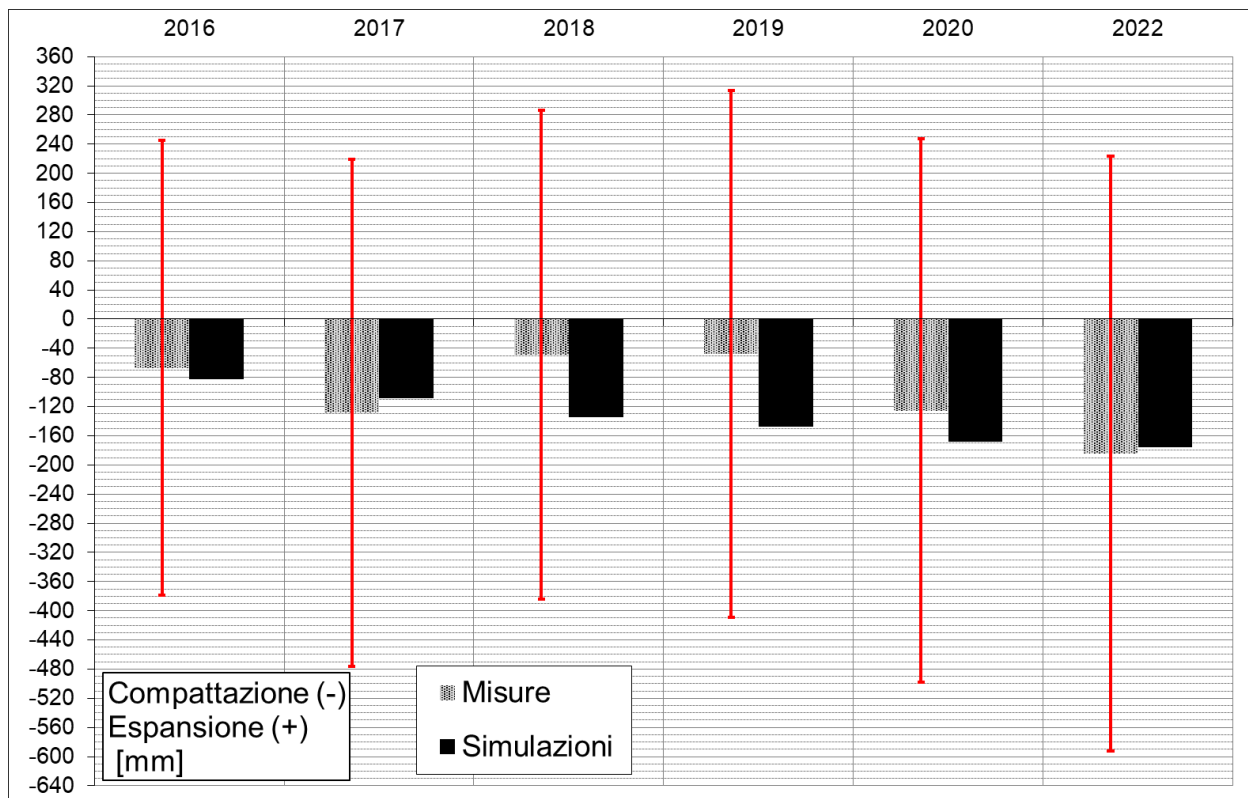



Figura 14 – Confronto tra le deformazioni verticali misurate e le corrispondenti stime del modello geomeccanico, rispetto al primo sondaggio del 2015, con riferimento all'insieme di tutti i marker spacing monitorati.



Tabella 4 - Misure dell'ampiezza dei marker spacing a profondità nominale da 709 a 1103 m MD.

