

Opdrachtgever:

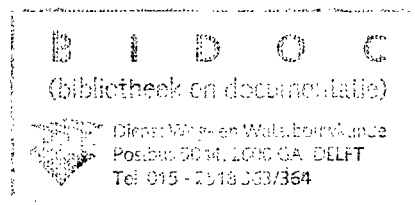
Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde

26.09.2005

Digitaal beschikbaar	
BIDOC	DWW

1.0.v. DWW 2002

Invloed van aardbevingen op overstromingsrisico's

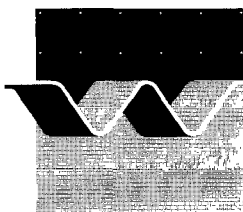


12.11.2002

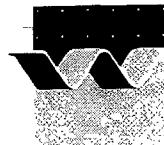
H.J.Verheij, F.Diermanse, T.van Eck, G.de Lange, J.Lindenberg,
H.J.Simmellink en H.J.T.Weerts

Verslag

december 2002



wl | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde

TITEL: Invloed van aardbevingen op overstromingsrisico's

SAMENVATTING:

In Nederland komen regelmatig natuurlijke en gasgeïnduceerde aardbevingen voor in gebieden waar waterkeringen liggen. Deze aardbevingen kunnen een invloed hebben op het waterkerend vermogen van dijken en kaden. Tot op heden wordt ervan uitgegaan dat aardbevingen geen significante bedreiging vormen voor de veiligheid tegen overstromen. De vraag is of dit overeen komt met de huidige kennis en inzichten en of het terecht is dat in de huidige praktijk geen aandacht wordt besteed aan de potentiële bedreiging door aardbevingen in relatie tot de veiligheid tegen overstromen. Met name de combinatie van aardbevingen en een nagenoeg geheel verzadigd dijklichaam kan tot falen of bezwijken van de dijk leiden, bijvoorbeeld in de vorm van een reductie van het kruinniveau. Om duidelijkheid te krijgen over de invloed van aardbevingen op het overstromingsrisico is een oriënterende studie uitgevoerd naar de invloed van aardbevingen op waterkeringen in de regio's Roermond, Bergen/Alkmaar en Groningen+Roswinkel.

De uitgevoerde oriënterende studie heeft geresulteerd in de conclusie dat als uitsluitend wordt gekeken naar frequenties van het gecombineerde voorkomen van aardbevingen en hoge waterstanden of de gevolgen van een aardbeving (maximale verplaatsingen van 10 - 40 mm), er een verwaarloosbaar kleine kans is op een verminderde veiligheid tegen overstromen. Toch is dit nu geen aanleiding te concluderen dat bij de veiligheidsbeoordeling geen rekening moet worden gehouden met aardbevingen en gasbevingen. Belangrijkste redenen zijn: op specifieke locaties kunnen problemen ontstaan (zie de ontstane scheur bij Asselt door de beving in 1992) en de onzekerheid over de exactheid van de resultaten, wat samenhangt met de gedane aannames bij de analyse en de onzekerheden over de optredende versnellingen bij de "ontwerp" aardbevingen.

Aanbevolen wordt daarom een vervolgstudie uit te voeren en daarbij voor één of meer concrete locaties te kwantificeren wat de effecten van een beving zijn en wat de kans op verminderde veiligheid tegen overstroming is.

REFERENTIES: overeenkomst DWW2198 (brief 9 juli 2002 met kenmerk AK023812)

VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1	H.J. Verheij	10-10-02	concept	C.Stolker	F.C.M. van der Knaap
2	H.J. Verheij et al	28-11-02	2e concept	C.Stolker	F.C.M. van der Knaap
3	H.J. Verheij et al	04-12-02	definitief	F.C.M. van der Knaap	P.C.G. Glas

PROJECTNUMMER Q 3177

TREFWOORDEN: aardbevingen, overstromingen, hoogwaters, waterkeringen

AANTAL BLADZIJDEN 53

VERTROUWELIJK ☒ JA, tot (datum) 31-12-2003 ☐ NEE

STATUS: ☐ VOORLOPIG ☐ CONCEPT ☒ DEFINITIEF

Inhoud

Lijst van Symbolen

1	Inleiding	1–1
1.1	Aanleiding en doelstelling	1–1
1.2	Aanpak	1–1
2	Uitgangspunten, kansen en frequenties	2–1
2.1	Inleiding	2–1
2.2	Kansen en frequenties	2–2
2.3	Waterstanden	2–5
2.4	Dijkprofielen en geologische ondergrond	2–11
3	Seismische risico's in Nederland	3–1
3.1	Inleiding	3–1
3.2	Geologie, tektoniek en seismiciteit	3–2
3.3	Huidige status van het seismisch risico onderzoek in Nederland	3–5
4	Effecten van de ondiepe ondergrond	4–1
4.1	Inleiding	4–1
4.2	Demping en opslinging	4–1
4.3	Verweking	4–5
4.4	Voorkomen van grondslagen	4–7
4.5	Conclusies	4–8
5	Stabiliteit waterkeringen tijdens aardbevingen	5–1
5.1	Inleiding	5–1
5.2	Referentiekader	5–1

5.3	Analyse van de taludstabiliteit bij ontwerp aardbeving(en)	5-4
6	Discussie	6-1
6.1	Inleiding	6-1
6.2	Vigerende wetgeving en richtlijnen	6-1
6.3	Veiligheid tegen overstromen	6-3
7	Conclusies en aanbevelingen.....	7-1
7.1	Conclusies.....	7-1
7.2	Aanbevelingen	7-3

Lijst van Symbolen

Symbol	Eenheid	Betekenis
A_a	m/s^2	spectraal versnelling bij korte perioden
A_v	m/s^2	spectraal versnelling een periode van 1 seconde
a_{max}	m/s^2	horizontale piekversnelling
D_{max}	m	horizontale maximale verplaatsing
F_a	-	amplificatiefactor (opslingering versnelling)
f	-	overschrijdingsfrequentie
g	m/s^2	zwaartekracht versnelling
h	m	waterstand ten opzichte van NAP
I_o	-	maximale intensiteit
MHW	-	Maatgevend Hoog Water
M_L	-	magnitude aardbeving
N	-	cumulatief jaarlijks aantal aardbevingen
P	-	overschrijdingskans
PGA	-	Peak Ground Acceleration
PSHA	-	Probabilistic Seismic Hazard Analysis
Q	m^3/s	afvoer
SF	-	stabiliteitsfactor voor grondtalud
T	jaar	herhalingstijd
V_{max}	m/s	horizontale maximale snelheid
ϕ	grad	hoek van inwendige wrijving van de grond

I Inleiding

I.1 Aanleiding en doelstelling

In Nederland komen regelmatig aardbevingen voor in gebieden waar waterkeringen liggen. Deze aardbevingen kunnen een invloed hebben op het waterkerend vermogen van dijken en kaden. Tot op heden wordt ervan uitgegaan dat aardbevingen geen significante bedreiging vormen voor de veiligheid tegen overstromen. De vraag is of dit overeen komt met de huidige kennis en inzichten en of het terecht is dat in de huidige praktijk geen aandacht wordt besteed aan de potentiële bedreiging door aardbevingen in relatie tot de veiligheid tegen overstromen. Met name aan de combinatie van aardbevingen en een nagenoeg geheel verzadigd dijklichaam dient in dit verband aandacht te worden besteed in relatie tot reductie van het kruinniveau als gevolg van falen of bezwijken van de dijk.

Om duidelijkheid te krijgen over de invloed van aardbevingen op het overstromingsrisico heeft de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van RWS schriftelijk d.d. 9 juli 2002 (overeenkomst DWW2198; brief met kenmerk AK023812) opdracht gegeven aan WL | Delft Hydraulics om samen met GeoDelft, NITG-TNO en KNMI een oriënterende studie uit te voeren naar de invloed van aardbevingen op waterkeringen in de regio's Roermond, Bergen/Alkmaar en Groningen + Roswinkel. Voor deze regio's is gekozen omdat de meeste aardbevingen daar plaatsvinden.

Het onderzoek heeft dus betrekking op de mogelijke invloed van aardbevingen op de veiligheid tegen overstromen, doordat mogelijk het waterkerend vermogen van dijken en kaden wordt aangetast. De doelstelling is tweeledig:

1. Bepalen van de invloed van aardbevingen op de faalkans van dijken en kaden en de veiligheid tegen overstromen in de regio's Bergen/Alkmaar, Groningen + Roswinkel, en Roermond (Centrale Slenk breuksysteem);
2. Nagaan of het terecht is dat de invloed van aardbevingen op de veiligheid tegen overstromen wordt verwaarloosd.

I.2 Aanpak

De onderhavige studie is gefaseerd aangepakt, waarbij de volgende fasen zijn onderscheiden:

1. Bepalen van de kans van voorkomen van aardbevingen naar kracht en tijdsduur voor de regio's Bergen/Alkmaar, Groningen + Roswinkel, en Roermond. Dit betekent dat de kracht van een aardschok is gepresenteerd als grondversnelling voor verschillende frequenties van voorkomen;

2. Oriënterend onderzoek naar het effect van aardbevingen op de waterkeringen in deze regio's; van belang hierbij is kennis van het voorkomen van seismisch actieve breuken en kennis van de ondiepe ondergrond voor het bepalen van de eventuele lokale opslingeringseffecten en het mogelijk ontstaan van verweking. Aangegeven is of de kerende hoogte van de dijk reduceert of zou kunnen reduceren (kans) of dat de sterkte anderszins negatief wordt beïnvloedt;
3. Verzamelen van overschrijdingskansen van waterpeilen in de regio's Bergen/Alkmaar, Groningen + Roswinkel, en Roermond. Op basis daarvan zijn kansen van voorkomen bepaald van een aardbeving in combinatie met de kans op hoogwater voor de regio's Bergen/Alkmaar, Groningen + Roswinkel, en Roermond. Vervolgens is gegeven de voorwaardelijke kans op falen de kans bepaald dat aardbevingen leiden tot een verminderde veiligheid tegen overstromen voor de regio's Bergen/Alkmaar, Groningen + Roswinkel, en Roermond;
4. Evalueren van de huidige veiligheidsfilosofie (Wet op de Waterkering, Leidraad Toetsing). Aangegeven wordt of falen van een kering mogelijk is (falen gedefinieerd als verlaging van het kruinniveau en/of afschuiven) in het licht van de veiligheidsfilosofie en vigerende regelgeving en de wijze van omgaan met onzekerheden. Op basis daarvan zal worden vastgesteld of er mogelijk sprake is van een serieus probleem in de regio's Bergen/Alkmaar, Groningen + Roswinkel, en Roermond dat nader onderzoek vergt.

De studie is uitgevoerd op basis van beschikbare geologische en geofysische kennis en literatuuronderzoek, dat wil zeggen: het bestuderen en interpreteren van bestaande informatiebronnen voor de 3 regio's in Nederland waarvan bekend is dat daar met enige regelmaat aardbevingen optreden. Deze globale benadering betekent dat uitsluitend voor de 3 genoemde regio's conclusies zijn te trekken en niet voor andere regio's in Nederland. Mogelijke risico's voor andere regio's door uitstraling van bevingen zullen worden aangeduid, maar niet worden gekwantificeerd.

De studie is in gezamenlijkheid uitgevoerd door ir. H.J. Verheij, dr.ir F. Diermanse (beiden WL | Delft Hydraulics), ir. J. Lindenberg (GeoDelft), drs. G. de Lange (NITG-TNO) en dr. T. van Eck (KNMI). Bijdragen zijn verder geleverd door ir. H.J. Simmelink en dr. H.J.T. Weerts (beiden NITG-TNO). WL | Delft Hydraulics fungeerde als penvoerend instituut, waarbij de projectleiding in handen lag van ir H.J. Verheij. Van de zijde van de opdrachtgever fungeerde ir. P.J.L. Blommaart als contactpersoon.

2 Uitgangspunten, kansen en frequenties

2.1 Inleiding

In Nederland komen aardbevingen voor die een natuurlijke oorsprong hebben, maar ook bevingen als gevolg van menselijke activiteiten, zoals aardgaswinning. Om te kunnen nagaan of natuurlijke aardbevingen dan wel gasgeïnduceerde bevingen van invloed zijn op de veiligheid tegen overstromingen, worden in dit hoofdstuk een aantal uitgangspunten en randvoorwaarden gedefinieerd.

De begrippen kans en frequentie worden in allerlei toepassingsgebieden regelmatig door elkaar gehaald, hetgeen verwarrend kan werken. Voor zeer extreme gebeurtenissen is het kwantitatieve verschil tussen beiden verwaarloosbaar. Echter voor meer frequente is er wel degelijk verschil. Dit verschil kan worden gekwantificeerd maar kan ook gevoelsmatig duidelijk gemaakt worden.

Allereerst de definities. De jaarlijkse *overschrijdingsfrequentie*, f , van een bepaald drempelniveau is het gemiddeld aantal keren dat dit niveau per jaar overschreden wordt. De jaarlijkse *overschrijdingskans*, P , van een bepaald drempelniveau is de kans dat dit niveau in een jaar tenminste 1 keer overschreden wordt. De frequentie kan groter dan 1 zijn terwijl dat voor de kans uiteraard niet mogelijk is.

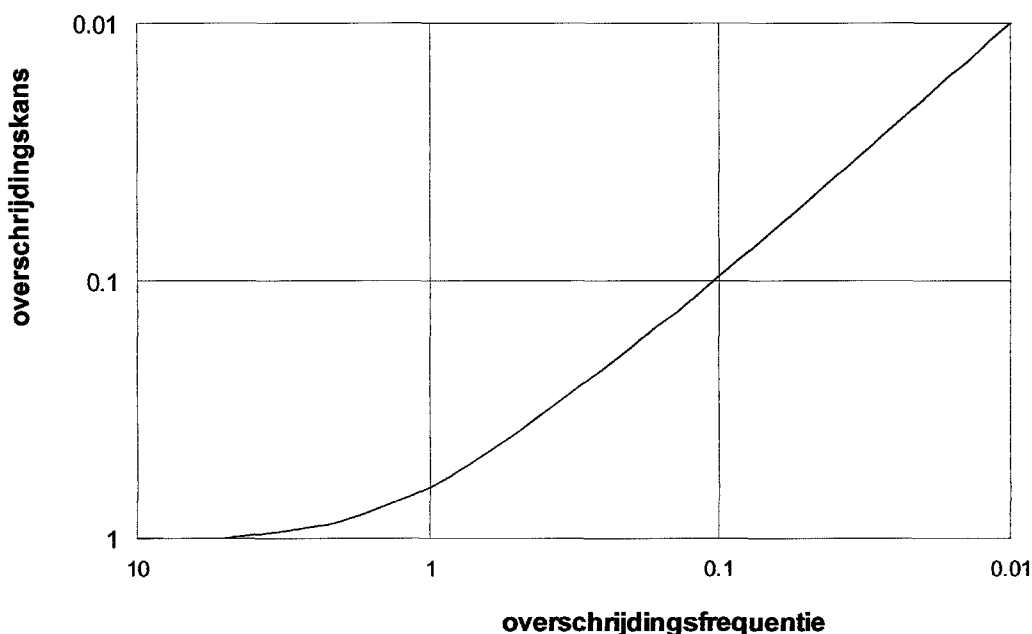
Een drempelniveau dat gemiddeld eens per jaar overschreden wordt (d.w.z. $f=1$) zal in de praktijk gedurende een aantal kalenderjaren meerdere keren overschreden worden en gedurende een ander aantal kalenderjaren in het geheel niet overschreden worden.

Het feit dat dit drempelniveau gedurende een aantal jaren niet wordt overschreden geeft aan dat de jaarlijkse overschrijdingskans, P , kleiner is dan 1, d.w.z. $P < f$. Aan de andere kant heeft een gebeurtenis die gemiddeld eens per 10.000 jaar overschreden wordt (d.w.z. $f=1/10.000$) een jaarlijkse overschrijdingskans P die zo goed als gelijk is aan $1/10.000$, d.w.z. $P=f$. De kans op twee van deze gebeurtenissen in één jaar is namelijk verwaarloosbaar klein.

Aangenomen dat het overschrijden van een drempelniveau beschreven kan worden door een Poissonproces, kan de relatie tussen (jaarlijkse) overschrijdingskans, P , en (jaarlijkse) overschrijdingsfrequentie, f , als volgt geformuleerd worden:

$$P = 1 - e^{-f}$$

Deze relatie is in Figuur 2.1 weergegeven.



Figuur 2.1 Relatie tussen (jaarlijkse) overschrijdingskans en (jaarlijkse) overschrijdingsfrequentie

2.2 Kansen en frequenties

Om de invloed van aardbevingen op de veiligheid tegen overstromen te kunnen vaststellen dienen een aantal stappen te worden doorlopen. In hoofdlijnen zijn dit:

1. Keuze van het referentiekader waaraan de veiligheid tegen overstromen bij optreden van een aardstok dient te worden getoetst;
2. Bepaling van de “ontwerp” aardbeving of aardbevingen, eventueel in combinatie met de overige voor overstromen belangrijke condities. Beschrijving van de als referentie gekozen waterkeringen;
3. Analyse van het effect van de “ontwerp” aardbeving(en). In feite vaststelling van de schade aan de dijk/kade waartoe deze aardbevingen mogelijkwerijs kunnen leiden. Van direct belang is hierbij de mate waarin het waterkerend vermogen kan worden aangetast. Als maatgevend mechanisme wordt de stabiliteit van de taludhelling van de dijk/kade beschouwd;
4. Beantwoording van de vraag of aardbevingen een significante invloed hebben op de kans op overstroming. Hiermee wordt in feite bedoeld of aardbevingen een zodanige additionele kans op overstromen toevoegen dat het verschijnsel in de toekomstige beschouwingen niet langer kan worden genegeerd. In dit verband worden tevens enkele opmerkingen gemaakt met betrekking tot de vigerende aanpak (o.a. in Leidraad Toetsen op Veiligheid).

In de volgende hoofdstukken wordt aandacht besteed aan deze vier hoofdstappen in het beoordelingsproces. Vanwege het oriënterende karakter van het onderzoek worden, daar waar van toepassing, conservatieve aannamen gedaan waarmee een conservatief eindoordeel resulteert. Deze conservatieve keuzes zullen worden benoemd. Aangegeven wordt waar bij een eventuele later detailonderzoek verfijning/aanscherping mogelijk is.

In deze oriënterende fase worden vooralsnog alleen de drie locaties/regio's Roermond, Bergen/Alkmaar en Groningen+Roswinkel beschouwd. Voor de locatie Roermond worden "natuurlijke" bevingen als belasting beschouwd voor de recent aangelegde hoogwaterkaden langs de Maas. Voor Bergen/Alkmaar en Groningen+Roswinkel fungeren de door gaswinning in die regio's geïnduceerde bevingen als ingang. Hierbij wordt voor de regio Bergen/Alkmaar verondersteld dat dezelfde seismische frequentieverdeling van toepassing is als voor de regio Groningen (vanwege het feit dat in de regio Alkmaar/Bergen slechts 4 gasbevingen beschikbaar zijn). De invloed op het functioneren van de waterkeringen in deze regio's wordt globaal beoordeeld. In relatie tot de natuurlijke bevingen worden aan het slot enkele opmerkingen gemaakt met betrekking tot het mogelijke belang voor de veiligheid van de rivierdijken in de provincies Noord- Brabant, Gelderland, Utrecht en Zuid-Holland.

