

Bodemdalingskaarten

Ger de Lange
Jan L Gunnink (TNO)

Titel
Bodemdalingskaarten

Opdrachtgever **Project** **Pagina's**
Deltares 16

Trefwoorden
Maaiveldaling, peilbeheer, klimaatscenario, gaswinning, natuurlijke daling, Deltamodel

Samenvatting
Type hier de samenvatting

Referenties
Type hier de referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	2013-07-17	Ger de Lange					
		Jan L. Gunnink					

Status
concept
Dit document is een concept rapport, niet een definitief rapport, en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

1 De bodemdalingskaart van Nederland

1.1 Inleiding

Het aardoppervlak is continu in beweging. De bewegingen hebben in ruimte en tijd, afhankelijk van de oorzaak van de beweging, verschillende schalen. Als we plotselinge, soms catastrofale bewegingen zoals aardbevingen en aardverschuivingen buiten beschouwing laten, zijn het voornamelijk geleidelijke verticale bewegingen, die een belangrijke invloed hebben op de samenleving. Vooral bodemdaling is een factor waarmee rekening gehouden moet worden. Bodemdaling leidt bijvoorbeeld tot relatieve zeespiegelstijging, verlies van waterberging, en het toenemen van kwel, maar kan op lokale schaal ook tot schade aan gebouwen en andere constructies leiden. Om de effecten van bodemdaling in beleid te kunnen meewegen zijn bodemdalingskaarten gemaakt.

1.2 Bodemdaling in kaart gebracht

In deltagebieden zijn de voornaamste oorzaken van bodemdaling de compactie van jonge sedimenten en het oxideren van oppervlakkig en organische lagen, door drainage. Ook het winnen van delfstoffen leidt tot bodemdaling. Bodemdaling door natuurlijke oorzaken verloopt langzamer, maar op langere termijn moet er ook rekening mee worden gehouden.

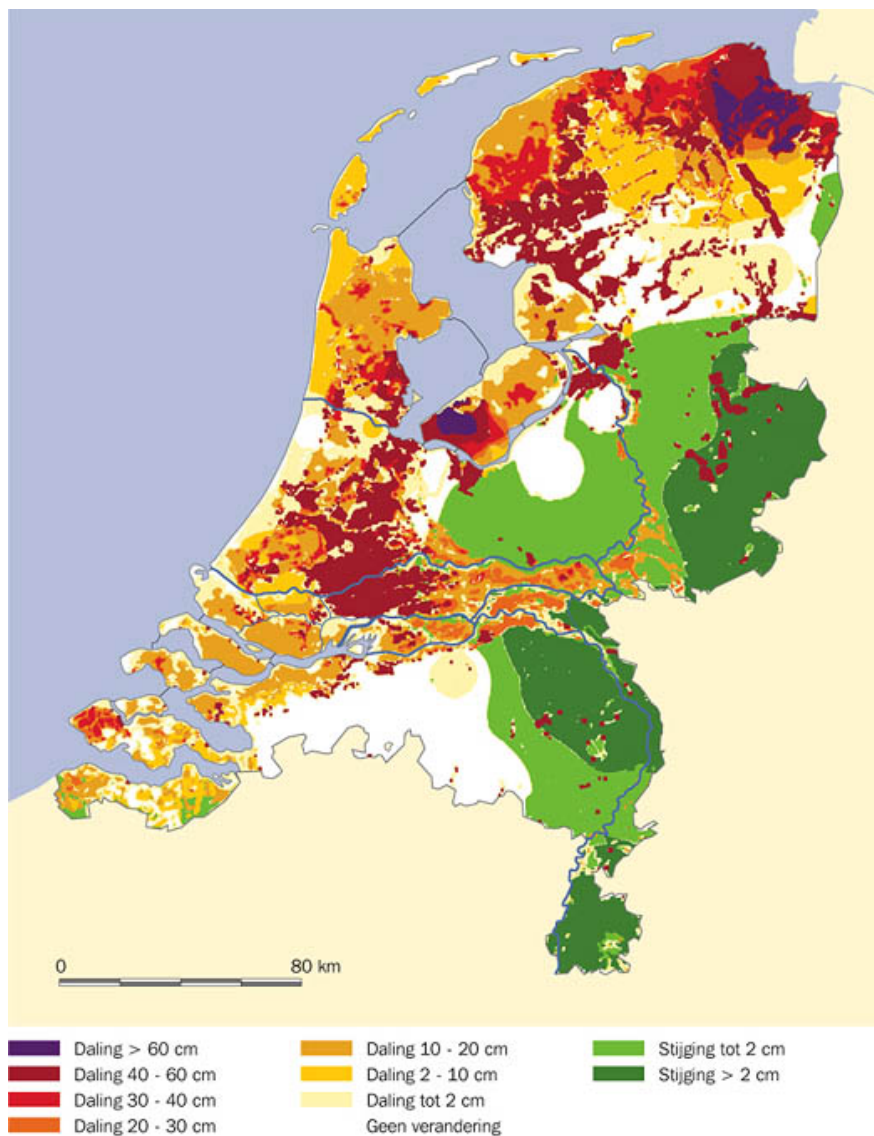
De bodemdaling in Nederland is in kaart gebracht door van de verschillende optredende oorzaken het aandeel in de totale bodemdaling in te schatten op een tijdstip in de toekomst, bijvoorbeeld in het jaar 2050.

