



Campi di Naomi e Pandora

Modello Geomeccanico di Subsidenza

Management Summary

Executive Summary

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo ai campi a gas di Naomi e Pandora, 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-plastica. In questo studio sono stati presi in considerazione due scenari di produzione: Do Nothing, che prevede la continuazione in futuro dello stesso schema di produzione attualmente in atto e Sidetrack che prevede dei workover per migliorare il recupero di idrocarburi. Inoltre, lo studio considera due scenari di compressibilità derivati dai risultati delle misure con markers, ovvero: (a) uno scenario di compressibilità intermedia, (b) uno scenario di alta compressibilità. Considerando i due casi di compressibilità realizzati, il valore massimo di subsidenza, collocato praticamente sulla verticale del giacimento di Naomi, si attesta ad un valore finale compreso tra 3 ed 8 cm nello scenario Do Nothing, e tra 4 e 9 cm nello scenario Sidetrack.

Per entrambi gli scenari simulati la distanza minima del fenomeno dalla linea di costa risulta superiore a 25 km.

Data

31/12/2021



Indice

1	Introduzione	3
2	Dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS	4
3	Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti	5
3.1	Approccio metodologico	5
3.2	Geometria del modello	5
3.3	Proprietà dei materiali	7
3.3.1	Densità della roccia	7
3.3.2	Peso specifico dei fluidi saturanti	7
3.3.3	Comprimibilità uniassiale	7
3.4	Inizializzazione e storia di pressione	14
3.4.1	Stato tensionale iniziale	14
3.4.2	Storia di pressione	14
4	Confronto con i dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS.....	15
5	Confronto con i dati di compattazione misurati dai markers radioattivi.....	16
6	Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico.....	18
	Bibliografia	28

1 Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo ai campi di Naomi e Pandora, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione dei giacimenti. I giacimenti di Naomi e Pandora sono situati nell'offshore adriatico circa 50 km a NE di Ravenna (Figura 1) e ad una distanza superiore ai 30 km dalla costa. La profondità del fondale marino è di circa 36 m.

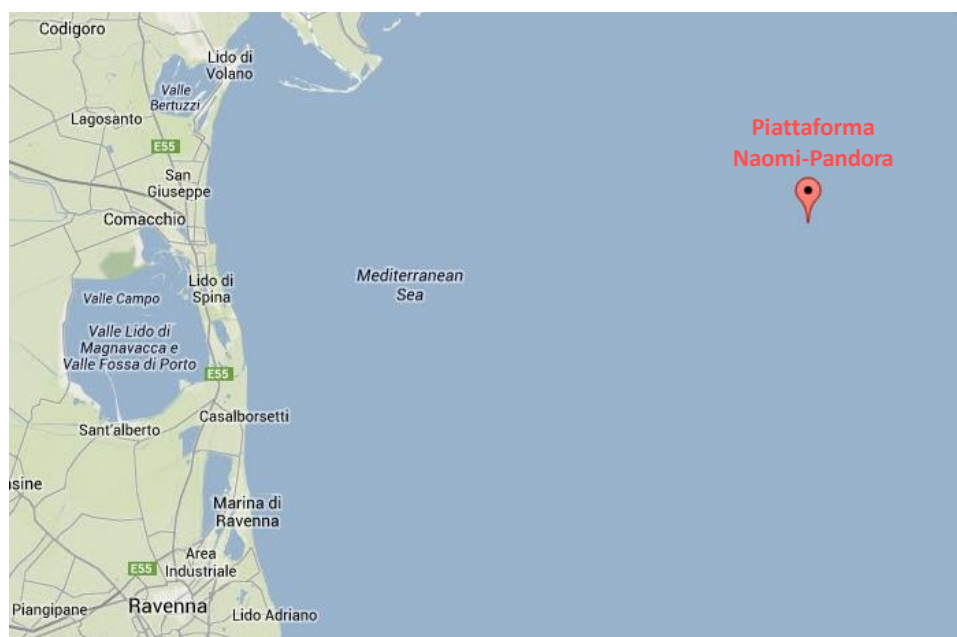


Figura 1 – Posizione del giacimento di Naomi-Pandora.

La previsione di subsidenza è stata eseguita da ISAMGEO Engineering GmbH con un modello geomeccanico 3D ad elementi finiti (FE), impiegando il codice di calcolo proprietario Isamgeo. Le informazioni relative alla geometria del giacimento, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dallo studio fluido-dinamico di giacimento realizzato da Eni [1] con il codice di calcolo Eclipse [2].

La produzione dei campi di Naomi e Pandora è iniziata ad agosto 2001 e i due campi sono stati chiusi alla produzione da marzo 2003 ad aprile 2011. Nel modello dinamico, la storia produttiva dei pozzi eroganti dai livelli dei due giacimenti è stata aggiornata fino al 31 maggio 2021 (fine history match) e lo studio dell'evoluzione delle pressioni è stato protratto, a pozzi chiusi, sino a gennaio 2086 per considerare l'effetto della redistribuzione delle pressioni in giacimento e in acquifero dopo la chiusura dei pozzi.

2 Dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS

La stazione CGPS è installata sulla piattaforma di Naomi-Pandora in corrispondenza delle coordinate 2349437.58 m E, 4950688.61m N. Il periodo di osservazione in cui sono stati analizzati i dati va dal 20 giugno 2002 al 27 luglio 2021 (Figura 2).

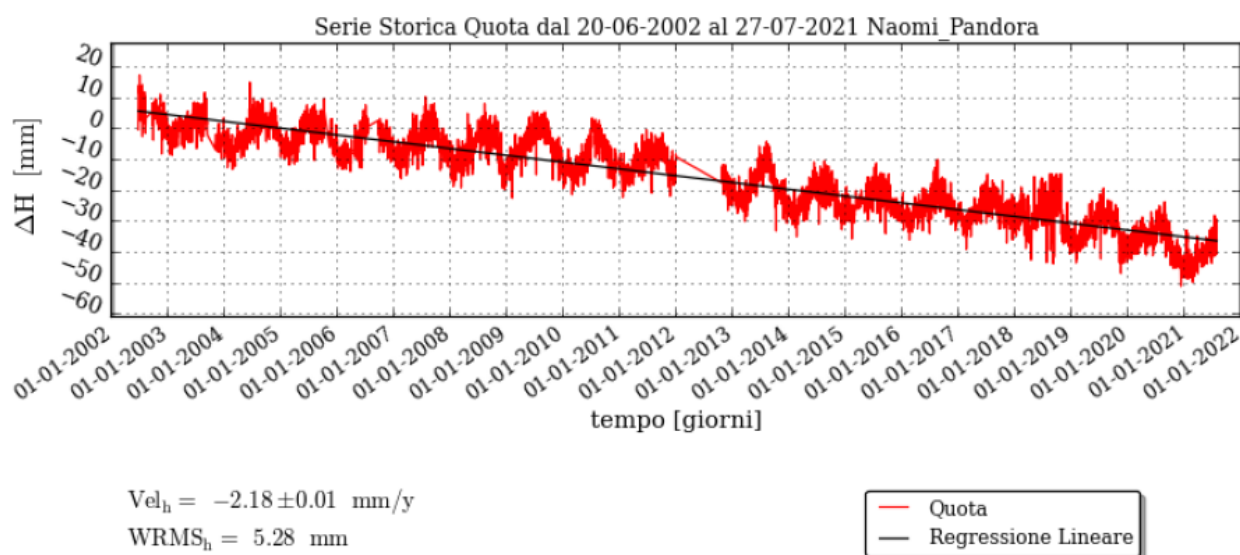


Figura 2 – Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Naomi-Pandora, aggiornate al 27 luglio 2021.

3 Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti

3.1 Approccio metodologico

Lo studio geomeccanico di subsidenza è stato condotto utilizzando il codice agli Elementi Finiti (FE) di ISAMGEO. La costruzione del modello è stata basata sulle seguenti informazioni:

- Mappe geologiche dei livelli interessati dal campo, estese in misura tale da descrivere interamente non solo la zona mineralizzata ma anche gli acquiferi laterali;
- Dettagliata descrizione della geometria e geologia dei livelli mineralizzati e degli acquiferi connessi, riprodotta con accuratezza dalla maglia di calcolo numerica;
- Distribuzione di pressione nei livelli mineralizzati e negli acquiferi connessi, calcolata con il modello di flusso 3D Eclipse. Lo studio fluido-dinamico di giacimento è stato comunque protratto per 30 anni dopo la fine della produzione (a pozzi chiusi) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione;
- Proprietà meccaniche della roccia descritte con una legge costitutiva del tipo Cam Clay Modificato, che tiene conto non solo della variazione della compressibilità 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 fatto sulla base dello spessore gross degli stessi.

Le compressibilità dei materiali nella regione del giacimento sono state calibrate affinché i risultati del modello Abaqus riproducessero gli spostamenti verticali registrati dalla stazione CGPS posta sulla piattaforma di produzione.

3.2 Geometria del modello

Il modello Eclipse è composto da 294x214x24 celle nelle direzioni I, J e K rispettivamente, per un totale di 1744100 celle, delle quali circa 1 milione sono attive. Esso interessa un'area di circa 28x41 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 70x70 km².

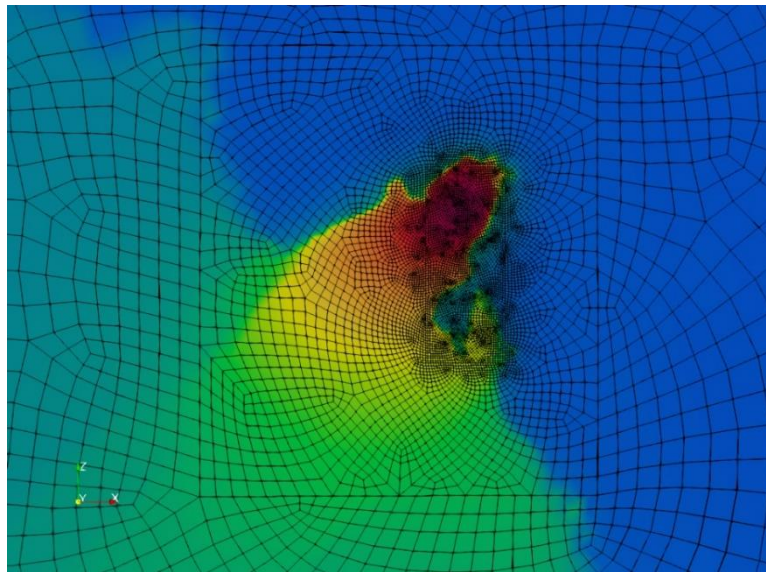


Figura 3 - Mesh agli elementi finiti in pianta.

La mesh 3D, illustrata nella Figura 3 e nella Figura 4, si compone di una fittissima discretizzazione ad elementi finiti del sottosuolo fino a 6500 m di profondità, realizzata con 1039536 nodi e 302400 elementi a 16 o 20 nodi distribuiti su un totale di 35 strati – tra produttivi, strati di separazione, overburden ed underburden - di 8673 elementi ciascuno.