In deze paragraaf wordt in algemene zin ingegaan op kansen en frequenties zoals die staan aangegeven in de wetgeving en ontwerprichtlijnen. Voor wat de primaire dijken betreft staat in de Leidraad Bovenrivieren (blz. 18; TAW, 1985) als afgeleide uit de Wet op de Waterkeringen (1996) welke veiligheid tegen overstromen vereist is:

- a. de dijkhoogte moet gelijk zijn aan het MHW vermeerderd met een waakhoogte. Als basis voor het (locale) MHW dient de wettelijk vastgelegde overschrijdingsfrequentie, bijvoorbeeld rivierdijken: 1/1250 per jaar en zeedijken 1/10000 per jaar tot 1/4000 per jaar.
- b. de hoogte en constructie van de dijk moet zodanig zijn dat de kans op dijkdoorbraak (in de gehele dijkkring) door golfoverslag bezien over alle hoogwaters beneden MHW niet meer bedraagt dan 10% van de kans dat MHW wordt overschreden.
- c. bij waterstanden gelijk of lager dan MHW dient de kans op doorbraak (over de gehele dijkkring bezien) door andere oorzaken, zoals afschuiving of interne erosie (maar in het algemeen ook extreme regenval of aardbeving), verwaarloosbaar klein te zijn.

Voor "verwaarloosbaar klein" wordt voor alle "andere oorzaken" tezamen in het algemeen eveneens uitgegaan van (kleiner dan) 10% van de kans dat MHW wordt overschreden. Stel we hebben in totaal 10 andere oorzaken dan kunnen we dus 1% reserveren als acceptabele kans op doorbraak als gevolg van aardbeving. Voor rivierdijken is dit dan 1% van 1/1250, dus 1/125.000.

Opmerking:

De frequentie 1/1250 is alleen van toepassing op het bedijkte deel van de rivieren en niet voor de regio Roermond. Daar is de norm gerelateerd aan de recent aangelegde kades.

Het gaat dus feitelijk om doorbraak (= overstroming) en daarmee om de combinatie of opeenvolging van de gebeurtenissen:

- taludafschuiving of anderszins schade aan de dijk tijdens of direct na de aardbeving al dan niet met kruinverlaging gepaard gaande;
- het optreden van hoogwater tegelijkertijd met de aardbeving of hoogwater na de aardbeving gedurende de periode die nodig is om de eventuele schade aan de dijk te herstellen. Afhankelijk van het tijdstip in het jaar zal de herstelperiode 1 week tot 6 maanden kunnen duren.

Onder “andere oorzaken” bij c. wordt (bijv. In Leidraad Benedenrivieren blz. 92, 93; TAW, 1989) nog onderscheid gemaakt in oorzaken direct aan extreem hoogwater gerelateerd en oorzaken die niet aan hoogwater zijn gecorreleerd. Aardbeving hoort in de laatste categorie. Ondanks dat de leidraden voor 99% gericht zijn op hoogwater als directe aanleiding voor schade/doorbraak (en dus niet “hoe om te gaan met aardbeving”) kunnen de beschreven procedures (incl. Inbreng van vereiste mate van “veiligheid”) ook als handvat dienen voor de aanpak bij niet gecorreleerde oorzaken.

Het betekent dat we voor de rivierdijken in Nederland niet de belastingscombinatie aardbeving 1/500 per jaar (duur enkele seconden) met hoogwater 1/1250 per jaar (duur orde één week) behoeven te beschouwen (kans van voorkomen van $1/1250 \times 1/500 \times 1/52 = 1/32.500.000$).

Aangenomen dat een extreem hoogwater (met herhalingstijd > 1250 jaar) een week aanhoudt. In een periode van 1250 jaar zijn er $1250 \times 52 = 65.000$ weken, waarvan er dus slechts 1 week is waarin een hoogwater boven de 1/1250 norm plaats vindt.

Vervolgens moet de kans berekend worden dat tijdens die week ook een aardbeving plaats vindt. In een periode van 500 jaar zijn $500 \times 52 = 26.000$ weken, waarvan dus slechts 1 week is waarin een aardbeving plaatsvindt. De kans dat, *gegeven* het feit dat op een bepaald moment een hoogwater $> 1/1.250$ norm optreedt, tevens een aardbeving plaats vindt is derhalve 1/26.000. Aangezien een dergelijk hoogwater maar eens in de 1250 jaar voorkomt is de frequentie van optreden van beide gebeurtenissen tegelijkertijd derhalve inderdaad $1/1.250 \times 1/26.000 = 1/32.500.000$.

Een aardbeving dient als niet aan hoogwater gecorreleerde belasting te worden beschouwd. Beperkte schade/kruindaling leidt kennelijk niet direct tot doorbraak en overstroming. Hierbij moeten nog wel twee aspecten worden beschouwd, namelijk:

- welke buitenwaterstand voeren we in als “toevallig samenvallend” (want buiten staat er altijd water);
- indien de aardbeving wel schade veroorzaakt, welke periode is nodig voor herstel en welke waterstand kan daarin optreden.

Theoretisch vereist dit een integratie van alle mogelijke kansen op dijkdoorbraak door “toevallige” combinaties van buitenwaterstand en aardbevingen.

Praktischer en aansluitend bij de gedachtegang van de leidraden is het om twee hoogwater-aardbeving combinaties te beschouwen met een gecombineerde kans van voorkomen van 1/1250 per jaar voor rivierdijken:

1. aardbeving 1/500 per jaar gecombineerd met een hoogwater 1/ 2,5 per jaar.
2. aardbeving 1/1250 per jaar gecombineerd met een gemiddeld jaarlijks hoogwater.

Opgemerkt wordt dat vanwege de korte duur van zowel de aardbeving als het hoogwater de gecombineerde kans in werkelijkheid nog aanzienlijk kleiner is dan 1/1250 (bijvoorbeeld: indien de duur van het hoogwater 2 weken bedraagt dan is de gecombineerde kans $1/26 \times 1/1250 = 1/32.500$). Indien uit nadere analyse blijkt dat één of beide combinaties tot schade leidt of kan leiden dan dient vervolgens vastgesteld te worden dat de kans op doorbraak kleiner is dan 1/125.000. In deze beschouwing dient de kans op doorbraak als gevolg van hoogwater gedurende de periode dat de waterkering nog niet is hersteld, te worden betrokken.

Hoewel een afzonderlijke categorie (de leidraden boven- en benedenrivieren zijn immers hier niet voor bedoeld) dient ook het eventuele falen van de boezemkaden te worden beschouwd. Omdat de boezem waterstand (vrijwel) constant is, zal “hoogwater” meestal een mede-oorzaak zijn indien tijdens een aardbeving instabiliteit/schade optreedt. Voor boezemkaden wordt van een belastingfrequentie tussen 1/10 tot 1/1000 per jaar (afhankelijk van risico en schadeklasse) uitgegaan. Bij 1/10 per jaar zal beoordeling van een vrij “normale” gasbeving in combinatie met de boezemwaterstand volstaan. Bij 1/1000 per jaar is aardbeving in combinatie met hoogwater zeker een belangrijk aandachtspunt ook omdat boezemkaden minder robuust zijn dan primaire dijken en meer “op het randje” zijn ontworpen (hoewel niet direct bij de 1/1000 kaden).

2.3 Waterstanden

Voor de regio's Bergen/Alkmaar, Groningen + Roswinkel en omgeving Roermond zijn overschrijdingskansen voor de waterstanden verzameld. Het gaat om globale waarden die gelden voor een regio en niet om kansen voor een specifieke locatie.

Bergen/Alkmaar

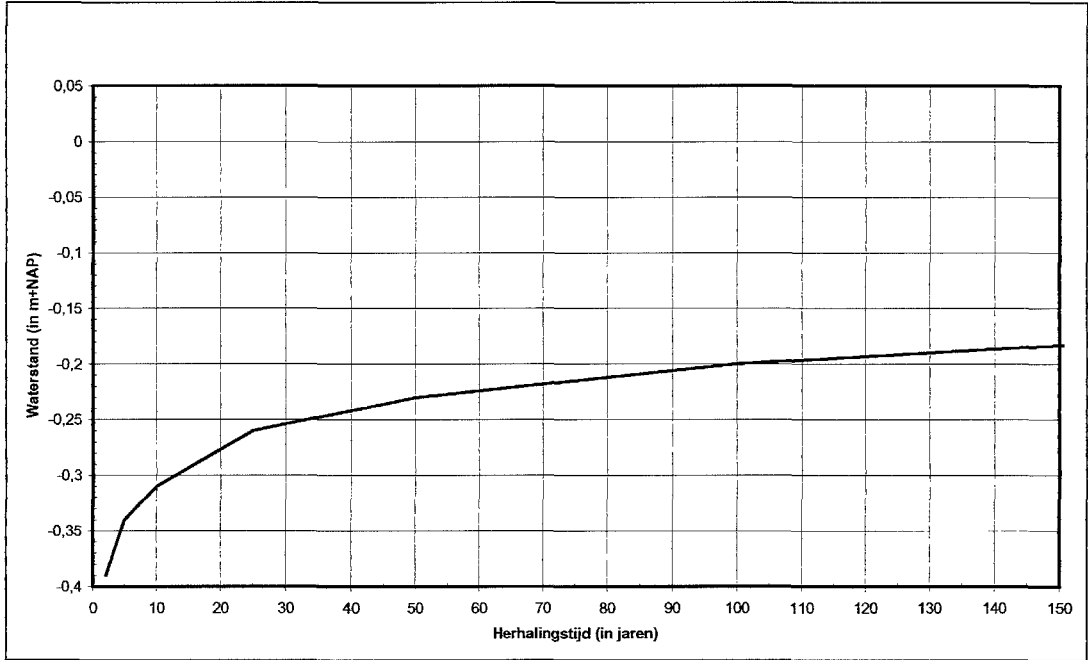
Het gebied Bergen/Alkmaar ligt in de Schermerboezem. Recent is een faalkansanalyse uitgevoerd (WL, 2002) en zijn faalkansen bepaald in relatie tot een waterstandniveau in de boezem; zie onderstaande tabel 2.1 en figuur 2.2.

Tabel 2.1 Herhalingstijden en bijbehorende waterniveaus

herhalingstijd (jaar)	waterstand (m tov NAP)
2	-0.39
5	-0.34
10	-0.31
25	-0.26
50	-0.23
100	-0.20
250	-0.15
500	-0.12
1000	-0.09
1250	-0.08
2500	-0.05
5000	-0.01
10000	0.02

Het streefpeil in de Schermerboezem is NAP -0,50 m. Verder wordt als norm voor de herhalingstijd 100 jaar aangehouden.

Uit een andere studie (WL, 2001) is gebleken dat de faalkans nu 1/500 is, maar dat deze als geen maatregelen worden genomen (zoals noodoverloopgebieden) afneemt tot 1/20 per jaar (“worst case”).



Figuur 2.2 Relatie tussen herhalingstijd en waterstand voor Bergen/Alkmaar

Groningen+Roswinkel

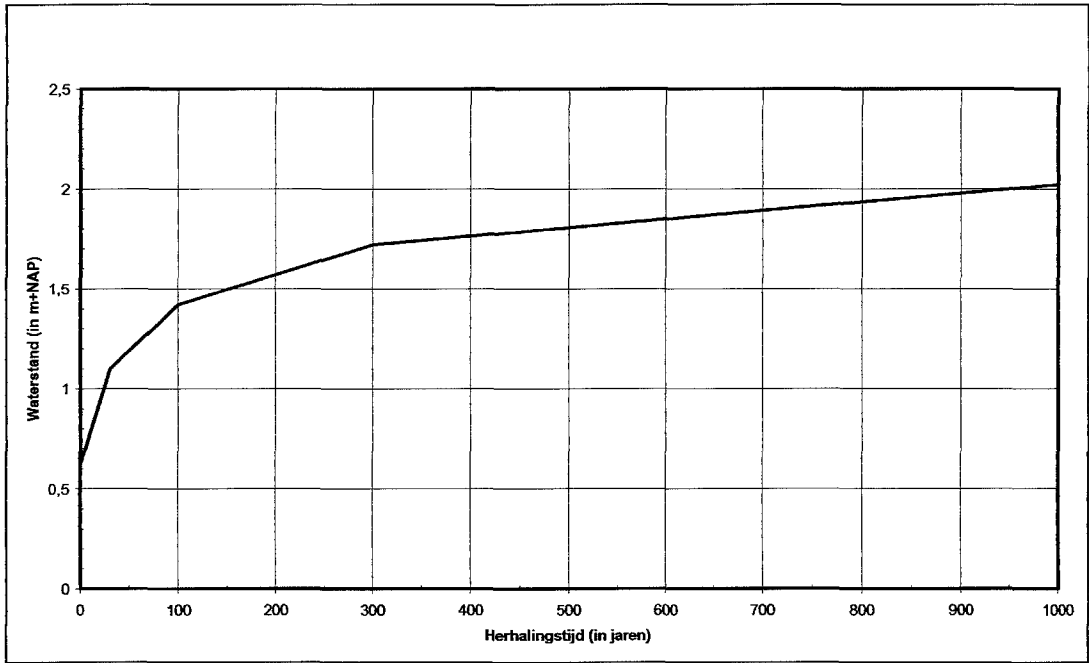
Als locatie is gekozen voor de Oostersluis (vlakbij Groningen stad). Dit is een boezem, en derhalve hebben we met kades te maken. Verder ligt het in het gebied waar de verzakking als gevolg van gaswinning vrij groot is.

Voor deze locatie zijn de volgende frequenties bekend (Heynert et al, 2001):

Table 2.2

herhalingstijd (jaar)	peil (m tov NAP)
Streefpeil	0.62
30	1.10
100	1.42
300	1.72
1000	2.02

Als norm voor de herhalingstijd wordt in analogie met Bergen/Alkmaar 100 jaar aangehouden.



Figuur 2.3 Relatie tussen herhalingstijd en waterstand voor Groningen +Roswinkel

Roermond en omgeving

De dichtst bij Roermond zijnde locatie waarvoor gegevens van de Maas beschikbaar zijn is Stevensweert (km-raai 61,5). Voor deze locatie zijn de twee volgende stappen uitgevoerd:

- 1. bepalen van de afvoerstatistiek.
- 2. koppelen van verschillende afvoerniveaus aan een waterstand (Q-h relaties).

afvoerstatistiek Borgharen-Stevensweert

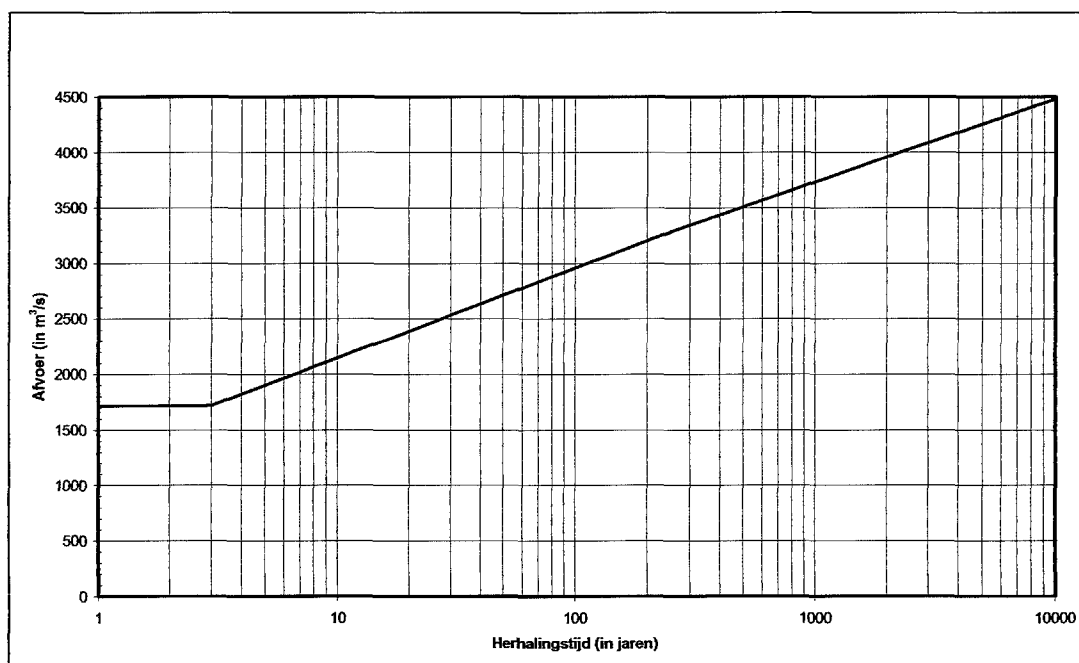
Tabel 2.3 bevat in kolom 1 drempelwaarden van de afvoer te Borgharen gekoppeld aan het gemiddeld aantal dagen per jaar in kolom 3 dat deze afvoer wordt overschreden (de zogenaamde dagenlijn). Voor afvoeren van 1.000 m³/s en lager is deze statistiek eenvoudigweg gebaseerd op turven van het aantal dagen. Voor afvoeren van 1.250 m³/s en hoger is de statistiek van (HKV, 2001) overgenomen. Voor Stevensweert is aangenomen dat de afvoer aldaar gelijk is aan die van Borgharen.

Het verband tussen de piekafvoer van een hoofwatergolf Q en de herhalingstijd T wordt weergegeven middels een zogenaamde werklijn. Parmet et al (2000) hebben de werklijn voor de Maas bij Borgharen afgeleid voor afvoeren met een herhalingstijd van 2 tot 10000 jaar. In (HKV, 2001) is de werklijn afgeleid voor afvoeren met een herhalingstijd van 1 tot 2 jaar (zie ook Figuur 2.4).

