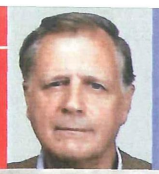
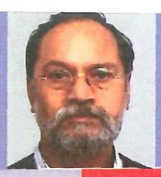

dr ir Fl. Schokking
GeoConsult B.V.
Haarlem


dr D. Nieuwland
NewTec B.V.
Leiderdorp

Bodemdaling Hondsbossche en Pettemer Zeewering: gevolg van geologische processen in diepe ondergrond

Figuur 1 *Hondsbossche en Pettemer Zeewering.*

Samenvatting

November 2004 werden door Floris van GeoConsult bodemdalingsnelh plaatse van de Hondsbossche Zeew meer dan 40 cm/eeuw in de media relatie met de in de toekomst verw spiegelstijging en klimaatveranderi hierdoor veroorzaakte verminderin hoogte van de zeewering zorgwekk artikel wordt de juistheid van de hy aangetoond, dat de optredende bo een natuurlijke oorzaak heeft en ve houdt met tektonische en mogelijk geologische processen in de diepe grond. Het belangrijkste bewijs vo tektonische oorzaak is het periodis van het dalingsverloop van de aang peilmerken van het NAP. Deze duic kleef-slip beweging langs breuken. grote verticale neo-tektonische be snelheden zijn nooit elders in de w deze wijze geregistreerd en beschr De juistheid van de hypothese wor ondersteund door waarnemingen a sche 2D-seismische opnamen afko olieindustrie, door laboratorium o van bewegingen langs breuken, do risch geologisch onderzoek en doo satellietradarinterferometrie onde (remote sensing uit de ruimte). Uitgebreider onderzoek naar de o van de bodemdaling ter plaatse va Hondsbossche en Pettemer Zeewe belang om voorspellingen over lan te kunnen doen en tevens om inzic in vergelijkbare geologische proce andere locaties langs de Nederlan hoge bodemdalingsnelheden vero

Inleiding

GeoConsult werd in het kader van het project Kustvisie 2050 in 2004 door Rijkswaterstaat (RWS), Directie Noord-Holland verzocht te beoordelen wat op ingenieurs geologisch en geotechnisch gebied de problemen van de Zwakke Schakels zouden zijn, en met name waar het de Hondsbossche en Pettemer Zeewering betreft. Door betrokkenheid bij de beoordeling van de effecten van de aardgaswinning in de zuidelijker gelegen aardgasvelden in de toenmalige concessies van BP (voorheen Amoco en recentelijk Taqa Energy) was GeoConsult in staat met de interpretatie van historische peilmerk gegevens en uitgebreid ingenieurs geologisch en geotechnisch onderzoek extreem hoge bodemdalingsnelheden waar te nemen en de oorzaken daarvan gedeeltelijk te verklaren. De eerste resultaten van dit onderzoek werden november 2004 gepubliceerd (Schokking, 2004).

Naar aanleiding hiervan werd juli 2005 een workshop georganiseerd door RWS teneinde de problematiek door een aantal deskundigen te laten belichten. De bijdragen aan de workshop en een verslag ervan werden gebundeld en gerapporteerd (RWS/Deltares/TUDelft, 2008). De algemene conclusie in de rapportage luidt, dat er sprake is van door de mens veroorzaakte bodemdaling, waarbij aardgasonttrekking en verhoging van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering als mogelijke activiteiten genoemd worden.

Anders dan in de genoemde workshop worden in dit beschreven onderzoek de resultaten van een aantal methodieken direct met elkaar vergeleken. De gepresenteerde gevolgtrekkingen geven een inzicht in de natuurlijke geologische processen die de oorzaak zijn van bodemdaling ter plaatse van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering. Hoewel geen direct gevaar voor overstroming of instabiliteit van de zeeweringen dreigt, is verder onderzoek nodig om nauwkeuriger te definiëren welke mechanismen werken die tot de gemeten dalingfenomenen leiden. Met name de interpretatie van 3D-seismische informatie is hierbij van belang om voorspellingen over in de toekomst optredende bodemdaling te kunnen doen.

Mede in relatie tot de verwachte zeespiegelrijzing en klimaatverandering in de komende eeuw is kennis over additionele relatieve zeespiegelrijzing door bodemdaling van groot belang voor de veiligheid van de overige delen van de Nederlandse kust.

Langs overige delen van de kust, die vergelijkbare geologische kenmerken vertonen, kan met de dan in Noord-Holland verkregen inzi verder onderzoek uitgevoerd worde

Vraagstelling

In de Kustvisie 2050 (Arcadis, Nieuw & Alkyon, 2002) en de Verkenning K digingstrategieën Zwakke Schakels Holland (Provincie Noord-Holland, 2 worden met betrekking tot kustveil zowel de duinkust als de harde zeev zoals de Hondsbossche en Pettemer in beschouwing genomen.

Wat betreft de duinkust vormt kust having een uitgangspunt voor het b

De relatie kustafslag (erosie) en bodemdaling in de Kop van Noord-Holland is als zodanig nog niet gelegd. Anderzijds, kan gesteld worden, dat sinds ca. 1350 A.D. de toename van de kustafslag in dit gebied opmerkelijk is. Zandsuppletie, teneinde de kustlijnhandhaving te bewerkstelligen, blijft, onafhankelijk van de oorzaak of oorzaken van de sterke erosie, uiteraard een optie. De vraag is of locaal hoge bodemdalingsnelheden een rol spelen in het erosieproces. Een antwoord hierop kan bijdragen in de methodieken die op de korte en de lange termijn voor de suppletie van zand gekozen worden. Dit mede in relatie met de diverse opties van kustlijnhandhaving (strandverbreding, uitbreiding bestaande duinen, uitbreiding met nieuwe duinen en vooroeversuppletie).

In 'Verkenning Kustverdediging Strategieën; Zwakke Schakels Noord-Holland, Startnotitie voor integrale effecten beoordeling' (Provincie Noord-Holland, 2005) worden met betrekking tot de harde zeeweringen de volgende integrale opties overwogen:

1. 'Gladde' kust: Verbreding van de duinkust van Huisduinen tot Petten van tot maximaal 200 m en traditionele, consoliderende dijkverzwaring van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering. De vooroever wordt met zand bedekt.
2. 'Duinzoom in de lift': Landinwaartse duinverbreding ten noorden van Petten (mede om secundaire gevolgen van klimaatverandering en bodemdaling achter de duinen te verminderen). De Pettemer Zeewering wordt traditioneel versterkt en verbreed en de Hondsbossche Zeewering wordt overslagbestendig gemaakt.
3. 'Harde kust': Ten noorden van Petten worden 250 m pieren in zee gelegd en zand aangebracht en de Hondsbossche en Pettemer Zeewering worden eveneens met pieren en zand beschermd.

Consequenties voor de harde zeeweringen

Bij de beschouwing van het optreden van bodemdaling ter plaatse van de Hondsbossche en Pettemer zeewering moet rekening gehouden worden met:

a. bodemdalingsnelheden die invloed hebben op de minimaal vereiste kruinhoogte
b. het optreden van differentiële verplaatsingen, die de integriteit van de zeeweringen in gevaar kunnen brengen.