Mesh agli elementi finiti

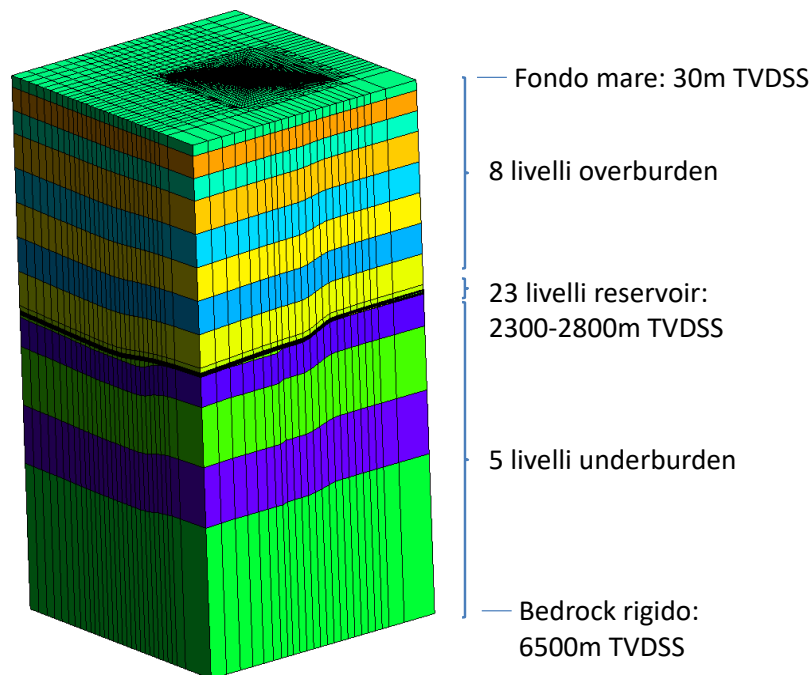


Figura 4 - Mesh di calcolo ad elementi finiti utilizzata nel modello geomeccanico per il campo di Naomi Pandora. La scala verticale della rappresentazione è molto esagerata (15x) rispetto a quella orizzontale.

I livelli del reservoir, tra produttivi e interlayer, sono discretizzati in elementi a 16 nodi (quadratici in direzione x e y e lineari in direzione z – verticale) mentre overburden ed underburden sono discretizzati con elementi a 20 nodi. Il problema numerico da risolvere ammonta ad un totale di 3118608 gradi di libertà.

3.3 Proprietà dei materiali

3.3.1 Densità della roccia

Partendo dai density log registrati nei pozzi Naomi-1 e Pandora-1 dir, è stato possibile calcolare un profilo di densità ρ definito attraverso la seguente relazione:

$$\rho(z) = 0.1471(z - z_{fm}) + 1973.08 \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (1)$$

ove le profondità (z) sono misurate in metri TVDSS (*True Vertical Depth Sub Sea*) ed è stata considerata una profondità del fondale marino z_{fm} pari a 36 m, al di sopra della quale la densità è stata assunta pari a 1030 kg/m³.

La curva analitica così ottenuta fornisce un'ottima approssimazione della densità misurata ed è stata perciò utilizzata nel modello FE per ricostruire la densità dei sedimenti e l'andamento dello stato di stress totale con la profondità.

3.3.2 Peso specifico dei fluidi saturanti

Viene fornito al modello FE il valore del peso specifico γ_f dei fluidi saturanti. Per ciascuna regione idro-meccanica il valore di γ_f (relativo al gas o all'acqua) è stato considerato costante. Per ciascuno dei due campi, esso è stato determinato partendo dalla profondità del contatto gas-acqua e dalla distribuzione iniziale delle pressioni calcolata dai modelli Eclipse.

3.3.3 Comprimibilità uniassiale

Il parametro geomeccanico chiave nelle simulazioni di subsidenza è la comprimibilità uniassiale C_m (detta anche edometrica, ovvero a deformazione laterale impedita) del materiale. È oggi comunemente accettato [p.es. *Baù et al.*, 2002] che i valori più attendibili di questo parametro, generalmente funzione non lineare dello stress efficace, sono quelli derivati dalle cosiddette misure tramite markers radioattivi. Questo è particolarmente vero per sedimenti profondi e poco consolidati, quali quelli considerati in questo studio.

Il modello di riferimento per la stima della comprimibilità nel bacino Nord Adriatico viene normalmente espresso in termini di comprimibilità uniassiale C_m [bar⁻¹] verso stress efficace σ' [bar], ed è stata sviluppata da *Hueckel et al.*, [2005]. La relazione è rappresentata in Figura 11, ove sono rappresentate la miglior stima:

$$C_m = 0.01367 \cdot (\sigma')^{-1.16434} \quad (2)$$

ed il quantile superiore al 97.5% (media + 2 deviazione standard). In Figura 5 la relazione di *Hueckel et al.* [2005] è messa a confronto con quella di *Baù et al.* [2002], e le due appaiono molto simili.

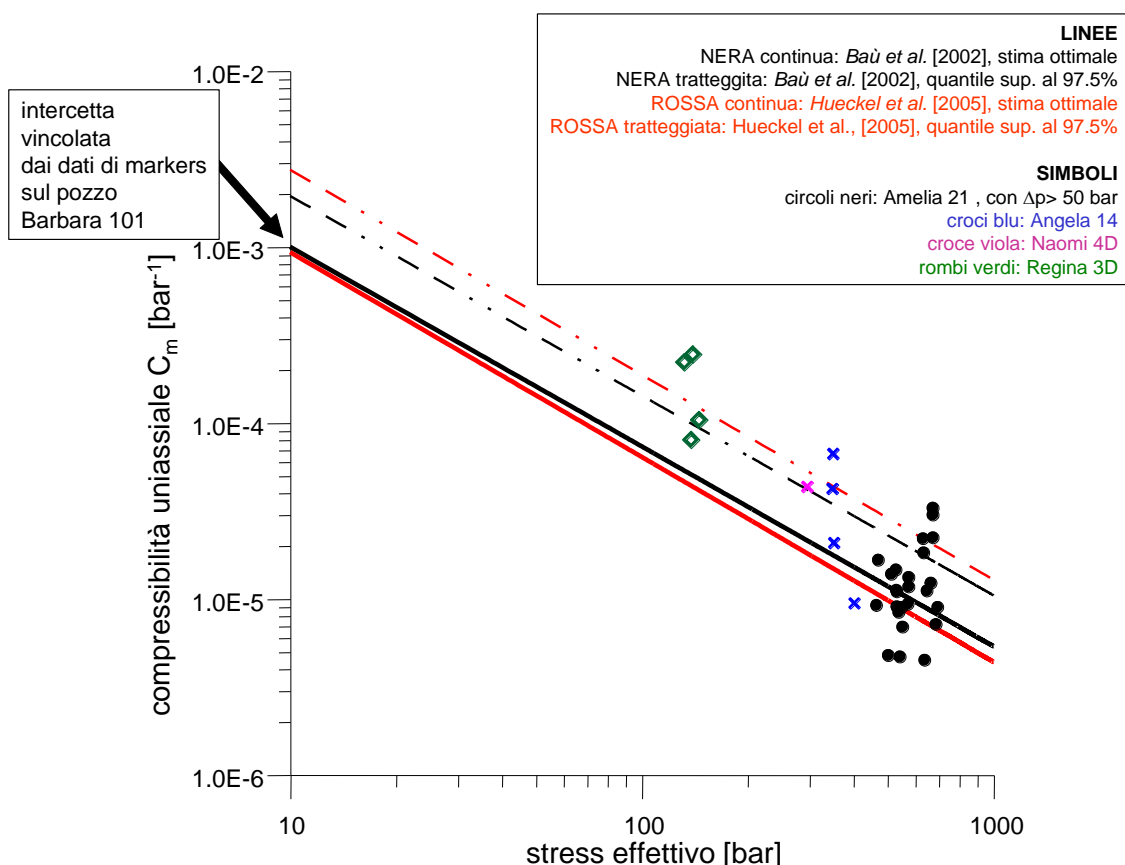


Figura 5 - Relazione della compressibilità uniaassiale C_m verso stress efficace in sito, derivata da misure su marker radioattivi nei campi a gas del bacino nord adriatico [da Hueckel et al., 2005].

Studi successivi al lavoro di *Baù et al.* e relativi alla porzione più superficiale del profilo di C_m [*Ferronato et al.*, 2003 e 2004] hanno evidenziato come sia la relazione di *Baù et al.* [2002] che quella di *Hueckel et al.* [2005] tendono a sottostimare la compressibilità uniaassiale dei sedimenti nei primi 1500 m di profondità. Si ritiene che il valore di C_m che si ottiene dalle precedenti relazioni vada moltiplicato approssimativamente per 2 nella zona al di sopra dei 1500 m di profondità, mentre sia corretto al di sotto dei 2500 m. Nella zona intermedia si presuppone esista una qualche forma di transizione continua ancora da definire (sono quasi assenti dati da marker in tale intervallo di profondità).

Per i sedimenti al di sopra dei 1500 m di profondità, i valori di C_m da utilizzare si possono perciò esprimere come:

$$C_m = 2 \times 0.01367 \cdot (\sigma')^{-1.16434} \quad (3)$$

Si noti come i livelli di Naomi e Pandora messi in produzione in questo studio giacciono tutti al di sotto dei 2500 m di profondità, per i quali vale la relazione (2). La relazione (3) è stata quindi utilizzata sostanzialmente nell'overburden.

I valori C_m definiti dalle equazioni (2) sono stati utilizzati per la stima della compressibilità dei pori utilizzata nel modello dinamico Eclipse, e per la stima di subsidenza relativa agli scenari denominati **Cm medio**.

In accordo con le stesse stime regionali di compressibilità in funzione dello stress verticale efficace, sono stati anche definiti i limiti superiore ed inferiore da utilizzare nell'analisi di sensitività, ovvero:

$$- \text{scenario } \mathbf{Cm \text{ Upper}} \text{ (quantile 97.5\%): } C_m = 10^{0.467} \cdot 0.01367 \sigma'^{-1.16434} \quad (4)$$

$$- \text{scenario } \mathbf{Cm \text{ Lower}} \text{ (quantile 2.5\%): } C_m = 10^{-0.467} \cdot 0.01367 \sigma'^{-1.16434} \quad (5)$$

Le compressibilità ricavate dalla (4) sono state utilizzate per la stima della compressibilità dei pori nel modello dinamico Eclipse e per la stima di subsidenza relativa allo scenario denominato **Cm Upper**.

I valori di stress verticale efficace necessari per le stime di C_m nelle equazioni (2), (3), (4) e (5) sono stati ricavati a partire da dati di pressione vergine (sezione 3, equazione 1) e dalla relazione che stima lo stress verticale totale.

Per il calcolo della subsidenza sui due campi considerati è stato adottato un modello costitutivo del materiale del tipo Modified Cam Clay (MCCM). I parametri fondamentali di questo modello, per quanto concerne la compattazione indotta dall'estrazione di fluidi dal sottosuolo, sono l'indice di compressione λ , direttamente legato alla compressibilità uniassiale, il rapporto dei vuoti allo stress di riferimento e_0 e l'indice di espansione κ . Il MCCM, essendo un modello elasto-plastico, tiene anche conto del diverso comportamento in fase di ripressurizzazione dei livelli depletati. Il parametro κ rappresenta infatti la deformabilità del sistema in queste condizioni.

I parametri del modello Cam Clay modificato (λ ed e_0) sono stati calcolati a partire dai C_m di cui sopra utilizzando i valori di porosità, stimati per ogni singolo livello a partire dai dati utilizzati nelle simulazioni di giacimento (si vedano Tabelle 4, 5 e 6 in sezione 3), utilizzando le relazioni riportate in Appendice. Il calcolo dei parametri è quindi stato fatto livello per livello, come illustrato nelle Tabelle 4, 5 e 6. Il valore del parametro κ è stato assunto pari a $\lambda/3$, conservativo anche rispetto alle più recenti stime che indicano un rapporto fra i due di circa 2.5 [Baiù et al., 2001]. La pendenza della linea di stato critico M è stata scelta uguale a 1.33, mentre la formulazione ad elementi finiti del MCCM richiede anche un rapporto di Poisson, scelto uguale a 0.33.