Werklijn	toepassingsbereik
$Q_p = 450,3 * \ln(T) + 1264,2$	$1 \leq T \leq 2$
$Q_p = 353,4 * \ln(T) + 1331,4$	$2 \leq T \leq 250$
$Q_p = 324,8 * \ln(T) + 1488,7$	$250 \leq T \leq 10.000$

De piekafvoer met een herhalingstijd van 1 jaar ($T = 1$) is derhalve gelijk aan:

$$Q_p = 450,3 * \ln(1) + 1264,2 = 1264,2 \text{ m}^3/\text{s}$$



Figuur 2.4 Werklijnen voor de Maasafvoer

Q-h-relaties

Om frequenties van waterstanden te bepalen is de afvoer gekoppeld aan de waterstand via een zg. Q-h relatie. Voor Stevensweert is deze bij benadering te beschrijven als een polynoom:

$$h = a*Q^2 + b*Q + c$$

waarin:

- Q = afvoer (m^3/s)
- h = waterstand (m tov NAP)
- a = $-1.25\text{E-}07$
- b = $1.38\text{E-}03$
- c = 22.29

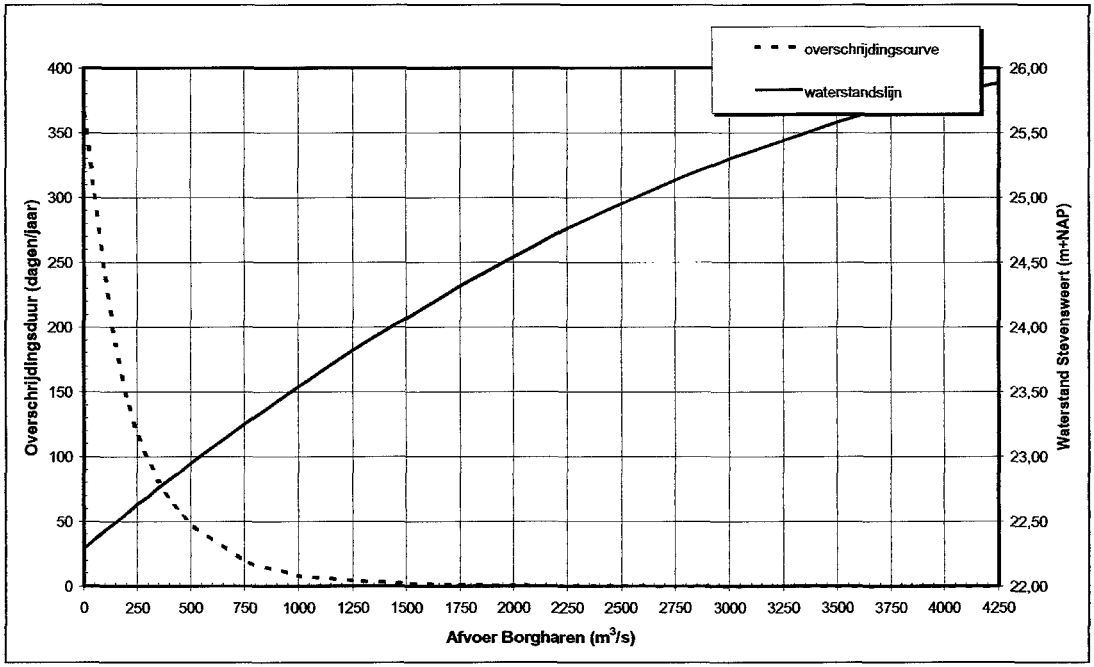
Opgemerkt wordt dat de fit gebaseerd is op hoge afvoeren en waterstanden. Voor lage waterstanden is het gebruik van de polynoom derhalve minder betrouwbaar. Echter, lage waterstanden zijn minder interessant omdat dan de kades niet belast worden.

Toepassing van de polynoom resulteert in een dagenlijn voor locatie Stevensweert, zoals aangegeven in Tabel 2.3 (kolom 2). In Figuur 2.5 zijn de gegevens van Tabel 2.3 grafisch weergegeven.

Tabel 2.3 Dagenlijn van de afvoer te Borgharen en de waterstand te Stevensweert.

Afvoer m³/s	waterstand m +NAP	Overschrijding #dagen/jaar
0	22.29	365
50	22.36	304
100	22.43	238
150	22.49	187
200	22.56	146
250	22.63	117
300	22.69	97
350	22.76	81
400	22.82	68
450	22.88	57
500	22.95	48
750	23.25	19
1000	23.54	8
1250	23.82	4.2
1500	24.07	2.0
1750	24.32	0.9
2000	24.54	0.4
2250	24.76	0.2
2500	24.95	8.26 ^{E-02}
2750	25.13	3.73 ^{E-02}
3000	25.30	1.66 ^{E-02}
3250	25.44	7.17 ^{E-03}
3500	25.58	2.90 ^{E-03}
3750	25.70	1.09 ^{E-03}
4000	25.80	3.47 ^{E-04}
4250	25.88	6.18 ^{E-05}

De waterstand behorende bij de jaarlijkse afvoer (herhalingstijd T = 1 jaar) van Q = 1264 m³/s is dus: NAP +23,83 m en wordt 4,2 dagen per jaar overschreden.



Figuur 2.5 Verband tussen afvoer, waterstand en overschrijdingsduur

veiligheidsniveau

Op de Maas zijn twee situaties te onderscheiden:

- bedijkte deel van de Maas benedenstrooms van Mook, waarvoor een veiligheidsniveau geldt van 1/1250;
- “hoge” Maas waar van oudsher geen dijken waren, maar sinds de recente overstromingen kades worden aangelegd met een beoogd veiligheidsniveau van 1/250.

Het veiligheidsniveau van 1/250 zal in de toekomst van toepassing zijn, na uitvoering van de rivierverruimende maatregelen. Zolang deze niet zijn gerealiseerd moet de kade een waterstand kunnen keren behorende bij een veiligheidsniveau van slechts 1/50 (of de waterstand van 1995; hoogste is van toepassing).

Gegeven de veiligheidsniveaus met herhalings tijden van 50 en 250 jaar is met de eerder gepresenteerde werklijnen de maatgevende afvoer te bepalen en met Tabel 2.3 de bijbehorende waterstand en het aantal dagen overschrijding per jaar.

herhalings tijd	Afvoer	waterstand	dagen overschrijding
50	2714	+ 25,10	4.10 ⁻²
250	3283	+ 25,46	7.10 ⁻³

2.4 Dijkprofielen en geologische ondergrond

Omdat voor iedere locatie een specifieke geologische ondergrond aanwezig is en slechts op regio niveau wordt gekeken, wordt voor de geologische ondergrond een worst-case benadering gevolgd o.a. in relatie tot de mogelijke opslingeringseffecten. Voor de opbouw en geometrie van de dijk of kade zal een gemiddelde worden aangehouden.

Alkmaar/Bergen

Exacte gegevens over de kruinhoogte van de kade zijn niet bekend. Aangenomen wordt dat deze 0,50 m boven het normpeil ligt. De kruin ligt dus op NAP + 0,30 m.

De samenstelling van de geologische ondergrond is beschreven op Geologische Kaart Alkmaar West (19W).

De pleistocene ondergrond, waarvan de top op ongeveer NAP -20 tot -25 m ligt, bestaat voornamelijk uit dichte zanden. De holocene bedekking in het gebied van de Schermerboezem bestaat uit twee karakteristieke deelgebieden, die ontstaan zijn aan weerszijden van de zich vormende kustlijn (zie Figuur 2.6).

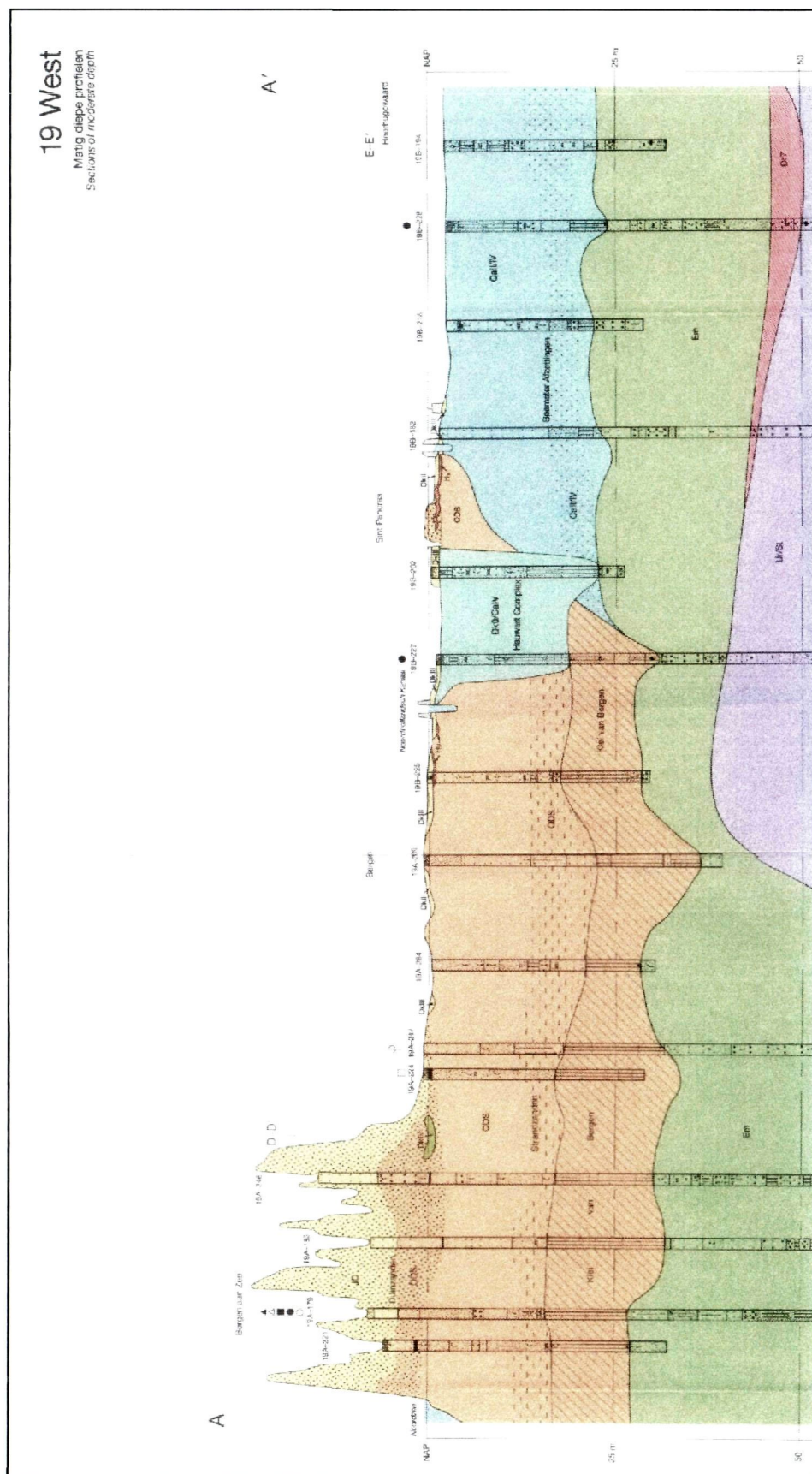
Ten westen van de lijn Broek op Langedijk - Akersloot ligt op het pleistocene zand een laag vaste zandige klei met een dikte van 5 - 10 m, de Klei van Bergen (Formatie van Naaldwijk). Hierop bevinden zich strand- en duinzanden, die grotendeels vast gepakt zijn. In ondiepe depressies achter de huidige duinenrij bevinden zich hierop lokaal dunne (< 1m) klei en veenlagen.

Ten oosten van de bovengenoemde lijn liggen op het pleistocene zand de lagunaire kleiige zanden en zandige kleien van het Laagpakket van Wormer (Formatie van Naaldwijk). Basisveen is nog slechts plaatselijk aanwezig. De zanden komen voornamelijk aan de basis voor en zijn matig vast tot vast gepakt, de kleien zijn van boven naar beneden stevig tot vast. De top van dit pakket ligt gemiddeld op NAP - 3,5 m en ligt voor het grootste gedeelte aan het maaiveld in de uitgeveende polders (Schermer, Polder Heerhugowaard).

In de polders bevinden zich nog enkele restanten Hollandveen (Formatie van Nieuwkoop) met een dikte van 1 tot 1,5 m, maar met name onder de kades is deze laag dikker.

Bij Broek op Langedijk ligt hier nog een dunne laag klei op. Ten noorden van Alkmaar, in een zone die naar het noorden toe breder wordt en waarvan de grens grofweg de rand van de Polder Geestmerambacht volgt, bevinden zich vanaf maaiveld slappe tot stevige, vaak zandige kleien, gevormd in de geulen van het vroegere zeegat van Bergen (Formatie van Naaldwijk). De onderkant van dit complex reikt tot 20 - 25 m onder NAP.

In een strook tussen het Noordhollandsch Kanaal en Schoorl (Aegtdorper en Oudburger Polders) ligt op de strandzanden een dikkere laag (4 - >5 m dik) slappe tot stevige klei met een Hollandveen tussenlaag.



Figuur 2.6 **Geologisch profiel Bergen - Heerhugowaard**

Groningen/Roswinkel

Opnieuw wordt aangenomen dat de kruin van de kade 0,50 m boven het normpeil ligt. De kruin ligt dus op NAP + 1,92 m.

Er is geen nauwkeurig dijkprofiel beschikbaar. Op basis van globale informatie over de dijk bij de Tussenklappenpolder is het volgende dijkprofiel verondersteld: dijk met taluds 1:2 en een kruin die 2 m boven het maaiveld ligt (maaiveld ligt op NAP).

De samenstelling van de geologische ondergrond is beschreven op Geologische Kaarten Assen West en Oost (12W, 12O) en Emmen West en Oost (17W, 17O).

In het grootste deel van de provincie komt in de ondergrond een meer dan 5 meter aaneengesloten dik pakket slappe tot vaste klei voor, afgewisseld met matig vast gepakt kleilig zand (Formatie van Naaldwijk), eventueel met veeninschakelingen (Hollandveen Laagpakket; Formatie van Nieuwkoop). Meestal is bovenop het pleistocene pakket een enkele decimeters dunne veenlaag aanwezig, de Basisveen Laag (Formatie van Nieuwkoop). In een strook van ca. 10 tot 15 km langs Eems en Dollard komen dikke veenpakketten voor. In het zuidelijk deel van het Westerkwartier en een groot deel van Westerwolde liggen vaste pleistocene afzettingen aan het maaiveld. De dikte van het holocene pakket varieert van 0 m in het zuiden tot meer dan 25 m langs de kust. Oude erosiegeulen zijn hier op uitgebreide schaal ingesneden.

Ten zuiden van het gebied, waaronder vrijwel de gehele provincie Drente, liggen de pleistocene afzettingen aan maaiveld. Een groot deel van het gebied is bedekt met een laag dekzand uit de laatste ijstijd, die enkele meters dik kan zijn. Door bodemvorming is hierin vaak een lichte cementatie van de korrels opgetreden.

In de beekdalen, bijvoorbeeld van de Hunze, heeft zich in het Holoceen veen gevormd. Veel hiervan is vergraven. De dikte is nooit meer dan enkele meters.

Roermond

De kades zijn aangelegd conform de vigerende Leidraad voor de aanleg van Rivierdijken (TAW, 1985). In deze oriënterende studie is uitgegaan van de ontwerpgrondslagen voor het dimensioneren van de kades zoals beschreven in de zogenaamde Boertien-II studie naar aanleiding van de Maas hoogwaters (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1994). Dit betekent een dijk met taluds 1:3 en een kruin met een breedte van 3 m. De kern bestaat daarbij uit zand waarop is aangebracht een kleilaag van 1 m dik.

De uiteindelijke kruinhoogte is inclusief een waakhogte van 0,50 m.

De samenstelling van de geologische ondergrond is beschreven op Geologische Kaart Roermond (58W en 58O).

De aardbevingsgevoelige (dwz lagen gevoelig voor verweking en opslingering, zie hoofdstuk 4), ondiepe ondergrond van de omgeving van Roermond wordt gekenmerkt door de afzettingen van de Maas en de Roer en tevens door pleistocene afzettingen van de Formatie van Twente. De laatstgenoemde afzettingen zijn fijnkorrelige dekzanden en fluvio-periglaciaire fijne tot matig grove zanden, silthoudende zanden en veen. De dikte varieert van 1 tot enkele meters, maar in depressies komen dikten tot 25 m voor. Deze afzettingen komen voor buiten de stroombanen van de Maas en de Roer.

De holocene afzettingen bestaan uit de afzettingen van Maas (Formatie van Beegden) en de Roer en andere beekdalafzettingen (Laagpakket van Singraven, Formatie van Twente) en landduinen (Laagpakket van Kootwijk, Formatie van Twente). Laatstgenoemde fijne stuifzanden liggen grotendeels boven de grondwaterspiegel.

De rivierafzettingen van de stroomgeulen bestaan uit matig grof tot grof zand met grind en minder dan 5 m dikke rivierkleien die buiten de stroomgeulen zijn afgezet. Dikkere slappe tot stevige rivierklei afzettingen zijn gevormd in de verlaten geulen en meanders, die zich nu onder het maaiveld bevinden. Dikkere fijnkorrelige lagen en veenlagen komen voor in beekdalen.

Ten oosten van Venlo komen nog aardbevingsgevoelige lagen voor in de Formatie van Stramproy.

3 Seismische risico's in Nederland

3.1 Inleiding

In Nederland treden aardbevingen van natuurlijke oorsprong op in het zuidelijk deel van Nederland (zie Figuur 3.2).

De krachtigste bevingen zijn:

- 22 juli 2002 bij Alsdorf, Duitsland: $M_L = 4,9$ (M_L = magnitude op de schaal van Richter);
- 13 april 1992 bij Roermond: $M_L = 5,8$ (schade ongeveer 100 miljoen Euro);
- 20 november 1932 te Uden: $M_L = 5,0$.

De beving van april 1992 heeft niet alleen tot materiële schade geleid, maar ook schade aan een kade veroorzaakt (foto 1).



Foto 1 Scheuren in de Maasdijk bij Asselt als gevolg van de beving bij Roermond op 13 april 1992 (Rijkswaterstaat)

Bevingen door gaswinning traden op in Groningen en in Noord Holland in de omgeving van Bergen:

- 26 december 1986 te Assen: $M_L = 2,7$;
- 6 augustus en 21 september 1994 bij Alkmaar: twee bevingen met $M_L = 3,0$ resp $3,2$;
- 9 en 10 september 2001 bij Bergen/Alkmaar: drie bevingen met $M_L = 3,5$, $3,2$ en $2,7$.

Ondanks bovenstaande is Nederland een land met laag seismisch risico (low-seismicity region) dus een regio waar wel degelijk aardbevingen voorkomen, en soms zelfs krachtige, maar met een relatief lage frequentie vergeleken met de tijdsduur waarvoor we complete catalogi van de seismiciteit hebben. Op grond van het statistisch voorkomen van aardbevingen moeten we dus met grote foutenmarges rekenen omdat er weinig gegevens beschikbaar zijn.

Een seismische risico analyse (risk) omvat een keten van begrippen, zowel de kans op trillingen (seismic hazard), de kwetsbaarheid van de bouwwerken of van de infrastructuur (vulnerability) en de mogelijke gevolgen van de trillingen (effects). De gevolgen zijn in het algemeen een complexe samenloop van economische, bouwtechnische, verzekeringstechnische en psychologische omstandigheden. Hier beschouwen wij uitsluitend de seismic hazard en meer specifiek de kans op schade aan een dijklichaam ten gevolge van trillingen veroorzaakt door bevingen.

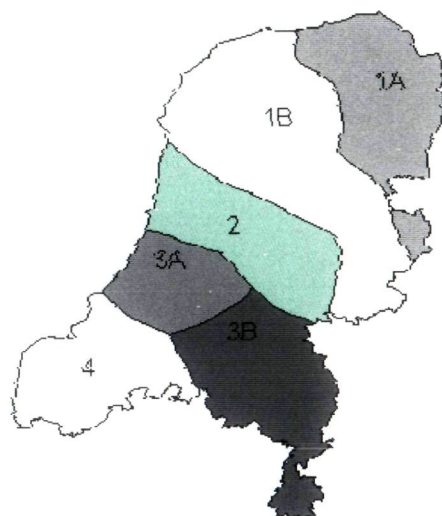
3.2 Geologie, tektoniek en seismiciteit

Voor het seismisch risico in Nederland is voornamelijk de neotektoniek van belang, d.w.z. de bewegingen en breuken uit het Cenozoicum. Ziegler (1994) plaatst de huidige tektonische bewegingen in Nederland in een brede context, waarbij de Roerdal slenk wordt gezien als het verlengde van een riftsysteem dat zich uitstrekt van de Noordzee tot de Middellandse zee. Een samenvatting van de neotektonische bewegingen en relevante breuken is te vinden in het NITG verslag (Simmelink et al, 2001) waarin Nederland in een aantal tektonische zones wordt verdeeld (Fig. 3.1). Deze studie is gebaseerd op gemeten verzetten langs bekende breuken.