Bij het bepalen van het beleid met betrekking tot de inrichting van laag-Nederland, in het bijzonder de relatie van het waterbeheer tot de prognoses van bodemdaling is in 1997 voor de Vierde Nota Waterhuishouding door RIZA een bodemdalingsprognosekaart voor 2050 samengesteld (Figuur 1, bron: RIZA). Om verschillende redenen is deze kaart nu verouderd. Niet alleen zijn er al 10 jaar verstreken, maar ook zijn door voortschrijdend inzicht de basisgegevens en de rekenmethoden verbeterd. Dit geldt ook voor de voorspelling van de gevolgen van klimaatverandering.

In deze notitie worden de recente verbeteringen in de bodemdalingsprognosekaart beschreven. De verschillende oorzaken van bodemdaling zijn afzonderlijk in kaart gebracht. Het betreft:

- ondiepe, door waterbeheer bepaalde bodemdaling
- bodemdaling door (diepe) delfstofwinning
- natuurlijke bodemdaling

De bodemdaling in de IJsselmeerpolders wordt voor een aanzienlijk deel bepaald door de gevolgen van de drooglegging. Naast compactie en oxidatie speelt hier het rijpingsproces van de bodem een belangrijke rol. Tijdens de rijping van de in cultuur gebrachte voormalige zeebodem krimpt de bodem sterk. Aan een verbetering van de bodemdalingsprognose voor de IJsselmeerpolders wordt momenteel gewerkt door Grontmij, Deltares, TNO en Alterra. Hierover zal in augustus 2011 een rapport verschijnen.



Figuur 1: RIZA kaart Bodemdaling in 2050 (Projectteam NW4, 1997)

1.3 Ondiepe bodemdaling

1.3.1 Werkwijze

Uitgangspunt is de aanname dat de maaiveld­daling het directe gevolg is van het peil­beheer. In iedere kolom van een 3D voxel (“volume pixel”) model van de Holocene ondergrond wordt een eendimensionale maaiveld­dalings­berekening uitgevoerd volgens de samendruk­kings­formule van Koppejan (Terzaghi-Buisman). Dit model, bestaande uit voxels van 100 *100 * 0,5 m (l*b*h) is een geostatistische interpretatie van alle in het ‘Data en Informatie Nederlandse Ondergrond’ (DINO) aanwezige boringen. Er wordt gebruik gemaakt van een vereenvoudigde lithologie, nl. zand, klei en veen. Aan deze lithologieën zijn samendruk­king­eigen­schap­pen toegekend, ontleend aan Tabel 1 van de norm NEN 6740. De huidige grondwater­stand in iedere kolom is ontleend aan het grondwater­model van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium. De maaiveld­hoogte hiervan is afgeleid uit het AHN.

Als basis voor de berekening is de top van het Pleistoceen aangenomen. Het model beslaat geheel Nederland.

Om de gevoeligheid van het gebied voor het peilbeheer eenduidig te kunnen weergeven is voor het gehele gebied de aanname gedaan dat het peilbeheer de maaiveldddaling volgt. Dit is in de berekening geëffectueerd door de peilen iedere 10 jaar te verlagen met de in de voorafgaande 10 jaar opgetreden maaiveldddaling. De hieruit berekende maaiveldddaling na 50 jaar (referentiejaar is 2000) is gebruikt om een kaartbeeld te maken van de maaivelddalingsgevoeligheid.

De gehanteerde aanpak is schematisch weergegeven in Figuur 2. De onderscheiden hoofdstappen zijn:

Stap 1

Selectie en kwaliteitscontrole van boorgegevens en overige geologische informatie.

Stap 2

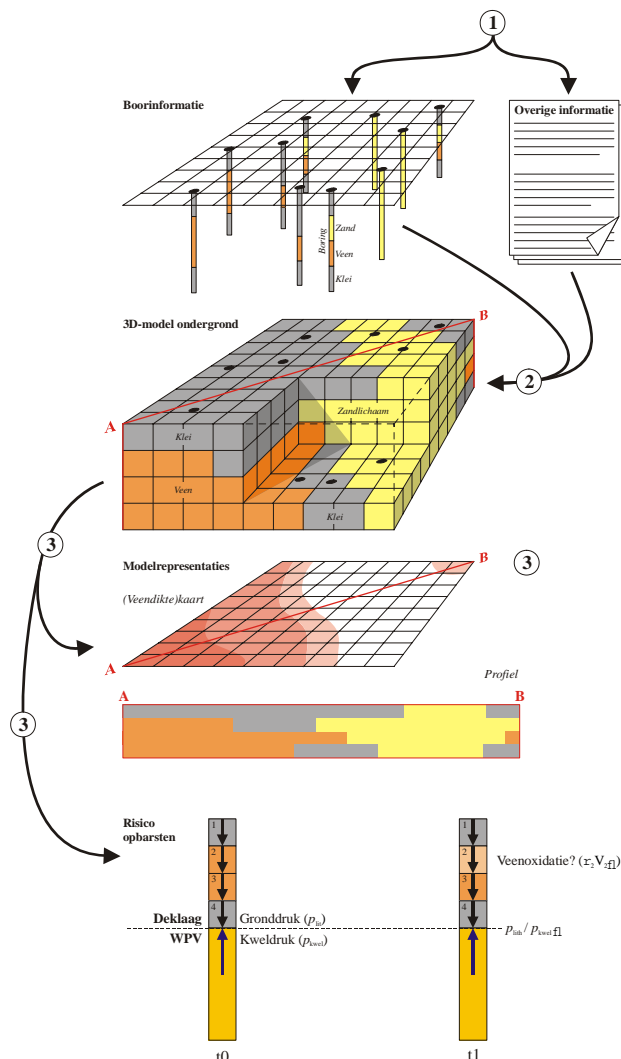
Vervaardigen van een voxelmodel ("3D-gridcellenmodellen"; celattributen zijn gebaseerd op geïnterpoleerde boorgegevens);