Il rapporto fra stress orizzontali iniziali e verticali iniziali (rapporto K_0) è stato scelto in coerenza con studi precedenti (desunto da prove in sito del bacino Nord Adriatico) uguale a 0.546. Lo stato tensionale iniziale del modello è di tipo normal-consolidato.

Le relazioni costitutive per i sedimenti del bacino Nord Adriatico (2)-(5) producono, nel primo centinaio di metri di profondità, stime dei parametri del materiale troppo "soffici" per essere realistiche. D'altra parte questi primi strati di materiale hanno un effetto minimo sulla subsidenza calcolata. Per questo motivo, il primo strato di overburden è stato simulato come elastico lineare. È stata condotta un'analisi di sensitività raddoppiando il modulo di Young utilizzato per questo livello, senza ottenere alcuna variazione nelle previsioni, pertanto si è concluso che l'effettivo valore dei parametri elastici di questo primo livello non ha impatto sui risultati della previsione.

Tabella 1 - Valori di profondità media, stress totale, pressione iniziale e stress efficace verticale iniziale per il modello geomeccanico di Naomi e Pandora.

Materiale Modello ISAMGEO	Profondità media (m)	Stress totale verticale (bar)	Pressione (bar)	Stress efficace verticale iniziale (bar)
1	94.5	15.5	9.9	5.6
2	287.9	53.4	30.2	23.2



3	545.7	104.7	57.3	47.4
4	868.1	170.3	91.2	79.1
5	1254.9	250.9	131.8	119.1
6	1641.7	333.6	172.4	161.2
7	2028.5	418.6	213.0	205.5
8	2415.3	505.6	253.7	252.0
9	2652.1	560.0	293.7	266.3
10	2617.2	552.0	290.2	261.7
11	2685.2	567.7	297.0	270.7
12	2650.3	559.6	293.5	266.1
13	2690.1	568.8	297.5	271.3
14	2654.6	560.6	293.9	266.7
15	2692.5	569.4	297.7	271.7
16	2656.5	561.0	294.1	266.9
17	2693.9	569.7	297.9	271.8
18	2657.6	561.3	294.2	267.0
19	2695.4	570.0	298.0	272.0
20	2658.6	561.5	294.3	267.2
21	2697.4	570.5	298.2	272.3
22	2659.9	561.8	294.5	267.4
23	2699.3	571.0	298.4	272.6
24	2661.4	562.2	294.6	267.6
25	2701.2	571.4	298.6	272.8
26	2662.9	562.5	294.8	267.8
27	2703.1	571.8	298.8	273.1
28	2664.5	562.9	294.9	268.0
29	2704.1	572.1	298.9	273.2
30	2665.6	563.1	295.0	268.1
31	2704.9	572.2	298.9	273.3
32	2666.5	563.3	295.1	268.2
33	2707.8	572.9	299.2	273.7
34	2667.9	563.7	295.3	268.4
35	2711.1	573.7	299.6	274.1
36	2671.2	564.4	295.6	268.8
37	2712.7	574.1	299.7	274.3
38	2674.0	565.1	295.9	269.2
39	2714.6	574.5	299.9	274.6
40	2676.4	565.6	296.1	269.5
41	2717.4	575.1	300.2	275.0
42	2679.1	566.3	296.4	269.9
43	2720.1	575.8	300.5	275.3
44	2682.0	566.9	296.7	270.3
45	2722.6	576.4	300.7	275.6
46	2684.8	567.6	297.0	270.6
47	2725.1	576.9	301.0	276.0
48	2688.3	568.4	297.3	271.1
49	2727.1	577.4	301.2	276.2
50	2691.5	569.1	297.6	271.5



51	2728.5	577.7	301.3	276.4
52	2692.3	569.3	297.7	271.6
53	2737.7	579.9	302.2	277.6
54	2695.0	569.9	298.0	272.0
55	2918.9	622.2	320.3	302.0
56	3492.3	759.5	377.5	382.0
57	4256.9	949.8	453.7	496.2
58	5594.8	1303.2	587.1	716.2

Tabella 2 – Valori di compressibilità uniassiale, di porosità, di indice dei vuoti, e dei parametri del MCCM λ , e_0 e κ per il modello geomeccanico di Naomi e Pandora, nello scenario Cm medio.

Materiale Modello ISAMGEO	Cm in 1/bar	Porosità	Indice dei vuoti	λ	e_0	$\kappa=\lambda/3$
1	LIVELLO ELASTICO LINEARE CON MODULO DI YOUNG = 1000 BAR					
2	7.04E-04	0.386	0.6298	0.0266	0.7133	0.0089
3	3.06E-04	0.368	0.5830	0.0230	0.6716	0.0077
4	1.69E-04	0.346	0.5283	0.0204	0.6173	0.0068
5	1.05E-04	0.318	0.4674	0.0183	0.5548	0.0061
6	3.68E-05	0.291	0.4111	0.0084	0.4536	0.0028
7	2.77E-05	0.264	0.3590	0.0077	0.4002	0.0026
8	2.19E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3505	0.0024
9	2.05E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
10	2.09E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
11	2.01E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
12	2.05E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
13	2.01E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
14	2.05E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
15	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
16	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
17	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
18	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
19	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
20	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
21	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
22	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
23	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
24	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
25	1.99E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
26	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
27	1.99E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
28	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
29	1.99E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
30	2.03E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
31	1.99E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
32	2.03E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024



33	1.99E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
34	2.03E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
35	1.98E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
36	2.03E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
37	1.98E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
38	2.02E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
39	1.98E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
40	2.02E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
41	1.98E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
42	2.02E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
43	1.97E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
44	2.02E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
45	1.97E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
46	2.01E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
47	1.97E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
48	2.01E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
49	1.96E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
50	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
51	1.96E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
52	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
53	1.95E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
54	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
55	1.77E-05	0.22	0.2821	0.0069	0.3212	0.0023
56	1.35E-05	0.21	0.2658	0.0065	0.3045	0.0022
57	9.93E-06	0.2	0.2500	0.0062	0.2882	0.0021
58	6.48E-06	0.2	0.2500	0.0058	0.2881	0.0019

Tabella 3 - Valori di compressibilità uniaassiale, di porosità, di indice dei vuoti, e dei parametri del MCCM λ , e_0 e κ per il modello geomeccanico di Naomi e Pandora, nello scenario Cm Upper.

Materiale Modello ISAMGEO	Cm in 1/bar	Porosità	Indice dei vuoti	λ	e_0	$\kappa=\lambda/3$
1	LIVELLO ELASTICO LINEARE CON MODULO DI YOUNG = 1000 BAR					
2	1.03E-03	0.386	0.6298	0.0390	0.7522	0.0130
3	4.48E-04	0.368	0.5830	0.0336	0.7129	0.0112
4	2.47E-04	0.346	0.5283	0.0299	0.6588	0.0100
5	1.53E-04	0.318	0.4674	0.0268	0.5955	0.0089
6	1.08E-04	0.291	0.4111	0.0245	0.5357	0.0082
7	8.13E-05	0.264	0.3590	0.0227	0.4799	0.0076
8	6.41E-05	0.237	0.3106	0.0212	0.4276	0.0071
9	6.01E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
10	6.13E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
11	5.90E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
12	6.01E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
13	5.88E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070



14	6.00E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
15	5.87E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
16	5.99E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
17	5.87E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
18	5.99E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
19	5.86E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
20	5.99E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
21	5.86E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
22	5.98E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
23	5.85E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
24	5.98E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
25	5.84E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
26	5.97E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4278	0.0070
27	5.84E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
28	5.97E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4278	0.0070
29	5.83E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
30	5.96E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
31	5.83E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
32	5.96E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
33	5.82E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
34	5.95E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
35	5.81E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
36	5.94E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
37	5.80E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
38	5.93E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
39	5.80E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
40	5.93E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
41	5.79E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
42	5.92E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
43	5.78E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
44	5.91E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
45	5.77E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
46	5.90E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
47	5.76E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
48	5.89E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
49	5.76E-05	0.237	0.3106	0.0208	0.4278	0.0069
50	5.87E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
51	5.75E-05	0.237	0.3106	0.0208	0.4278	0.0069
52	5.87E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
53	5.72E-05	0.237	0.3106	0.0208	0.4278	0.0069
54	5.86E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
55	5.19E-05	0.22	0.2821	0.0201	0.3968	0.0067
56	3.95E-05	0.21	0.2658	0.0191	0.3793	0.0064
57	2.91E-05	0.2	0.2500	0.0181	0.3621	0.0060
58	1.90E-05	0.2	0.2500	0.0170	0.3618	0.0057

3.4 Inizializzazione e storia di pressione

3.4.1 Stato tensionale iniziale

L'andamento dello sforzo totale verticale è stato determinato a partire dalle interpretazioni dei density log dei pozzi Naomi-1 e Pandora-1 dir. Sulla base di tali informazioni è stato possibile ricavare la seguente relazione:

$$\sigma_v(z) = 7.215 \cdot 10^{-6}(z - z_{fm})^2 + 0.1935(z - z_{fm}) + 10^{-5}\rho_w g z_{fm}$$

dove σ_v è lo sforzo totale verticale (in bar), z è la profondità (in metri) riferita al livello medio del mare, z_{fm} è la profondità (in metri) del fondo mare pari, in questo caso, a 36 m, ρ_w è la densità dell'acqua assunta pari a 1030 kg/m^3 e g è l'accelerazione di gravità assunta pari a 9.807 m/sec^2 .

Lo sforzo orizzontale σ'_h è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico definite come:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (2)$$

dove K_0 rappresenta il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.546 [6].

3.4.2 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello fluido-dinamico Eclipse, è stata importata nel modello ad elementi finiti. Le pressioni sono state importate in 79 step temporali, selezionati in modo che non si verificassero eccessive variazioni di pressione tra due intervalli successivi.

4 Confronto con i dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS

Un primo confronto è stato effettuato rispetto ai dati GPS registrati sulla piattaforma Naomi-Pandora, la cui posizione è indicata in Figura 6 in relazione alla costa adriatica ed all'estensione del modello fluidodinamico. Si osservi come la posizione della piattaforma non corrisponda a quella di massima subsidenza prevista, che si trova più prossima alla verticale del campo di Naomi, a est, che contiene la maggioranza delle riserve di gas.