Bij a. ligt het voor de hand om analoog aan het Middenscenario zeespiegelrijzing: 60 cm/eeuw (TAW werkgroep Kust, 2003 en 3e Kustnota, MinV&W, 2000), voor beslissingen met een lange ontwerpduur de vijftig tot honderd jaar aan te houden. Bij bodemdalingsnelheden van 40 cm/eeuw en meer zullen deze bij de traditionele versterking van zowel de Hondsbossche als de Pettemer Zeewering (Optie 1.) en bij de versterking van de Pettemer Zeewering (Optie 2.) direct een rol gaan spelen. Bij de andere opties zal ook de gedurende de ontwerp en beslissingsperiode beschouwde kruinhoogte, en hoe en waar deze beïnvloed wordt door hoge bodemdalingsnelheden, een ontwerpcriterium vormen.

Bij b. moet gedacht worden aan verplaatsingen langs breuken cq. breukzones, al dan niet in relatie met het optreden van aardbevingen.

Consequenties voor het achterland

Naast a. en b. dient in het gehele gebied achter de kustlijn, rekening gehouden te worden met bodemdaling in verband met de vermeerdering van zoute kwel en de verandering van hydraulische condities voor het oppervlakte water ten gevolge van daling van maaiveld, dijken, waterpeilregelende constructies en rioolsystemen.

Vraagstelling betreffende bodemdaling

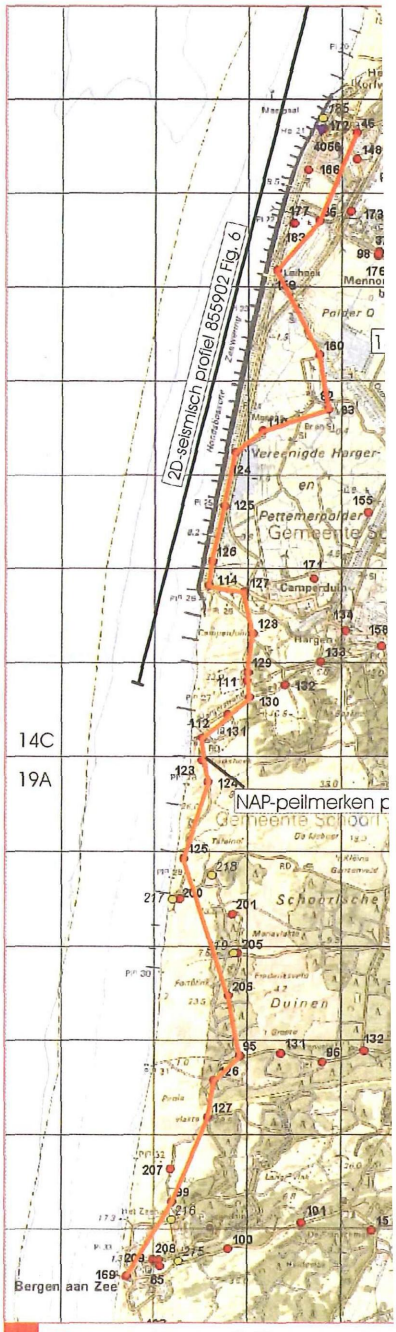
Uiteindelijk zal antwoord gevonden moeten worden op de volgende vraagstelling:

a. Vindt er locaal en/of regionaal bodemdaling plaats, en wat is de bodemdalingsnelheid en wat is de oorzaak ervan?
b. Indien er bodemdaling optreedt, is er dan een voorspelling te doen over het verloop van de bodemdaling en de bodemdalingsnelheden in de toekomst?
c. Indien er bodemdaling optreedt, is er dan kans op differentiële bodemdaling?
d. Zijn er op grond van de waarnemingen uitspraken te doen over het optreden van bodemdaling langs de overige delen van de Nederlandse kust?

In dit artikel zal slechts een deel van deze vraagstelling belicht kunnen worden en met name waar het onderdeel A betreft. Voor vraagstellingen B, C en D is uitgebreider onderzoek vereist in het Noord-Hollandse gebied en langs overige delen van de Nederlandse kust.

Hypothese

Uitgaande van bovenbeschreven vraagstelling wordt in dit artikel de juistheid van de volgende hypothese beargumenteerd:



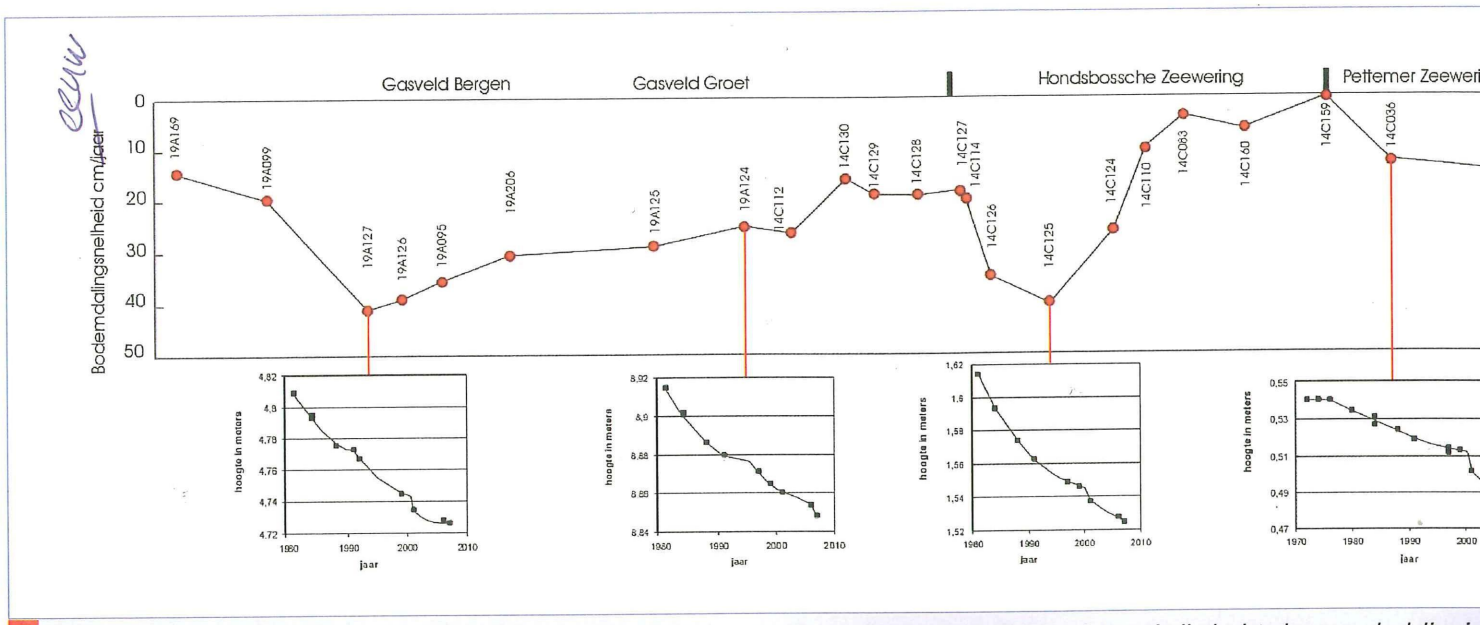
Figuur 2 Ligging NAP-peilmerker 2D-seismisch profiel.

