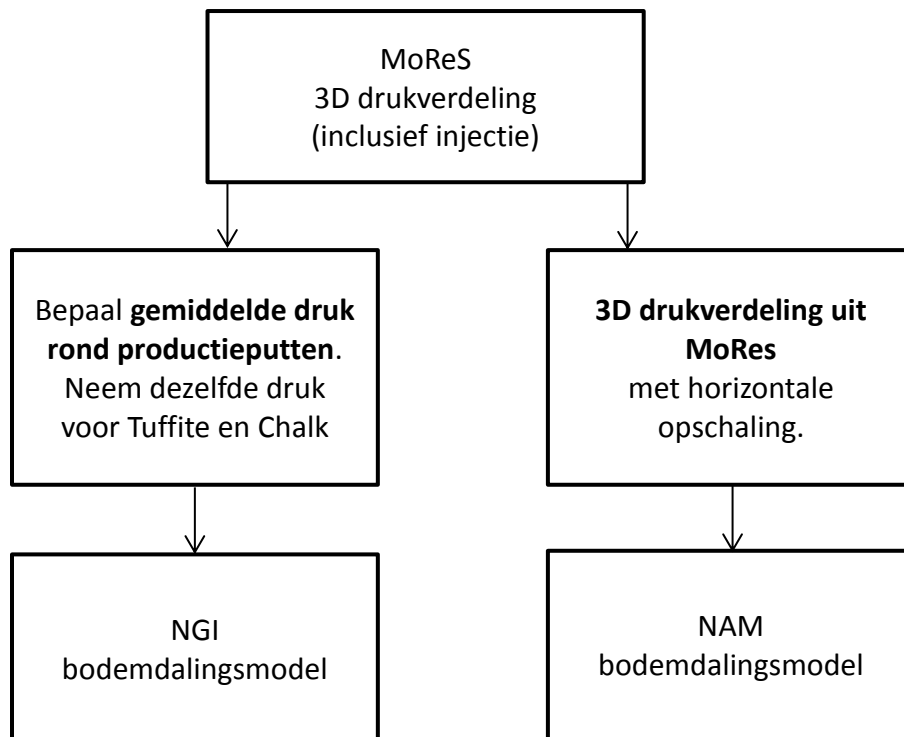


Bijlage berekeningsmethodiek bodemdaling NAM

Deze bijlage geeft de technische achtergrond van de bodemdalingsberekening zoals gepresenteerd in Sectie C van dit winningsplan. Er zijn drie modellen betrokken bij de bodemdalingsberekening:

1. Dynamische reservoir simulator (MoReS, Shell's reservoir engineering software). Deze simulator berekent de **drukverdeling** in het reservoir, rekening houdend met injectie en productievolumes.
2. **NGI bodemdalingsmodel**. Dit vereenvoudigd model (axi-symmetrisch) berekent de bodemdaling gebaseerd op ingevoerde reservoirdrukken. Dit model is gekozen omdat het een eerste orde begrip levert over het compactie/pore-collapse/kruip gedrag van de kalksteenlagen (Chalk).
3. **NAM bodemdalingsmodel**. Dit model berekent de bodemdaling gebaseerd op de 3D reservoirdrukken uit het MoReS model. De NGI berekeningsmethode voor compactie/pore-collapse/kruip in de Chalk is in het NAM bodemdalingsmodel geïmplementeerd.

De informatiestroom tussen deze drie modellen is hieronder gevisualiseerd:

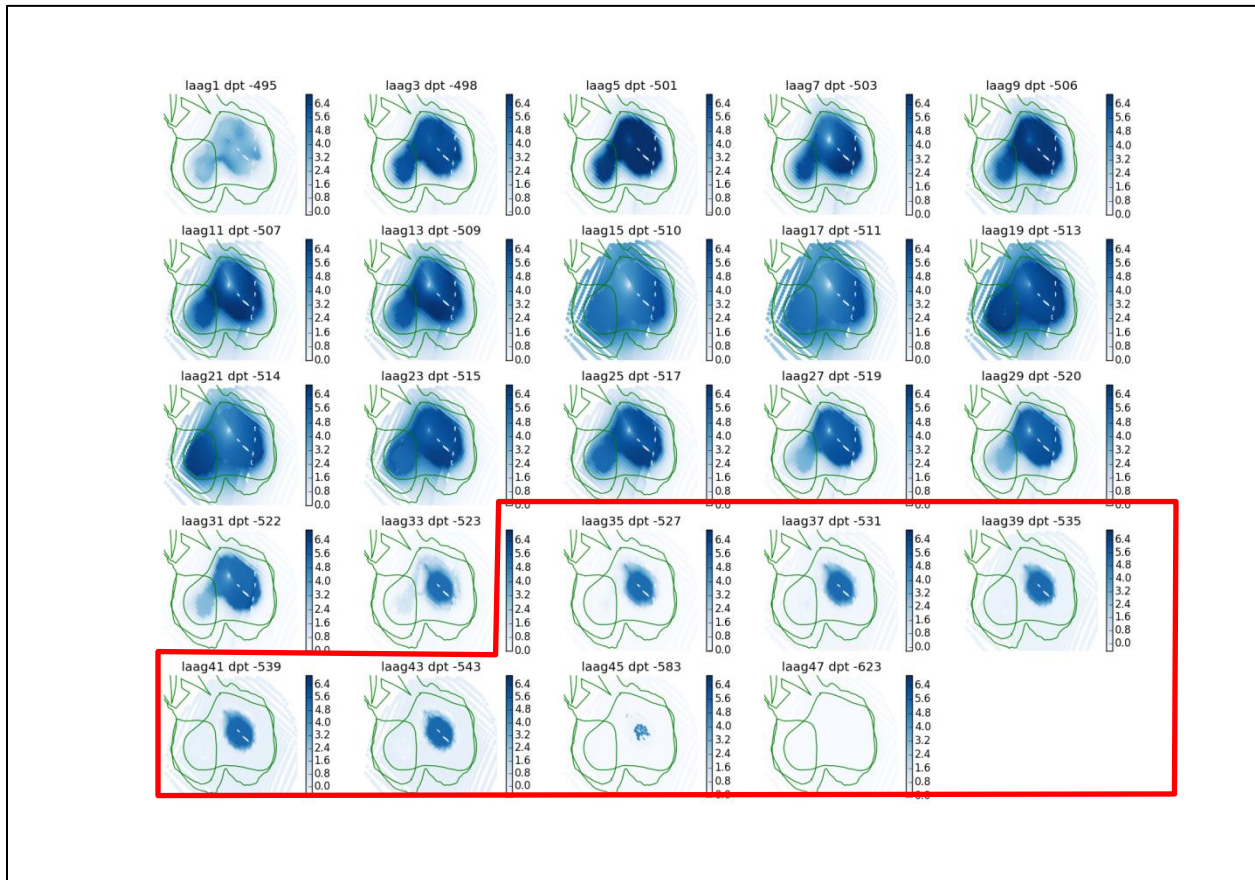


Drukverdeling volgens het MoReS simulatiemodel

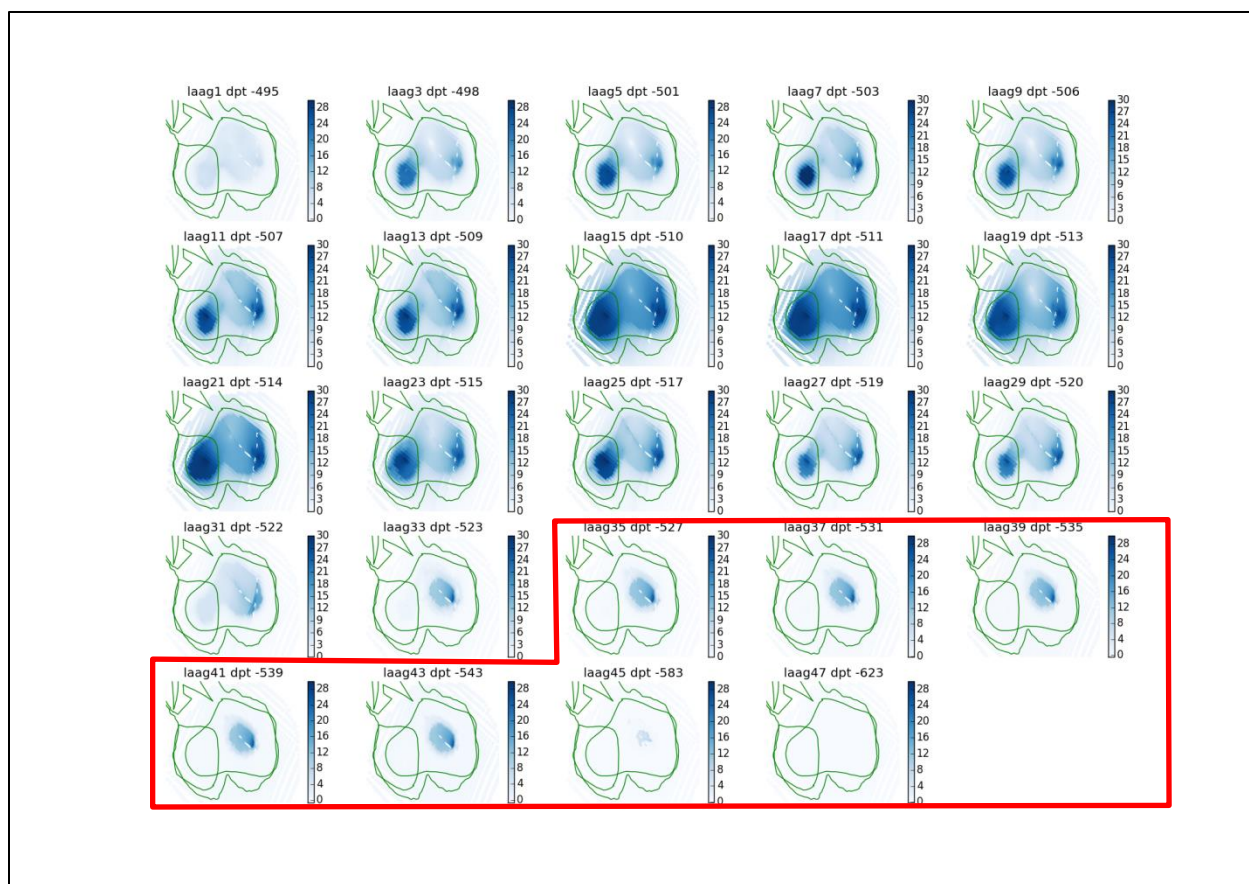
Het MoReS model bestaat uit 48 verticale lagen, waarvan de lagen 1 t/m 33 het Tuffite-reservoir vormen en de lagen 34-48 het Chalk-reservoir vormen. De berekende maximale drukdaling tot 2016 is getoond in **Figuur 1** en tot 2029 in **Figuur 2**. Binnen de rode omtrek wordt drukdaling in de Chalk lagen aangegeven, de overige lagen liggen binnen het Tuffite-reservoir.

Figuur 1 en 2 tonen de maximale drukdaling die in elk punt wordt bereikt binnen de gehele periode en niet de uiteindelijke drukdaling. Deze maximale drukdaling wordt gebruikt in het bodemdalingsmodel van NAM. De gemiddelde einddruk in 2029 ligt hoger door het herstel van drukevenwicht en komt uit op een gemiddelde druk van ongeveer 56 bar zoals beschreven in Tabel B.1.

De witte vlekken in het blauw laten de plekken zien dat bij injectoren geen drukdaling plaatsvindt door de stikstofinjectie. Beide figuren laten zien dat zowel de gemiddelde drukdaling als de omvang van de drukdaling in het Tuffite-reservoir groter is dan in het Chalk-reservoir.



Figuur 1. Drukvaling tussen 1962 en 2016 per laag in het simulatiemodel, waarbij alleen de oneven lagen zijn getoond. De kalksteenlagen zijn aangegeven met de rode polygoon.



Figuur 2. Maximale drukdaling tussen 1962 en 2029 per laag in het simulatiemodel, waarbij alleen de oneven lagen zijn getoond. De kalksteenlagen zijn aangegeven met de rode polygoon. NB: de gebruikte kleurschaal is anders dan in Figuur 1.