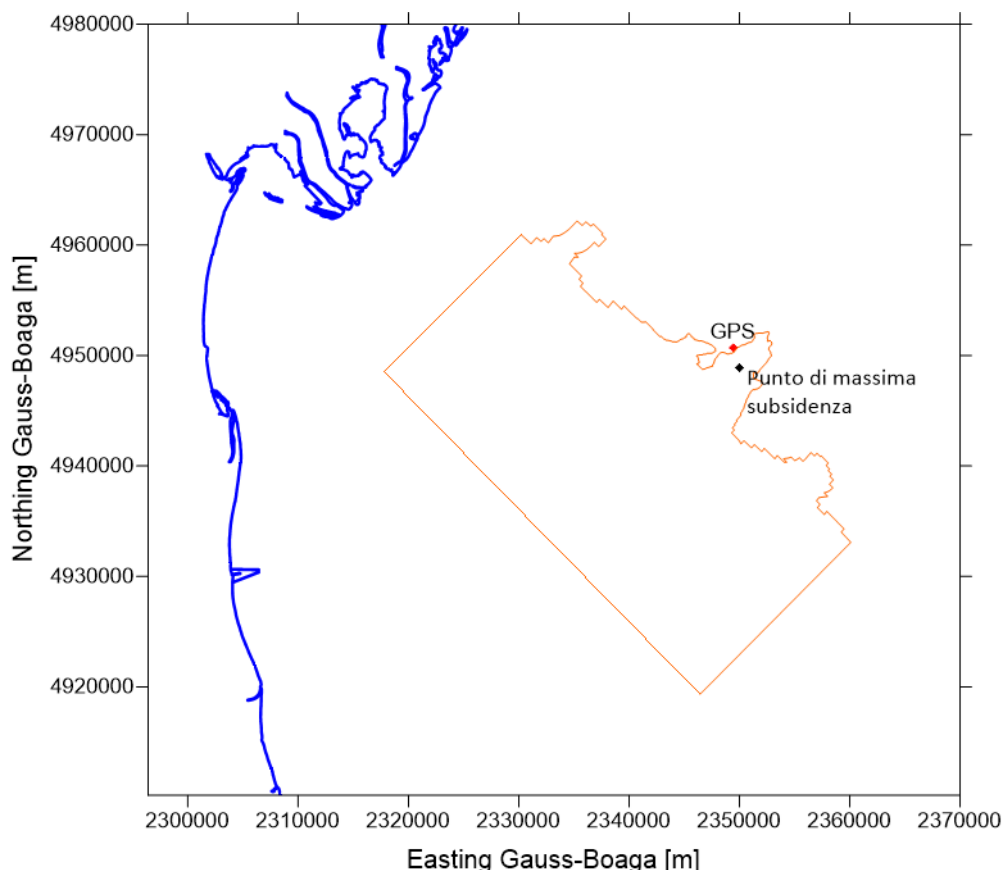


Figura 6 – Posizione della piattaforma Naomi-Pandora (indicata con “GPS”) rispetto alla costa ed al punto di massima subsidenza prevista (sulla verticale del campo di Naomi). In arancio è riportata l’estensione del modello dinamico.

Il confronto tra dati GPS e simulazioni di subsidenza è illustrato nella Figura 7. Durante il periodo di arresto della produzione tra aprile 2003 e marzo 2011, le registrazioni GPS mostrano un tasso medio di abbassamento pari a 0.87 mm/anno, che potrebbe quindi essere considerato come subsidenza naturale (sedimentaria o tettonica) nell’area considerata. Pertanto, nella Figura 7 i dati GPS sono stati depurati di questa componente “naturale”.

L’andamento misurato dal GPS è riprodotto in modo convincente dalle simulazioni effettuate, con una forchetta di valori possibili di compressibilità dei sedimenti compresa tra lo scenario Cm Medio e lo scenario Cm Upper, ma sicuramente più vicino al primo (Cm Medio).

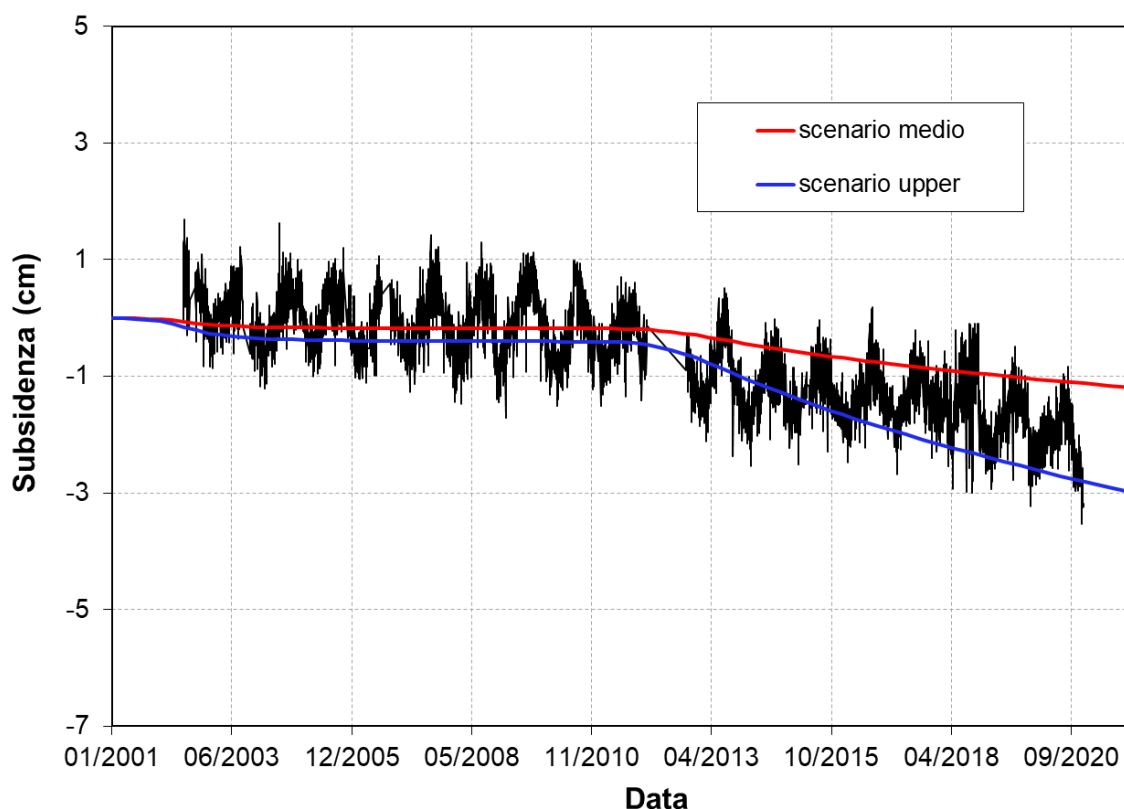


Figura 7 – Spostamento misurato e calcolato in corrispondenza della stazione CGPS di Naomi Pandora.

5 Confronto con i dati di compattazione misurati dai markers radioattivi

Un secondo dato di campo è quello di compattazione in giacimento, offerto dalle misure con markers radioattivi nel pozzo Naomi 4D. I marker sono posizionati in un intervallo di profondità limitato, con spaziatura di circa 5 m l'uno dall'altro lungo la verticale. Si osservi come le misure FSMT, che sono utilizzate per misurare la distanza fra markers, sono effettuate su distanze medie di circa 10 m, a causa della lunghezza dello strumento di misura. Pertanto, le dieci misure di intervallo tra markers disponibili (i markers sono in tutto 21) sono sovrapposte tra loro per una lunghezza pari a circa la metà della lunghezza dello strumento stesso.

La Figura 8 mostra il confronto tra compattazione cumulativa nei diversi intervalli coperti dai markers radioattivi tra il 2001 e l'anno dell'ultimo survey disponibile (2019), misurata e simulata, rispettivamente nei casi Cm medio e Cm upper. Le barre di errore in corrispondenza dell'istogramma delle misure mostrano la variabilità (3 deviazioni standard). In generale si osserva che, al netto dello scatter dei dati che rimane comunque piuttosto contenuto (la compattazione misurata è per lo più inferiore a 20mm su un intervallo di 10m), i due scenari di compressibilità mostrano una coerenza da buona ad ottima nella maggior parte dei livelli e per tutti i survey. In particolare, lo scenario Cm Medio sembra essere quello che meglio riproduce le misure di campo.

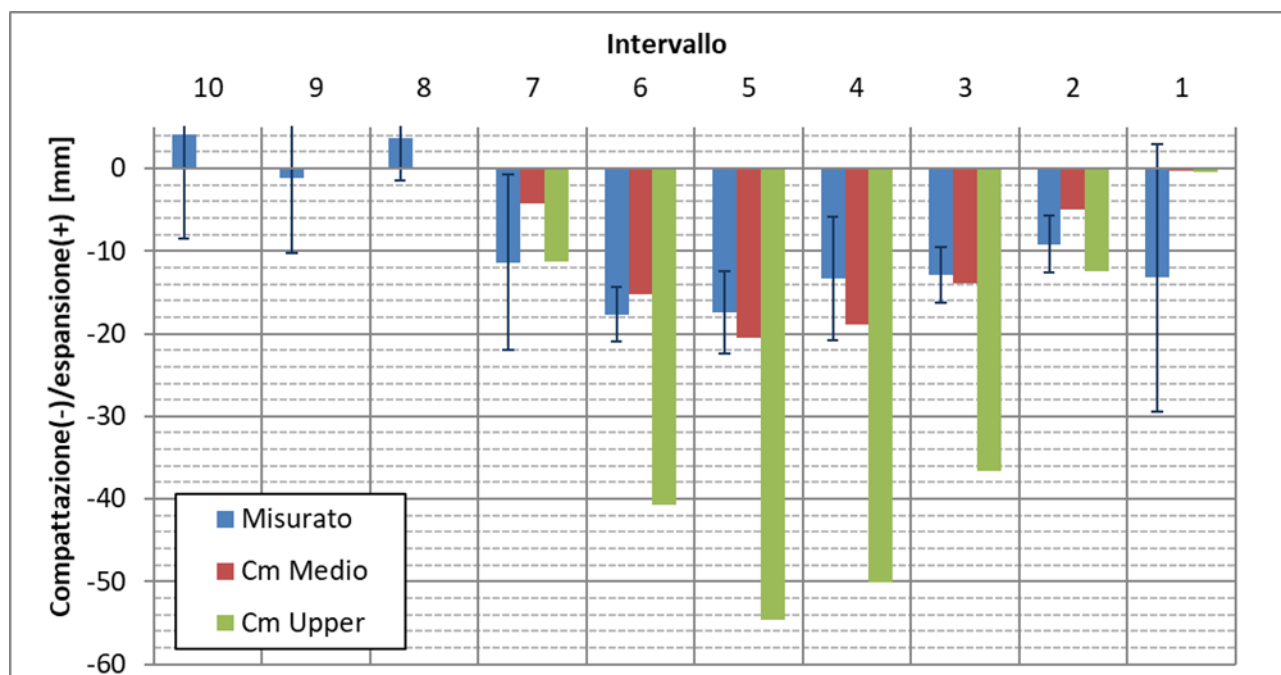


Figura 8 – Confronto tra compattazione osservata con markers radioattivi e compattazione simulata nel periodo 2001-2019 nei diversi intervalli. La compattazione misurata è riportata insieme all'errore, calcolato a partire dalla deviazione standard delle misure (livello 3σ).

6 Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico

I risultati delle simulazioni di subsidenza nei due scenari di produzione (Do Nothing e Sidetrack) sono riportati in questo paragrafo: sono presentati i risultati dei 2 casi Cm Medio e Cm Upper relativi alla compressibilità dei sedimenti, rimanendo ferma la considerazione che i dati osservati si collocano tra questi due casi, seppur più prossimi al primo.

Si osservi che la data di fine produzione differisce tra i due scenari di produzione:

Data fine produzione		
Scenario FC	Caso Upper	Caso Medio
DN	2043	2047
DN+ST	2052	2056

L'andamento temporale della subsidenza prevista in corrispondenza dei punti di controllo è riportato nelle Tabella 4 e Tabella 5, nei 4 scenari studiati.

Tabella 4 – Andamento temporale della subsidenza totale (in m) prevista ai due punti di controllo nei due casi di compressibilità per lo scenario di produzione Do Nothing.