De Roerdal slenk (zone 3B) wordt in deze studie gezien als de enige zone waar duidelijk neotektonische bewegingen waar te nemen zijn. Op enkele plaatsen in de Roerdal slenk wordt een daling van ongeveer 10 cm/1000 jaar waargenomen. Houtgast en van Balen (2000) rapporteren een gemiddelde snelheid van 8 cm/1000 jaar en constateren een toenemende snelheid in het Kwartair. Dat deze daling ook nu nog gaande is, wordt bevestigd door gemeten verzetten van 10 cm/1000 j in glaciële dekzanden (Simmelink et al, 2001).

Voor de andere gedefinieerde zones zijn er geen indicaties te vinden voor neotektonische bewegingen. Voor zone 3A, het West Nederland bekken in het verlengde van de Roerdal slenk, is echter ook niet met zekerheid te zeggen dat er geen neotektonische bewegingen zouden zijn.

De zones 1, 2 and 4 worden respectievelijk als “stabiel”, “stabiel dalingsbekken” en “zeer stabiel” beschouwd. Zone 1 wordt nog verdeeld in 1A, waar nog breuk activiteit tot in het vroeg Pleistoceen is waargenomen, en 1B, met een geringer intensiteit aan breuken en breuk activiteit dat al in het Kwartair is gestopt.

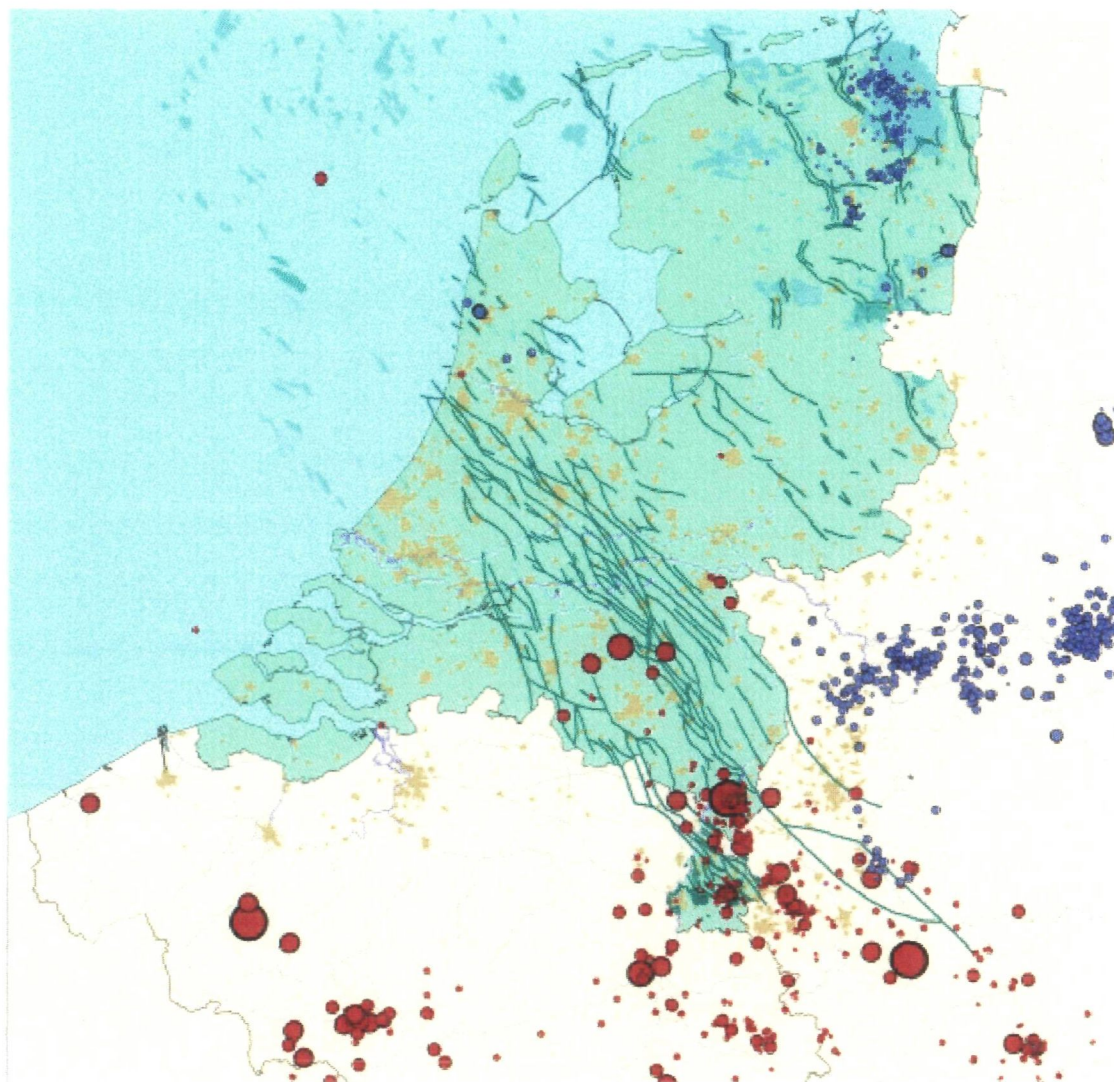


Figuur 3.1 Schematisch overzicht van zes verschillende (neo) tectonische zones in Nederland: 1A en 1B, 2 en 3A en 3B en 4 (bron: Simmelink et al, NITG 2001) Deze indeling is gebaseerd op kwantitatieve indeling van de gemiddelde bewegingssnelheden langs breuken in drie tijdsperiodes: Vroeg Tertiair, Laat Tertiair en het Pleistoceen. In deze zoneringskaart is rekening gehouden met zowel natuurlijke als geïnduceerde bewegingen.

De seismiciteit catalogus van Houtgast (1991) vormt de huidige basis voor de risico analyses die voor Nederland zijn gemaakt. Deze catalogus is ontstaan uit een literatuur onderzoek gecombineerd met waarnemingen uit de 20ste eeuw. In 1904 zijn de eerste instrumentele waarnemingen in Nederland, in De Bilt, begonnen gedurende ruim drie maanden. Sinds 1908 zijn er continue instrumentele waarnemingen, die met der tijd verbeterde wat betreft registratiemethoden en gevoeliger seismometers. Figuur 3.2 geeft een overzicht van de, hoofdzakelijk met instrumenten, waargenomen seismiciteit.

Momenteel is men op het KNMI bezig een systematische revisie en update uit te voeren. Dit betreft zowel een complete heranalyse van waarnemingen en paleoseismische studies. De seismiciteit catalogus kan met een systematische bronnen onderzoek, zoals verricht door Alexandre (1994) voor de periode 600-1525, uitgebreid worden voor de periode 1525-1900. Vooralsnog heeft dit niet de hoogste prioriteit bij het KNMI en zijn hier vooralsnog geen fondsen beschikbaar. Er zijn echter nu geen redenen om aan te nemen dat de gerevideerde catalogus een belangrijk verschil zal opleveren in nieuwe risico analyses.

Een uitbreiding verder terug in de tijd kan men doen met paleoseismisch onderzoek (van den Berg et al, 2002) met het doel seismische gebeurtenissen op een bekende breuk te identificeren. De resultaten van recente paleoseismische onderzoeken (Camelbeeck & Meghraoui, 1996; Camelbeeck & Meghraoui., 1998; van den Berg et al, 2002) daarentegen kunnen wel degelijk een invloed hebben. Deze zijn echter nu nog te controversieel om praktische conclusies uit te kunnen trekken i.v.m. seismisch risico.



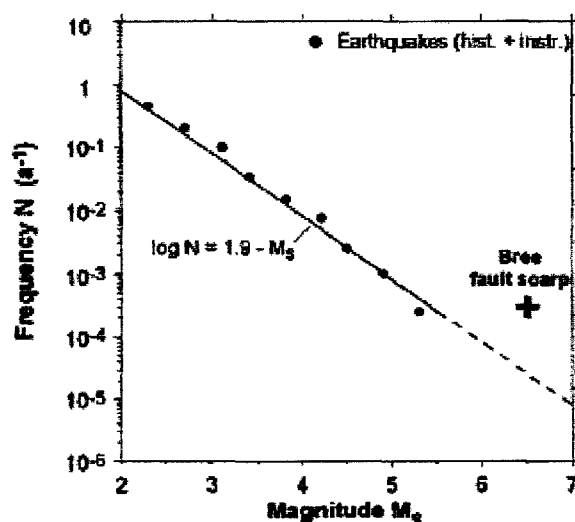
Figuur 3.2. De seismiciteit in Nederland en omgeving sinds 1900 (bron: KNMI). De rode cirkels geven de seismiciteit aan die aan de natuurlijke tectoniek gerelateerd kan worden. De blauwe cirkels geven de seismiciteit aan die door het KNMI als geïnduceerd wordt geclassificeerd. De bevingen zijn geschaald naar magnitude. De donkergroene lijnen geven de gekarteerde breuken aan in het Boven-Noordzee (bron: NITG, zie ook Figuur 3.1).

De neotektonische bewegingen, zoals hierboven beschreven, zijn vaak ontstaan als gevolg van langzame bewegingen, d.w.z. aseismisch. Slechts incidenteel komen plotselinge bewegingen, aardbevingen, voor. Deze bevingen komen vooral voor langs bestaande breuken. De relatie tussen het aseismische en het seismische deel van de neotektonische bewegingen is in onze omgeving momenteel moeilijk te kwantificeren door gebrek aan gegevens over een voldoende lange periode.

De waargenomen seismiciteit toont echter wel onomstotelijk aan dat er breukbewegingen zijn. Als men Figuur 3.1 met Figuur 3.2 vergelijkt dan lijkt de waargenomen seismiciteit de conclusies van Simmelink et al (2001) omtrent de neotektonische bewegingen in grote lijnen te bevestigen. De Roerdalslenk moet als neotektonisch actief beschouwd worden, terwijl er een onzekerheid blijft bestaan ten opzichte van het West Nederland Bekken.

Het is verder interessant om hierbij op te merken dat Frikken (1999) denkt aanwijzingen te hebben voor een duidelijke relatie tussen het huidige (neo)tektonische spanningsveld in Noord Nederland en de daar waargenomen geïnduceerde seismiciteit.

De waargenomen seismiciteit in Nederland en omgeving kan in het tijdsdomein redelijk goed gemodelleerd worden als een Poisson proces, d.w.z. onafhankelijke gebeurtenissen met een willekeurige kans van voorkomen en een exponentiële distributie qua sterkte. De waargenomen magnitude-frequentie verdeling (Figuur 3.3) laat deze exponentiële distributie zien.



Figuur 3.3. Frequentie (N) - magnitude (M_s) relatie gebaseerd op historische en instrumentele data, gemodelleerd als $\log N = a - b M_s$. De waarde $a = 1,9$ is een benadering voor een 20 km lange breuk in de "Lower Rhine Graben". Paleoseismische data, zoals geobserveerd langs de Bree breuklijn past niet in dit model en suggereert een grotere frequentie van grote aardbevingen (overgenomen uit Camelbeeck & Meghraoui, 1996)

3.3 Huidige status van het seismisch risico onderzoek in Nederland

Seismisch risico voor Nederland is tot nu toe hoofdzakelijk bepaald in termen van Intensiteit (schaal van Mercalli, MSK schaal of de nieuwe Europese Macroseismische Schaal - EMS). Intensiteit beschrijft in feite de schade fenomenen die optreden in verschillende graden naar gelang epicentrale afstand, bodem gesteldheid, bouwconstructies, etc. voor een aardbeving (de Crook, 1993; de Crook, 1994; Ahorner and Rosenhauer, 1975; Rosenhauer en Ahorner, 1994). Helaas is Intensiteit een moeilijk toe te passen begrip voor de modellering van bewegingen van constructies aan, op of net onder het aardoppervlak. Een beschrijving in termen van waarschijnlijkheden van de kans voor een bepaalde groundbeweging is hier meer geschikt. Dit is echter niet makkelijk te bepalen. De horizontale piek versnelling is de meest gebruikelijke parameter (Reiter, 1990; Krinitsky et al, 1993). Voor Nederland zijn op het ogenblik alleen eerste orde benaderingen beschikbaar.

Een eerste orde benadering omdat:

- a) zowel de seismische golfvoortplantingsmodellen als de beschrijving van de seismisch actieve zone grofmazig zijn;
- b) lokale opslingering niet is meegenomen in de berekeningen; en
- c) nog weinig waarnemingen (registraties van versnellingsmeters) aanwezig zijn om de golfdempingsmodellen te verifiëren.

Een eerste orde benadering van het seismisch risico in Nederland in termen van absolute groundbewegingen zijn gepresenteerd door de Crook (1996). Deze schatting (Figuur 3.4) is gebaseerd op een conversie (Ahorne, 1983b) van het seismisch risico in termen van Intensiteit (de Crook, 1994) en kan een grote foutenmarge introduceren, grofweg een factor 1.5 (Krinitzsky et al., 1993).

Binnen het "Global Seismic Hazard Assessment Project" (GSHAP) is het seismisch risico in termen van absolute groundbewegingen direct berekent in een "Probability Seismic Hazard Assessment (PSHA)" procedure (Grünthal et al, 1999). Deze resultaten (Figuur 3.5) zijn echter gebaseerd op grove benaderingen van de seismisch actieve zones. Daarom moeten ook deze resultaten als een eerste orde benadering beschouwd worden.

De twee resultaten worden vergeleken in Tabel 3.1 en geven een indruk van de mogelijke onzekerheid marges. Beiden gebruiken vergelijkbare seismiciteits modellen en met de onzekerheden, zoals die door Camelbeeck & Meghraoui (1996) zijn aangekaart (Figuur 3.3) is hier geen rekening gehouden.

Tabel 3.1 Horizontale piek versnellingen waarvoor een 10% kans is dat deze wordt overschreden in periode T (jaren), de herhalingsstijd De zone's B t/m D zijn aangegeven in Figuur 3.4..

T = 50 jaar	De Crook (1996)	Grünthal et al (1999)	
Zone D	0,1 g	0,07 – 0,13 g	
Zone C	0,05 g	0,03 – 0,07 g	
Zone B	0,022 g	0,02 – 0,03 g	

Tabel 3.2 Horizontale piekversnellingen nabij Roermond waarvoor een 10% kans bestaat dat deze wordt overschreden in de herhalingsstijd van T jaren

T (jaren)	I ₀ ¹⁾	Geschatte a _{max} ²⁾	Geschatte onzekerheid (naar boven) ³⁾	Grünthal et al (1999)
5	V	0,022g	0,08g	-
10	VI	0,05g	0,12g	-
50	VI-VII	0,05-0,1g	0,15g	0,03-0,13g
100	VII	0,1g	0,18g	-
250	VII-VIII	0,14g	0,2g	-
1000	VII-VIII	0,18g	0,28g	-

I₀ – Maximum Intensiteit

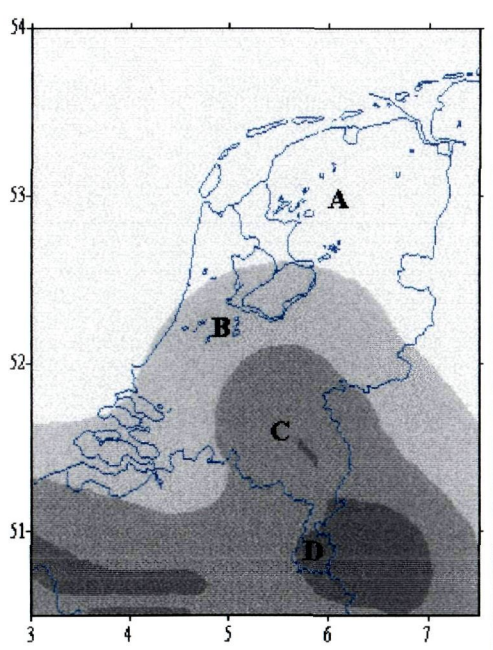
a_{max} – Piek versnelling

¹⁾ De maximale Intensiteit I₀ is gebaseerd op de analyse van De Crook (1993)
²⁾ De geschatte a_{max} voor de intensiteit VI-VII zijn gebaseerd op een empirische relatie van Ahorne (1983). De geschatte a_{max} voor de intensiteit VII-VIII is gebaseerd op een empirische relatie tussen Intensiteit en versnelling voor "far-field" op zowel zachte, als geconsolideerde ondergrond (Krinitzsky et al., 1993: Tabel 3 in Appendix 2).