NGI bodemdalingsmodellen

De compactie en bodemdaling als gevolg van productie van de Dongen/Tuffite en Chalk formaties zijn berekend volgens de methode zoals beschreven in het rapport van NGI:

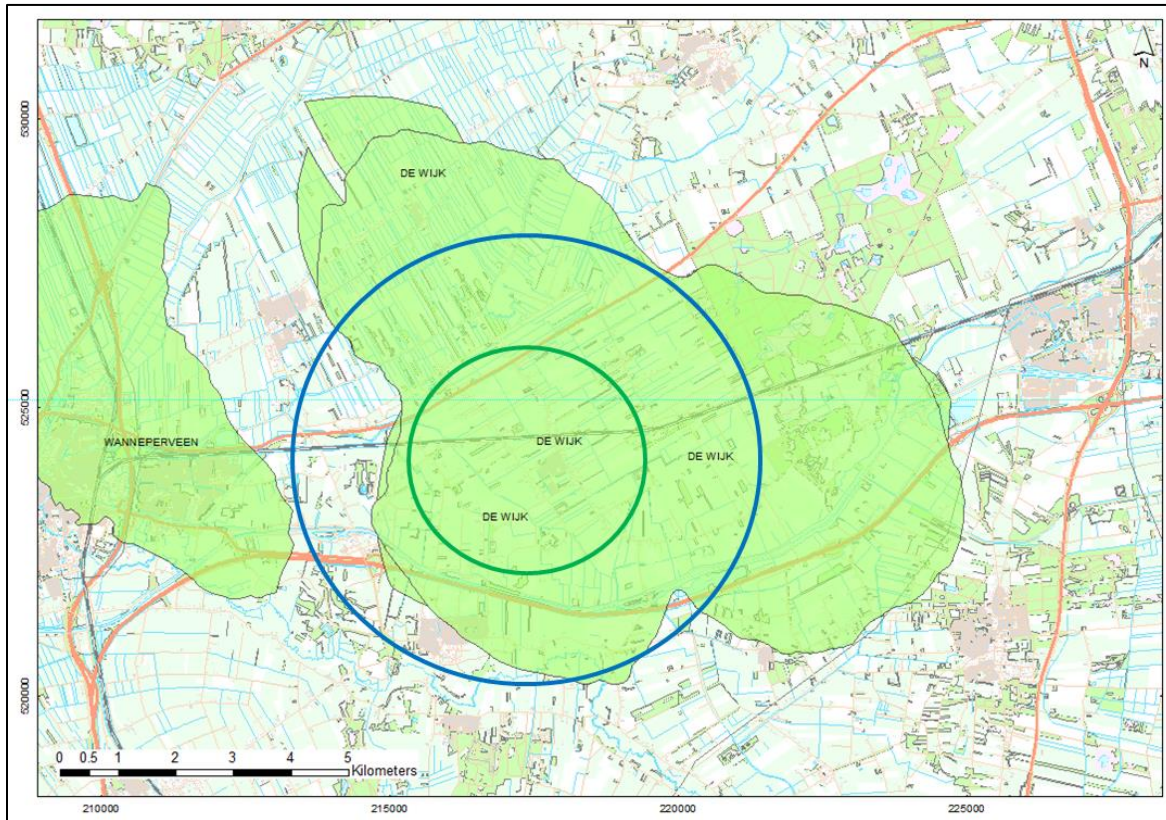
- Compaction assessment of a depleting shallow chalk reservoir, DeWijk compaction and subsidence study NGI 20130660-01-R 13 May 2015
<http://s01.static-shell.com/content/dam/shell-new/local/business/nam/downloads/pdf/technische-rapporten-compactie-en-bodemdeling-deel-1.pdf>)

NGI gebruikt dit compactiemodel in een numeriek axi-symmetrisch model, zoals beschreven in:

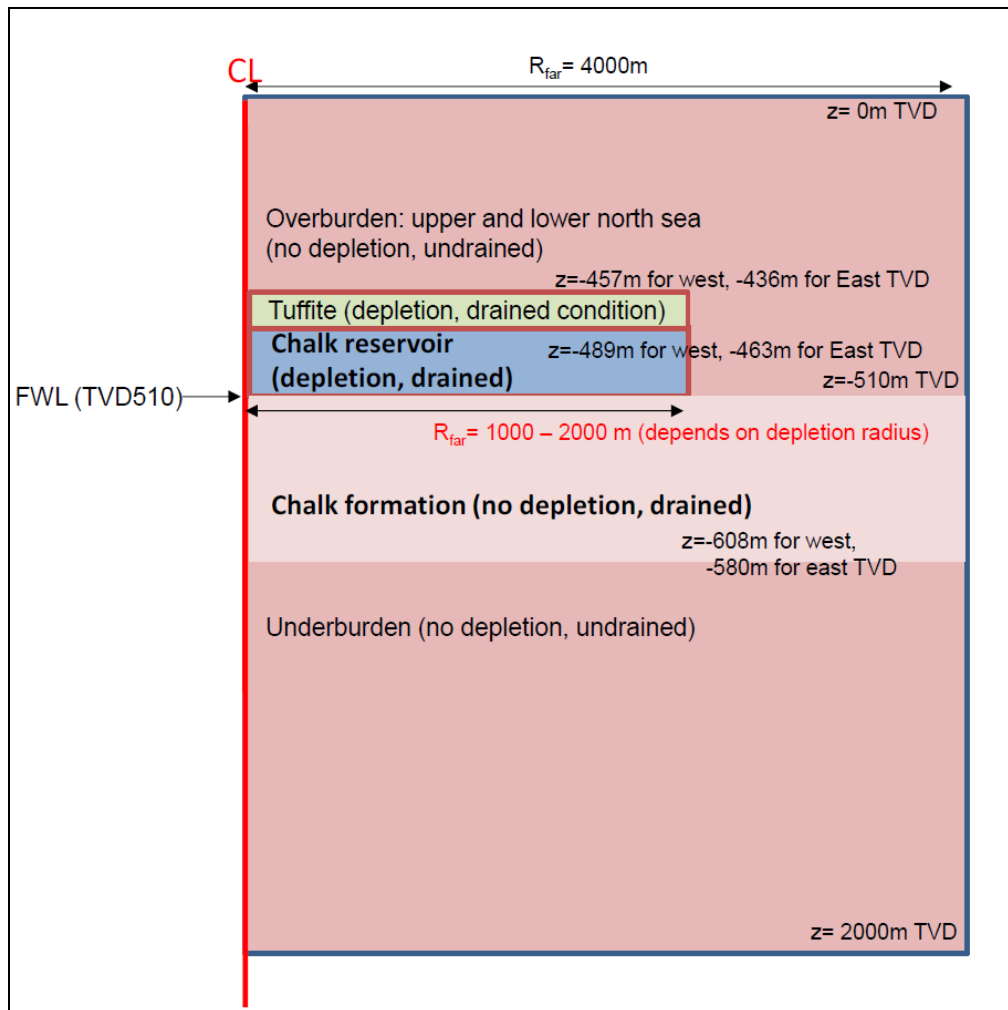
- DeWijk Phase 2: Compaction assessment of a depleting shallow chalk reservoir, 2D axisymmetric FE analysis, 20130660-02-R 6 November 2014.
<http://s05.static-shell.com/content/dam/shell-new/local/business/nam/downloads/pdf/technische-rapporten-compactie-en-bodemdeling-deel-2.pdf>

NGI gebruikt twee numerieke axi-symmetrische bodemdalingsmodellen (oost en west) met een straal van 4 km waarbij de reservoirs een straal hebben tussen de 1 en 2 km. De omvang van deze modellen wordt getoond Figuur 3. De geometrie van dit model is een benadering van de werkelijke vorm van het voorkomen. De axi-symmetrische doorsnede van het model toont tevens aan dat de straal voor beide reservoirs voor dit voorkomen gelijk zijn (Figuur 4).

Beide NGI modellen gaan uit van een homogene dikte- en drukverdeling: één voor het oostelijk deel en één voor het westelijk deel van het de Wijk voorkomen. De maximale drukdaling rond productieputten uit het MoReS model is hierbij gebruikt (20-30 bar). Let op: de druk in Tuffite en Chalk reservoirs zijn in het NGI model gelijk verondersteld.



Figuur 3. Grootte van het NGI reservoir model, geprojecteerd op het De Wijk veld. De blauwe cirkel geeft de omvang van het gehele model aan, de groene cirkel geeft de omvang van het reservoir aan.



