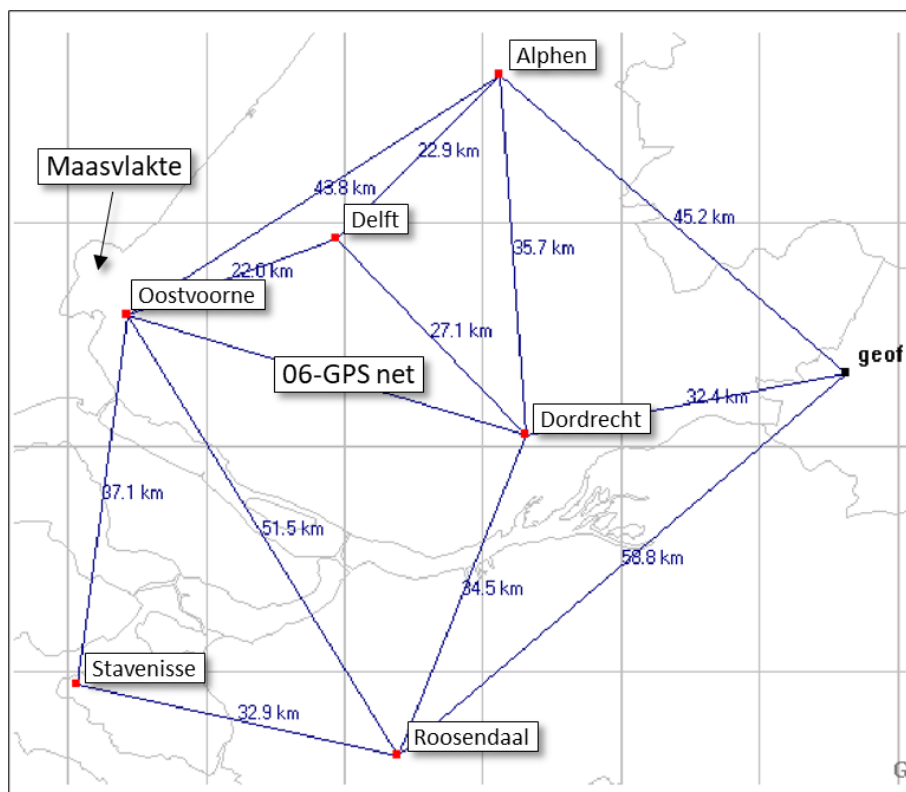


Appendix A Aanvullende informatie bodemdaling

Ten aanzien van het lokale meetnetwerk zoals beschreven in hoofdstuk 6.2 dient het volgende vermeld te worden: In het oorspronkelijke meetplan was baken 4 (Mb4 Krabbeterrein) bedoeld als 0 referentie voor de overige 3 meetpunten. Al direct bij productie van het Maas veld zijn de meetbakens 1 t/m 3 geijkt met het 06-GPS landelijk meetnet (Figuur 22). Hierdoor is baken 4 komen te vervallen als meetpunt¹.