De gemeten bodemdaling ter plaatse va Hondsbossche Zeewering wordt veroo door grootschalige geologische proce de diepe ondergrond, waarbij neo-tek het belangrijkste proces vormt.

Observatie van bodemdaling uit NAP-metingen

Voor een doelmatig waterbeheer in Ne het Nieuw Amsterdam Peil (NAP) al ee het vaste referentievlak bij de meting waterpeil. Daarnaast is het NAP van be hoogtemetingen bij aanleg en beheer

Normaal



Figuur 3 *Bodemdalingsnelheden van NAP-peilmerken tussen Bergen-aan-Zee en Petten. In de TVG's is het periodische karakter van de daling in gebied te zien. Alle dalinglijnen vertonen een versnelde daling na de aardbevingen van 2001 in het Gasveld Bergermeer (KNMI, 2001).*

sluizen, infrastructuur en andere constructies. De basis van het NAP wordt gevormd door het primaire net van ondergrondse merken (OM) die gefundeerd zijn op in de Pleistocene zandlaag geplaatste palen.
Deze OM'en worden gebruikt als uitgangspunt voor het secundaire net bestaande uit ca. 35.000 peilmerken geplaatst op relatief stabiele objecten, zoals gebouwen, viaducten, bruggen en duikers.
De publicatie en uitgevoerde evaluaties van de metingen van het NAP gaan terug tot de metingen van de 2e Nauwkeurigheidswaterpassing (2e NWP) die plaatsvond tussen 1926 en 1940. Gedurende die periode zijn van 47 OM'en de hoogten vastgesteld ten opzichte van het nulpunt in Amsterdam. Tijdens de in de periode van 1996 tot 1999 uitgevoerde 5e NWP is vastgesteld, dat er aantoonbare verschillen bestaan tussen de bestaande hoogten van de OM'en en de werkelijke hoogten (AGI en ICT, 2003).
Deze bewegingssnelheden zijn kleiner dan een mm/jaar, maar over een periode van 60 tot 80 jaar moet er terdege rekening mee worden gehouden. Deze bewegingen worden veroorzaakt door grootschalige geologische processen, met name gerelateerd aan isostasie, in de diepe ondergrond. Door aanpassing van de hoogten na een vaste periode wordt het NAP hiervoor steeds weer bijgesteld.

Door meer locale bodemdaling in de ondergrond kunnen de peilmerken van het secundaire net, maar ook de OM'en, daling vertonen in de tijd. De bodemdalingkommen van gasvelden worden ondermeer hiermee gemonitord, zoals in het Groningen aardgasveld reeds sinds begin jaren '70 van de vorige eeuw gebeurd. Bodemdaling door andere oorzaken, zoals door zoutwinning, door het graven van boortunnels of door de belasting van dijklichamen, maar ook bodemdaling door natuurlijke oorzaken, resulteren eveneens in een meetbare vervorming van het oppervlak.

In het gebied tussen Petten en Bergen zijn vanaf 1950 peilmerken aangemeten in successievelijke waterpascampagnes. Indien we de bewegingssnelheden van de peilmerken in een sectie langs de duinkust en de Hondsbossche en Pettemer Zeewering in een grafiek weergeven zien we twee zakkingfenomenen *(figuur 2 en 3)*. Tussen Bergen-aan-Zee en Camperduin is de expressie te zien van de bodemdaling in het Bergenveld en het Groetveld, waar sinds beging jaren '70 van de vorige eeuw aardgas gewonnen wordt. In het diepste punt van de schotelvormige bodemdalingkommen worden de hoogste bodemdaling snelheden gemeten van ca. 41 respectievelijk 28 cm/eeuw.[1] Tussen Camperduin en Petten is ter plaatse van de Hondsbossche Zeewering een zakkingfenomeen te zien, dat zich uitstrekt over de gehele zeewering bestaande uit een kanteling naar het zuiden en een aansluitende meer komvormige zakking over een afstand van ca. 2 km.Tussen 1980 en 2001 werd een maximale bodemdalingsnelheid van gemiddeld 40,1 ± 1,4 cm/eeuw gemeten. Het zakkingbeeld van peilmerken die ten oosten van de Hondsbossche Zeewering liggen is compatibel met dit zakkingbeeld.
In de omgeving van Petten tonen p
ten oosten van de Pettmer Zeewer
zijn een locale daling in het gebied
wering met een snelheid tot ca. 13
cm/eeuw gemeten vanaf 1950 tot

Als mogelijke oorzaken kan gedach
door de mens veroorzaakte bodem
inklinking van samendrukbare lage
oorzaak gelegen boven het Pleisto
vlak) ten gevolge van het gewicht
brachte of opgehoogte dijklichaam
king die optreedt ten gevolge van
in de randaquifer van het Groetvel
hangt met de verlaging van de gasc
de exploitatie (diepe oorzaak, optr
het Pleistocene oppervlak). Daarna
geologische processen in de onder
het Pleistocene oppervlak) de oorz
waarbij tektonische deformatie va
langs breuken, natuurlijke compac
sieve lagen ten gevolge van de dru
bovenliggende afzettingen, en eve
matie van zoutlagen beschouwd k

In het geval van bodemdaling bove
gasveld wordt voor de analyse hie
a-priori deformatie model opgeste
het algemeen mogelijk uit een (de
modellering in combinatie met inf
geologische en geomechanische m
eventueel mede gebaseerd op lab
proeven die het compactiegedrag
voirgesteente beschrijven.

De geschatte deformatie van het aardoppervlak, op basis van geodetische technieken die gebruik maken van gemeten hoogteverschillen, kan vervolgens met het a-priori model worden vergeleken. Hieruit kan dan eventueel een terugkoppeling naar de aangenomen modelleringen en parameters gemaakt worden en kunnen na herijking van het a-priori model voorspellingen over toekomstige te verwachten daling opgesteld worden.

Omdat de oorzaak van de dalingen ter plaatse van de Hondsbossche Zeewering onbekend is kunnen geen a-priori modelleringen opgesteld worden en moet een andere methodiek of combinatie van methodieken gebruikt worden om oorzaken te identificeren. Pas nadat er een geverifiëerde oorzaak of combinatie van oorzaken is vastgesteld kunnen zinvolle a-priori modellen opgesteld worden en aan de metingen getoetst.

Analyse van bodemdaling met verschillende methodieken

Er is een in het volgende beschreven combinatie van methodieken toegepast om de oorzaak van de bodemdaling ter plaatse de Hondsbossche Zeewering te onderzoeken, die in het volgende beschreven wordt.

- **Tijd-verplaatsing diagrammen**

Hierbij wordt het karakter van de beweging per peilmerk geanalyseerd aan de hand van de gemeten NAP-hoogtes per epoch.

- **Historisch dalinggedrag**

Hoogteliggingen van de Hondsbossche Zeewering op verschillende momenten in het verleden, bekend uit archieven, worden met elkaar vergeleken.

- **Satellietradarinterferometrie**

Achtereenvolgende radarbeelden uit satellieten worden met elkaar vergeleken, waarmee bodemdalingsnelheden met een formele precisie van 0,1 tot 0,2 mm/jaar waargenomen kunnen worden. Deze methodiek heeft globaal dezelfde nauwkeurigheid als waterpassen, echter de acquisitiedichtheid (in ruimte en tijd) op harde oppervlakken is vele malen groter ten opzichte van een peilmerkennet, dat vereist is voor het waterpassen.