Data	Cm MEDIO		Cm UPPER	
	GPS	Massimo	GPS	Massimo
01/01/2021	-0,01	-0,02	-0,03	-0,05
01/01/2030	-0,02	-0,03	-0,04	-0,07
01/01/2040	-0,02	-0,03	-0,05	-0,08
01/01/2042	-0,02	-0,03	-0,05	-0,08
01/01/2045	-0,02	-0,03	-0,05	-0,08
01/01/2054	-0,02	-0,03	-0,05	-0,08
01/01/2057	-0,02	-0,03	-0,05	-0,08
01/01/2065	-0,02	-0,03	-0,05	-0,08
01/01/2080	-0,02	-0,03	-0,04	-0,07

Tabella 5 – Andamento temporale della subsidenza totale (in m) prevista ai due punti di controllo nei due casi di compressibilità per lo scenario di produzione Sidetrack.

Data	Cm MEDIO		Cm UPPER	
	GPS	Massimo	GPS	Massimo
01/01/2021	-0,01	-0,02	-0,03	-0,05
01/01/2030	-0,02	-0,03	-0,05	-0,07
01/01/2040	-0,02	-0,03	-0,05	-0,09
01/01/2042	-0,02	-0,04	-0,06	-0,09
01/01/2045	-0,02	-0,04	-0,06	-0,09
01/01/2054	-0,02	-0,04	-0,06	-0,09
01/01/2057	-0,02	-0,04	-0,06	-0,09
01/01/2065	-0,02	-0,04	-0,06	-0,09
01/01/2080	-0,02	-0,04	-0,05	-0,09

In Figura 9 e Figura 10 sono riportati gli andamenti temporali della subsidenza in corrispondenza rispettivamente della piattaforma e del punto di massimo, per i quattro scenari considerati.

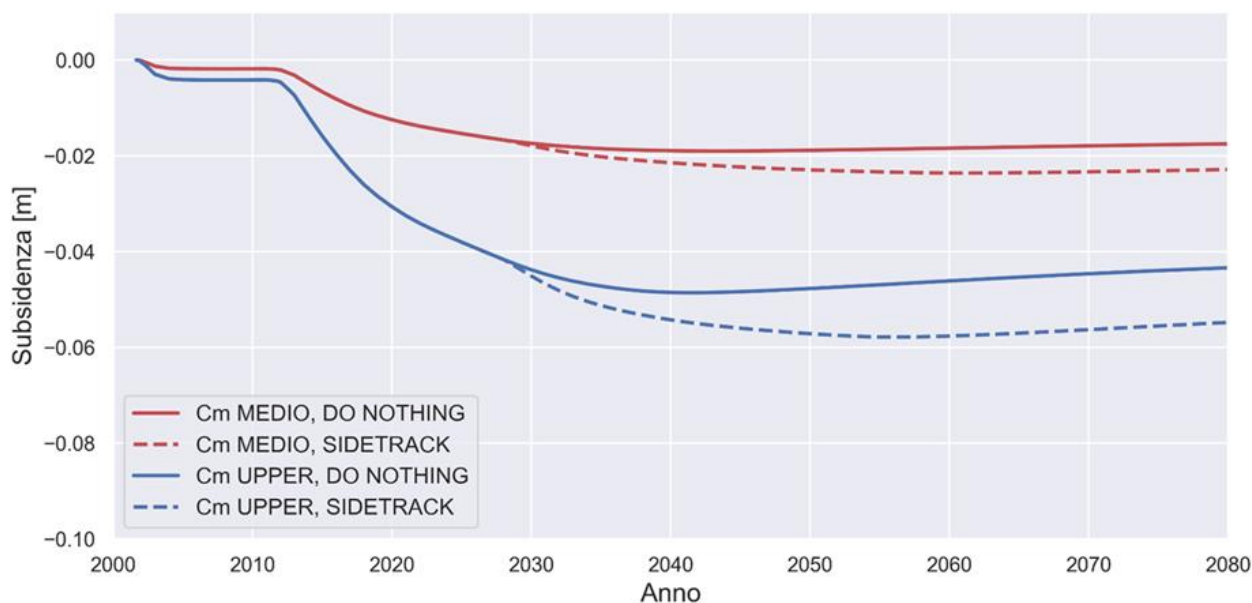


Figura 9 - Andamento temporale della subsidenza in corrispondenza della piattaforma nei 4 scenari considerati.

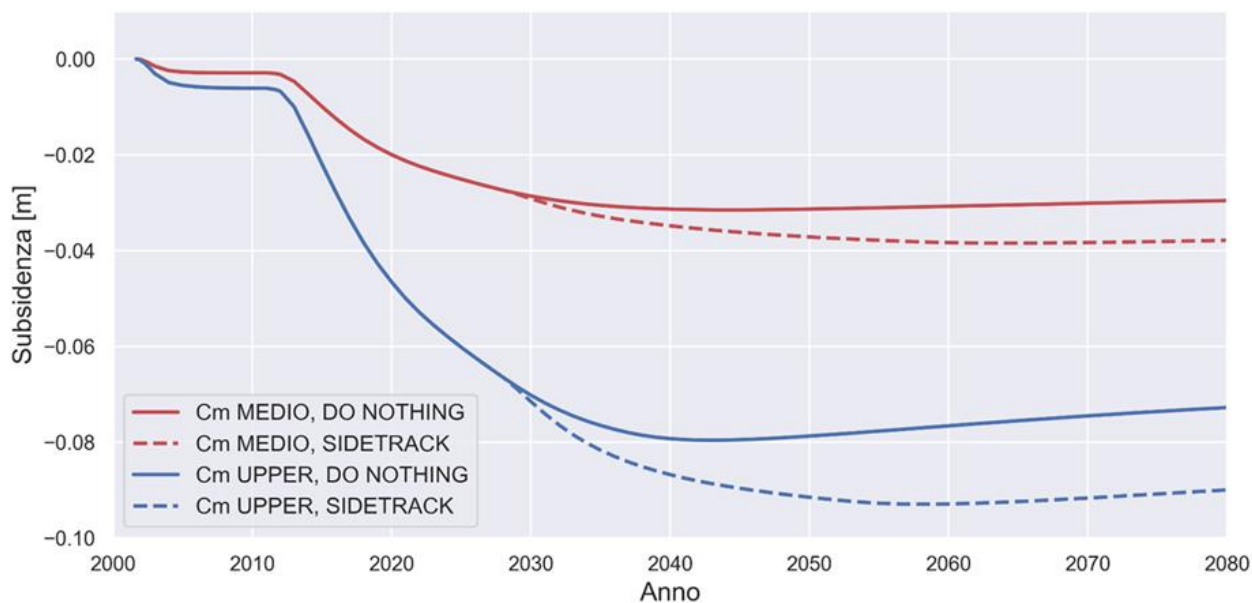


Figura 10 - Andamento temporale della subsidenza in corrispondenza del punto di massimo nei 4 scenari considerati.

Da Figura 11 a Figura 20 sono riportate le mappe di subsidenza per i quattro scenari considerati, alla fine dell'history match (2021), alla fine della produzione e alla fine della simulazione.

Da Figura 21 a Figura 24 è riportata infine l'evoluzione dell'isolinea dei 2cm di subsidenza per i quattro scenari considerati.

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza, collocato praticamente sulla verticale del giacimento di Naomi, si attesta ad un valore finale compreso tra 3 cm e 8 cm, nello scenario Do Nothing e tra 4 cm e 9 cm, nello scenario Sidetrack, considerando la forchetta dei casi di compressibilità considerati.
- l'estensione della subsidenza, valutata sulla base della linea di livello pari a 2 cm alla fine della simulazione, rimane relativamente prossima ai giacimenti, con una distanza dal valore del punto di massimo compreso tra 4 km e 9 km.
- la distanza dalla linea di costa della stessa isolina dei 2 cm si attesta ad un valore minimo finale compreso rispettivamente tra 30 km e 25 km nel caso, rispettivamente, dello scenario medio e dello scenario upper del caso Sidetrack.

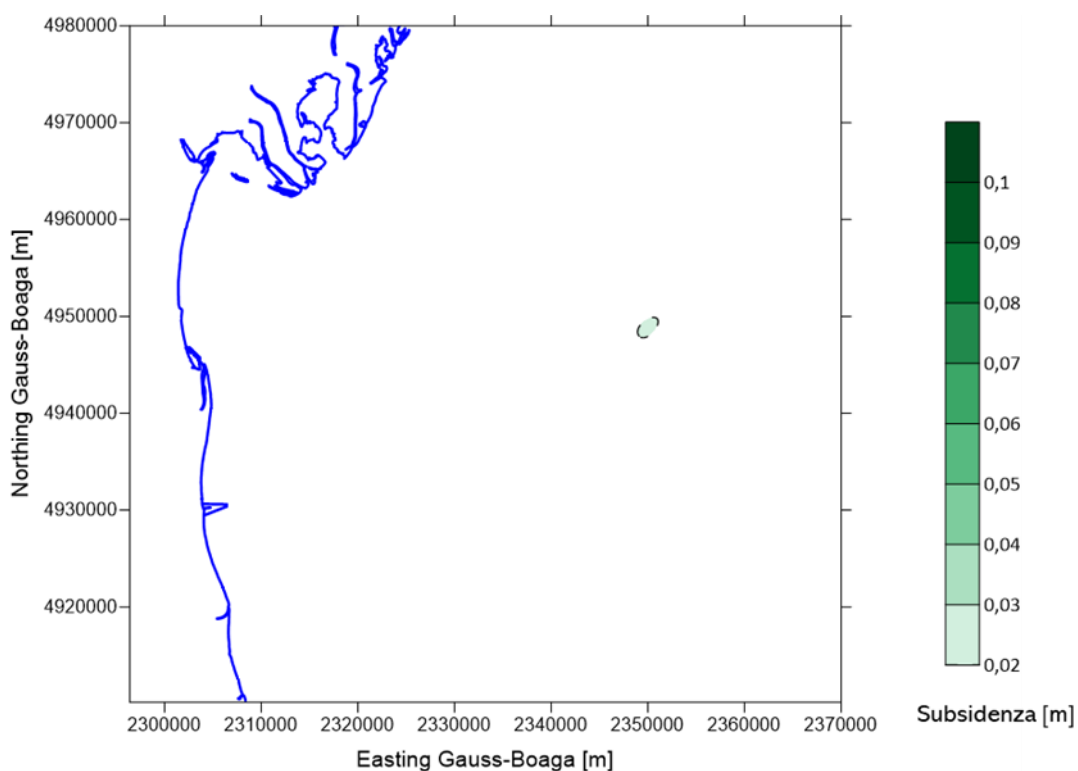


Figura 11 - Subsidenza prevista (in m) a gennaio 2021 per il caso Cm medio, Scenario Do Nothing.