Figuur 22: Dekking in Zuid-Holland van het landelijke 06-GPS meetnet

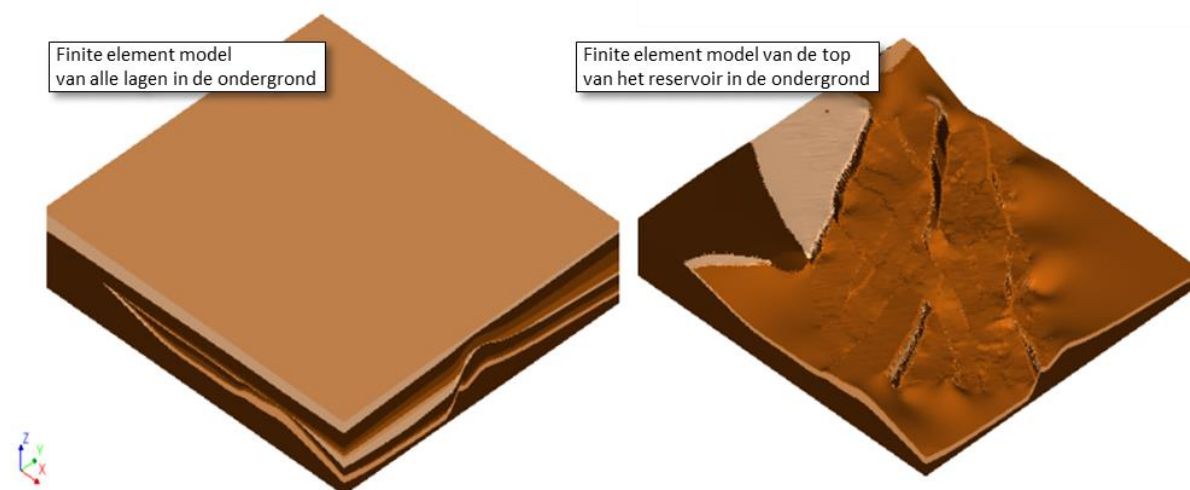
A.1 Bodemdalingsstudie en methodiek

Omdat het gasvoorkomen van Maasdiep net ten noordwesten van de Maasvlakte ligt (Figuur 12), is een zo precies mogelijke prognose van de te verwachten bodemdaling gewenst. OND heeft een bodemdalingsstudie en prognose voor Maasdiep daarom laten uitvoeren door het onafhankelijke ingenieursbureau Diana-FEA (Diana-FEA, 2022). De prognose kan worden vergeleken met eerder gemaakte prognoses voor de Maas en Maasmond velden door Deltares berekend (ONE, 2017). Zoals in hoofdstuk 6.2 beschreven is sinds het begin van de productie van het Maas veld in 2014, lokaal de bodemdaling gemeten op het maaiveld en op ca. 70 meter diepte door Antea Groep, in opdracht van OND (Figuur 12). Deze metingen zijn gebruikt om de geschatte bodemdaling te ijken.

Voor deze bodemdalingsstudie is, voorafgaand aan de winning uit Maasdiep, een model van de ondergrondse situatie gemaakt (Figuur 23). De geometrie en complexiteit van dit model is afkomstig van de ondergrondse seismische kartering over het Maasdiep voorkomen (Figuur 8). De gesteente mechanische parameters in het model zijn gebaseerd op metingen en modellering van de eerder geproduceerde Maas en Maasmond velden (zie bijvoorbeeld het winningsplan van het Maasmond veld: ONE, 2017). Dit ondergrondse model bestaat uit kleine blokjes (cellen) waarin over de

¹ Het meetpunt 4 op het Krabbeterrein liet vanaf het begin incorrecte metingen zien (stijging i.p.v. daling) waarschijnlijk door problemen met de verankering van dit meetbaken. Waarden van dit baken worden dan ook in dit winningsplan niet gebruikt.

voorkomens Maas, Maasmond en Maasdiep diverse eigenschappen bekend zijn zoals de diepte, de dikte en het verloop van de druk vanaf het begin van winning tot aan de verlatingdruk van het koolwaterstof bevattende reservoir en bijbehorende aquifer. Ook de gesteente-mechanische eigenschappen van het reservoir en de overliggende lagen zijn in dit model per blokje bekend (Tabel 5). De dalingsgeschiedenis en kom worden berekend aan de hand van een zgn. “Finite Element Model” waarin voor elke blokje de compactie doorgerekend wordt komende van het compacterende reservoir door gasproductie. Het is van belang te benadrukken dat in het model de lagen “lineair elastisch isotroop” zijn².



Figuur 23: 3-dimensionaal model van de ondergrondssituatie

Gesteente laag	Young's Modulus (E in GPa)	Poisson 's ratio (ν)	C _m (1/GPa)
Boven North Sea Gp (Tertiair)	1.72	0.38	0.311
Onder North Sea Gp (Tertiair)	2.11	0.38	0.253
Chalk (Krijt)	14.06	0.35	0.044
Holland (Krijt)	16.38	0.23	0.053
Vlieland (Krijt)	22.67	0.23	0.038
Delfland (Boven Jura)	22.67	0.23	0.038
Altena Gp (Onder Jura)	17.68	0.23	0.049
Boven Trias	27.38	0.20	0.033
Bontzandsteen Low	29.03	0.20	0.031
Bontzandsteen Mid	18.37	0.20	0.049
Reservoir High	11.69	0.20	0.077
Aangepast	7.30	0.20	0.123
Onder Bontzandsteen (Onder Trias)	30.00	0.25	0.028
Zechstein en Rotliegend (Perm)	30.00	0.25	0.028
Carboon	30.00	0.25	0.028