- **Interpretatie van 2D-seismische opnamen**

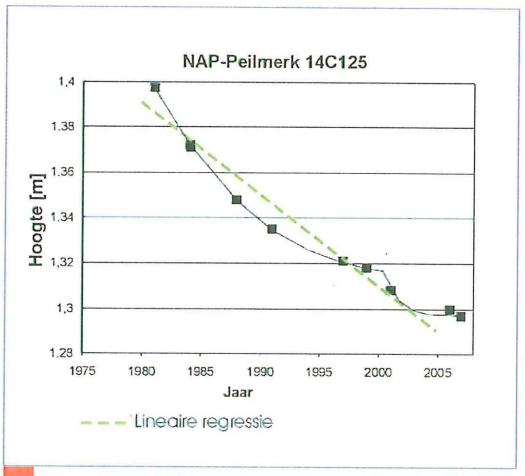
Interpretatie van 2D-seismische reflextiebeelden tot meer dan ca. 3000 m diepte, een geofysische techniek, die standaard gebruikt wordt voor de opsporing van olie, gas en mineralen, levert informatie over de opbouw van de ondergrond. Met name het voorkomen van structurele discontinuïteiten, zoals breuken en breukzones kan met deze techniek goed worden bepaald. Tevens kan uit de geometrie en positie van lagen bodemdaling afgeleid worden indien die in het geologische verleden is opgetreden.
De resolutie van de seismische reflextiebeelden is afhankelijk van de frequentie van het aan de oppervlakte ontvangen terugkerende signaal. Des te hoger deze frequentie, des te hoger is de resolutie. Een seismisch signaal verliest hoge frequenties naarmate de diepte toeneemt, waarmee de resolutie lager wordt met de diepte. De informatie van ondiepe niveaus, waarop in deze studie bodemdaling in het geologische verleden wordt waargenomen, heeft daarom een hoge betrouwbaarheid.

Dit zijn verschillende methodes en datainterpretatietechnieken die op zichzelf al bewijskracht kunnen leveren voor een bepaalde oorzaak van bodemdaling. In combinatie kunnen ze elkaar versterken als bij het in elkaar passen van een puzzel, waarvan de stukjes niet altijd de gaafheid hebben, die men zich zou wensen.

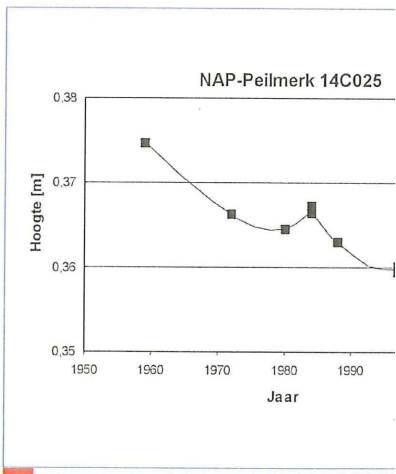
Analyse van tijd-verplaatsing diagrammen

In tegenstelling tot de vergelijking va deformatie modellen en geodetische blijken individuele tijd-verplaatsing d (TVD'en) belangrijke informatie te ge mechanismen die optreden bij de bod ter plaatse van de Hondsbossche Zee Indien de verandering in de hoogte p tegen de tijd wordt uitgezet in een T men additionele informatie over het l de beweging.

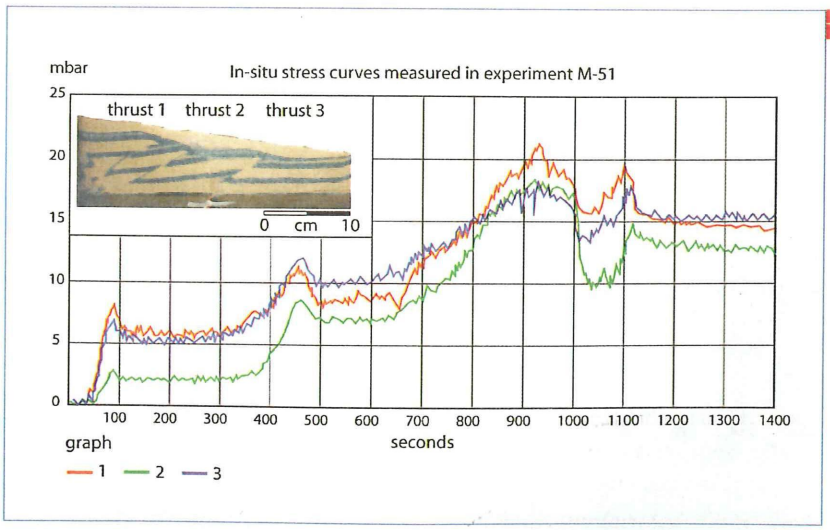
In het algemeen kan met de TVD mid methode van de kleinste kwadraten e een bepaalde periode de gemiddelde verticale bewegingssnelheid worden Met een tweetal nauwkeurigheidtoet nauwkeurigheid van de hoogten ten d de geïnterpoleerde lijn die de snelhei (gebruik makend van de standaardafv de hoogte) en de nauwkeurigheid van



Figuur 4a TGV van maximale bodemdaling vanpeilmerk langs weg aan binnentalud van Hondsbossche Zeewering.



Figuur 4b Periodisch karakter van daling van peilmerk 2,5 km ten oos Hondsbossche Zeewering.



Figuur 4 In-situ s metinge zandkist ment, da tektonis simuleer kleef-sli selen bij ving lang optreden land et a

van de beweging (gebruikmakend van de standaardafwijking van de geschatte dalingssnelheid) zelf geschat worden. Dit alles in het geval van een lineair veronderstelde beweging. Bij de bepaling van de maximum bodemdalingsnelheid ter plaatse van de Hondsbossche Zeewering is deze methode toegepast. Hierbij werd geen rekening gehouden met het niet-lineaire karakter en de periodiciteit die curve te zien geeft met name door de afvlakking tussen 1990 en 2001 en door de vergroting van de steilheid bij de meting van 2001 (*figuur 4a).*

Vaak is de aanname van een lineaire bewegingssnelheid niet gerechtvaardigd. Bij spanningsveranderingen in een geconstrueerde dan wel natuurlijke situatie zal in een omgeving met homogene grond- of gesteentematerialen, tot aan het bereiken van een eventueel bezwijkpunt, over het algemeen een eindige deformatie optreedt die gerelateerd is aan de spanningsverandering, de heersende omringende spanning en de eigenschappen van het materiaal. De spanningverandering kan een aangebrachte belasting zijn in de vorm van een dijklichaam, zoals van de Hondsbossche Zeewering. Ook de onttrekking van aardgas of water uit de bodem veroorzaakt een verhoging van de effectieve spanning die dan hetzelfde effect heeft: door samendrukking onder de grotere spanning treedt verkleining van de poriën in de grond of gesteente op, of anders gezegd neemt de porositeit af en treed zakking op. Het TVD zal over het algemeen niet-lineair zijn, indien een voldoende lange periode beschouwd wordt, waarbij dan elastische en plastische deformatie waargenomen wordt.