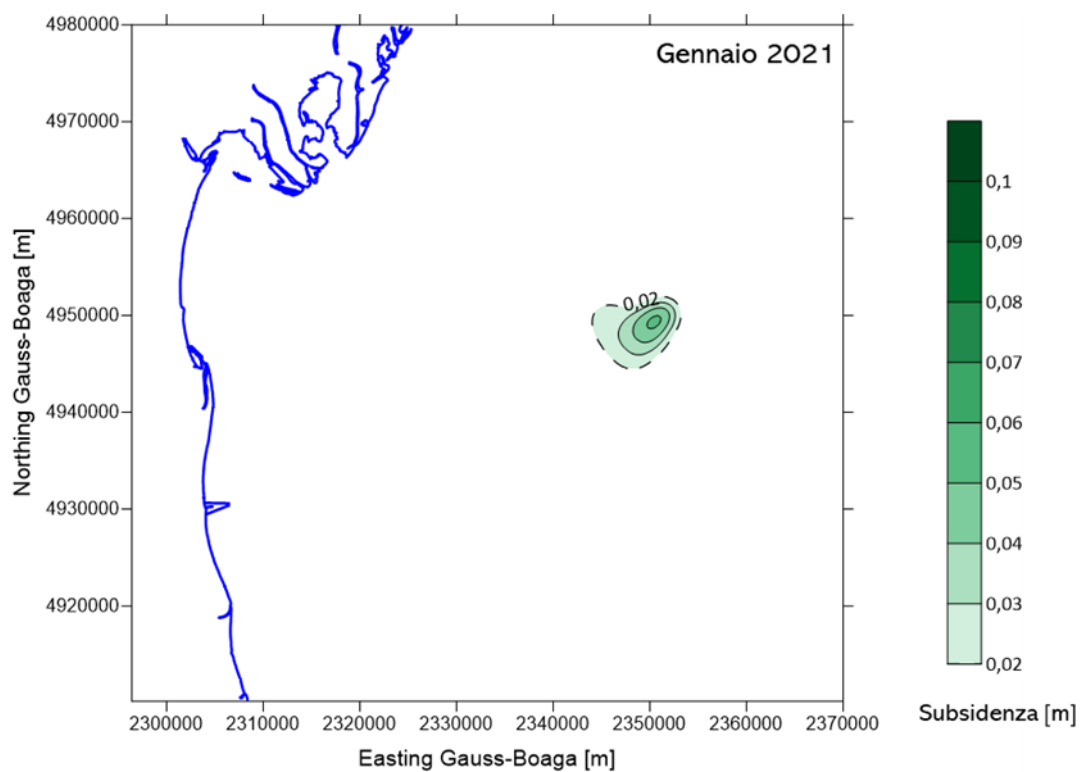


Figura 12 - Subsidenza prevista (in m) a gennaio 2021 per il caso Cm upper, Scenario Do Nothing.

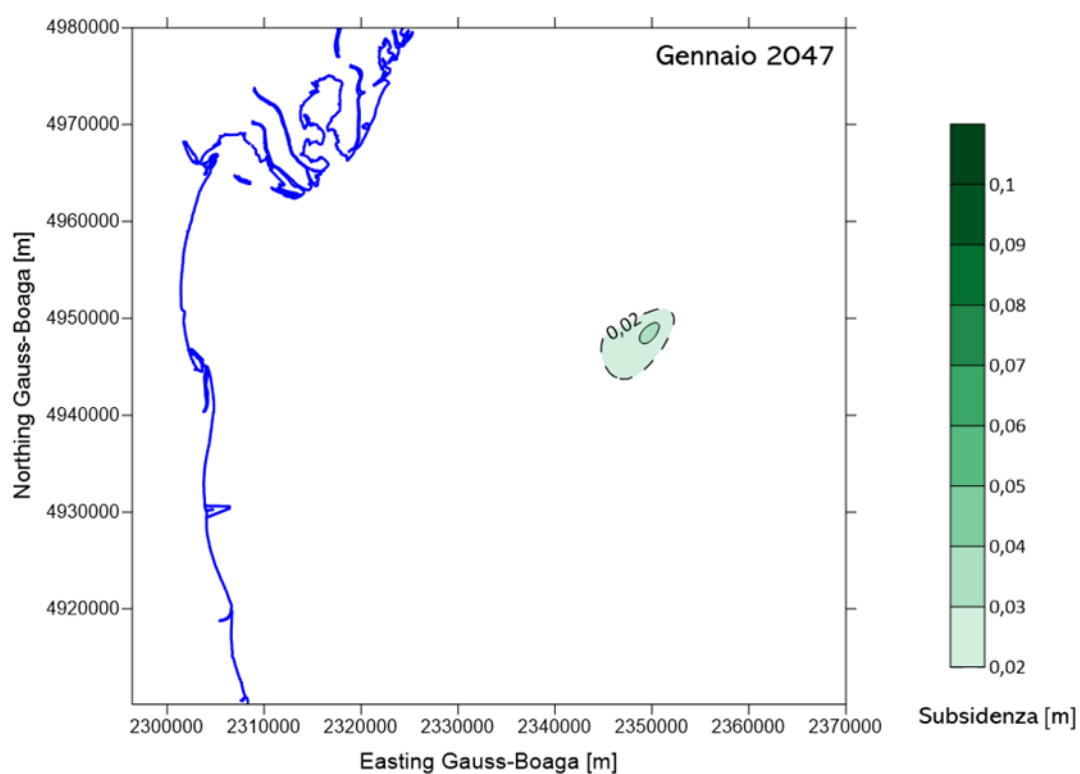


Figura 13 - Subsidenza prevista (in m) a gennaio 2047 per il caso Cm medio, Scenario Do Nothing.

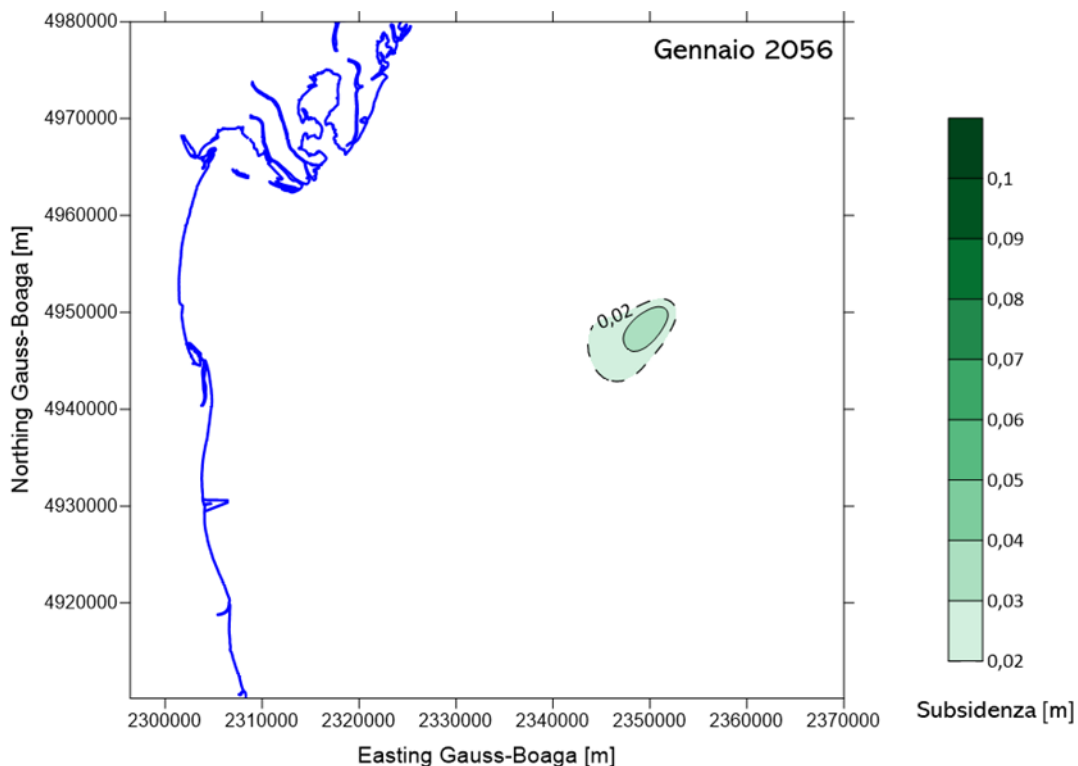


Figura 14 - Subsidenza prevista (in m) a gennaio 2056 per il caso Cm medio, Scenario Sidetrack.

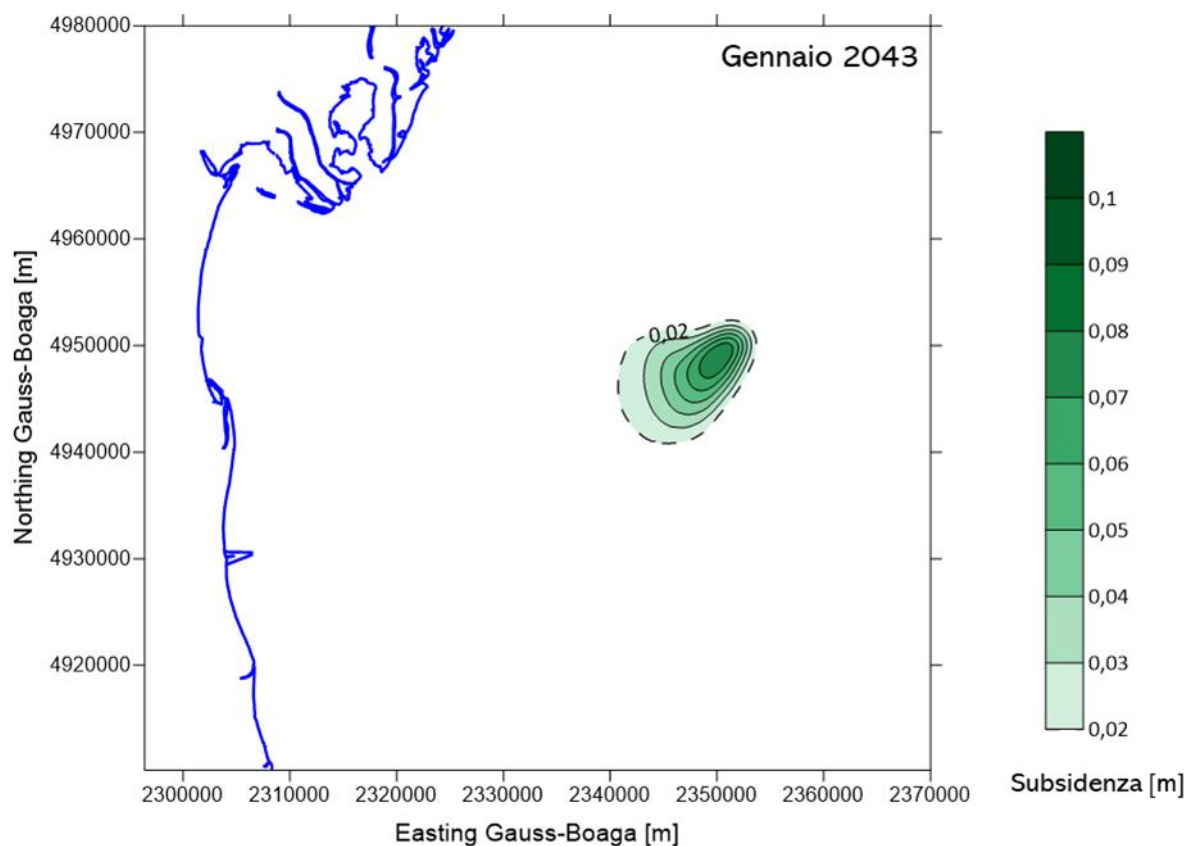


Figura 15 - Subsidenza prevista (in m) a gennaio 2043 per il caso Cm upper, Scenario Do Nothing.