Stap 3

Indeling in geotechnische eenheden en parametrisatie. Vervaardigen data rasters voor de maaivelddalingsberekening;

Stap 4

Scenariostudie naar de maaiveldddaling, waarbij de veenoxidatie, compactie of zwellen ten gevolge van het waterbeheer



Figuur 2: Opzet van maaivelddalingsmodellering

De reactie van de bodem op peilveranderingen in termen van bodembeweging worden bepaald door de verandering van de spanningen in de grond en in veenweidegebieden vooral door veenoxidatie. De spanningen veranderen als gevolg van de waterdruk in de poriën, die wordt bepaald door de grondwaterstanden en de hydraulische weerstand van de respectievelijke lagen. In deze notitie worden slechts de hoofdlijnen van de methodologie genoemd, voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar Bremmer e.a. (2000).

Zetting van de bodem treedt op bij peilverlaging door afname van de waterdruk in het sediment, waardoor dit compacteert. Bij peilverhoging zwelt het sediment weer op. Dit proces is geprognoseerd met de volgende formule, naar Koppejan (1948):

$$\frac{Dh_t}{h} = \left(\frac{U(Dt)}{C_p} + \frac{1}{C_s} \log \frac{Dt}{Dt_d} \right) \ln \left(\frac{s_i' + Ds'}{s_i'} \right)$$

met: h = dikte grondlaag; Dh_t = totale samendrukking (m), Dh_t/h = relatieve samendrukking; U = consolidatiegraad, $C_{p,s}$ = samendrukkingsconstanten, s_i = initiële korrelspanning (kPa), Ds' = toename korrelspanning, Dt = duur van de belasting (dagen), $Dt_d = 1$ dag (referentieperiode).

Veenoxidatie is berekend met:

$$Dh = h_{droog} (1 - e^{(-V_{ox} Dt)})$$

met: h_{droog} = dikte droogliggend veen (m); Dh = dikteverandering door veenoxidatie (m), V_{ox} = veenoxidatiesnelheid = 15 mm per m drooglegging per jaar, Dt = oxidatieduur (jr).

Ten behoeve van de geotechnische berekeningen is het geologische voxelmodel geschematiseerd in lithologische eenheden met onderscheiden samendrukkingseigenschappen. Voor iedere voxel is de meest waarschijnlijke lithologie bepaald. De gebruikte lithologieën zijn beperkt tot zand, klei en veen, die representatief zijn voor respectievelijk weinig, matig en sterk samendrukbaar, waarbij alleen in veen oxidatie plaatsvindt. Binnen de lithologieën is niet gedifferentieerd in parameters. De in de berekening gebruikte parameters zijn samengevat in Tabel 1. Dit zijn gemiddelde waarden afgeleid uit de NEN tabel met geotechnische parameters (tabel 1 van NEN 6740).

Tabel 1: Overzicht samendrukkingsparameters

	Natuurlijk volumiek gewicht	Samendrukkingsconstanten				Consolidatiecoëfficiënt	Grensspanning	Oxidatiesnelheid
	[kN/m ³]	[-]				[mm ² /sec]	[kN/m ²]	[m/m/jaar]
	γ_{nat}	C_p	C_s	$C_{p'}$	$C_{s'}$	C_v	P_g	V_{ox}
Zand	19	2000		500		1	100	0
Klei	14	28	320	7	80	3.00E-08	100	0
Veen	10	20	80	5	20	8.00E-08	100	0.015

1.3.2 Resultaat bij huidig klimaat

Om de gevoeligheid van de bodem voor maaiveld daling als gevolg van peilbeheer weer te geven is de situatie na 50 jaar dalingsvolgende peilaanpassingen, dat wil zeggen na 5 perioden van 10 jaar met hetzelfde ingestelde peil ten opzichte van maaiveld berekend. Grondwaterstandveranderingen in de omgeving van onttrekkingen zijn genegeerd.