Bij gesteentematerialen, waarin bijvoorbeeld breuken of discontinuïteiten aanwezig zijn, zal bij opgelegde tektonische spanningen niet-lineariteit evenzeer het geval zijn, maar hier zullen de breuken invloed hebben op de snelheid van deformatie die optreedt langs de breuken en kan al dan niet een periodiciteit van de effecten optreden, die een serie van achtereenvolgende snelheidstoenamen en afnamen te zien geeft. Dit kleef-slip (Eng.: stick-slip) gedrag is aangetoond in 'zandkist' proeven op zand (Nieuwland et al., 1999; Nieuwland et al., 2000)) *(figuur 4c)* en wordt ook beschreven bij onderzoek naar het optreden van aardbevingen in Californië (Anderson et al., 2003).

In dit onderzoek is onderzocht of er bij de TVD die de maximum dalingsnelheid aangeeft ter plaatse van de Hondsbossche Zeewering *(figuur 4a)* sprake is van een multipele zet
gevolge van achtereenvolgende d
van de Hondsbossche Zeewering,
tektonische en andere geologisch
in de ondergrond werkzaam zijn d
leveren. In het volgende wordt be
dat het hier gaat om natuurlijke p
in het gehele gebied van Bergen t
mogelijk tot in wijdere omgeving

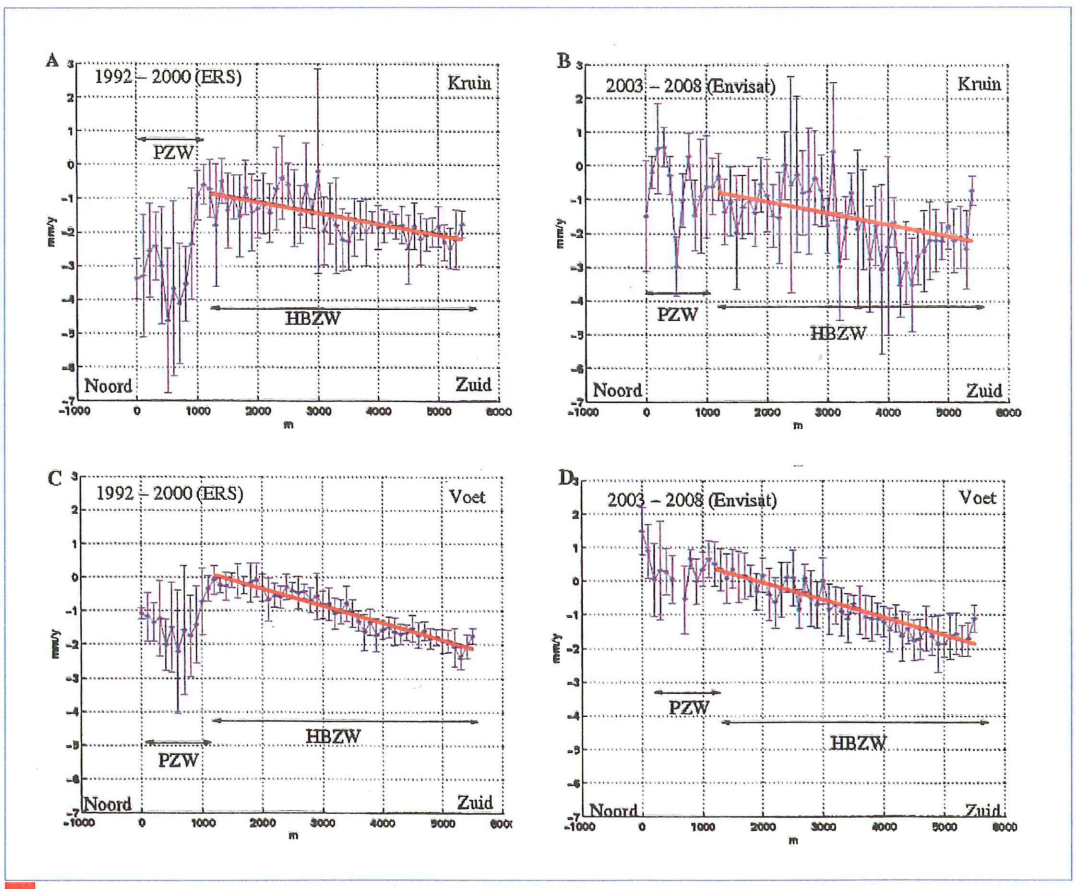
- Er worden op verschillende loca
  gebied, en niet ter plaatse van
  door dijklichamen, peilmerken a
  die vanaf 1950 duidelijk meerde
  van dalingsnelheidstoename en
  zien geven *(figuur 4b).*
- De toename van de steilheid var
  2001 wordt door het gehele geb
  fen.

Bij de andere peilmerken die meer
te zien geven, wordt de toename i
verschillende tijdstippen waargen

- De periodiciteit van de TVD'en i
  het gehele traject van Petten to
  Zee *(figuur 3)*, en met name waa
  belast is door de dijkophoging
- De periodiciteit is ter plaatse va
  gesuperponeerd op de dalingsli
  taat is van de snelheid van bode
  aardgasonttrekking

Geconcludeerd kan worden, dat d
van de beweging niet gerelateerd
ging van de Hondsbossche Zeewe
geen relatie heeft met de gasontt
Groetveld. Het fenomeen heeft e
lijke verbreiding en is in tijd niet g
de menselijke invloeden maar vin
periode van 20 jaar daarvoor plaat
winning rond 1970, start ophogin
bossche Zeewering naar Deltahoo
Omdat de periodiciteit, zowel in h
Petten, als in het poldergebied, al
gebied ten zuiden van Camperdui
de invloed van door de mens vero
standveranderingen uiterst onwaa
Overigens is deze invloed in zandi
zeer gering – ligt in het elastisch b
veel kleiner, dat de waargenomen

Opmerkelijk is, dat de meting die
aardbevingen van 2001 is uitgevo
hele gebied een aanzienlijke neer
plaatsing aangeeft, waarmee nieu
begint *(figuur 3, 4a en 4b)*. Deze ge
gevallen een grotere dalingsnelhe
in alle waargenomen voorgaande



Figuur 5 *Resultaten InSAR onderzoek 1992-2000 en 2003-2008 (Hanssen et al., 2008).*