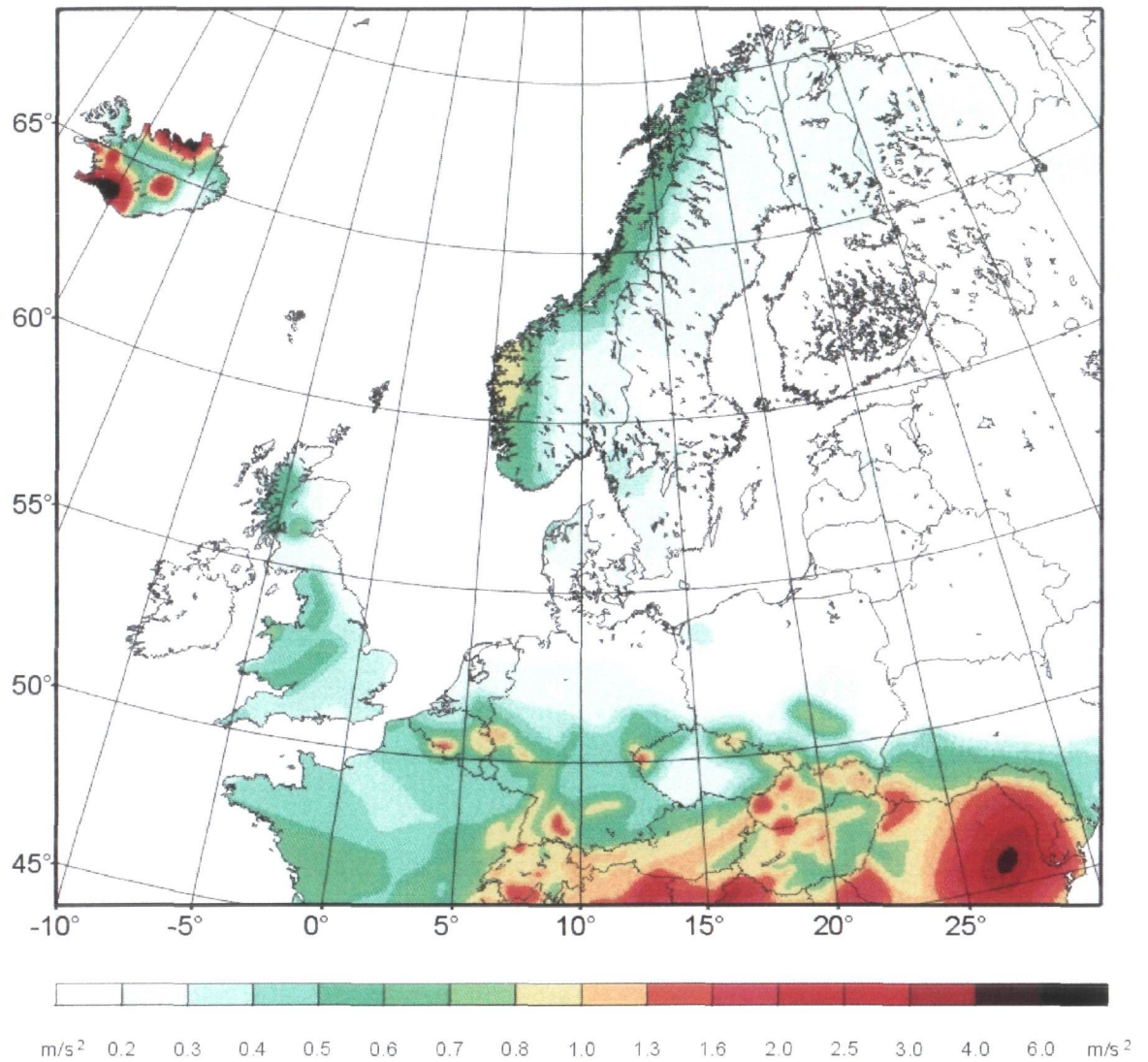
³⁾ De geschatte a_{\max} voor intensiteit VII-VIII en de onzekerheden is gebaseerd op een empirische relatie tussen Intensiteit en versnelling voor "far-field" op zowel zachte, als geconsolideerde ondergrond (Krnitzsky et al., 1993: Tabel 3 in Appendix 2). De onzekerheden zijn de waarde voor de mediaan + een standaard afwijking. Hierbij moet men wel de kantekening plaatsen dat zowel de benadering als de gedefinieerde waarden erg grof benaderd zijn.

In die gevallen in Nederland waar het aardbevingsrisico een eventueel risico zou kunnen zijn wordt in de huidige praktijk de Eurocode 8 gevolgd (ENV, 1998). Hier wordt dan de horizontale piek versnelling als de "design ground acceleration" beschouwd en daar zijn dus de "response spectra" van af te leiden. Microzonatie ofwel mogelijke opslingerings effecten zijn alleen nog maar bij uitzondering aan de orde geweest.

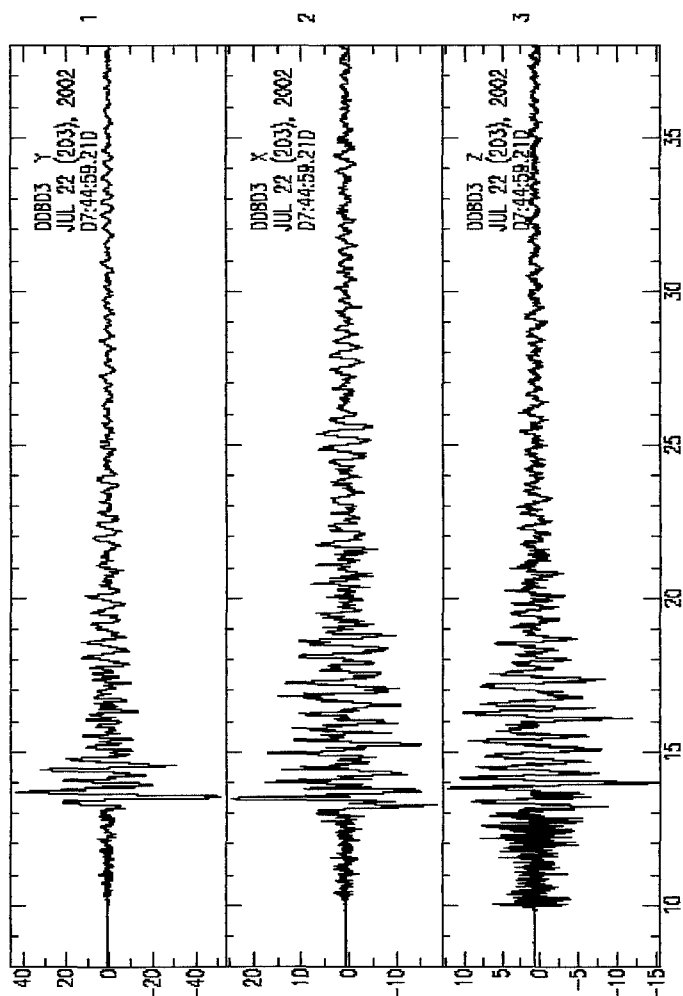
Sinds een aantal jaren is het KNMI bezig systematisch versnellingsmeters te plaatsen in Zuid en Noord Nederland. Dit begint zijn vruchten af te werpen. De meest recente registraties zijn die van de beving bij Alsdorf (22/7/2002) geregistreerd bij Voerendaal op zo'n 17 km epicentrale afstand (Figuur 3.6). Hierbij heeft men een grootste horizontale piek grondversnelling van ongeveer 0,045g gemeten (g = gravitatieversnelling). De tijdsduur van een "krachtige versnelling" is zo'n 5 à 6 seconden.



Figuur 3.4. Eerste orde benadering van het seismisch risico in Nederland. Voor vier seismische zones, A t/m D, zijn de horizontale piek versnellingen gedefinieerd, respectievelijk 10, 22, 50 en 100 cm/s^2 , waarvoor er 10% kans bestaat dat ze in een periode van 50 jaar overschreden worden (Crook, 1996). Voor de zone's B tot en met D zijn de te verwachten piekversnellingen in Tabel 3.1 vergeleken met de waarden uit een soortgelijke studie van Grünthal et al., (1999).



Figuur 3.5. Seismisch risico voor noordwest Europa gedefinieerd als de horizontale piek versnelling waarvoor er een 10% kans is dat deze wordt overschreden in een periode van 50 jaar (Grünthal et al., 1999). Dit is een resultaat van het GSHAP project.



Figuur 3.6. Door het KNMI gemeten grondversnelling bij Voerendaal op zo'n 20 km epicentrale afstand van de $M_L = 4,9$ beving bij Alsdorf, Duitsland op 22/7/2002. Twee horizontale componenten en een verticale component. De tijdsas geeft seconden, de y-as de grondversnelling in eenheden van een duizendste van g (zwaartekracht, $9,8 \text{ m/s}^2$). Piekversnelling van 30 mg.

Groningen en Alkmaar

De situatie in Groningen en Drenthe en rond Alkmaar wordt op verzoek speciaal behandeld. De situatie is wat betreft seismisch risico is hier anders. De gaswinning is de oorzaak van de relatief ondiepe bevingen (ongeveer 3 km diepte), die hier sinds 1986 worden waargenomen (zie ook BOA rapport, 1993).

Een probabilistische risico analyse zou daarom ook de gaswinning erbij moeten betrekken. Een meer pragmatische methode lijkt een deterministische analyse. Hierbij wordt de grondversnelling, veroorzaakt door de meest waarschijnlijke grote beving, als input voor verdere risico analyses gebruikt. De Crook et al (1998) concluderen dat een beving van maximaal $M_L = 3,8$ kan worden verwacht in Noord Nederland. Er zijn momenteel geen redenen om niet dezelfde waarde voor de omgeving van Alkmaar aan te nemen.

De krachtigste bevingen in Noord Nederland vonden tot nu toe plaats bij Roswinkel ($M_L = 3,4$) en Alkmaar ($M_L = 3,5$). Dit komt in beide gevallen overeen met maximaal geobserveerde Intensiteit van VI op de EM-Schaal.

Helaas is de relatie van Ahorner (1983b) tussen Intensiteit en piek grond versnelling niet toepasbaar voor deze ondiepe bevingen. Wel heeft het KNMI piek waarden voor grondbeweging (zie Tabel 3.3) en versnellingen (Figuur 3.7) gemeten.

Een eenvoudige vergelijking tussen de registraties uit Voerendaal, Limburg en Roswinkel, Groningen illustreren een essentieel verschil tussen de ondiepe (geïnduceerde) bevingen in het noorden en de diepere bevingen in het zuiden. De bevingen in het noorden worden over een klein oppervlak gevoeld, d.w.z. de grondbeweging heeft een relatief korte duur, maar kan relatief krachtig zijn. De bevingen in het zuiden worden over een groot oppervlak gevoeld, d.w.z. de grondbeweging is over het algemeen langer.

Het bijzondere van de bevingen in het noorden is de geringe diepte die een korte maar krachtiger versnelling kan opleveren dan wat men gewend is van tektonische bevingen met dezelfde sterkte.

Tabel 3.3 Geobserveerde grondbewegingen nabij Roswinkel

Beving	M _L	A _{max}	V _{max}	D _{max}
Roswinkel 19/2/1997	3,4	0,29	46	1,5

A_{max} – horizontale piek versnelling (m/s²)
V_{max} – horizontale maximale snelheid (mm/s)
D_{max} – horizontale maximale verplaatsing (mm)

De Crook, Haak en Dost (1998) hebben, bij gebrek aan een beter model, de bevingen in het Noorden van Nederland beschouwd als een Poisson proces en hebben daarom een cumulatieve lineaire frequentie-magnitude relatie voor Noord-Nederland beschouwd:

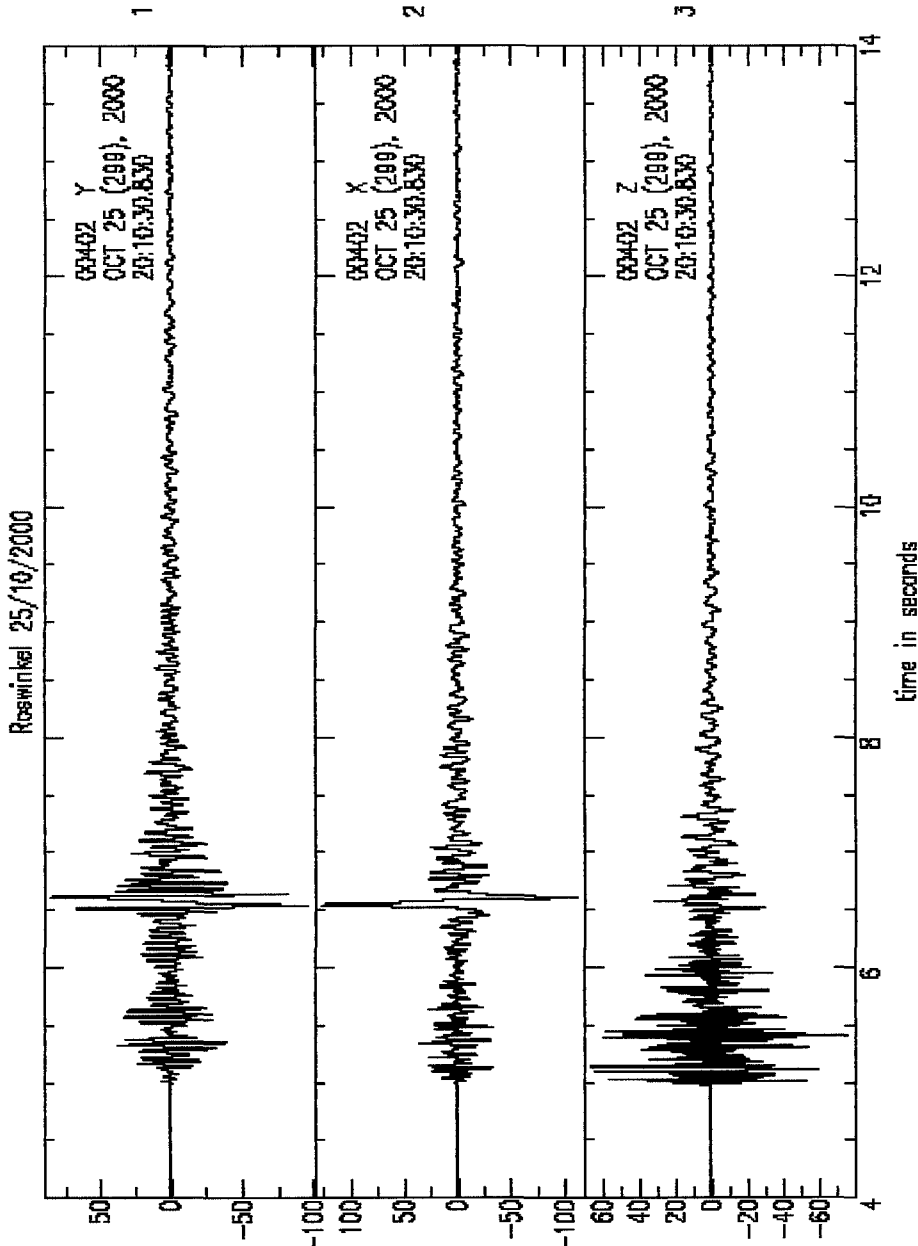
$$\log N = a - b M_L$$

waar N het cumulatieve jaarlijkse aantal aardbevingen is, $a = 2,27 \pm 0,24$, $b = 0,84 \pm 0,12$ en M_L de "Richter" magnitude. Deze relatie geldt voor bevingen met magnitude M_L tussen 1,5 en 2,7 in Noord-Nederland in en rond de gasvelden in een gebied van zo rond 3000 km². Dit zou dan ook een eerste benadering van het gebied waarin de bovengenoemde frequentie-magnitude relatie geldt. Dit betekent bijvoorbeeld een jaarlijkse kans van zo'n 0,4 voor een M_L = 3,0 of groter in geheel Noord-Nederland.

Dost (2002, pers. comm) heeft de gemeten grondbeweging a_{max}, horizontale piek versnelling, and v_{max}, horizontale piek snelheid, met de dampings relaties van Campbell (1997, 2000, 2001) vergeleken. Veronderstellend dat de bevingen op een hypocentrale afstand van ongeveer 2,5 km plaatsvinden komen de relaties van Campbell vrij goed overeen met de geobserveerde waarden bij Roswinkel (zie Tabel 3.4). Daarom wordt deze relatie van Campbell vooralsnog toegepast.

Tabel 3.4. De te verwachten piek grondversnellingen en snelheden op 2,5 km afstand voor bepaalde magnitude M_L volgens (Campbell 1997, 2000, 2001)

M_L	A_{max} (cm/s^2)	$A_{max} + 1 \sigma$ (cm/s^2)	V_{max} (cm/s)
2,0	50	85	0,5
3,0	120	190	1,9
3,8	200	316	5,7



Figuur 3.7. Door het KNMI gemeten grondversnelling bij Roswinkel op zo'n 2 km epicentrale afstand van de $M_L = 3,2$ beving bij Roswinkel op 25/10/2000. Twee horizontale componenten en een verticale component. De tijdsas geeft seconden, de y-as de grondversnelling in eenheden van een duizendste van g (zwaartekracht, $9,8\text{ m/s}^2$) aan. De horizontale versnelling is hier slechts een korte impuls.

4 Effecten van de ondiepe ondergrond

4.1 Inleiding

De uitwerking van een aardbeving op een waterkering worden deels bepaald door de effecten die de aardbeving heeft op de ondiepe ondergrond. Deze effecten zijn tweeledig:

De beving kan worden gedempt of versterkt ("opslingering") door de ondiepe ondergrond als gevolg van de verschillen in seismische impedantie van deze lagen.

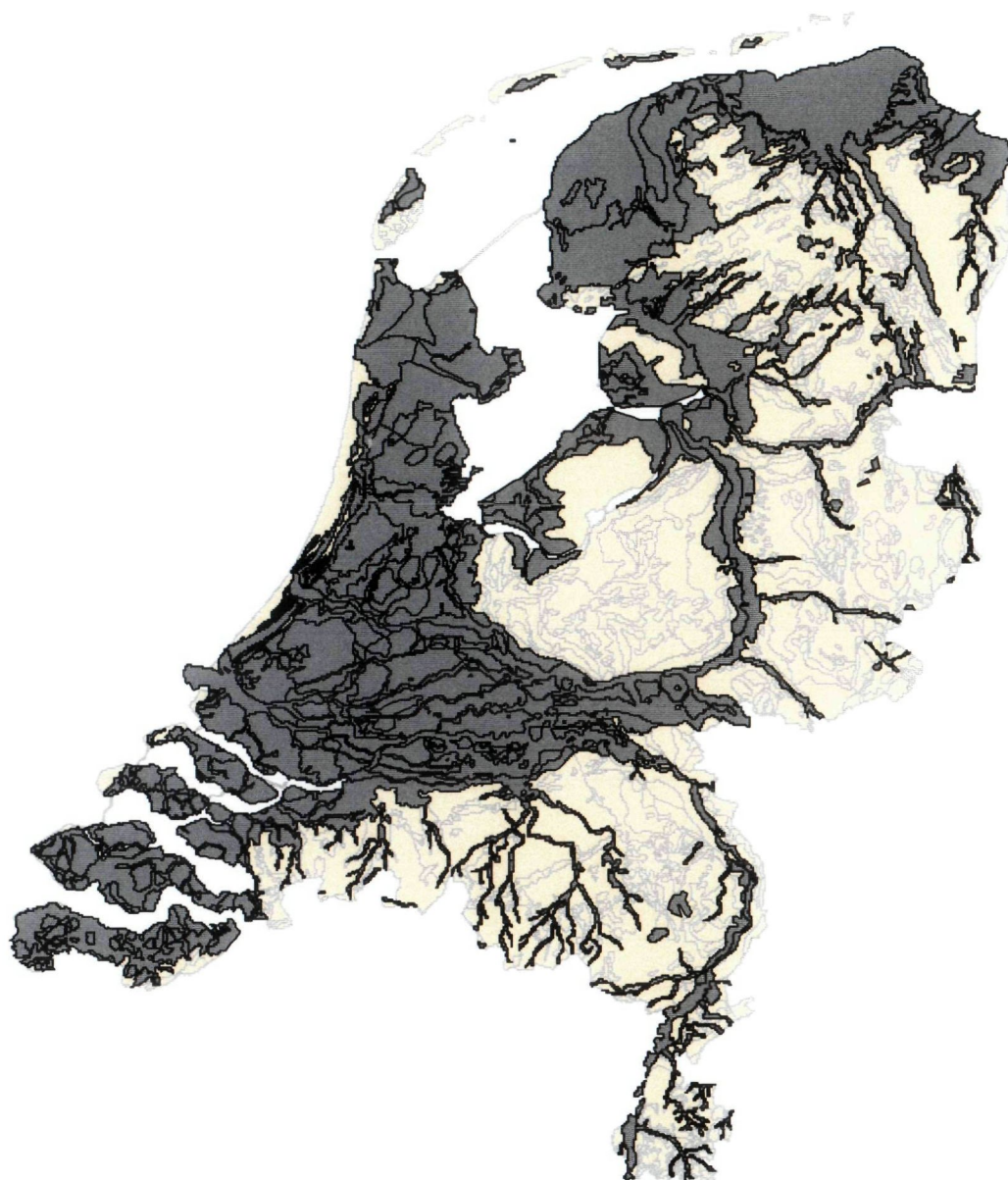
De beving kan verweking ("liquefaction") van matig tot losgepakte zand- en siltlagen veroorzaken, waardoor de draagkracht van de grond waarop de waterkering ligt afneemt.