Figuur 4. Axi-symmetrische doorsnede van het NGI-bodemdalingsmodel

NAM bodemdalingsmodel

Voor de modellering van de bodemdaling maakt NAM gebruik van een 3D model. Dit model is gebaseerd op de diktes, porositeitsverdeling en “net-to-gross” verdeling van het MoReS model. In het bodemdalingsmodel is de verticale gelaagdheid van het MoReS model intact gebleven (en daarmee ook de lagen met hogere porositeit). Het model is echter lateraal opgeschaald naar een grid van 250m x 250m. De bekende 3D drukverdeling van het MoReS model wordt (opgeschaald) in dit 3D bodemdalingsmodel gebruikt, waarbij voor elk gridblok de maximaal berekende drukdaling over de gehele periode wordt bijgehouden en gebruikt in de bodemdalingsberekening.

Het NAM bodemdalingsmodel gebruikt het compactiemodel zoals beschreven in het rapport van NGI voor compactie en bodemdaling.

Vergelijking tussen de resultaten

NGI en NAM hebben berekeningen uitgevoerd om de uiteindelijke verwachte bodemdaling te voorspellen. De maximale bodemdaling is volgens het NGI model enkele centimeters meer dan de maximale bodemdaling volgens het NAM model. Dit verschil is te verklaren door

- Geometrie. Het NGI model bestaat uit twee onafhankelijke axi-symmetrische eindige elementen modellen die uitgaan van een homogene dikte: één voor het oostelijk deel en één voor het westelijk deel van het de Wijk voorkomen. Tevens gaat het NGI model ervan uit dat de straal van het “Chalk” reservoir even groot is als de straal van het “Tuffite” reservoir. Het NAM model gaat uit van de 3D gekarteerde reservoir verdelingen. In dit verband kan het model van NGI als een eerste benadering worden beschouwd en het NAM model als een verfijning hiervan.
- Drukverdeling. Het NGI model gaat uit van een homogene druk in de reservoirs, met gelijke drukdaling in Tuffite en Chalk. Hierbij is dus de aanname dat de drukdaling in het reservoir gelijk is aan de drukdaling rond de putten. Het NAM model gebruikt de 3D berekende drukverdeling. Hierbij wordt de maximaal gemodelleerde drukdaling per punt over de gehele periode bepaald en gebruikt in de bodemdalingsberekening. De tabel hieronder geeft een samenvatting van de verschillen in aangenomen drukdaling

Locatie	NGI bodemdalingsmodel druk daling (bar)		NAM bodemdalingsmodel
	West	Oost	
Tuffite, bij productieput	60.5 -> 31	60.5 -> 37	Variabel: zie Figuur 1 en 2
Tuffite, gemiddelde druk	60.5 -> 31	60.5 -> 37	
Chalk, bij productieput	60.5 -> 31	60.5 -> 37	
Chalk, gemiddelde druk	60.5 -> 31	60.5 -> 37	

Pore collapse?

De totale compactie in het Chalk reservoir is volgens het NGI model de som van de elastische compactie, de plastische compactie door “pore collapse” en de compactie door kruip. Pore collapse kan alleen optreden bij relatief hoge drukdaling en hoge porositeiten. In de NGI en NAM modellen wordt pore collapse niet bereikt vanwege de stikstofinjectie.

Dichtbij productieputten (enkele meters) zullen de drukken lager zijn dan de gemiddelde druk op enige afstand van de put. Bij deze drukken zou pore collapse kunnen plaatsvinden. Er zijn door NGI speciale berekeningen gedaan waarbij deze lokale extra drukdaling rond productieputten is meegenomen (zie rapport 20130660-02-R). NGI concludeert dat de gevolgen voor de bodemdaling en compactie beperkt zullen zijn (enkele millimeters) in het geval van een lokale extra drukdaling met pore collapse rondom de putten.

Na afloop van de productie zal de compactie in de kalksteen zich nog enige jaren voortzetten als gevolg van kruip. Deze vorm van compactie zal snel (logaritmisch) afnemen met de tijd.

Het dient opgemerkt te worden dat de cementering die gebruikt wordt tijdens het boren van de putten voor De Wijk Fase 2 is aangepast om de berekende bodemdaling te weerstaan.