Tabel 5: Parameters van de lagen van het ondergrondse model

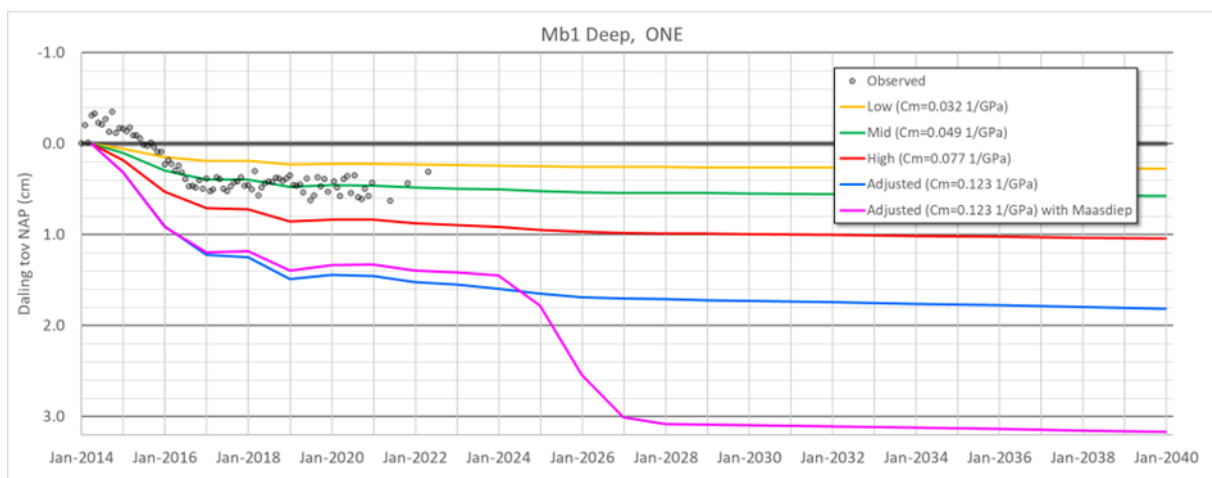
De lagen onder het reservoir zijn minder van belang voor de dalingskom aan het maaiveld, de drukdaling vindt immers boven deze lagen plaats. Ze zijn wel van belang voor de compactie van het reservoir als zgn. “stijve ondergrond”. Voor de gesteentenamen zie ook Figuur 8.

² Dit wil zeggen dat elke laag in dezelfde mate naar iedere zijde deformeert en dat deze deformatie reversibel is. Het enige verschil tussen de lagen en scenario's wordt gekenmerkt door het verschil in samendrukbaarheid en de mate van zijwaartse deformatie als gevolg van compactie (in terminologie de zg. Young's modulus en Poisson ratio, zie hoofdstuk 7 voor een verder uitleg)

Elke modellering kent onzekerheid. Omdat het diepte-verloop van de lagen alleen indirect gemeten kan worden, en de eigenschappen van de gesteentelagen maar op enkele punten bekend zijn (uit eerdere boringen), zijn er onzekerheden in de voorspellingen voor de grootte van een gasvoorkomen. Daarnaast is er onzekerheid over de specifieke gesteente-mechanische parameters ter plekke (zoals samendrukbaarheid). Het gevolg is dat ook de bodemdalingsvoorspelling door onzekerheidsmarges omgeven is. Mocht de gemeten bodemdaling niet binnen de in dit winningsplan aangegeven grenzen verlopen, dan zal in overleg met SodM besproken worden hoe daarmee om te gaan. De consequentie zal afhangen van de grootte en de aard van de afwijking. Als nieuwe bodemalingsprognoses die in het winningsplan genoemde verwachte bodemdaling zouden overschrijden, zal een nieuw winningsplan worden opgesteld, en ter goedkeuring aan de Minister van Economische Zaken en Klimaat worden voorgelegd.