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven als hoogteverandering ten opzichte van de huidige hoogte van het maaiveld. De getalswaarden zijn sterk afhankelijk van de gebruikte parameters, de vereenvoudiging in het ondergrondmodel en de aannames met betrekking tot het peilbeheer en kunnen daardoor sterk afwijken van de toekomstige werkelijkheid. De resultaten zijn echter zeer bruikbaar om de relatieve gevoeligheid voor maaiveld daling in kaart te brengen (Figuur 3). Stedelijk gebied is niet aangegeven. Hier zal in het algemeen de maaiveld daling worden geremd, doordat er minder oxidatie plaatsvindt.

Zoals verwacht vindt de grootste maaiveldddaling, meer dan 10 cm, plaats in de veenweidegebieden. In kleigebieden is de maaiveldddaling beperkt tot maximaal 10 cm. Zandgebieden vertonen proaktisch geen maaiveldddaling.

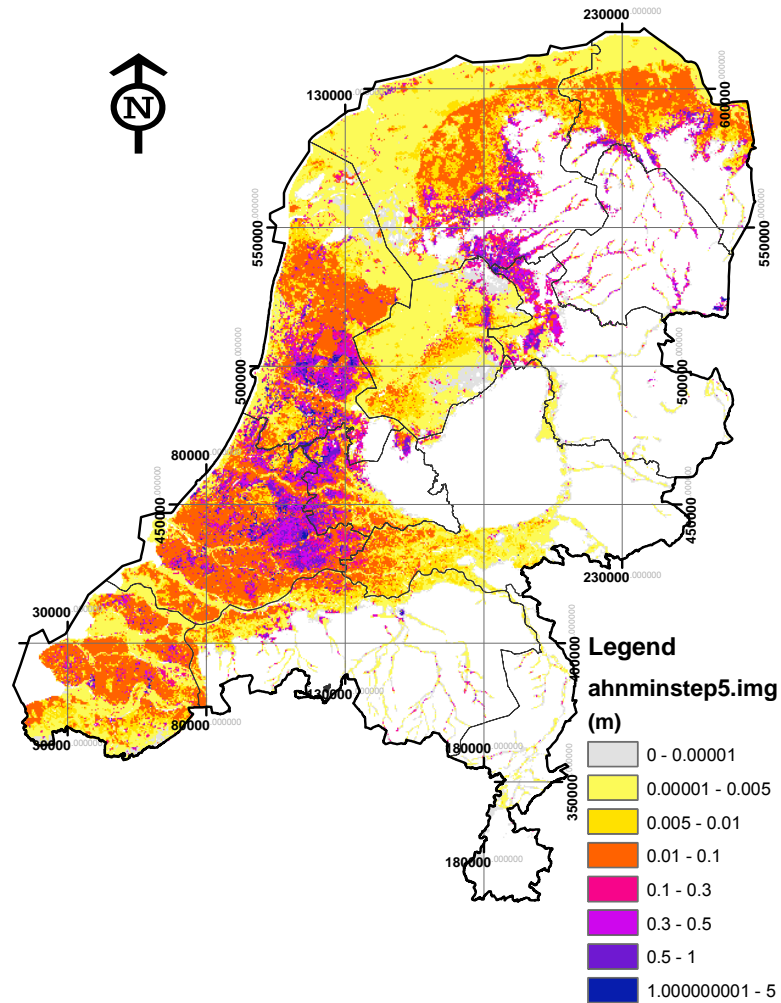
1.3.3 Berekening van klimaateffecten

Er is voor de berekening van klimaateffecten uitgegaan van 1 klimaatscenario, namelijk het W+ scenario. De klimaateffecten worden het duidelijkst weergegeven door alleen de effecten van de veranderingen weer te geven en deze te vergelijken met de maaiveldddaling bij huidig klimaat en onder handhaving van de grondwaterstand door peilbeheer. De verandering voor het dalingsmodel manifesteert zich in de gevolgen van de grondwaterstandverlaging en de temperatuur. De grondwaterstandverlaging wordt gegeven door het verschil tussen GLG_huidig en GLG_W+. Deze zorgt voor een extra compactie en grotere ontwateringsdiepte van veenlagen. Laatstgenoemde veroorzaakt een extra oxidatie. De oxidatie wordt verder versterkt door de temperatuursverhoging. De extra maaiveldddaling is berekend voor een periode van 40 jaar (2010 tot 2050) (Figuur 4).