De opbouw van de ondergrond speelt dus een belangrijke rol en zal aan het einde van dit hoofdstuk aan de orde komen.

4.2 Damping en opslingering

In een sedimentpakket dat bestaat uit naar boven toe gelijkmatig afnemende seismische snelheden en dempingsratio's zal de uit de ondergrond komende trilling normaal gesproken worden gedempt. Uit waarnemingen bij aardbevingen is echter geconstateerd dat bij bepaalde grondopbouw versterking, opslingering van de amplitude kan voorkomen. Dergelijke waarnemingen zijn in Nederland zeldzaam en in enkele gevallen is hier ook aan gerekend (De Crook en Wassing, 2001 en De Bie, 2001).

Opslingering vindt plaats wanneer er sprake is van grote impedantieverschillen in de lagen waar doorheen zich de trilling voortplant. Dit kan ook wel uitgedrukt worden in de verschillen in schuifgolfsnelheid. Zo'n situatie doet zich in Nederland voor waar een slap holoceen pakket ligt op een dichte, stijve laag Pleistoceen. Deze gebieden zijn in Figuur 4.1 weergegeven.



Figuur 4.1 Gebieden met slappe holocene grond liggend op vaste pleistocene ondergrond

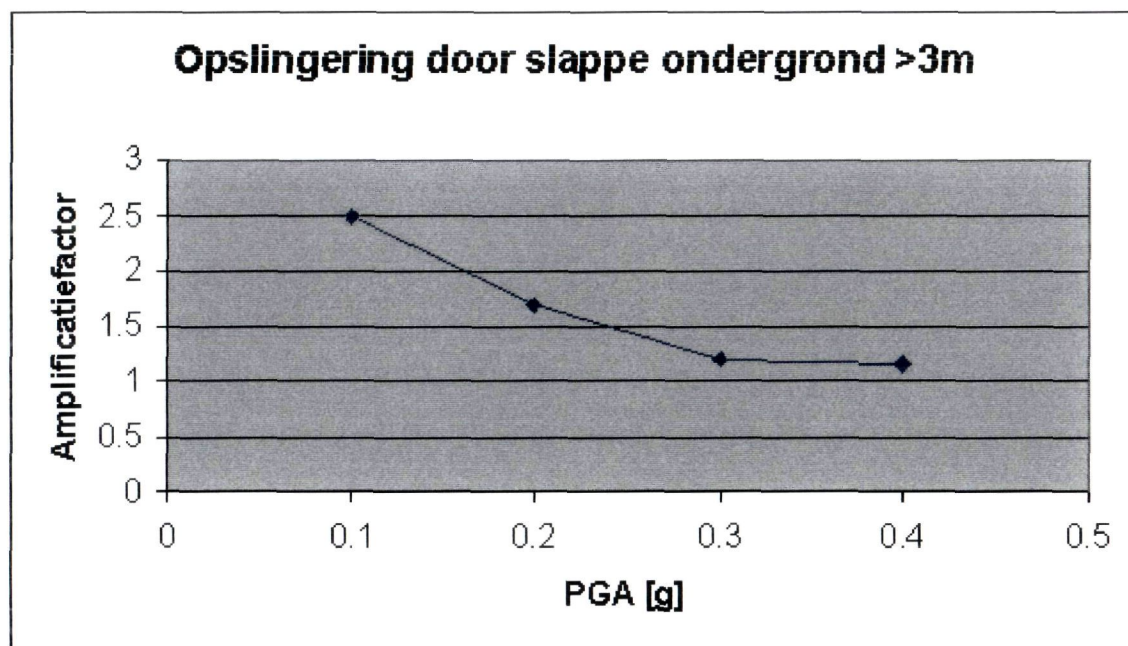
De opslingering wordt weergegeven in de vorm van een multiplicatiefactor. Een benadering voor de opslingeringsfactor voor grotere bevingen wordt gegeven in het Department of Defense Handbook MIL-HDBK-1007/3 (USA-DOD, 1997), waarin de amplificatiefactor uitgezet is tegen de uit de PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, zie 3.3) gevonden Peak Ground Acceleration (zie figuur 4.2). De amplificatiefactor is dan het lokale effect van de slappe bovenlaag. Uit de figuur kan de conclusie worden getrokken dat voor lagere PGA-waarden de amplificatiefactor aanzienlijk op kan lopen. Bij versnellingen groter dan 0,4g kan gesteld worden dat de slappe grond mechanisch bezwijkt zodat uitgegaan kan worden van een factor gelijk aan 1 (Idriss, 1990)

De Crook en Wassing hebben de opslingering door een 4 m dikke veenlaag aan het maaiveld gemodelleerd met SHAKE, na ijking van het model aan een waargenomen beving in het seismometerstation Zuidlaarderveen. De gemeten bronversnelling was hier lager dan 0,1 g.

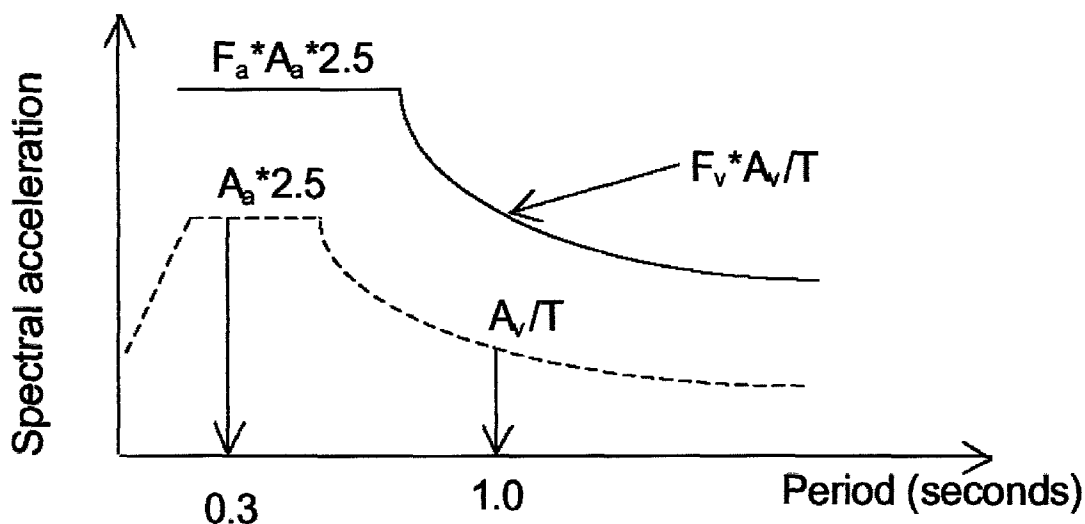
De gemiddelde berekende amplificatiefactor in het model met de veenlaag was hier 5, echter voor bepaalde frequenties werd een aanzienlijk hogere amplificatiefactor gevonden (10-30). Er moet dus rekening gehouden worden met een frequentieafhankelijkheid.

De Bie heeft eveneens een modellering in SHAKE uitgevoerd voor het profiel onder de Maasdijk, dat voornamelijk uit losgepakt zand bestaat. Hier is een amplificatiefactor van 2 gevonden, bij een uit de dempingsvergelijkingen afgeleide maximum versnelling van 0,12 g.

Als benadering kan in dit geval gebruik gemaakt worden van relaties die de spectraal acceleratie weergeven in relatie tot de frequentie of periode van de trilling (Figuur 4.3).



Figuur 4.2: Amplificatiefactor in relatie tot PGA (USA-DOD, 1997)



Figuur 4.3: Bepaling van frequentieafhankelijke amplificatiefactor (IBC, 2000). A_a en A_v zijn de spectraal versnellingen bij respectievelijk korte perioden en bij 1 seconde. De factoren F_a en F_v voor slappe grond zijn weergegeven in Tabel 4.1

De in de International Building Code gehanteerde lokale amplificatiefactoren in Figuur 4.3 voor slappe grond zijn in tabel 4.1 gegeven.

Tabel 4.1 Locale amplificatiefactor

PGA ($\approx A_a$) [g]	≤ 0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
F_a	2.5	1.7	1.2	0.9	Noot b
F_v	3.5	3.2	2.8	2.4	Noot b

Noot b: in deze gevallen dient een locatiespecifiek onderzoek te worden uitgevoerd

Slappe grond wordt hier ingedeeld in categorie E, gedefinieerd als een profiel met de eigenschappen:

- Schuifgolfsnelheid kleiner dan 180 m/s;
- SPT slagnummer N kleiner dan 15 (komt overeen met 6 - 10 MPa);
- Ongedraineerde schuifsterkte kleiner dan 50 kPa.

of ieder profiel met een laag van meer dan 3 m dik met de volgende eigenschappen:

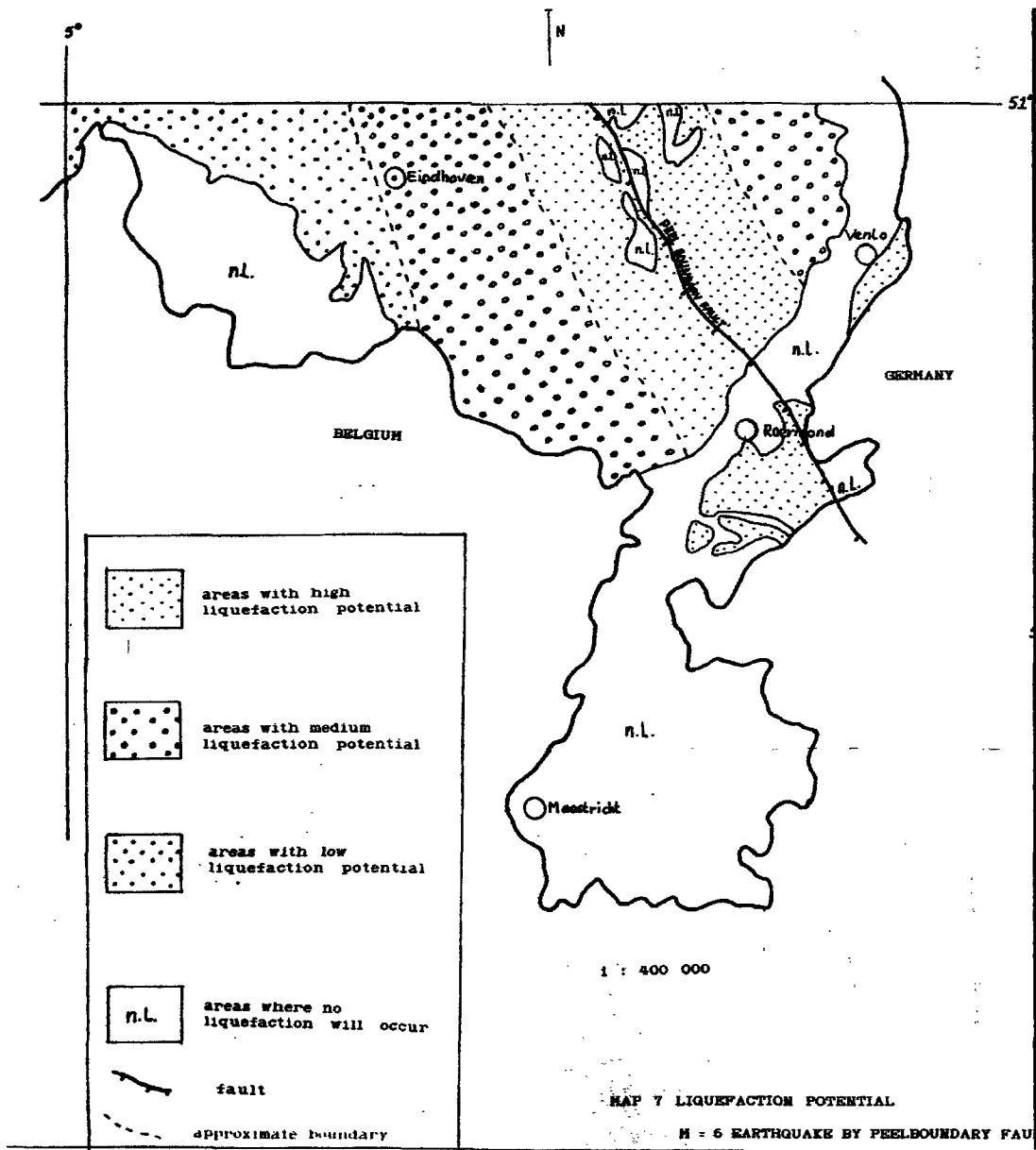
- Plasticiteitsindex groter dan 20;
- Watergehalte groter dan 40%;
- Ongedraineerde schuifsterkte kleiner dan 25 kPa.

Hierbij wordt geëist dat op locaties met bijvoorbeeld veenlagen dikker dan 3 m of slappe klei dikker dan 35 a 40 m, een locatie-specifiek onderzoek plaats moet vinden, bijvoorbeeld door toepassing van SHAKE op het locale bodemprofiel.

4.3 Verweking

Verwekingssgevoelige gronden komen voor als losgepakte zandige geulopvullingen en als rivierduinen en dekzanden, voorzover deze zich onder de grondwaterspiegel bevinden.

Reeds in 1987 is door Lap aangetoond dat in de ondergrond van ZO-Nederland over een aanzienlijke oppervlakte verwekingsgevoelige afzettingen voorkomen (zie Figuur 4.4). Lap hield echter geen rekening met slappe geulopvullingen in het gebied met rivierafzettingen. Door De Bie is de schade aan de Maasdijk bij Asselt (zie Foto 1) in detail onderzocht (De Bie, 2001). Er werd geconcludeerd dat de schade voornamelijk door verweking van de losgepakte zandlaag onder de dijk is veroorzaakt. Verweking is tevens uit zandvulkaantjes geconstateerd aan de rivierzijde van de dijk en op enige afstand achter de dijk (Foto 2). Of de schade is veroorzaakt door zetting, spreiding of afschuiving is uit het onderzoek niet gebleken.



Figuur 4.4: Verwekingsgevoeligheid in Zuid-Oost Nederland bepaald door Lap (1987)

De methode van Seed & Idriss om de verwekingsgevoeligheid te bepalen, die door De Bie is gebruikt, is beschreven in het rapport van Lindenberg (Lindenberg, 1996). Hieruit blijkt dat voor een versnelling van 0,12 g de relatieve dichtheid van ondiepe (<10 m) zandlagen lager dan of gelijk aan 20 à 30 % moet zijn om verweking te veroorzaken. Wanneer er rekening gehouden wordt met opslinging in een slap holocene pakket kan deze bovengrens hoger liggen, waardoor het aantal locaties waar verweking kan optreden kan toenemen.

Opgemerkt moet worden dat voor het ontstaan van verweking de grond een aantal trillingscycli moet doorlopen, zoals dit wel gebeurt bij de tektonische aardbevingen uit het brongebied van de Roerdalslenk. De aan gaswinning gerelateerde bevingen kenmerken zich, zoals uit het seismogram blijkt (zie figuur 3.7), door een korte puls. Het is daarom onwaarschijnlijk dat zich hierdoor een situatie van verweking voor zal doen.



Foto 2 Zandvulkaantjes

4.4 Voorkomen van grondslagen

De variabelen die het risico van instabiel worden van dijklichamen bij aardbevingen bepalen zijn:

1. de kracht en de duur van de aardbeving.
2. de samenstelling van de Holocene deklaag op de oudere ondergrond, met name het contrast tussen de slappe bovenlaag en de dichte ondergrond.
3. de dikte van de slappe bovenlaag.

Allereerst dienen de termen “dichte ondergrond” en “contrast” helder te worden gedefinieerd. Ook moet duidelijk worden bij welke minimale dikte van de slappe bovenlaag opslinging plaats kan vinden en welke grondsoorten gevoelig zijn voor verweking. Bij de opstelling van de definities is gebruik gemaakt van de IBC 2000. Hieronder worden de lagen samengevat die voldoen aan de voorwaarden voor een van de bovenbeschreven effecten.

Dichte ondergrond bestaat uit zand met een conusweerstand $> ca. 20$ [MPa] of uit klei/leem met een voortplantingssnelheid van de schuifgolven die groter is dan $ca. 360$ [m/s]. Het betreft afzettingen uit het Pleistoceen of ouder met uitzondering van dekzand, rivierduinen en Laat-Glaciale rivierklei (resp. Laagpakketten van Wierden en Delwijnen uit de Formatie van Twente en Laag van Wijchen uit de Formatie van Kreftenheye).

1. De **slappe bovenlaag** bestaat uit Holocene afzettingen van de Formaties van Echteld (rivier-afzettingen), Naaldwijk (mariene afzettingen) en Nieuwkoop (veen in de kust- en riviervlakte). Daarnaast omvat de slappe bovenlaag Holocene beekafzettingen en veen, veen op de waterscheidingen, stuifzand, dekzand, rivierduinzand en Laat-Glaciale rivierklei (resp. de Laagpakketten van Singraven, Kootwijk, Griendtsveen, Wierden en Delwijnen uit de Formatie van Twente en de Laag van Wijchen uit de Formatie van Kreftenheye).
2. Er is altijd sprake van een **contrast** tussen de slappe bovenlaag en de dichte ondergrond behalve als de slappe bovenlaag bestaat uit zand $> 105 \mu\text{m}$.
3. De **minimale dikte van de slappe ondergrond voor opslingering** bedraagt 3 m (IBC 2000).
4. Matig tot los gepakt met water verzadigd, niet tot zwak grindhoudend silt en zand $< 210 \mu\text{m}$ in de slappe bovenlaag wordt opgevat als **materiaal dat gevoelig is voor vervloeijing**. Voor met water verzadigd rivierduinzand wordt een ondergrens van $420 \mu\text{m}$ aangehouden vanwege de homogene korrelgrootteverdeling en de 'omringing' van het zand met slecht doorlatend materiaal waardoor het water niet weg kan.

Op grond van de definities 1-4 en de verspreiding van de formaties in de ondergrond van Nederland kan geconcludeerd worden dat er in het gebied van de grote rivieren, maar ook in de beekdalen gebieden zijn waar aan de voorwaarden voor opslingering en/of verweking, een slappe holocene laag op een stijve pleistocene of oudere ondergrond, wordt voldaan. In het gebied in de directe omgeving van de Roerdalslenk komt deze situatie met name voor in opgevulde geulen. Ten westen van Nijmegen wordt het voorkomen van deze situatie frequenter. Naar het westen toe wordt tevens de dikte van het holocene pakket groter. In de gebieden in Noord-Nederland, waar zich de gasgerelateerde bevingen voordoen komen deze situaties eveneens voor.

Verweking kan mogelijk lokaal optreden in ondiep gelegen rivierduinen (definitie 5), maar ook zandige geulopvullingen kunnen aan de voorwaarden voldoen.