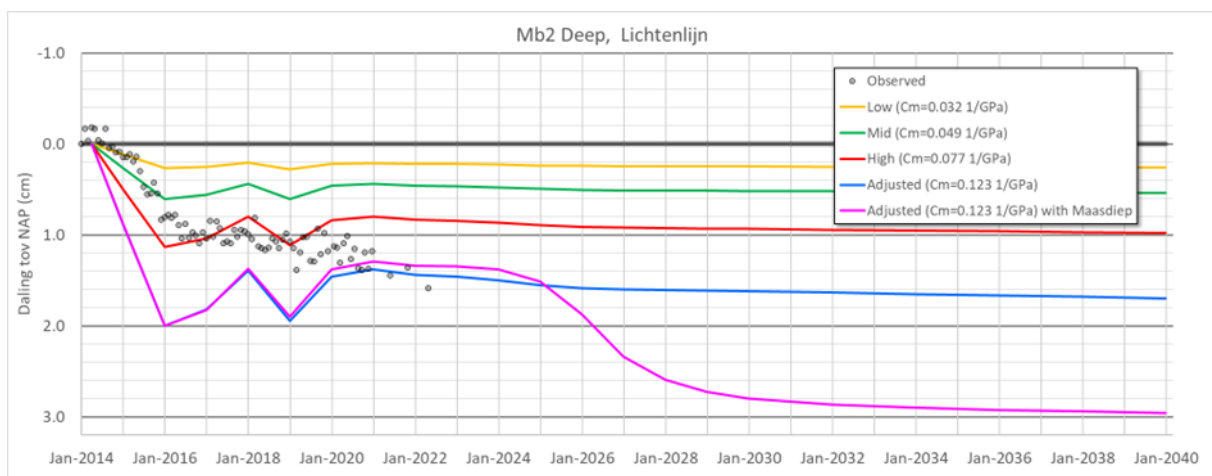
A.2 Bodemdaling geobserveerd versus gemodelleerd

Figuur 24, Figuur 25 en Figuur 26 laten de geobserveerde en gemodelleerde waarden zien van elk van de meetpunten in het lokale meetnet (Figuur 12).



Figuur 24: Dalingsmetingen en prognose voor meetpunt Mb1 in tijd

De meetgegevens zijn aangegeven met grijze puntjes. De gemodelleerde dalingen zijn aangegeven in geel, groen, rood, blauw en paars voor respectievelijke de C_m 's van Low = 0.031, Mid = 0.049, High = 0.077 en aangepast = 0.123 1/GPa (zie ook Tabel 5). De paarse bodemdaling is met de maximale aangepaste C_m = 0.123 1/GPa voor alle velden inclusief voorkomen Maasdiep. Zie Figuur 12 voor de locatie van het meetbaken.

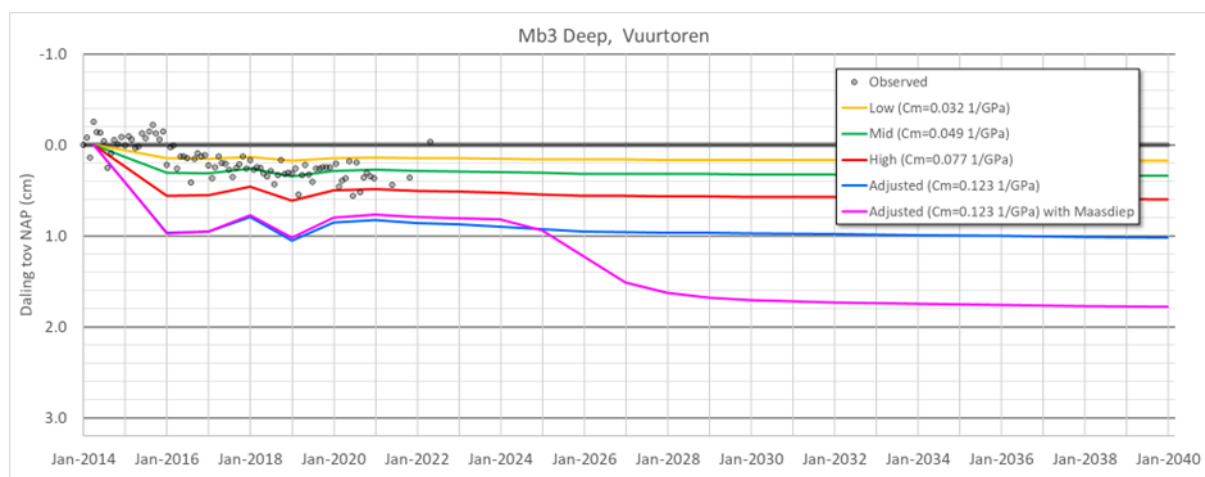


Figuur 25: Dalingsmetingen en prognose voor meetpunt Mb2 in tijd

Zie Figuur 24 voor uitleg van de grafiek.