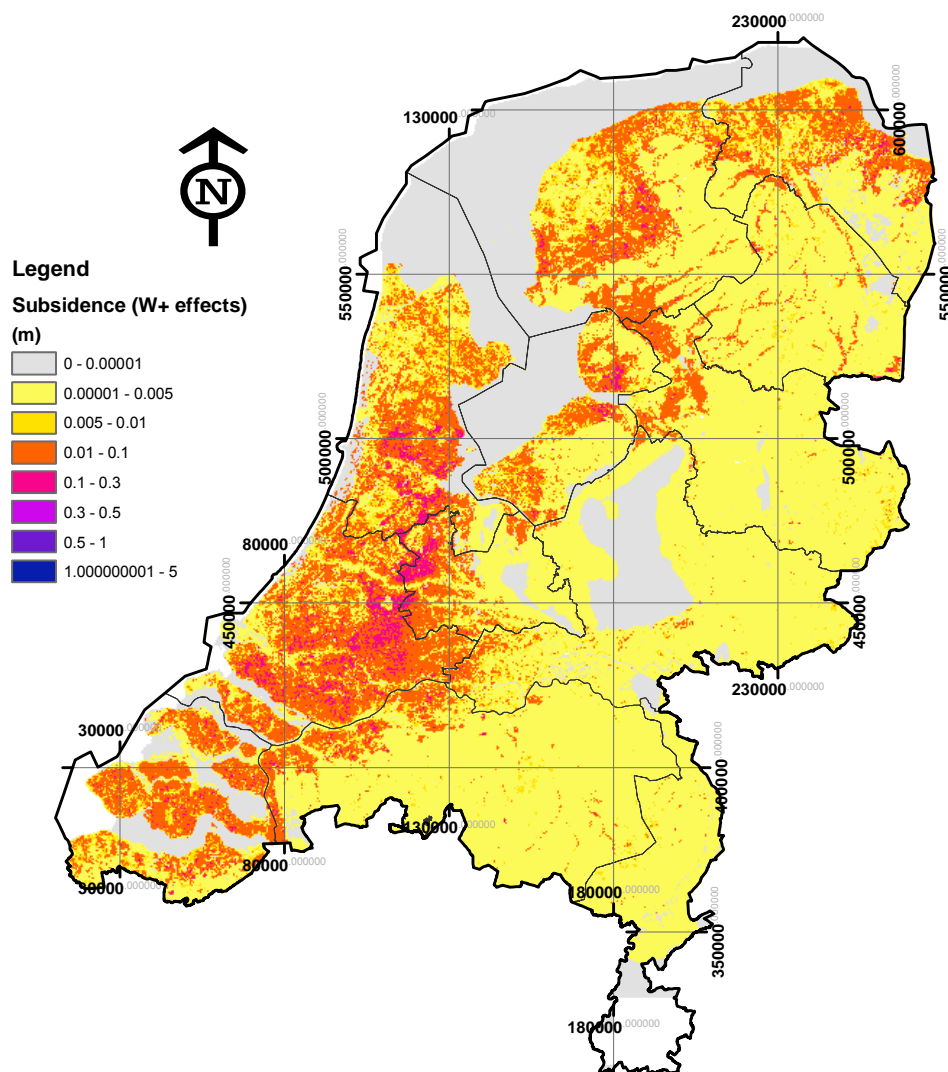
De veenoxidatie neemt toe met het hoger worden van de temperatuur (WB21, 2000).

Uitgaande van een verhoging van de zomertemperatuur in 2050 ten opzichte van huidig van 2,8 graden Celsius, moet voor de hele periode huidig -2050 met een verhogingsfactor rekening gehouden worden behorend bij de gemiddelde opwarming van 1,4graden. Op basis van het WB21 rapport betekent dit een vermenigvuldigingsfactor voor de oxidatie van 1,1.

Wanneer we de relaties tussen bodemtemperatuur en oxidatiesnelheid van Stephens (1984) toepassen (Stephens, J.C., Allen, L.H. and Chew, E. 1984. Organic soil subsidence. American Geological Society Reviews in Engineering Geology VI:107-122), komen we op eveneens op 1,1.



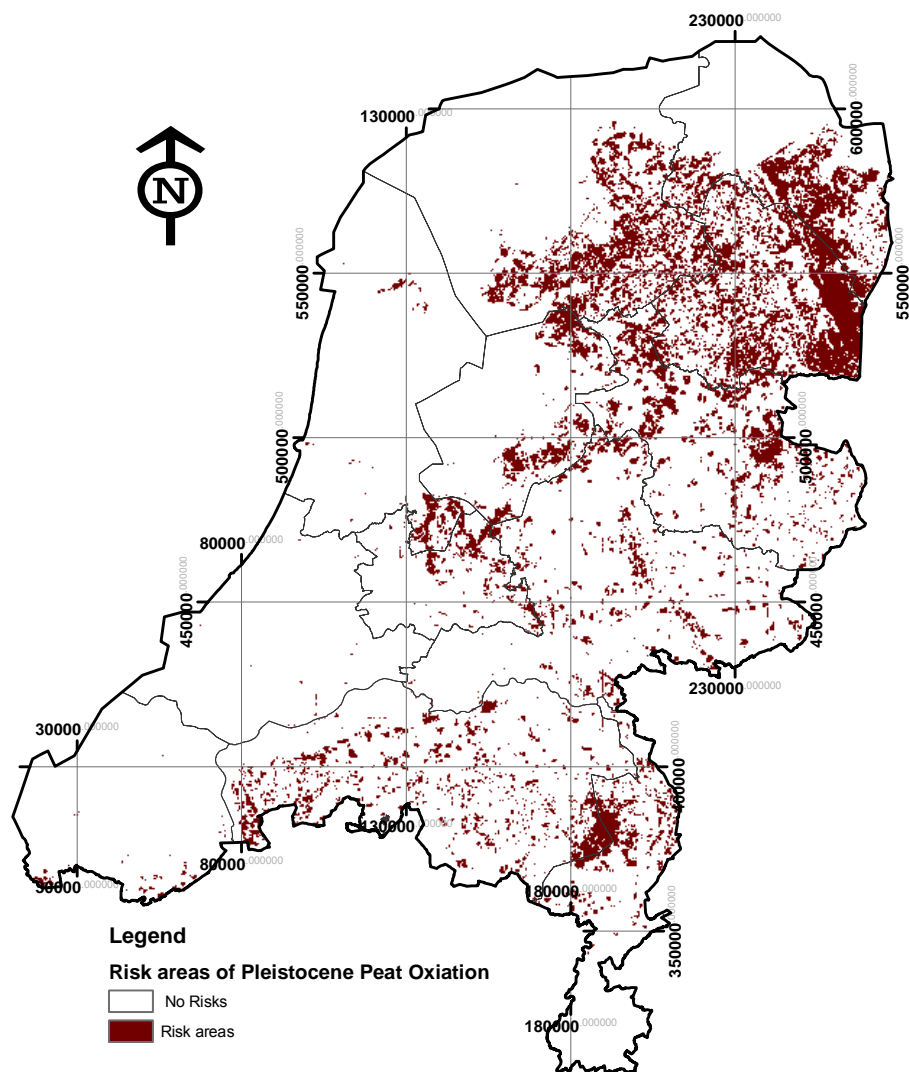
Figuur 3: Maaiveld daling (m) na 50 jaar handhaving van huidige drooglegging bij huidig klimaat