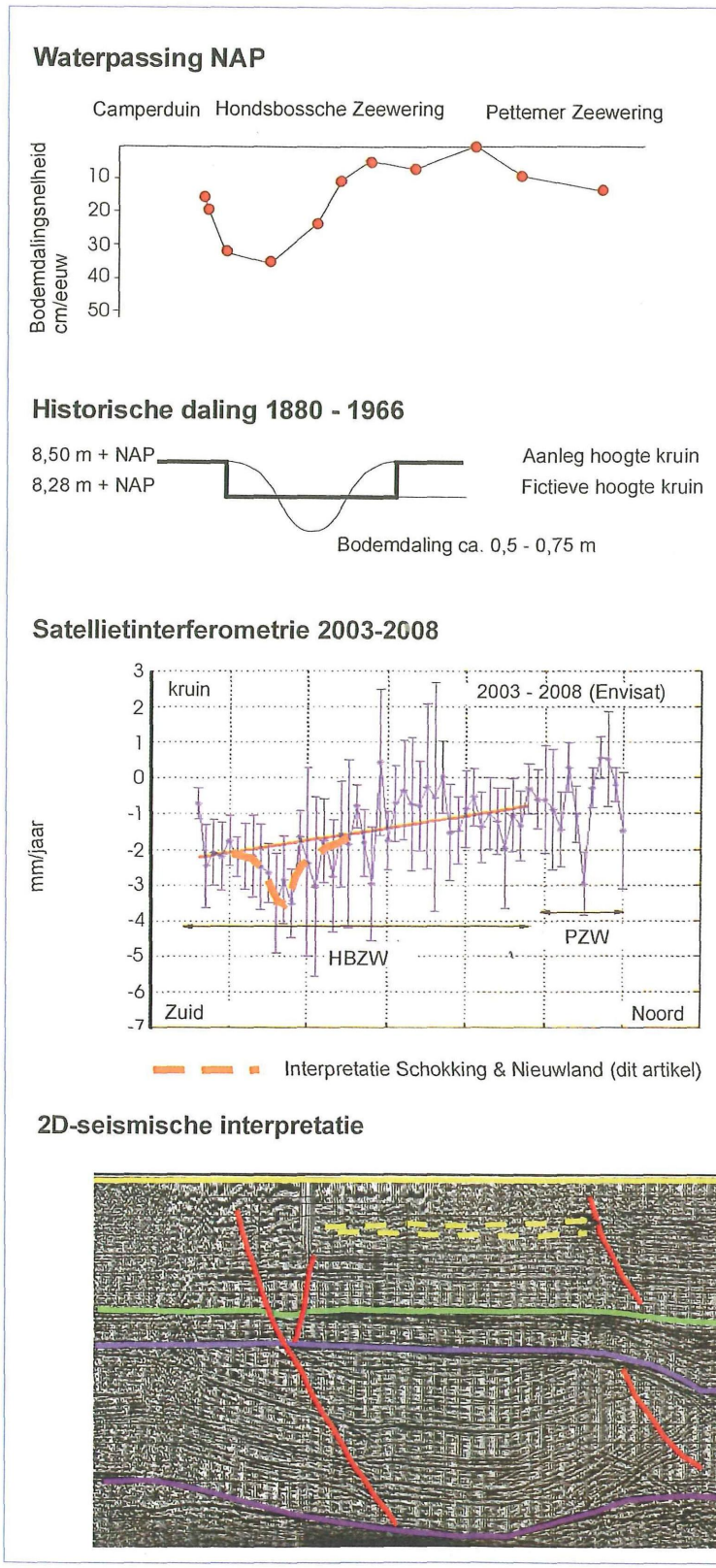
Een relatie van de bewegingen met het voorkomen van de aardbevingen wordt daarmee waarschijnlijk.

Historisch bodemdalinggedrag

Tussen 1870 en 1875 is de kwetsbare oorspronkelijke zanddijk, die er sinds het einde van de 18e eeuw lag, opgehoogd tot 8,50 m + NAP.
In 1966 is een bestek opgesteld voor de ophoging van de Hondsbossche Zeewering naar de Deltahoogte van 11,50 m + NAP (HHNK, 1966). Bestekstekeningen geven voor 43 doorsneden met een onderlinge afstand van 100 m de geometrie van de oorspronkelijke dijk weer met de hoogteligging van de kruin op 8,50 m + NAP. Echter voor de doorsneden 19 t/m 38 wordt op tekening tevens een kruinhoogte van 8,28 m + NAP als geschreven tekst aangegeven *(figuur 6)*.
In persoonlijke communicatie met Ing. B. Zuidweg, die de verhoging van de Hondsbossche Zeewering naar Deltahoogte voor het Hoogheemraadschap Noordhollands Noorderkwartier begeleidde, kwam naar voren, dat hem bekend was dat de dijk vanaf Camperduin tot maximaal ca. 0,75 m in noordelijke richting helde.
Helaas is de waterpassing voorafgaand aan de versterking van de dijk niet in het archief van het hoogheemraadschap teruggevonden.
Er moet echter aangenomen worden dat met het oog op het extra volume grond, dat een aannemer zou moeten plaatsen ten gevolge van het lager liggen van de kruin en de taluds een fictieve kruinhoogte op de bestekstekening is aangegeven over het traject tussen de 1800 en 3900 m *(figuur 6)*. De maximale bodemdaling die gedurende ca. 90 jaar is opgetreden wordt met de beschikbare informatie geschat tussen ca. 50 en 75 cm.
Dit komt neer op een maximale bodemdalingsnelheid van ca. 55 tot 80 cm/eeuw. De locatie van deze maximale daling in de bestekstekening komt overeen met het gebied rond het peilmerk 14C0125 van het NAP, waar de maximale dalingsnelheid geregistreerd is.

Satellietradarinterferometrie

Naar aanleiding van de dicussie over mogelijke bodemdaling langs de kust van Noord-Holland is door de TUDelft een deformatieonderzoek uitgevoerd van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering met behulp van satellietradarinterferometrie (InSAR) (Hanssen et al., 2008).
Met deze techniek kan voor reflectorpunten met millimeterprecisie de deformatie gemeten worden gebruikmakend van radarsignalen vanuit satellieten. De radar kan dag en nacht meten en ook bij bewolkte omstandigheden, waardoor van iedere satellietpassage beelden gebruikt worden. De techniek is erop gebaseerd, dat het fase



Figuur 6 *Analyse va daling ter p Hondsboss Pettemer Z met versch methodiek passing var merken, his dalinggege satellietint metrie (InS (Hanssen e en interpre van 2D-seis opname (le Tabel 1).*

Periode/Tijdvak	Globale diepte	In
Kwartair/Holoceen en Pleistoceen (veen, zand, klei)	0 - 500 m	
Tertiair (zand, klei, kleisteen, tuf)	500 - 900 à 950 m	
Jura, Krijt,Trias (mergel, schalie, kalksteen, zandsteen)	900 à 950 - 2200 à 2550 m	
Perm/Zechstein (steenzout)	2200 m en à 2550 - dieper	

Tabel 1 *Geologische opbouw ter plaatse van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering.*

verschil tussen twee satellietbeelden (voor dit onderzoek een periode van vijf weken tussen de acquisitiemomenten) met elkaar worden vergeleken en het faseverschil wordt berekend. Dit faseverschil bevat informatie over de afstandsveranderingen tussen aarde satelliet (Hanssen, 2001).
Er is een tijdserie van opeenvolgende beelden nodig om de meetpunten c.q. 'scatters' te detecteren en foutenbronnen met voldoende nauwkeurigheid te kunnen schatten.
Er zijn beelden gebruikt van de satellieten van de European Space Agency (ESA) uit de periode 1992-2000 (ERS-1en ERS-2) en 2003-2008 (Envisat). In principe kan gebruik gemaakt worden van naar het noorden bewegende en naar het zuiden bewegende satellieten, waarbij de eersten als het ware naar het oosten kijken en de laatsten naar het westen.
Door gebruik te maken van beide kijkrichtingen kan onderscheid gemaakt worden tussen verticale deformatie en schuine deformatie, waar die ook een horizontale component bevat. Gezien de beperkte omvang van het onderzoek werd slechts gebruik gemaakt van de in de westelijke richting opgenomen beelden. Bij de interpretatie van de metingen leek een punt aan de voet van het zeewaartse talud op de grens van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering niet te bewegen. Dit punt is stabiel verondersteld ten opzichte van een cluster punten bij Heiloo die op hun beurt stabiel verondersteld werden.