Figuur 24 en Figuur 26 laten duidelijk zien dat de geobserveerde daling zich vanaf 2014 tot en met mei 2022 zich begeeft volgens de Mid tot High C_m prognose. Deze meetpunten liggen wat verder van het

Maas veld af dan Mb2 (Figuur 25). Dit laatste meetpunt bevindt zich het dichtst bij het Maas veld en laten een daling zien die meer overeenkomt met een High C_m van 0.077 1/GPa; deze overschrijdt en gaat richting een C_m van 0.123 1/GPa gaat (de aangepaste of “adjusted” case). Met betrekking tot deze “adjusted” C_m dient te worden opgemerkt dat dit waarschijnlijk een veel te hoge compactie coëfficiënt betreft eerder horend bij ongeconsolideerde zanden van de Tertiaire North Sea Gp dan bij de zandsteen van de Bontzandsteen Gp. Een sterkte test op het gekernde reservoir gesteente uit boring MSG-03X geeft een C_m van 0.077 1/GPa waarbij een gesteente kern aan de oppervlakte meestal een lagere sterkte laat zien dan hetzelfde gesteente op reservoir diepte door decompactie met het naar boven halen van de gesteente kern en ondanks nabootsing van reservoir druk in het laboratorium.



Figuur 26: Dalingsmetingen en prognose voor meetpunt Mb3 in tijd

Zie Figuur 24 voor uitleg van de grafiek.

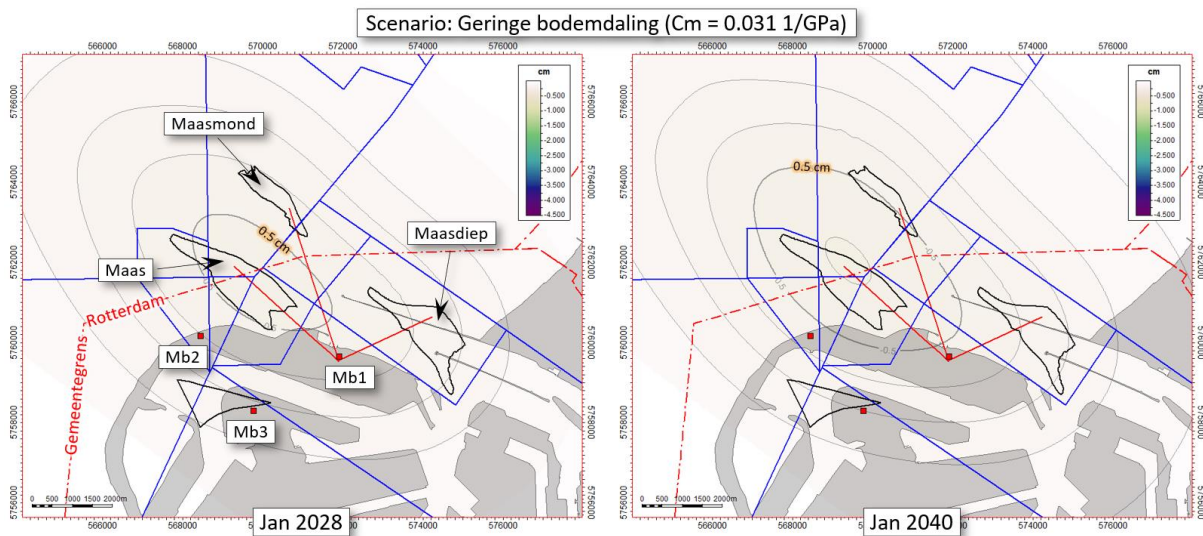
Een verklaring voor de verschillen in dalingsgedrag van de meetpunten kan liggen in de aanname dat de lagen “lineair elastisch isotroop” zijn, wat waarschijnlijk een over-simplificatie is van de heterogeniteit van de ondergrond. Wanneer in het bodemdalingsmodel anisotropie zou worden aangebracht kan men zich voorstellen dat de dalingskom er anders uit zou komen te zien met bijvoorbeeld een steilere helling naar het centrum van de kom toe en vlakke “schouders” van de kom. Een tweede effect van de “lineair elastisch isotroop” aanname is dat de daling veroorzaakt door drukverval weer wordt “goedgemaakt” door druktoename in de aquifer als de gasextractie tijdelijk of permanent stopt (als het veld verlaten wordt). Dit terugveren van het reservoir, ook wel “rebound” genoemd, komt doordat in het elastische model de deformatie reversibel is en met druktoename de compactie dus weer ongedaan wordt gemaakt. Dit effect is het duidelijkst te zien in meetpunt Mb2 (Figuur 25) waar, in de gemodelleerde daling, duidelijk de productiefasen van achtereenvolgens het Maas en Maasmond veld te zien zijn in de jaren 2015-2017 en 2019. Ook deze rebound is waarschijnlijk een over-simplificatie van de ondergrondse werkelijkheid: gesteente zal gedeeltelijk elastisch (reversibel) en plastisch (irreversibel) deformeren. Dit laten de gemeten dalingswaarden in Mb2 ook zien waarin de rebound veel minder duidelijk (zo niet onzichtbaar) in vergelijking met de rebound in de gemodelleerde daling. Op het verschijnsel “rebound” wordt dieper ingegaan in sectie 6.6.