Marker Spacing	Profondità Originale		Ampiezza Nominale	Sondaggio						
	Top Marker	Bottom Marker		ago-15	gen-17	dic-17	nov-18	set-19	nov-20	set-22
#	(m MD)		(m)							
45	709.440	719.780	10.340	10.341	10.340	10.339	10.342	10.342	10.342	10.339
44	719.780	730.280	10.500	10.503	10.502	10.502	10.503	10.504	10.504	10.502
43	730.280	740.780	10.500	10.501	10.501	10.500	10.502	10.502	10.502	10.501
42	740.780	751.280	10.500	10.498	10.499	10.498	10.499	10.499	10.499	10.498
41	751.280	761.790	10.510	10.504	10.504	10.503	10.505	10.505	10.505	10.504
40	761.790	772.220	10.430	10.438	10.436	10.433	10.436	10.438	10.438	10.435
39	772.220	782.690	10.470	10.468	10.471	10.469	10.470	10.471	10.471	10.468
38	782.690	793.220	10.530	10.531	10.531	10.529	10.530	10.531	10.531	10.528
37	793.220	803.700	10.480	10.472	10.468	10.467	10.465	10.470	10.470	10.466
36	803.700	814.250	10.550	10.549	10.548	10.547	10.551	10.551	10.551	10.552
35	814.250	824.500	10.250	10.527	10.532	10.528	10.533	10.528	10.528	10.530
34	829.940	840.300	10.360	10.539	10.551	10.537	10.540	10.539	10.539	10.540
33	840.300	850.890	10.590	10.403	10.403	10.403	10.405	10.406	10.406	10.406
32	845.730	856.000	10.270	10.503	10.503	10.501	10.503	10.503	10.503	10.502
31	850.890	861.410	10.520	10.526	10.523	10.525	10.528	10.528	10.528	10.528
30	856.000	866.690	10.690	10.455	10.454	10.454	10.456	10.455	10.455	10.454
29	861.410	871.940	10.530	10.524	10.522	10.520	10.523	10.520	10.520	10.524
28	866.690	877.210	10.520	10.515	10.515	10.515	10.514	10.515	10.515	10.514
27	871.940	882.470	10.530	10.508	10.507	10.507	10.508	10.508	10.508	10.507
26	877.210	887.740	10.530	10.507	10.504	10.503	10.507	10.506	10.506	10.503
25	882.470	892.700	10.230	10.509	10.506	10.508	10.510	10.511	10.511	10.510
24	887.740	898.250	10.510	10.511	10.508	10.509	10.510	10.509	10.509	10.510
23	898.250	908.500	10.250	10.510	10.510	10.508	10.510	10.510	10.510	10.508
22	913.970	924.400	10.430	10.427	10.423	10.424	10.426	10.426	10.426	10.425
21	924.400	934.800	10.400	10.524	10.522	10.522	10.524	10.525	10.525	10.525
20	929.610	940.141	10.531	10.533	10.527	10.533	10.532	10.531	10.531	10.529
19	940.141	950.626	10.484	10.491	10.488	10.483	10.486	10.486	10.486	10.484
18	950.626	961.110	10.485	10.481	10.476	10.476	10.480	10.480	10.480	10.478
17	955.880	966.400	10.520	10.528	10.527	10.526	10.526	10.528	10.528	10.527
16	961.110	971.640	10.530	10.537	10.534	10.534	10.538	10.536	10.536	10.536
15	966.400	976.880	10.480	10.474	10.475	10.473	10.476	10.475	10.475	10.474
14	971.640	982.120	10.480	10.488	10.487	10.487	10.487	10.486	10.486	10.487
13	976.880	987.370	10.490	10.498	10.496	10.497	10.497	10.499	10.499	10.498
12	982.120	992.500	10.380	10.540	10.538	10.537	10.533	10.536	10.536	10.529
11	987.370	997.910	10.540	10.551	10.541	10.542	10.543	10.543	10.543	10.542
10	997.910	1008.070	10.160	10.185	10.177	10.169	10.176	10.169	10.169	10.147
9	1008.070	1018.620	10.550	10.535	10.530	10.532	10.532	10.538	10.538	10.505
8	1018.620	1029.060	10.440	10.431	10.416	10.423	10.432	10.431	10.431	10.437
7	1029.060	1039.580	10.520	10.514	10.519	10.506	10.515	10.514	10.514	10.509
6	1039.580	1050.090	10.510	10.507	10.501	10.496	10.494	10.497	10.497	10.494
5	1050.090	1060.580	10.490	10.487	10.484	10.482	10.484	10.482	10.482	10.491
4	1060.580	1071.140	10.560	10.492	10.495	10.494	10.493	10.500	10.500	10.496
3	1071.140	1081.750	10.610	10.531	10.517	10.514	10.516	10.516	10.516	10.517
2	1081.750	1092.220	10.470	10.474	10.471	10.470	10.471	10.471	10.471	10.473
1	1092.220	1102.800	10.580	10.523	10.525	10.522	10.527	10.521	10.521	10.522

	Eni S.p.A.	Campo di Bonaccia - Modello Geomeccanico di Subsidenza Management Summary	Pagina 21 di 20
---	-------------------	--	-----------------

7 Bibliografia

1. Abaqus™, Simulia, versione 2019hf3.
2. *Campo di Bonaccia – Studio integrato di giacimento Aggiornamento Post Revisione 3D Adria 2019 e pozzo Bonaccia NW 3DIRA*. Relazione REVAL – 54D0A013-0, dicembre 2022.
3. Eclipse™, Schlumberger, versione 2021.1.
4. G.H.F. Gardner, L.W. Gardner, A.R. Gregory. *Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic traps*, Geophysics, 39, 770-780, 1974.
5. P.A. Vermeer and H.P. Neher: *A soft soil model that accounts for creep*. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam, 1999.
6. Roscoe, K. and J. B. Burland, 1968. On the generalized stress-strain behaviour of wet clay. *Engineering Plasticity*, Cambridge Univ. Press, 535-609.
7. G. Volonté, F. Gemelli, S.K. Nguyen, G. Musso, R. Lancellotta, M. Brignoli and S. Mantica: *Advances in geomechanical subsidence modeling: effects of elasto-visco-plastic constitutive behavior*. ARMA 17-1043. 51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, June 2017.
8. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino. *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala*. Relazione Agip S.p.A, LAPO-12/96, aprile 1996.
9. G. Musso e R. Lancellotta. *Analisi teorica del comportamento tensio-deformativo dei materiali appartenenti alle sequenze sedimentarie del bacino adriatico con identificazione di appropriate leggi costitutive*. Relazione 3, Progetto di ricerca “Modeling of Subsidence” Eni e Politecnico di Torino, giugno 2016.