4.5 Conclusies

In het rivierengebied en de gebieden met holocene mariene afzettingen komen situaties voor waar aan de voorwaarden voor opslingering en/of verweking wordt voldaan. Er bestaat momenteel geen kaart waarop de bovengenoemde situaties zijn weergegeven. Aangezien het optreden van schade aan waterkeringen door deze effecten een lokaal fenomeen is, namelijk waar de combinatie van inkomende versnelling en waterkering op ongunstige grondslag hiertoe aanleiding geeft, wordt voorgesteld om lokaal onderzoek te doen naar het voorkomen van deze combinaties en de uit de empirische en generieke rekenregels getrokken conclusies te verifiëren met modelberekeningen van deze geïdentificeerde locaties.

5 Stabiliteit waterkeringen tijdens aardbevingen

5.1 Inleiding

Bij het bepalen van de mogelijke invloed van aardbevingen op de faalkans van dijken en kaden en op de veiligheid tegen overstromen gaat het erom of de aardbeving dusdanige schade aan de dijk kan veroorzaken dat overstroming direct of indirect (bijv. twee weken na de beving omdat de schade nog niet is hersteld) optreedt. In dit hoofdstuk komen achtereenvolgens aan de orde: het referentie kader (paragraaf 5.2) en een analyse van de stabiliteit (paragraaf 5.3). Bij de behandeling zal onderscheid worden gemaakt in de drie regio's die onderwerp zijn van deze oriënterende studie.

5.2 Referentiekader

Per regio wordt in het vervolg gerefereerd aan kansen en frequenties. Voor de achtergronden wordt verwezen naar hoofdstuk 2.1.

In hoofdstuk 4 zijn de effecten in de ondiepe ondergrond beschreven. Het betreft de versnellings amplificatie en de invloed van waterspanningsopbouw en verweking op het gedrag van de waterkering. Omdat het optreden van beide effecten in sterke mate afhankelijk is van de lokale bodemcondities, wordt er hierna bij de beschouwing van de drie regio's niet in detail op ingegaan. Voor de regio Roermond is vooralsnog een opslingeringseffect conform Tabel 4.1 ingevoerd. Voor de andere twee regio's is geconcludeerd dat opslingering geen (additionele) rol speelt omdat het reeds in de randvoorwaarden is verdisconteerd. De eventuele locale invloed van verweking zal in later stadium moeten worden onderzocht.

Roermond

Beschouwd worden de recent aangelegde hoogwaterkaden waarbij als uitgangspunt fungeert het vereiste veiligheidsniveau $1/250$ voor het MHW. De gekozen werkwijze bestaat uit het toetsen van de vooraf geformuleerde stelling dat een aardbeving met een overschrijdingsfrequentie $1/250$ per jaar met tegelijk optredende waterstand die jaarlijks voorkomt slechts tot zeer beperkte schade zal leiden. De kans van voorkomen van deze combinatie met een duur van het hoogwater van 2 weken bedraagt $1/250 \times 1/1 \times 1/26 = 1/6500$ per jaar. Tijdens de periode benodigd voor herstel van de (beperkte) schade moet de kans op optreden van MHW voldoende klein zijn (bij 4 weken herstel is kans op MHW $1/250 \times 1/1 \times 1/13 = 1/3250$). Indien de stabiliteits analyse de vooraf geformuleerde stelling bevestigt dan is de uitspraak gerechtvaardigd dat de invloed van aardbeving op de kans op overstroming te verwaarlozen is.

De genoemde kansen $1/6500$ en $1/3250$ zijn aanzienlijk kleiner dan de aan MHW verbonden $1/250$ per jaar. Indien schade bij de aardbeving met herhalingsstijd 250 jaar niet kan worden uitgesloten is het zinvol ook minder zeldzame bevingen te beschouwen.

Bijvoorbeeld een gemiddeld eens in de 25 jaar aardbeving in combinatie met de jaarlijks optredende waterstand (gecombineerde kans $1/25 \times 1/1 \times 1/26 = 1/650$ per jaar). Bij de analyse van de taludstabiliteit zal hierop kort worden ingegaan. In dit verband moet opgemerkt worden dat de invloed van de waterstand die eens per jaar of vaker voorkomt op de stabiliteit naar verwachting klein zal zijn.

In hoofdstuk 3 zijn de horizontale piekversnellingen a_{\max} van aardbevingen gegeven als functie van de overschrijdingsfrequentie.

Uitgegaan wordt van de piekversnelling behorende bij een beving met een overschrijdingsfrequentie 1/250 per jaar (deze wordt gelijk verondersteld aan die waarvoor 10% kans bestaat dat ze in 25 jaar wordt overschreden). Als maatgevende versnelling wordt $a_{\max} = 0,25$ g verondersteld. Deze waarde bestaat uit drie componenten namelijk $a_{\max} = 0,14$ g voor homogene bodemopbouw (interpolatie tussen a_{\max} voor 10% kans in 10 en 50 jaar, tabel 3.2) bij een amplificatiefactor $F_a = 2,15$ (interpolatie tussen $F_a = 2,5$ en $1,7$ in tabel 4.1) voor mogelijk lokale bodemcondities bestaande uit slappe grond en een reductiefactor van 1,2. De reductiefactor is ingevoerd omdat de waarde $a_{\max} = 0,14$ voor mediaan + standaardafwijking als te extreem wordt verondersteld te meer omdat bij de bepaling van maatgevende hoogwaterstanden (MHW) gebruikelijk is om van gemiddelde verwachtingen uit te gaan.

De tegelijkertijd met de ontwerp aardbeving optredende (gemiddeld één maal per jaar voorkomende) waterstand in de Maas bedraagt NAP + 24,30 m.

Voor de hoogwaterkaden is een kadehoogte van 2,5 m, een kruinniveau NAP + 26,00 m, taludhellingen 1 op 3 en een kruinbreedte 3 m als referentie gekozen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1994). De kade wordt verondersteld opgebouwd te zijn uit zand met een toplaag van klei met dikte 1 m. De tegelijk met de aardbeving $a_{\max} = 0,25$ g veronderstelde waterstand NAP + 24,30 m is meer dan één meter lager dan de normwaterstand (NAP + 25,50m). Concrete gegevens met betrekking tot stabiliteit/veiligheid zijn niet beschikbaar. Verondersteld wordt echter dat de stabiliteit bij waterstand NAP + 24,30 een reserve van 30% bezit na in acht name van de voorgeschreven procedure t.a.v. vereiste veiligheidsfactor(en). In deze fase wordt dit gedefinieerd als een stabiliteitsfactor $SF = 1,3$ ten opzichte van $SF = 1,0$ als criterium (Let wel: in relatie tot de huidige adviespraktijk betekent dit een veiligheidsfactor SF van ongeveer 1,6 waar minimaal $SF = 1,3$ wordt voorgeschreven). De 30% reserve wordt verondersteld "beschikbaar" te zijn voor de additionele belasting door de aardbeving.

Bergen/Alkmaar

In deze regio dienen zowel primaire waterkeringen als boezemkaden te worden beschouwd. Als uitgangspunt voor de boezemkaden fungeert het vereiste veiligheidsniveau 1/100 voor de maatgevende waterstand (het normpeil). De gekozen werkwijze bestaat uit het toetsen van de vooraf geformuleerde stelling dat een aardbeving met een overschrijdingsfrequentie 1/100 per jaar met een gelijktijdig optredende waterstand welke eens per jaar kan optreden, slechts tot beperkte schade zal leiden. Aannemende dat deze waterstand gedurende 2 weken optreedt is de kans van voorkomen van deze combinatie $1/100 \times 1/1 \times 1/26 = 1/2600$.

Tijdens de periode benodigd voor herstel van de (beperkte) schade moet de kans op optreden van het normpeil voldoende klein zijn (bij 4 weken herstel bedraagt de kans $1/100 \times 1/13 = 1/1300$). Indien de stabiliteitsanalyse de vooraf geformuleerde stelling bevestigt dan is de uitspraak dat de invloed van aardbeving op de kans op overstroming te verwaarlozen is, gerechtvaardigd. Tevens wordt verondersteld dat de situatie bij de primaire waterkeringen minder kritiek is dan die bij de boezemkaden omdat de voor boezemkade beschouwde aardbeving met magnitude $M_L = 3,8$ als absoluut maximum geldt en de reserve in stabiliteit bij primaire waterkeringen groter is vanwege de in combinatie met de aardbeving te beschouwen relatief lage waterstand ten opzichte van MHW.

In hoofdstuk 3 zijn de horizontale piekversnellingen a_{\max} van aardbevingen in het noorden van ons land gegeven als functie van de magnitude. Uitgegaan wordt van de volgende karakteristieken:

- een magnitude $M_L = 3,0$ of groter heeft in geheel Nederland een jaarlijkse kans van 0,4 (gemiddeld één in de 2,5 jaar). De bijbehorende piekversnelling is $2,0 \text{ m/s}^2$ (mediaan + standaardafwijking);
- als maximum magnitude wordt $M_L = 3,8$ verondersteld met een bijbehorende piekversnelling van $a_{\max} = 3,2 \text{ m/s}^2$ (mediaan + standaardafwijking);
- de bevingen zijn zeer kortdurende (circa 0,1 s) en omvatten slechts één hevige puls. Voor deze bevingen als gevolg van delfstofwinning behoeft geen amplificatiefactor te worden toegepast;
- de bevingen in het noorden worden over een relatief klein oppervlak gevoeld (met name de hiervoor genoemde a_{\max}).

Het probleem van de geïnduceerde bevingen in het noorden (met name die in de omgeving van Alkmaar) is dat er zeer weinig gegevens over beschikbaar zijn. Het feit dat deze bevingen slechts over een klein oppervlak worden gevoeld zou normaliter aanleiding zijn om intensiteitsniveaus af te leiden, ware het niet dat de mogelijkheid dat de bevingen locatie gebonden zijn niet kan worden uitgesloten. Het betekent dat vooralsnog van een conservatieve “ontwerp” aardbeving uitgegaan moet worden: $M_L = 3,8$ en $a_{\max} = 3,2 \text{ m/s}^2$ (mediaan + standaardafwijking) en een herhalingstijd van 100 jaar.

Als locatie wordt de Schermerboezem beschouwd. De waterstand in deze boezem is slechts aan relatief kleine wisselingen (orde dm's) onderhevig. Het normpeil (frequentie 1/100 per jaar) bedraagt NAP – 0,20 m, het jaarlijkse peil ca. NAP – 0,40 m. Veiligheidshalve wordt daarom van het normpeil NAP – 0,20 m uitgegaan. Het kruinniveau van de boezemkade ligt circa 2,5 m boven polderniveau en de taludhelling is ongeveer 1 op 2. De kaden zijn voornamelijk uit kleiig materiaal opgebouwd. Een in 1986 uitgevoerd onderzoek naar de veiligheid wijst uit dat de stabiliteitsfactor SF, gebaseerd op gemiddelde parameters (uit celproeven), minimaal 1,40 bedraagt bij hoge boezemwaterstand. In het kader van deze oriënterende analyse wordt verondersteld dat de stabiliteit van de kaden bij een waterstand gelijk aan normpeil een reserve van 10% bezitten (na in acht name van de voorgeschreven procedure vereiste veiligheidsfactor(en)). Op basis van de met SF = 1,0 gedefinieerde norm is de veiligheidsfactor voorafgaand aan het optreden van de aardbeving daarmee SF = 1,1.

Groningen+Roswinkel

Voor deze regio wordt van dezelfde ontwerp aardbeving uitgegaan als bij Alkmaar. Dus ook hier $M_L = 3,8$ en $a_{\max} = 3,2 \text{ m/s}^2$ (mediaan + standaardafwijking) en een herhalingsperiode van 100 jaar.

Ook voor deze regio wordt verondersteld dat de condities bij boezemkaden (relatief) kritieker zijn dan bij de primaire waterkeringen. Als referentie voor de stabiliteitsbeschouwing wordt de Tussenklappenpolder beschouwd met een dijk/kade van 2 meter hoog en taludhelling 1 op 2. Gegevens over de huidige stabiliteit van deze kade zijn niet beschikbaar. Voor de waterstanden wordt uitgegaan van het normpeil NAP + 1,42 en de jaarlijks optredende waterstand ongeveer NAP + 0,70 m. Hoewel geen gegevens over de huidige kade stabiliteit beschikbaar zijn wordt er, evenals bij Alkmaar, van uitgegaan dat stabiliteitsfactor voor de taluds 10% reserve bezit bij normpeil in de boezem. Omdat de jaarlijks optredende waterstand 0,70 m lager is dan het normpeil wordt aangenomen dat de stabiliteit in die situatie 20% reserve bezit (na in acht name van de voorgeschreven procedure vereiste veiligheidsfactor(en), overeenkomend met $SF = 1,2$ ten opzichte van minimaal $SF = 1,0$ als eis).

5.3 Analyse van de taludstabiliteit bij ontwerp aardbeving(en)

Voor het adequaat functioneren van een dijk is het van belang dat de aardbeving niet tot kruinverlaging leidt. Tevens dat de schade beperkt blijft zodat een eventueel hoogwater tijdens de herstelperiode na optreden van de aardbeving niet tot doorbraak kan leiden.

In de analyse wordt de taludstabiliteit als maatgevende karakteristiek beschouwd. Indien tijdens de beving niet aan het stabiliteitscriterium wordt voldaan kan er afschuiving optreden. Omdat de aardbevingsbelasting slechts van zeer korte duur is, zal ook de neiging tot beweging van de afschuivende moot ten opzichte het dijklichaam kortdurend zijn. Hierdoor zal overschrijding van het stabiliteitscriterium in het algemeen slechts in een kleine relatieve verplaatsing resulteren. Voor het afschatten van het gedrag van de dijk/kade tijdens aardbeving wordt in deze oriënterende fase gebruik gemaakt van eenvoudige methoden. Omdat het talud hierbij oneindig lang wordt verondersteld zijn de resulterende stabiliteitsfactoren conservatief.

De analyse bestaat uit de volgende twee onderdelen (zie Lindenberg, J., 1996):

- de stabiliteitsberekening voor een oneindig lang talud waarin de aardbevingsbelasting als een horizontale massakracht wordt gesimuleerd. De berekening resulteert in de stabiliteitsfactor SF bij de bij a_{\max} behorende massakracht. Indien deze SF kleiner dan 1 is (d.w.z. de taludstabiliteit is niet verzekerd) wordt tevens de waarde voor de versnelling berekend waarbij juist voldaan wordt aan de stabiliteitsvoorwaarde ($SF = 1$).
- de verplaatsingsberekening waarmee een bovengrensschatting wordt verkregen van de relatieve verplaatsing van de afschuivende moot ten opzichte van het dijklichaam. De verplaatsingsberekening is alleen relevant indien de stabiliteitsfactor voor a_{\max} een waarde kleiner dan 1 bezit. De schatting voor de verplaatsing resulteert uit de integratie van het (geschematiseerde) versnellingsverloop vanaf de versnelling a waarvoor $SF = 1$ geldt.

In werkelijkheid bestaat een dijk uit een buiten- en een binnentalud van eindige lengte. Relatieve verplaatsing van het afschuivende deel betekent een neiging tot uitzakking van (eventueel) beide taluds. Dus een neiging tot uit elkaar bewegen van beide taluds welke met zakking van de kruin gepaard kan gaan. De gebruikte rekenmethode levert voor de Nederlandse condities een kleine relatieve verplaatsing op. In die gevallen is verticale scheurvorming in taluds en kruin mogelijk; een schadepatroon dat in dijken en dammen in aardbevingsgevoelige gebieden regelmatig wordt waargenomen.

De analysemethode bestaande uit opvolgende stabiliteits- en verplaatsingsberekeningen is in de internationale literatuur meerdere malen beschreven (Makdisi, F.I. & Seed, H.B. 1978; Committee on Earthquake engineering, 1985; N.N. Ambraseys & J.M. Menu, 1988). In Ambraseys, N.N. & Menu, J.M., 1988, worden tevens berekende verplaatsingen vergeleken met in het veld waargenomen schadepatronen.

In de stabiliteitsberekening wordt de schuifweerstand van het dijkmateriaal ingevoerd. In deze oriënterende fase wordt volstaan met een hoek van inwendige wrijving $\phi = 30^\circ$. Deze waarden zijn ongeveer representatief voor zand als gemiddelde waarde respectievelijk ondergrenswaarde. Voor de schuifweerstand van klei en veen is behalve de hoek van inwendige wrijving ook de cohesie c van belang. Vooralsnog wordt in deze oriënterende fase verondersteld dat de resultaten voor (alleen) $\phi = 30^\circ$ ook van toepassing zijn voor cohesieve grond. Dit is in het algemeen een conservatieve aanname voor de drie beschouwde locaties vanwege het feit dat de kaden een relatief lage kerende hoogte bezitten.

Bij aanwezigheid van losgepakt zand moet afzonderlijk de mogelijkheid van het ontstaan van verweking en de invloed daarvan op de respons van de dijk/kade worden beschouwd. Aan dit aspect is vooralsnog geen aandacht besteed omdat:

- in kaden en ondergrond (ondiep tot ca. 5 m onder maaiveld) in Alkmaar en Groningen slechts sporadisch losgepakt zand aanwezig zal zijn;
- het zand in de hoogwaterkade Roermond waarschijnlijk niet verzadigd is bij de tegelijk met het optreden van de aardbeving veronderstelde (relatief lage) waterstand. In het algemeen zal de mogelijkheid van verweking in de natuurlijke bodem onder de kaden eveneens beoordeeld moeten worden voor zover het de stabiliteit van deze kaden kan beïnvloeden. Dit dient een punt van nader onderzoek te zijn van een aansluitende studie waarbij de mogelijkheid van (soms zeer) lokaal ongunstige bodemcondities moet worden beschouwd.

Tijdens de aardbeving van 1992 bij Roermond zijn omvangrijke scheuren in de Maasoever opgetreden. Geconcludeerd is dat dit waarschijnlijk (mede) door verweking van het onderliggende zand is veroorzaakt (De Bie, 2001)(Lindenberg, 1996).

De toepassing van de voornoemde analysemethode levert voor de drie onderscheiden regio's de volgende resultaten op:

Roermond

Voor $a_{\max} = 0,25$ g, taludhelling 1 op 3 en een hoek van inwendige wrijving $\phi = 30^\circ$ volgt uit de stabiliteitsanalyse voor een oneindig lang talud een SF waarde van 0,91. De bij SF = 1,0 behorende waarde voor a bedraagt 0,21 g en zonder aardbeving ($a = 0$) is SF = 1,73.

Bij $a > 0,21$ g is SF < 1,0 en is er een neiging tot afschuiven. De hiervoor genoemde verplaatsingsberekening (N.N. Ambraseys & J.M. Menu, 1988; Lindenberg, J., 1996) resulteert in een totale (relatieve) verplaatsing van ongeveer 8 mm (6 trillingscycli met periode 0,5 s). Na afloop van de aardbeving is het talud weer stabiel.

Een andere globale aanpak is het relateren van SF = 1,73 bij $a = 0$ (voor een oneindig lang talud) aan de veronderstelde 30% reserve in stabiliteit bij de gelijktijdig met de aardbeving aangenomen waterstand (en in acht name van de vereiste veiligheidsfactoren). Hieruit volgt dan dat de bij SF = 1,0 behorende waarde voor a gelijk is aan 0,08 g. Voor deze meer conservatieve grenswaarde volgt een totale relatieve verplaatsing van ongeveer 40 mm.