A.3 Bodemdalingsvooruitzichten en onzekerheid

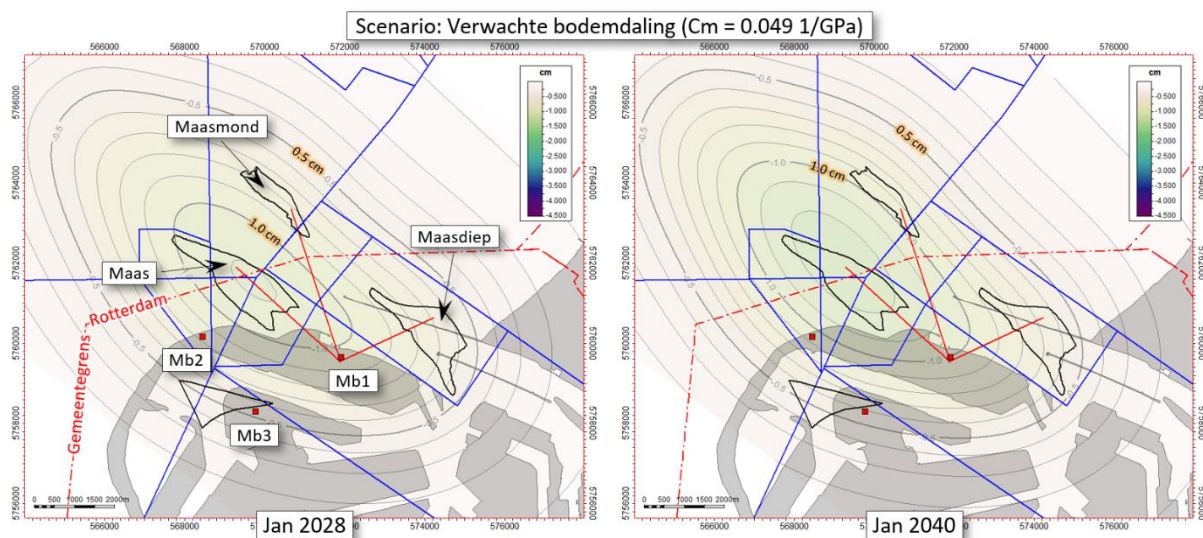
Om onderschatting van de bodemdaling bij Maasdiep te voorkomen zijn in dit winningsplan de volgende scenario's gebruikt:

- Geringe daling = overeenkomend met de Low case $C_m = 0.031$ 1/GPa
- Verwachte daling = overeenkomend met de Mid case $C_m = 0.049$ 1/GPa
- Sterke daling = overeenkomend met de High case $C_m = 0.077$ 1/GPa
- Maximale daling = overeenkomend met de Adjusted case $C_m = 0.123$ 1/GPa