Figuur 4: Extra maaiveldaling (m) ten gevolge van W+ scenario (verlaging GLG en hogere oxidatiesnelheid)

1.3.4 Overige veengebieden

De bovenstaande berekeningen zijn uitgevoerd voor de holocene ondergrond. De basis voor de berekeningen van de grondspanningen, die fluctueren met de grondwaterstand wordt in het algemeen gevormd door de pleistocene ondergrond. In een groot deel van het gebied ligt het Pleistoceen aan maaiveld. Hierin komen ook veenlagen voor, die boven de grondwaterspiegel oxideren. De oxidatiesnelheid van deze oudere venen is niet proefondervindelijk bekend. Verder kunnen door oxidatie de tegenwoordige dikte niet meer overeenkomen met de in de boorbeschrijvingen in DINO vermelde dikte. Om het risico op een bijdrage aan toekomstige maaiveldaling aan te geven zijn de gebieden waar aan de basisvoorwaarden voor oxidatie wordt voldaan voor deze oudere venen weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5: Gebieden met pleistoceen veen boven de GLG. Kans op maaiveld daling (1), niet gekwantificeerd)

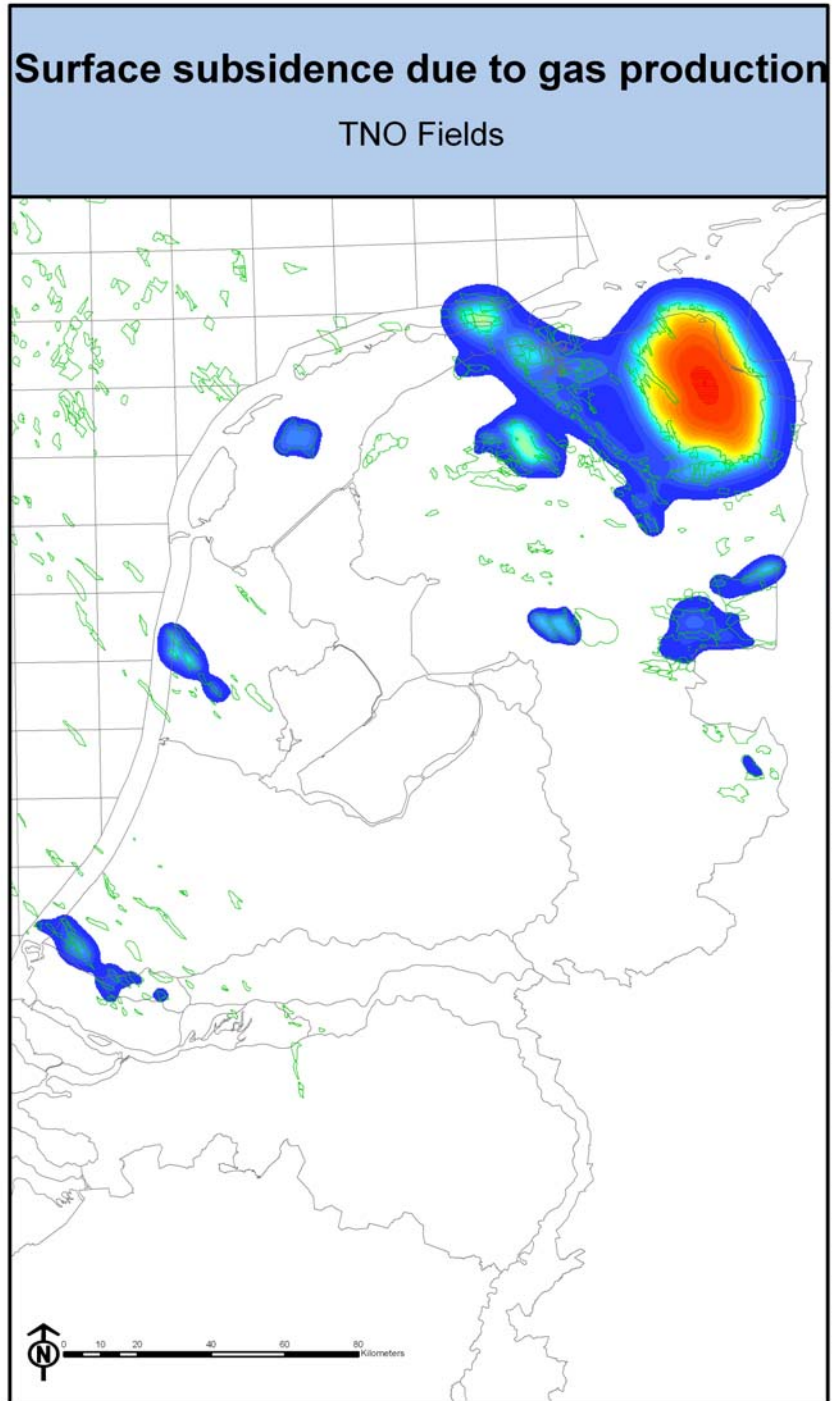
1.3.5 Opmerkingen

Bij de kaarten en conclusies moet een belangrijke kanttekening worden geplaatst. Dalingsvolgend peilbeheer voor heel Nederland is een sterk vereenvoudigde aanname geschikt voor het in beeld brengen van de bodemdalingsgevoeligheid. In werkelijkheid zal het werkelijke peilbeheer afwijken en daarmee de hoeveelheid bodemdaling. Door onderbemalingh kan zelfs meer daling optreden dan hier is berekend.

Door de oxidatie van veen verdwijnen dunne veenlagen geleidelijk. Uit een steekproef die in het kader van onderzoek van Alterra (De Vries et al., 2008) is uitgevoerd in Drenthe blijkt dat inmiddels bij 40 tot 60% van het oppervlak als moerige en (gedeformeerde) veengronden gekarteerde gronden geen veenlagen meer voorkomen. Veel veengronden zijn dun en enige decennia geleden gekarteerd. Bij de berekening van de maaiveld daling is gebruik gemaakt van deze gegevens die in DINO beschikbaar zijn. Het is te verwachten dat het gebied met een lichte tot gematigde maaiveld daling (dus dunne lagen) navenant kleiner is geworden.

1.4 Bodemdaling door olie- en gaswinning