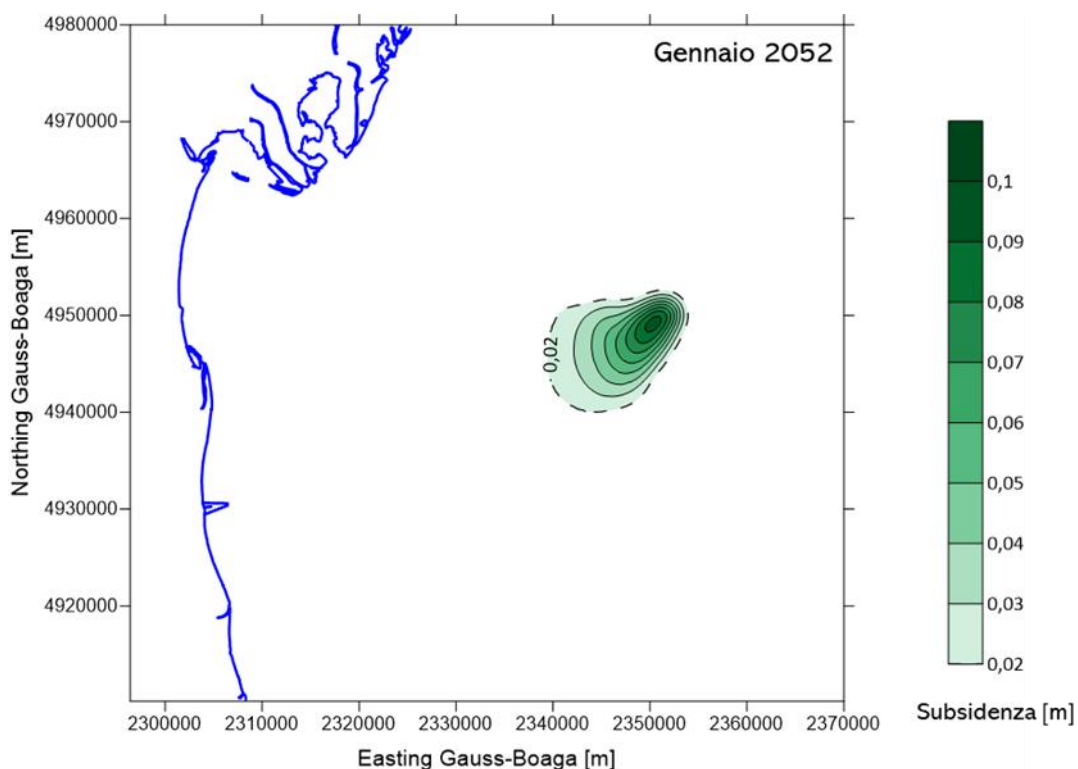


Figura 16 - Subsidenza prevista (in m) a gennaio 2052 per il caso Cm upper, Scenario Sidetrack.

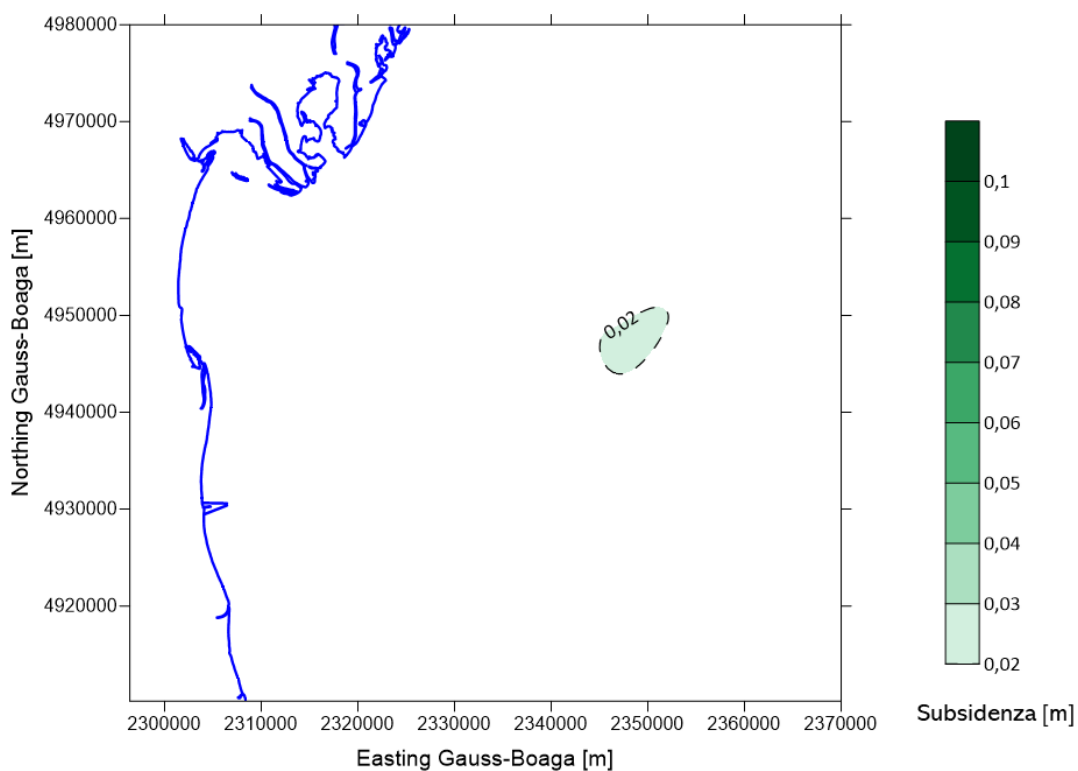


Figura 17 - Subsidenza prevista (in m) a gennaio 2080 per il caso Cm medio, Scenario Do Nothing.

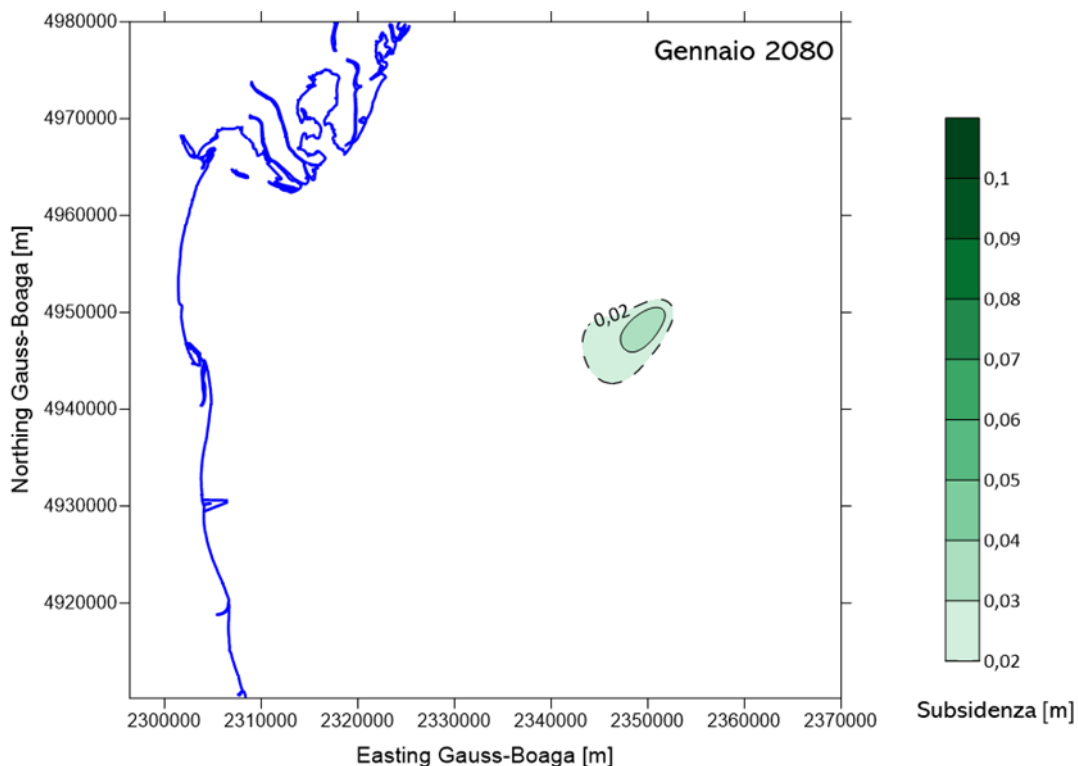


Figura 18 - Subsidenza prevista (in m) a gennaio 2080 per il caso Cm medio, Scenario Sidetrack.

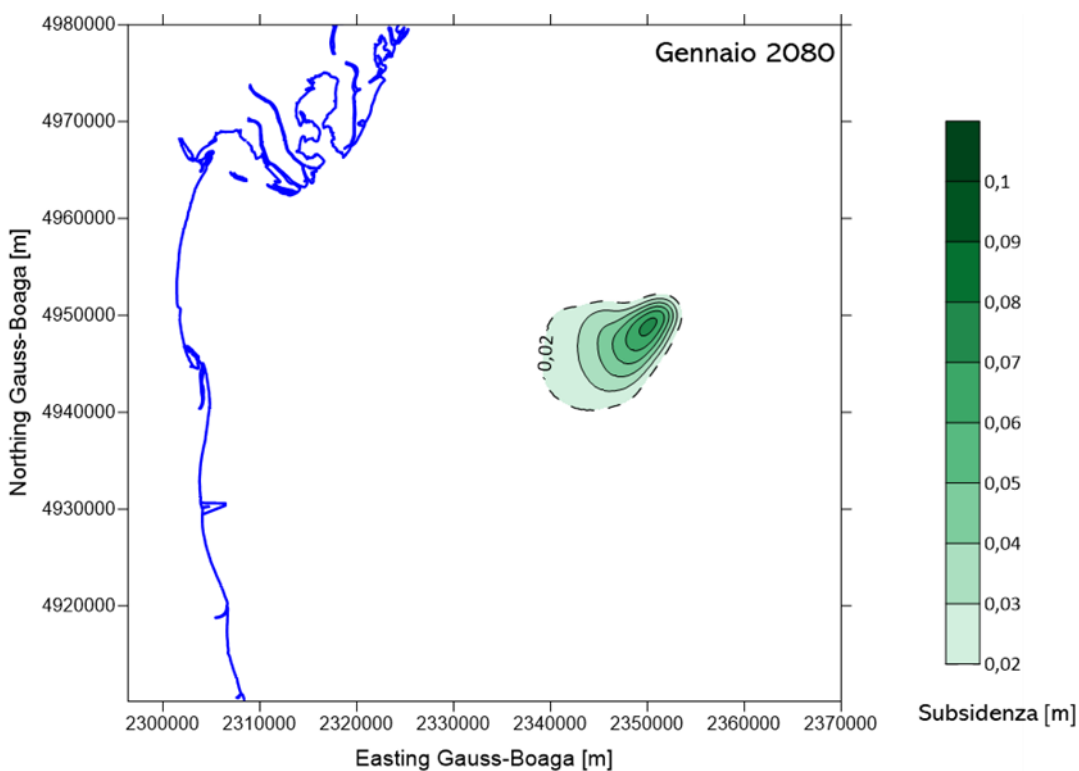


Figura 19 - Subsidenza prevista (in m) a gennaio 2080 per il caso Cm upper, Scenario Do Nothing.