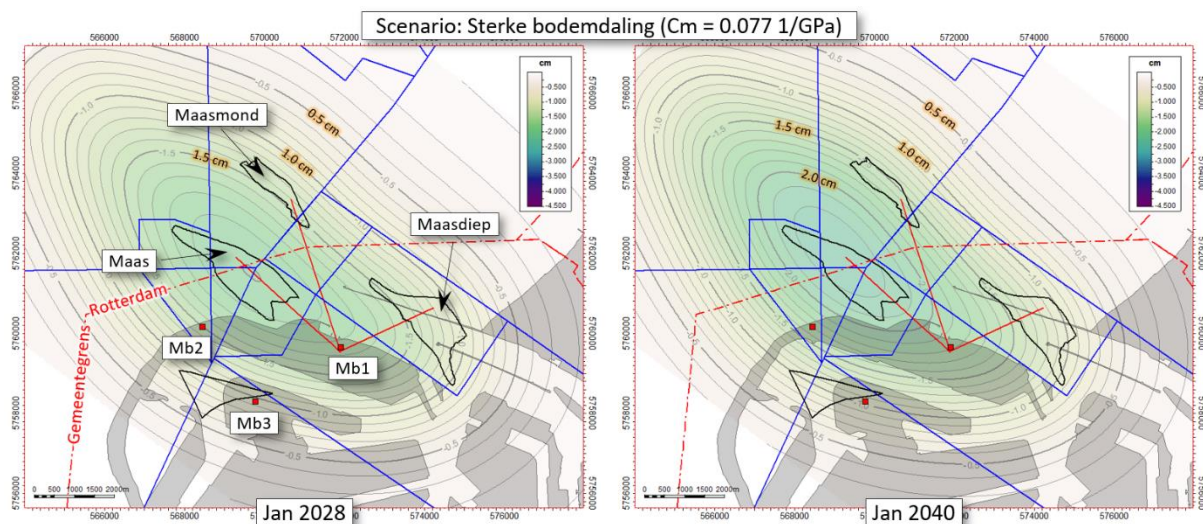
De kaarten en waarden voor de daling in de jaren 2022 (voor productie in Maasdiep), 2028 (aan het verwachte eind van Maasdiep productie) en in 2040 worden getoond voor de geringe-, verwachte-, sterke en maximale daling worden getoond in Figuur 27 t/m Figuur 30.



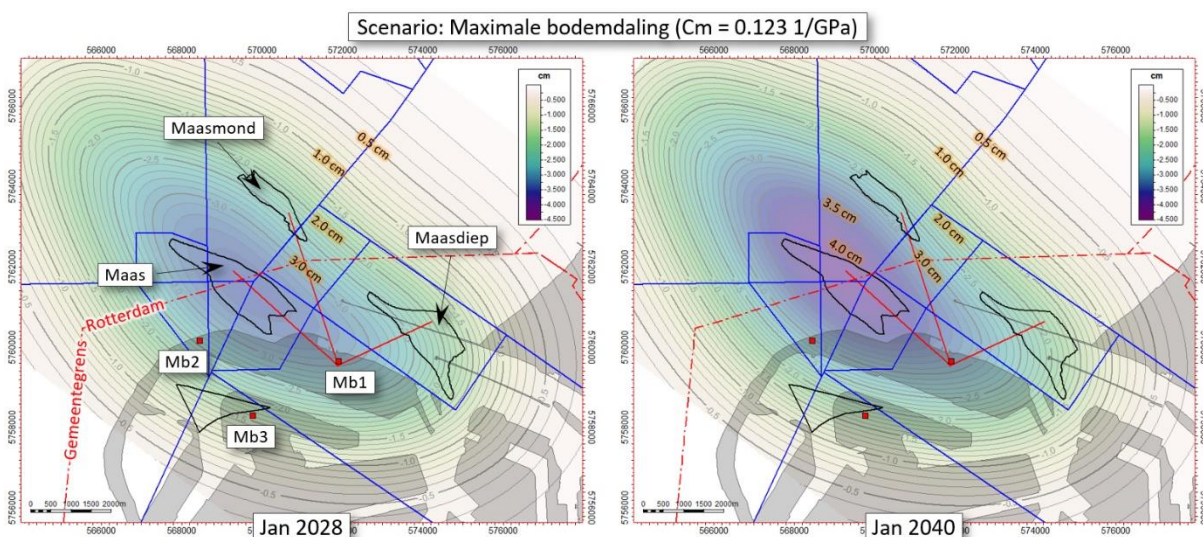
Figuur 27: Scenario geringe bodemdaling rond Maasdiep
 Getoond worden de kaartjes aan het eind van productie (2028) en geruime tijd na productie (2040). De daling wordt aangegeven door contouren met een 10 mm interval. De contouren per cm zijn extra dik gemarkeerd.