De winning van olie en gas veroorzaakt bodemdaling door compactie van de reservoirgesteenten als gevolg van de daling van de poriëndruk. Door deze compactie zakt het bovenliggende gesteente en de onverharde jongere sedimenten in. Dit uit zich in een komvormige bodemdaling. Uit empirische relaties kunnen de omvang van de dalingskom en de hoeveelheid daling berekend worden van afzonderlijke olie- en gasvelden. Dit is in 2010 door TNO voor de Nederlandse gasvelden gedaan. De bodemdaling is berekend voor de eindsituatie van de exploitatie van de huidige en reeds verlaten velden en is weergegeven in Figuur 6. Om de voorspelde daling ten opzichte van het tijdstip van opname van de referentiemaatveldhoogte, in dit geval het AHN (opname 1997-2001), te verkrijgen moet de reeds opgetreden bodemdaling van deze waarden worden afgetrokken. Dit resulteert in **Figuur 7 (in bewerking)**. In 2050 zijn alle in productie zijnde gasvelden zijn gedepleteerd. De kaart geeft dus de situatie in 2050 weer. Geen rekening is gehouden met het gebruik van lege velden als gasopslag, hetzij van aardgas, hetzij van CO₂. Door gasopslag neemt de bodemdaling af en stijgt de bodem zelfs weer licht.



1.5 Bodemdaling door zoutwinning

De zoutwinning in Barradeel, Veendam en Hengelo/Boekelo veroorzaakt eveneens bodemdaling. Een kaart hiervan is nog niet beschikbaar. (is aangevraagd bij TNO en SodM)

1.6 Diepe natuurlijke oorzaken van daling

De diepere oorzaken van bodemdaling zijn:

- compactie van kleilagen in het pleistoceen en tertiair
- isostasie: het herstel van zwaartekrachtsevenwicht tussen de vaste aardkorst en de visceuze massa daaronder. Het evenwicht is verstoord door afsmelten van de ijskappen, sedimentatie, gebergtevorming
- tektoniek: door drukken in de aardkorst stijgen en dalen delen van de aardkorst langs breukvlakken ten opzichte van elkaar.

Kooi et al. (1998) en Kooi en de Vries (1998) hebben deze factoren gekwantificeerd. Naast theoretische en analytische inschattingen voor de compactie (0,4 – 1,2 cm/eeuw) en isostasie (1-3 cm/eeuw) is daarbij ook gebruik gemaakt van de resultaten van de 4^e Nauwkeurigheidswaterpassing van het NAP (1965-1978) om het aandeel van de tektoniek in te schatten. Op basis van deze metingen bleek de tektonische bijdrage meer dan de helft van de gemeten 15cm totale hoogteverschil over Nederland sinds 1926 (het jaar van vaststelling van het NAP referentievlak) uit te moeten maken. Kooi et al. Zetten hierbij al de nodige vraagtekens. Na de analyse van de 5^e Nauwkeurigheidswaterpassing (1996-1999) zijn de gemeten hoogteverschillen sinds 1926 bijgesteld. Het totale hoogteverschil is daarbij gehalveerd, waardoor de tektonische bijdrage aan de daling langs de kust insignificant is geworden.