De resultaten van de metingen over de voet en de kruin van de Hondsbossche Zeewering en PZW zijn weergeven voor de twee meetperioden *(figuur 5)*. De standaard afwijking bedraagt in principe 0,1 tot 0,2 mm/jaar. De lengte van de foutenstaafjes geven de onbetrouwbaarheidsintervallen van de metingen weer. Omdat daarnaast de hoeveelheid gebruikte metingen en de onderlinge afstand invloed heeft op de nauwkeurigheid, met minder beschikbare metingen op de kruin, zijn de foutenintervallen (foutenstaafes) daar groter. Uit figuur 5 kunnen een aantal conclusies getrokken worden.

- De trendlijn geeft een maximale kantelingsnelheid te zien van 2.3 mm/jaar (23 cm/eeuw) voor de kruin en 2,2 mm/jaar (22 cm/eeuw) voor de voet over periode 2003-2008.
- Dat lagere bodemdalingsnelheid gedurende periode 1992-2000 wordt verklaard aan de hand van de periodiciteit die in de TVD'en waargenomen wordt: na 2001 is er een versnelling van de bodemdaling door het gehele gebied geconstateerd.
- De grotere snelheid die aan de zuidkant van de Hondsbossche Zeewering ten opzichte van de kanteling te zien is in de periode 2003-2008 ter plaatse van de kruin, ca. 3 mm/jaar (30 cm/eeuw), komt qua locatie overeen met de locatie van de maximum dalingsnelheid uit de waterpassing van het NAP, de analyse van de historische daling en tevens in de 2D-seismiek als bodemdaling gedurende het Kwartair waargenomen. Daarmee lijkt de significantie van deze snelheid aangetoond.
- Het verschil in snelheid tussen de kruin en de voet van de dijk is opvallend en is gezien het voorgaande moeilijk te verklaren als werkelijk optredend. Mogelijk, dat het verschil in oriëntatie van de aangemeten oppervlakten (horizontaal en hellend) in dit onderzoek een rol speelt, omdat hier slechts één kijkrichting (naar het westen) gebruikt is en verticale en zijdelingse deformatie daardoor mogelijk moeilijker te onderscheiden zijn.

De zakking van de voet van de Pettemer Zeewering komt overeen met een dalingsnelheid van meer dan 10 cm/eeuw waargenomen in de TVD'en in dit gebied – aan niet op de Pettemer Zeewering gelegen NAP-peilmerken – en tevens met in het geologische verleden opgetreden zakking die blijkt uit het 2D-seismisch profiel (figuur 6). Een verklaring met als uitsluitend de inklinking door ophoging van de dijk als oorzaak, zoals gesuggereerd door de auteurs (Hanssen et al., 2008), is hierdoor uiterst onwaarschijnlijk.

Interpretatie van 2D-seismisch profiel

De geologische eenheden die van boven naar beneden in het 2D-seismisch profiel (figuur 6) qua diepteligging globaal kunnen worden aangegeven, zijn vermeld in Tabel 1 (RGD, 1993):

In het noordelijk gedeelte van het profiel (figuur 6) ter hoogte van Petten zijn op twee niveaus complementaire breuken te zien, die vanaf het begin van de afzetting van het Tertiair als het ware een inzakking vertonen, en die zich tot in het Kwartair voortzet en mogelijk tot aan de oppervlakte.
Dit laatste is niet vast te stellen, omdat de kwaliteit, zoals vaak bij dit soort seismische opnamen, in het gebied nabij de oppervlakte onvolledig is. Een relatie met de diepgelegen Zechstein zoutlagen, waarvan de bovenkant in het profiel te zien is, is waarschijnlijk. Mogelijk wordt de depressie aan de bovenkant van het zout geleidelijk dieper, waarbij mede langs de breuken verplaatsingen optreden.
Aan de zuidkant van het profiel zijn de lagen van het Kwartair sterk verstoord, mogelijk door de aanwezigheid van een actieve breukzone in deze afzettingen en mogelijk ook dieper, steilheid van het breukvlak een local slip zone suggereerd. Mogelijk, dat samenhangt met de beschreven activ noordzijde. De breukzone valt globa met de grootste dalingen en dalings zoals waargenomen met de andere i getoonde methodieken.
Lagen in het Kwartair op een diepte 150 tot 200 m vertonen een scheefz uitwigging in de orde van grootte va tien-tal meters, in de zelfde richting huidige waargenomen deformatie la Hondsbossche Zeewering.

Langs het gehele profiel en met nam van de inzakking aan de noordkant is van de Ieper kleilagen (Tertiair) te zi duiden op breuk- of scheurvorming, optredend in relatie met de andere b deformatie fenomenen en die geleid en kan leiden tot versnelde ontwate kleien, die in (met een te hoge water opzichte van de diepte waarop zij vo worden aangetroffen. Dergelijke fer beschreven voor Tertiaire kleien in h Bekken door Cartright (1994 en 1996 Ieper klei voorkomend voor de Belgi op het op het vaste land (Henriët et

Conclusies en discussie

1. De juistheid van de hypothese, da ten bodemdaling ter plaatse van de bossche Zeewering wordt veroorzaa geologische processen in de diepe o is in het voorgaande aangetoond. M periodische karakter van de TVD'en komst voor wat betreft locatie en ge sen de diverse metingen van de in h opgetreden bodemdaling, waarbij b langs breuken optreedt, vormen de bewijs.

De voorlopige indicatie voor de oor bodemdaling is, dat plastische defo de Zechstein steenzoutlagen (zoutt het belangrijkste aandrijvende mecl vormt. Zouttektoniek hoeft echter zakelijkerwijs op zichzelf te staan, e verband houden met regionale neo- processen. Dit is temeer waarschijn gedurende het Kwartair hoge bode snelheden in dit gebied en in grote het Noordzee Bekken zijn geconsta et al., 1989). Opmerkelijk is, dat in gedurende het Kwartair het dikste aan zanden van ca. 500 m werden a vorming van de gehele Nederlands

Hiervoor is zeker een belangrijk gedeelte aan tektonische daling noodzakelijk.

2. De vergelijking van de hoogten van de dijk uit 1875 en die uit 1966 lijken aan te geven, dat de bodemdaling al gedurende een eeuw met een snelheid van minimaal 50 cm/eeuw optreedt. Hiermee is deel A uit de vraagstelling beantwoord. Voor wat betreft B kan gesteld worden, dat er aangenomen moet worden, dat de waargenomen processen honderden en zelfs duizenden jaren door kunnen werken. Daarbij kunnen er wel steeds temporele en locatie verschillen in de bewegingen optreden. Om hierover verderstrekkende uitspraken te doen zal uitgebreider onderzoek moeten plaatsvinden. Dit mede met het mogelijk optreden van vergelijkbare fenomenen in andere gebieden langs de Nederlandse kust.