Figuur 28: Scenario verwachte bodemdaling rond Maasdiep
 Zie Figuur 27 voor verder uitleg



Figuur 29: Scenario sterke daling rond Maasdiep
Zie Figuur 27 voor verder uitleg



Figuur 30: Scenario maximale daling rond Maasdiep
Zie Figuur 27 voor verder uitleg

In Tabel 6 wordt de prognose voor de meetbakens en de apex van de Maasdiep structuur getabuleerd. Voor de locatie van de Maasdiep apex zie Figuur 13.

Datum	Mb1 ONE				Mb2 Lichtenlijn			
	Gering (C _m =0.031)	Verwacht (C _m =0.0.049)	Sterk (C _m =0.077)	Maximaal (C _m =0.123)	Gering (C _m =0.031)	Verwacht (C _m =0.0.049)	Sterk (C _m =0.077)	Maximaal (C _m =0.123)
Jan-22	0.219	0.461	0.837	1.330	0.209	0.438	0.795	1.289
Jan-23	0.230	0.484	0.878	1.396	0.218	0.457	0.829	1.335
Jan-24	0.234	0.492	0.894	1.413	0.221	0.464	0.842	1.347
Jan-25	0.240	0.505	0.918	1.451	0.227	0.476	0.863	1.375
Jan-26	0.249	0.523	0.950	1.784	0.235	0.493	0.894	1.510
Jan-27	0.254	0.535	0.971	2.541	0.240	0.504	0.914	1.872
Jan-28	0.256	0.539	0.980	3.008	0.242	0.508	0.920	2.336
Jan-29	0.258	0.542	0.986	3.078	0.243	0.511	0.925	2.589
Jan-30	0.259	0.545	0.991	3.090	0.245	0.513	0.930	2.721
Jan-32	0.260	0.548	0.995	3.094	0.246	0.515	0.934	2.796
Jan-34	0.263	0.553	1.004	3.105	0.248	0.520	0.943	2.867
Jan-36	0.265	0.558	1.014	3.120	0.250	0.525	0.951	2.900
Jan-38	0.268	0.563	1.023	3.136	0.253	0.530	0.960	2.921
Jan-40	0.270	0.569	1.033	3.154	0.255	0.535	0.970	2.938

Datum	Mb3 Vuurtoren				Maasdiep Apex			
	Gering (C _m =0.031)	Verwacht (C _m =0.0.049)	Sterk (C _m =0.077)	Maximaal (C _m =0.123)	Gering (C _m =0.031)	Verwacht (C _m =0.0.049)	Sterk (C _m =0.077)	Maximaal (C _m =0.123)
Jan-22	0.139	0.274	0.483	0.764	0.125	0.258	0.465	0.803
Jan-23	0.146	0.286	0.504	0.795	0.128	0.264	0.475	0.820
Jan-24	0.148	0.291	0.513	0.804	0.132	0.272	0.490	0.846
Jan-25	0.152	0.299	0.526	0.822	0.186	0.384	0.692	1.195
Jan-26	0.157	0.309	0.544	0.937	0.298	0.615	1.108	1.913
Jan-27	0.161	0.316	0.557	1.228	0.321	0.664	1.196	2.064
Jan-28	0.162	0.319	0.561	1.514	0.308	0.635	1.144	1.976
Jan-29	0.163	0.321	0.565	1.626	0.297	0.614	1.107	1.911
Jan-30	0.164	0.322	0.568	1.677	0.292	0.603	1.086	1.874
Jan-32	0.165	0.324	0.570	1.704	0.288	0.594	1.070	1.848
Jan-34	0.166	0.327	0.575	1.732	0.288	0.594	1.070	1.847
Jan-36	0.168	0.330	0.581	1.747	0.289	0.596	1.074	1.854
Jan-38	0.169	0.333	0.586	1.759	0.290	0.599	1.079	1.863
Jan-40	0.171	0.336	0.592	1.769	0.292	0.602	1.085	1.874

Tabel 6: Prognose bodemdaling meetbakens en Maasdiep voorkomen
Getoond worden de bodemdalingswaarden voor de Low – Mid – High en Max case. Voor de locatie van de meetbakens en Maasdiep apex zie Figuur 12 en Figuur 13. De waarden van de C_m's zijn in 1/GPa.