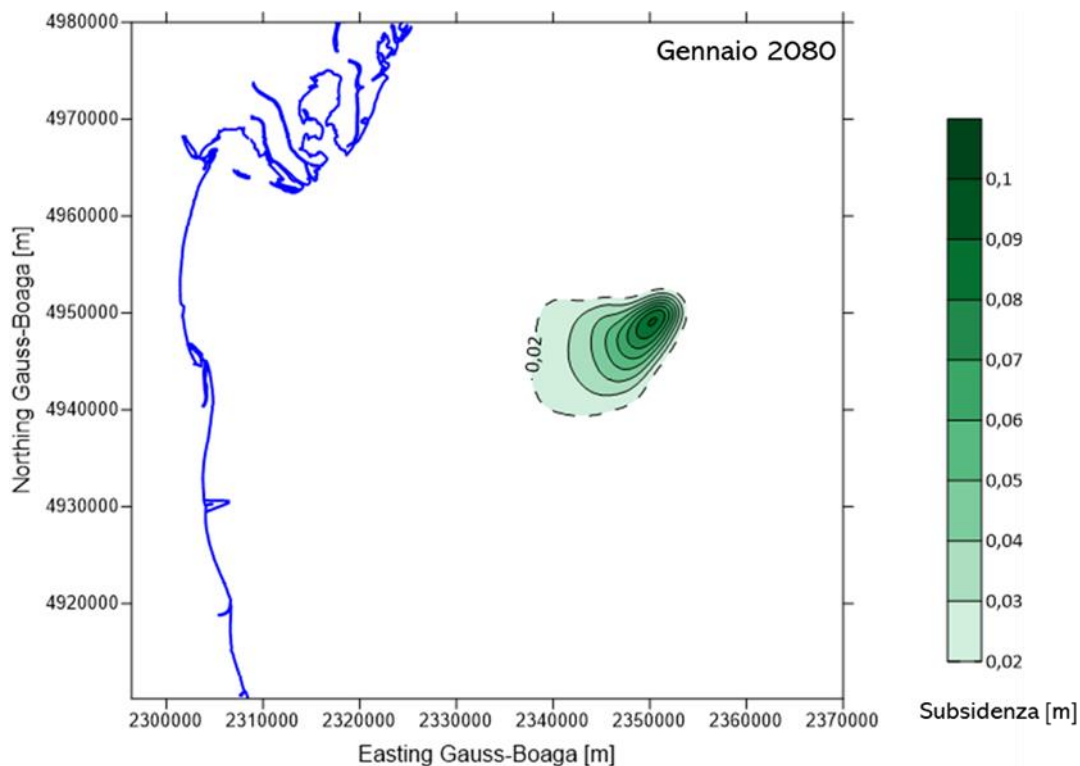


Figura 20 - Subsidenza prevista (in m) a gennaio 2080 per il caso Cm upper, Scenario Sidetrack.

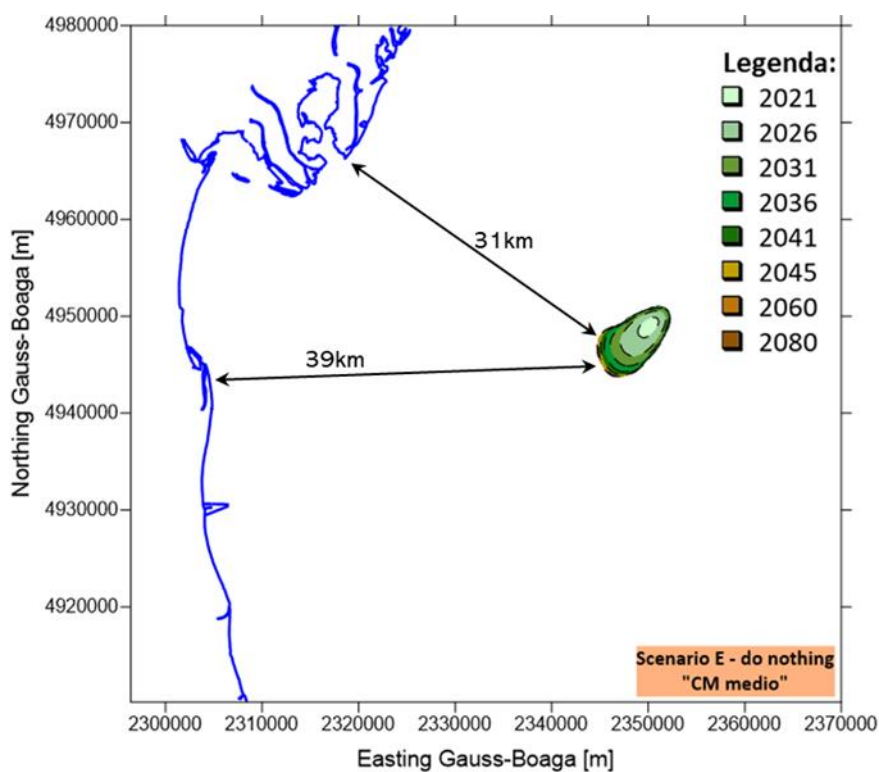


Figura 21 – Evoluzione nel tempo dell’isolinea dei 2cm di subsidenza e distanza dalla costa, caso Cm MEDIO, Scenario Do Nothing.

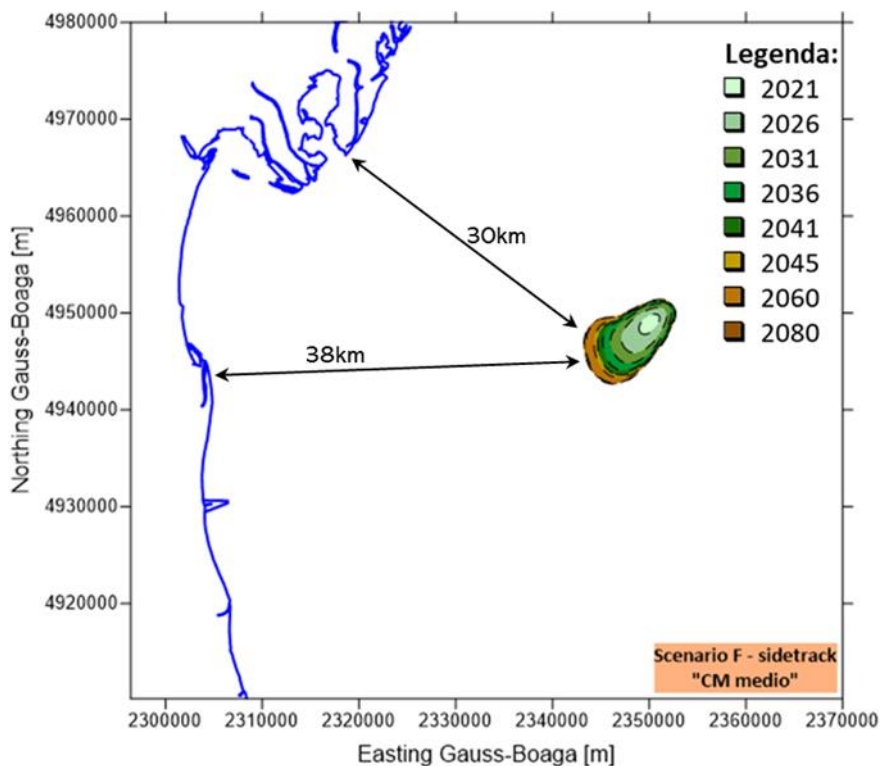


Figura 22 – Evoluzione nel tempo dell'isolinea dei 2cm di subsidenza e distanza dalla costa, caso Cm MEDIO, Scenario Sidetrack.

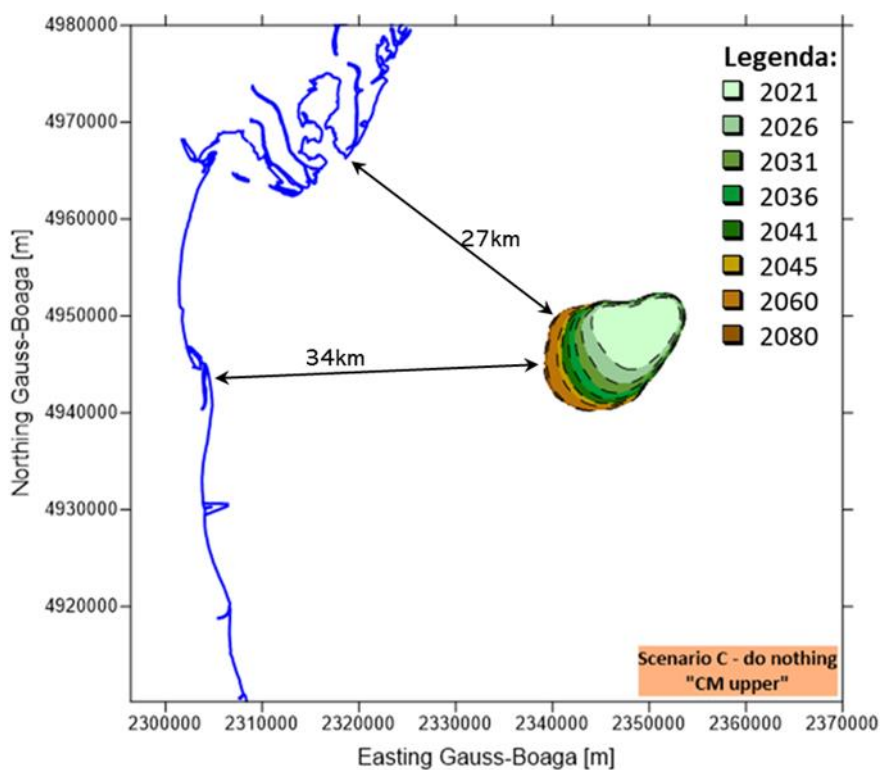


Figura 23 – Evoluzione nel tempo dell'isolinea dei 2cm di subsidenza e distanza dalla costa, caso Cm UPPER, Scenario Do Nothing.

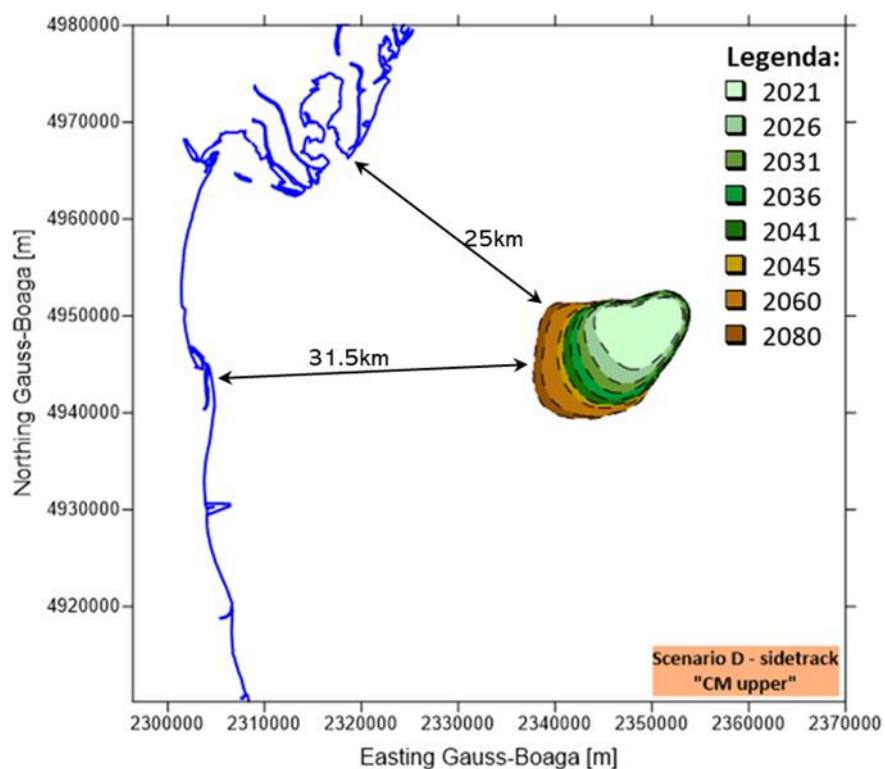


Figura 24 – Evoluzione nel tempo dell'isolinea dei 2cm di subsidenza e distanza dalla costa, caso Cm UPPER, Scenario Sidetrack.



Bibliografia

1. Campo di Naomi Pandora – Studio integrato di giacimento. Relazione ENI IPET-5F87DB00-0. Gennaio 2022.
2. Eclipse™, Schlumberger, versione 2018.2.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino: *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala* - 04/1996.