In relatie tot deel C van de vraagstelling is er belangrijke informatie beschikbaar in de TVD'en. De periodiciteit van de TVD'en vertoont veel overeenkomst met een cyclische beweging die is waargenomen in zandkist proeven, waarbij de tektonische beweging langs breuken gesimuleerd wordt (Nieuwland et al., 1999; Nieuwland et al., 2000; figuur 4c).
Opvallend is de steilheid van de curve, en daarmee de toename van de dalingsnelheid, gerelateerd lijkt te zijn aan de aardbevingen, die begin 2001 hebben plaatsgevonden (3,5 op de schaal van Richter)(KNMI, 2001)(fig. 4a en b). Dit is de grootste snelheidstoename, die door het gehele gebied op het zelfde tijdstip waargenomen wordt. Andere waargenomen snelheidtoenamen variëren in plaats en tijd. In KNMI, 2001 wordt een verband gelegd tussen de aardbevingen en de aardgasonttrekking in het Bergen- en Bergermeerveld.

Anderzijds moet in dit verband opgemerkt worden, dat voor de sterke bodemdaling in de Mississipi Delta in de Verenigde Staten een sterk vergelijkbaar verklarend model is opgesteld: deformatie langs listrische (gekromde) breukvlakken, die van dicht aan de oppervlakte tot in zoutlagen doorlopen (Dokka et al., 2006), waarbij vergelijkbare verticale maar ook horizontale deformaties optreden. Met name de plastische deformatie in het zout, zou verantwoordelijk zijn voor een laag seismisch regime, dat daar waargenomen wordt.
Er zal in Noord-Holland in dat verband onderzocht moeten worden of dit ook het geval is en of er geen risico bestaat voor differentiële bodemdaling uit deel C van de vraagstelling.
In dit verband is van belang, dat boven het epicentrum op de actieve breuk in het Bergermeerveld de gemeten sprong in hoogte aan maaiveld ca. 20 mm blijkt te zijn. Ter plaatse van de Hondsbossche Zeewering ca. 10 mm en in de omgeving van Petten ca. 15 mm. Een voorzichtige conclusie is, dat bij een optredende aardbeving bij de gasonttrekking er in het hele systeem van breuken in de omgeving van de Hondsbossche en Pettemer Zeeweringen plotselinge verplaatsingen optreden.

Deel D van de vraagstelling kan pas beantwoord worden als er meer inzicht is in de verschillende aspecten van de processen die optreden in Noord-Holland. Uitgebreider onderzoek naar historische bodemdaling, 3D-seismische interpretatie en eventueel het uitvoeren van ondiepe hoge resolutie reflectie seismische opnamen, en geomorfologisch veldonderzoek kunnen hiervoor belangrijke onderdelen vormen.
Indien de fenomenen in Noord-Holland voldoende bekend en verklaard zijn kunnen met deze kennis in andere gebieden langs de Nederlandse kust, met vergelijkbare geologische omstandigheden en geschiedenis, dezelfde risico's van hoge bodemdalingsnelheden onderzocht worden.

Noten

[1] Er is voor gekozen om de bodemdalingsnelheid in cm/eeuw uit te drukken, om een vergelijking met het lange termijn bodemdaling door natuurlijke oorzaken en zeespiegelstijging te kunnen maken. Omdat het begin van meeste meetreeksen in dit gebied niet voor 1970 ligt geeft het uitdrukken in mm/jaar eigenlijk beter aan, dat geëxtrapoleerd wordt over een periode van ca. 40 jaar.

Referenties

– AGI en ICT-RWS, 2003, *Een nieuwe NAP-publicatie, Feiten en achtergronden*.
– Anderson, G., D.C. Agnew, H.O. Johnson, 2003, *Salton Trough Regional Deformation Estimated from Combined Trilateration and Survey-Mode GPS data*; Bull. Seismological Society of America, Vol. 93, No. 6, pp. 2402 - 2414.
– Arcadis, Nieuwe Gracht & Alkyon, 2002, *Kustvisie 2050.*
– Cartwright, J.A., 1994, *Episodic basin-wide fluid expulsion from geo-pressured shale sequences in the North Sea basin*. Geology 22, 447-450.
– Cartwright, J.A. & L. Lonergan, 1996, *Volumetric contraction during the compaction of mudrocks: a mechanism for the development of regional-scale polygonal fault systems*. Basin Research 8, 183-193.
– Dokka, R.K., G.F. Sella, T.H. Dixon, 2006, *Tectonic control of subsidence and southward displacement of southeast Louisiana with respect to stable North America*. Geophysical Letters, Vol. 33, L23308, doi:10.102 2006GL027250, 2006.
– Hanssen, R.F., 2001, *Radar-interfer Data Interpretation and Error Analysis*, Acadamic Publishers.
– Hanssen, R.F., F. van Leijen, A. Hun *Deformatie van de Hondsbossche en P Zeewering geconstateerd met radar-interferometrie*; In: Bodemdaling lang Nederlandse Kust, Workshop juli 200 Hondsbossche en Pettemer Zeewerin F.B.J. Barends, E. Dillingh, R.F. Hanss van Onselen; IOS press/Delft Univers
– Henriët, J.P., M. De Batist, M. Vers 1991, *Early fracturing of Palaeogene c southernmost North Sea: relevance to of primary hydrocarbon migration*; *Gen accumulation, and production of Europ carbons*, Ed. A.M. Spencer, Spec. Pub E.A.P.G., No. 1, pp. 217 - 227.
– KNMI, 2001, *Seismische analyse van aardbevingen bij Alkmaar op 9 en 10 se en Bergen aan Zee op 10 oktober 2001* Technical Report TR-239.
– Kooi, H, S.A.P.L. Cloetingh, G. Rem *Intraplate stresses and the tectono-stra evolution of the North Sea Central Grab* Geologie & Mijnbouw, Vol. 68, pp. 49
– Ministerie van Verkeer & Waterstaa 3e Kustnota 'Traditie, trends en toek
– Nieuwland, D.A., J.L. Urai, M. Knoo *In-situ stress measurements in model ex tectonic faulting*; In: Aspects of Tector Eds. F.K. Lehner & J.L. Urai; Springer pp. 151 - 162.
– Nieuwland, D.A., J.H. Leutscher and 2000, *Wedge equilibrium in fold-and-th belts. Prediction of out-of-sequence th based on sandbox experiments and natu ples*; Geologie en Mijnbouw, V79/1, p
– Provincie Noord-Holland, 2005, *Ver Kustverdediging Strategieën; Zwakke S Noord-Holland, Startnotitie voor integra beoordeling.*
– RGD, 1993, *Geologische Atlas van de Ondergrond van Nederland*, Toelichting Kaartblad IV: Texel - Purmerend; RGD
– RWS-RIKZ & RWS-AGI, Deltares & T 2008, *Bodemdaling langs de Nederland* Workshop juli 2005, 'Case Hondsboss Pettemer Zeewering'; Eds. F.B.J. Bare D. Dillingh, R.F. Hanssen, K.I. van Ons press/Delft University Press
– Schokking, F., 2004, *Bodemdaling er broeikaseffect, Risico's op versnelde dal de Nederlandse kust*; Land en Water, N november 2004. ■