Voor het samenstellen van een prognosekaart kan de kaart dienen die de correcties op de hoogten van het primaire net weergeeft (zie ook Dillingh et al, 2010). Een onzekerheid die nog overblijft is de absolute beweging van het NAP. Deze bepaalt ook waar de as van de gemeten kanteling van Nederland ligt.

1.7 Betekenis van de bodemdalingsprognose in de scenario's van het Deltamodel

1.7.1 Relatieve zeespiegelstijging

Zoals in Dillingh et al wordt uitgelegd zijn er twee benaderingen om de toekomstige relatieve zeespiegelstijging aan de kust te voorspellen:

- extrapolatie van de meetreeksen van de peilschalen. Hierin is de natuurlijke bodemdaling door diepere oorzaken impliciet in verwerkt. Wel moet gecontroleerd worden in hoeverre daling door gaswinning in de metingen is verwerkt (voorbeeld: Delfzijl).
- Gebruik maken van KNMI en IPCC zeespiegelstijgingprognoses. Hierbij moet voor het verkrijgen van de relatieve zeespiegelstijging de natuurlijke bodemdaling worden opgeteld. In het rapport van de Deltacommissie (2008) is hiervoor een getal van 10 cm/eeuw voor de kust gehanteerd. Op basis van de 5^e NWP zou dit bedrag gehalveerd kunnen worden.

Het is goed om zich te realiseren dat voor het bepalen van de hoogte van de zeeeringen de mogelijke daling door ondiepe, menselijke oorzaken, zoals gaswinning, drainage (zie 1.3, 1.4, en 1.5) mee verdisconteerd moet worden.

1.7.2 Bodemdaling en waterbeheer achter de zeekering

Alle metingen en modellen met betrekking tot waterbeheer worden gerelateerd aan het NAP. De natuurlijke bodemdaling is hiermee impliciet al verwerkt in de gegevens. Dit betekent dat

in voorspellingen die zijn afgeleid of gecalibreerd met veldmetingen de natuurlijke bodemdaling al is meegenomen. Voor de scenario's volstaat het om alleen de ondiepe oorzaken te beschouwen. Net als bij de zeestanden moet er bij het gebruik van gegevens gecontroleerd worden of het hierbij gaat om gegevens gerelateerd aan het NAP vóór of na de correctie van 2005.

1.8 Zetting door bovenbelasting

Wanneer op het maaiveld een bovenbelasting wordt aangebracht zal de onderliggende grond samengedrukt worden. Bovenbelastingen zijn bijvoorbeeld ophogingen bij bouwrijp maken van terreinen, zandbanen voor wegen, dijklichamen, maar ook ondiep gefundeerde gebouwen. De resulterende samendrukking is een gevolg van de

Referenties

Bremmer, C.N., G. de Lange, W. van der Linden, E. Veling & J. Veldkamp (2000), Bodemdaling en integraal waterbeheer. TNO-rapport NITG 03-200-A, 100 p.

Dillingh, D., F. Baart and J.G. de Ronde.2010. Definitie van zeespiegelstijging voor bepaling suppletiebehoefte. Rekenmodel t.b.v. handhaven kustfundament. Deltares rapport 1201993.002, Delft, juli 2010 66 pp

Kooi, H., and J.J. de Vries (1998) Land subsidence and hydrodynamic compaction of sedimentary basins, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2, 159-171

Kooi, H., P. Johnston, K. Lambeck, C. Smither and R. Molendijk (1998) Geological causes of recent (~100 yr) vertical land movement in the Netherlands, *Tectonophysics*, 299, 297-316

Koppejan, A.W., 1948. A formula combining the Terzaghi load compression relationship and the Buisman secular time effect. *Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng.*, Rotterdam, 3, pp. 32-38.

Projectteam NW4, Klimaatverandering en bodemdaling: Gevolgen voor de waterhuishouding van Nederland, 4e Nota Waterhuishouding, Rijkswaterstaat, Lelystad, 1997

NEN 6740, (2006), Geotechniek - TGB 1990 - Basiseisen en belastingen

RIZA (2000), Scenario's externe krachten voor WB21, bijlage 4, door RIZA, WL Delft en KNMI

Stephens, J.C., Allen, L.H. and Chew, E. (1984). Organic soil subsidence. *American Geological Society Reviews in Engineering Geology* VI:107-122

Vries, F. de, R.F.A. Hendriks, R.H. Kemmers en R. Wolleswinkel, (2008), Het veen verdwijnt uit Drenthe. Omvang, oorzaken en gevolgen. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1661, 18 blz

Vos, D. de , (2010), Determination and visualization of the expected surface subsidence due to onshore gas production in the Netherlands, intern rapport TNO