De schattingen voor de relatieve verplaatsing 8 mm en 40 mm zijn gebaseerd op de combinatie aardbeving – waterstand met een zeer kleine kans van voorkomen 1/6500 per jaar in relatie tot de veiligheidsnorm 1/250 voor het MHW. Indien de aardbeving met herhalingsijd 25 jaar, waarvoor geldt dat $a_{\max} = 0,16$ g (bovengrens inclusief opslingerings-effect 2,5 en reductie 1,2) met de jaarlijks optredende waterstand wordt gecombineerd (kans per jaar 1/650) dan resulteert een relatieve verplaatsing van maximaal 10 mm.

Vanwege de sterk geschematiseerde doch conservatieve methode voor berekening van de verplaatsing betreffen genoemde relatieve verplaatsingen van orde één of enkele cm's een bovengrens. Hierbij dient te worden opgemerkt dat het ontstaan van wateroverspanning en verweking bij aanwezigheid van losgepakt zand onder de kaden (nog) niet is beschouwd. De in 1992 bij Asselt waargenomen scheur in de Maaskade met relatief grote afmetingen illustreert dat onder specifieke omstandigheden aanzienlijk grotere verplaatsingen kunnen optreden dan de hiervoor genoemde 40 mm. Omdat analyse van waterspanningsgeneratie en verweking inzicht in lokaal (ongunstige) bodemcondities vereist dient dit een onderwerp van nadere studie in een vervolgfase te zijn.

Het betekent dat de uitkomsten van de onderhavige oriënterende studie zodanig zijn dat nu niet kan worden uitgesloten dat zodanige schade optreedt dat de kans op doorbraak en overstroming wordt beïnvloed. Gezien de veilige aanpak is de verwachting dat dit in een latere, meer gedetailleerde fase wel het geval zal zijn. Belangrijke elementen daarbij zijn:

- definitie van de “ontwerp aardbeving”. Onder andere betreft dit de mate waarin onzekerheid daarin moet worden meegenomen. In de onderhavige oriënterende studie is uitgegaan van een bovengrens (mediaan + standaardafwijking). Opgemerkt wordt dat bij de vaststelling van MHW in het algemeen van de verwachtingswaarde wordt uitgegaan;

- De schattingen voor de relatieve verplaatsing zijn onder meer gebaseerd op de aanname dat de kade 30% stabiliteitsreserve bezit bij jaarlijks optredend hoogwater. Bij een nadere uitwerking zal deze aanname aan de hand van een concreet geval dienen te worden getoetst;
- Gebruik van minder conservatieve analyse- en berekeningsmethoden waarmee de werkelijkheid beter wordt benaderd.

Bergen/Alkmaar

Voor $a_{\max} = 0,32$ g, taludhelling 1 op 2 en een hoek van inwendige wrijving $\phi = 30^\circ$ volgt uit de stabiliteitsanalyse voor een oneindig lang talud en SF waarde 0,67. De bij SF = 1,0 behorende waarde voor a bedraagt 0,06 g en zonder aardbeving ($a = 0$) is SF = 1,15.

Duidelijk is dat de versnelling $a_{\max} = 0,32$ g kortstondig tot een zeer instabiele conditie in de boezemkade leidt. Te meer omdat op basis van de ontwerpsituatie (zonder aardbeving) slechts weinig stabiliteitsreserve beschikbaar is. De veronderstelde 10% reserve is ruim onvoldoende.

De beving is echter slechts van zeer korte duur en omvat maar één puls. Invoering van deze gegevens in een verplaatsingsberekening levert een zeer kleine relatieve verplaatsing namelijk maximaal ongeveer 1 mm. Dit is aanzienlijk minder dan de relatieve verplaatsing die nodig is om in een potentieel glijvlak tot bezwijken te leiden. Met andere woorden bezwijken treedt hoogstwaarschijnlijk niet eens op. Hiermee komt tevens een belangrijke tekortkoming van de gebruikte stabiliteitsberekening naar voren omdat grond daarin als niet-vernervormend medium wordt beschouwd.

Op basis hiervan wordt de verwachting uitgesproken dat de gasbevingen in het noorden van ons land vanwege de karakteristieke kenmerken (zeer korte duur, slechts één puls) geen of verwaarloosbare invloed uitoefenen op de kans op doorbraak en overstroming van boezemkaden. Vanwege de minder kritieke condities geldt deze verwachting tevens voor de primaire waterkeringen in de regio Bergen/Alkmaar. Vanwege het sterk oriënterende karakter van de onderhavige studie dient dit evenwel bij een later uit te voeren nadere analyse te worden bevestigd.

Groningen+Roswinkel

De procedure is dezelfde als die voor de regio Alkmaar. Ook de uitkomsten zijn ongeveer hetzelfde. Vanwege de veronderstelde grotere reserve in stabiliteit (20% in plaats van 10%) zal de neiging tot relatieve verplaatsing in het talud nog iets kleiner zijn. De hiervoor voor Alkmaar geformuleerde voorlopige conclusie dat de gasbevingen naar verwachting geen invloed hebben op de kans op doorbraak geldt ook voor Groningen/Roswinkel. Deze uitkomst is van toepassing voor zowel de boezemkaden als de primaire waterkeringen in de regio Groningen + Roswinkel.

6 Discussie

6.1 Inleiding

De kans op een beving is uiteraard voor de verschillende regio's anders. Ook de grondversnellingen en de versterkingsfactoren zijn niet gelijk. In onderstaande tabel 6.1 is een samenvatting gegeven van de voor de analyse van de waterkeringen ingevoerde waarden voor de belasting (zie hoofdstuk 5).

Tabel 6.1 Frequenties en bijbehorende belastingen van "ontwerp" aardbevingen

Regio	Kans op een beving	Grondversnelling	Versterkingsfactor
Roermond	0,004/jaar	2,5 m/s ²	2,5
Alkmaar/Bergen	0,01/jaar	3,2 m/s ²	1
Groningen+Roswinkel	0,01/jaar	3,2 m/s ²	1

Dit heeft geresulteerd in de conclusie dat schade aan dijken beperkt zal blijven: verplaatsingen in de orde van 10 mm (maximaal 40 mm), maar daarbij zijn een aantal kanttekeningen te maken. In dit hoofdstuk zal daar nader op worden ingegaan.

Daartoe zal eerst de vigerende wetgeving worden aangehaald.

6.2 Vigerende wetgeving en richtlijnen

In paragraaf 2.2 is reeds ingegaan op het gestelde in de Leidraad Bovenrivieren (TAW, 1985). Op basis daarvan is gesteld dat het gelijktijdig optreden van een significante aardschok en een met MHW overeenkomend hoogwater een zodanig lage kans van voorkomen heeft dat daar niet naar behoeft te worden gekeken.

In de Wet op de Waterkeringen (Min. v&W, 1996) staan "voor elk dijkkringgebied veiligheidsnormen aangegeven als gemiddelde overschrijdingskans per jaar van de hoogste hoogwaterstand waarop de tot directe kering van het buitenwater bestemde primaire waterkering moet zijn berekend, mede gelet op het waterkerend vermogen bepalende factoren" (art 3.1).

In art 3.2 wordt aangegeven dat bij algemene maatregel van bestuur de veiligheidsnorm zal worden aangegeven als gemiddelde kans per jaar op een overstroming door het bezwijken van een primaire kering. Vooralsnog is deze maatregel niet afgekondigd. In een begeleidende brief aan de staatssecretaris bij de aanbieding van het rapport "Van overschrijdingskans naar overstromingsrisico" concludeert de TAW dat het nog te vroeg is om over te gaan op de nieuwe veiligheidsnorm.

In de onderhavige studie wordt echter nadrukkelijk gevraagd om het overstromingsrisico aan te geven samenhangend met een aardbeving.

In de Leidraad Toetsen op Veiligheid (TAW, 1999) wordt in Katern 3, paragraaf 6 ingegaan op aardbevingen als belasting bij dijken, evenals de mogelijke gevolgen voor een dijk in relatie tot overstromen. Geconcludeerd wordt dat de kans op falen van de waterkering zo klein is dat het belastingsgeval “aardbeving” kan worden genegeerd. Deze conclusie wordt getrokken op basis van de door Lindenberg in 1996 uitgevoerde studie.

In het onderhavige oriënterende onderzoek kan deze conclusie nog niet definitief worden bevestigd. De belangrijkste reden is dat de maatgevende aan een aardbeving verbonden karakteristiek, de horizontale piekversnelling aan het bodemoppervlak, nu aanzienlijk hoger wordt ingeschat dan indertijd bij het opstellen van de tekst voor de Leidraad Toetsing. Dit heeft een aantal oorzaken namelijk:

- de onzekerheid in de aardbevingsbelasting is, in tegenstelling tot het onderzoek waarop de Leidraad Toetsing is gebaseerd, meegenomen door het toevoegen van de geschatte standaardafwijking aan de gemiddelde waarde voor de piekversnelling. Opgemerkt wordt dat bij de vaststelling van MHW in het algemeen van de verwachtingswaarde wordt uitgegaan;
- het amplificatie- of opslingerings-effect bij aanwezigheid van slappe bodemcondities is nu aan de piekversnelling toegevoegd. Begin jaren negentig was dit (op zijn minst) nog niet gebruikelijk;
- In het oriënterende onderzoek is de mogelijke invloed op de kans op overstromen beschouwd van de gasgeïnduceerde bevingen in het noorden van ons land (regio's Alkmaar en Groningen/Roswinkel). In het onderzoek dat als basis voor de Leidraad Toetsing heeft gediend, is daaraan geen aandacht geschonken;
- In de oriënterende analyse is meer dan in het onderzoek voorafgaand aan de Leidraad Toetsen, de sterktereserve bij alleen waterstand als ingang gehanteerd. Dit was vooral noodzakelijk bij de analyse van de boezemkaden (regio's Alkmaar en Groningen).
- In de oriënterende studie is een combinatie aardbeving – waterstand ingevoerd waarvan de kans van voorkomen is gerelateerd aan de normfrequentie voor MHW. Vooralsnog is hierbij van conservatieve waarden uitgegaan.

Voor het bepalen van het gedrag van de waterkering is een eenvoudige analysemethode gebruikt. Ondanks dat de hiermee verkregen uitkomsten belangrijk zullen afwijken van het werkelijke gedrag, is deze werkwijze acceptabel vanwege het oriënterende karakter van de studie en omdat de methode tot conservatieve resultaten leidt.

In het algemeen kan de schade aan de waterkering tijdens of kort na een aardbeving in negatieve zin worden beïnvloedt door de aanwezigheid van losgepakt zand in, onder of direct naast de dijk als gevolg van het ontstaan van wateroverspanning of verweking in dit zand. Bij de analyse van de drie onderscheiden regio's is hieraan nog geen kwantitatieve invulling gegeven. In een volgende fase zal aan dit aspect aandacht moeten worden besteed waarbij specifieke bodemcondities in mogelijke risicolocaties dienen te worden beschouwd.

Opgemerkt wordt dat voor 3 regio's een oriënterende studie is gedaan en niet voor “de rest van Nederland”. Deze waren geen onderwerp van het onderhavig onderzoek, maar het is van belang te benadrukken dat aardbevingen in het algemeen ook van belang zijn voor de “rest van Nederland”.

De eventuele invloed op de veiligheid tegen overstromen dient dus voor een groter gebied te worden vastgesteld. Dit betreft dan met name de rivierdijken in het boven- en benedenrivierengebied onder invloed "uitgestraalde" bevingen vanuit het zuid-oosten.

Voor zover bekend wordt niet over aardbevingen gesproken in andere wet- en regelgeving.

Voor kades is de IPO richtlijn relevant, maar in grote lijnen conformeert de IPO zich aan de TAW benadering voor het veiligheidsniveau. Wel stelt de TAW in een advies dat bij een risicobenadering een breed afwegingskader moet worden gehanteerd, want juist bij boezemkaden kan een actief peilbeheer grote invloed hebben op de faalkans vanwege de invloed op de boezemstatistiek.

6.3 Veiligheid tegen overstromen

Als referentiekader voor de beoordeling van de veiligheid is uitgegaan van de volgende veiligheidsniveaus:

- regio Roermond, Maaskaden: 1/250 per jaar;
- regio's Alkmaar en Groningen/Roswinkel, boezemkaden: 1/100 per jaar.

De huidige kaden zijn ontworpen en geconstrueerd om hoogwater met een overschrijdingskans van 1/250 resp. 1/100 per jaar (het MHW = Maatgevend HoogWater) te kunnen weerstaan. Met andere woorden: zowel hoogte als stabiliteit zijn bij deze hoogwatercondities gewaarborgd. In het algemeen wordt ervan uitgegaan dat de kans op overstromen bij MHW een orde kleiner is dan het bij MHW behorende overschrijdingsfrequentie zelf.

Tot op heden werd het belastingsgeval "aardbeving" daarbij niet beschouwd. Het onderhavige onderzoek dient antwoord te geven op de vraag of het negeren ervan gerechtvaardigd is geweest.

Centraal hierbij is of een aardbeving tot zodanige schade kan leiden dat de kans op overstromen significant wordt verhoogd. Bij de hiervoor beschreven analyse is deze vraagstelling in feite omgekeerd namelijk door het toetsen van de stelling dat "de schade als gevolg van aardbeving slechts beperkt zal zijn".

Gegeven de resultaten in de hoofdstukken 3, 4 en 5 kunnen nu kansen worden berekend. Daartoe is uitgegaan van de kansbepaling zonder onderscheid in de magnitude van de aardbeving met de volgende opties:

- a) het optreden van een aardbeving tijdens een hoogwater met waterstanden groter dan een bepaald minimum;
- b) het optreden van een hoogwater in de periode van herstel na een aardbeving.

Ook is het mogelijk meerdere klassen van mogelijke aardbevingen te onderscheiden.

Verondersteld is dat aardbeving en hoogwater op zichzelf twee onafhankelijke gebeurtenissen zijn. Indien aangenomen wordt dat alleen extreme aardbevingen tot schade zullen kunnen leiden is het gezamenlijk optreden van MHW en aardbeving een gebeurtenis die niet hoeft te worden beschouwd. Te meer omdat het MHW hoogstens gedurende enkele weken optreedt. Dit betekent dat de invloed van een extreme aardbeving in combinatie met een relatief minder zeldzame - waterstand dient te worden beschouwd. Daarnaast dient de periode benodigd voor herstel van de dijk/kade te worden meegenomen. Aangenomen is dat aardbeving slechts tot zeer beperkte schade zal leiden waarbij een herstelperiode van maximaal vier weken volstaat.

Bijvoorbeeld: voor de regio Roermond wordt een aardbeving met een gemiddelde herhalingsjijd van 250 jaar beschouwd en tegelijkertijd een waterstand met overschrijdingsfrequentie 1 (ééns per jaar) die maximaal 2 weken duurt. De kans van voorkomen van deze combinatie bedraagt $1/250 \times 1/1 \times 1/26 = 1/6500$ per jaar. Indien beperkte schade optreedt is de kans dat MHW optreedt tijdens de herstelperiode gelijk aan $1/250 \times 1/13 = 1/3250$. Bij de opgetreden beperkte schade is de kans op echte doorbraak vanzelfsprekend nog aanzienlijk kleiner. Theoretisch dienen ook andere combinaties van frequenties van aardbeving en waterstand te worden beoordeeld. Echter, omdat kan worden uitgesloten dat aardbevingen met herhalingsjijd korter dan ongeveer 50 jaar een wezenlijk invloed hebben op de kans op doorbraak en omdat de vrij frequent voorkomende waterstanden in de Maas de hoogwaterkade niet of nauwelijks belasten, is het beschouwen van de $1/250$ aardbeving vooralsnog voldoende.

Ook voor de waterkeringen in de regio's Alkmaar en Groningen/Roswinkel is deze aanpak gevolgd. Vanwege de meer of minder stagnante waterstand in de boezems levert het beschouwen van de minder extreme waterstand tegelijk met de ontwerp aardbeving echter een kleiner "voordeel" op.

Op basis van het voorgaande is de conclusie dat voor de regio Roermond de periode na een beving als nog geen herstel heeft plaats gevonden van de beschadigde dijk het grootste risico oplevert, terwijl voor de regio's Bergen/Alkmaar en Groningen+Roswinkel er altijd een groot risico is vanwege het vrijwel permanent aanwezige streefpeil.

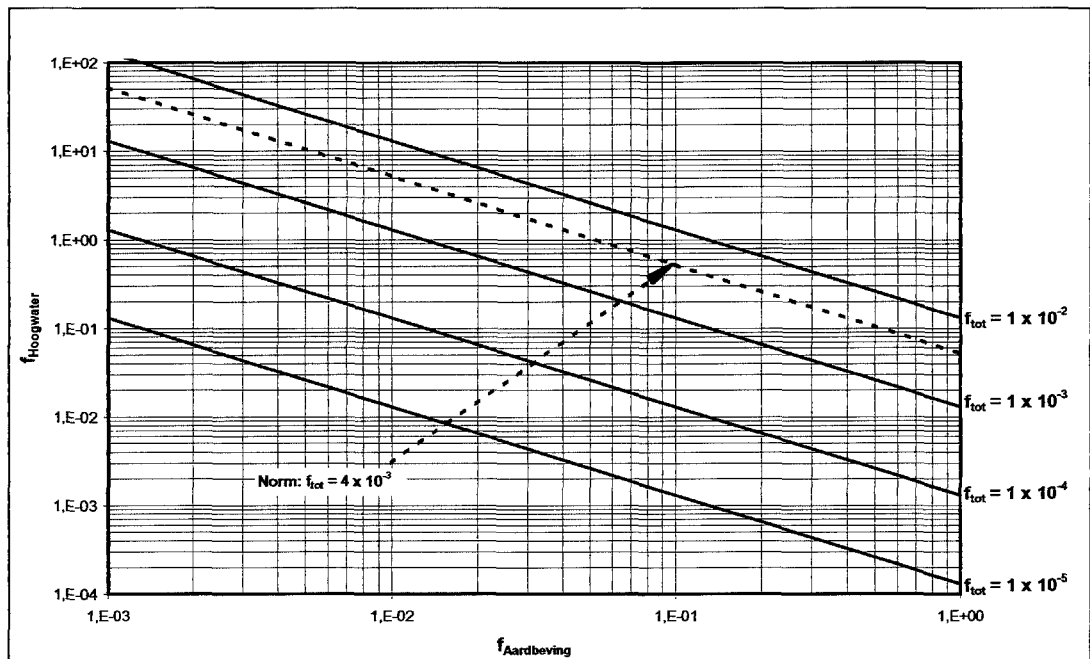
7 Conclusies en aanbevelingen

In de Leidraad Toetsen op Veiligheid (TAW, 1999) wordt ingegaan op aardbevingen als belasting bij dijken, evenals de mogelijke gevolgen voor een dijk in relatie tot overstromen. Geconcludeerd wordt dat de kans op falen van de waterkering zo klein is dat het belastingsgeval “aardbeving” kan worden genegeerd. Deze conclusie wordt getrokken op basis van de door Lindenberg in 1996 uitgevoerde studie. Naar aanleiding van recente aardbevingen is de vraag opnieuw actueel geworden.

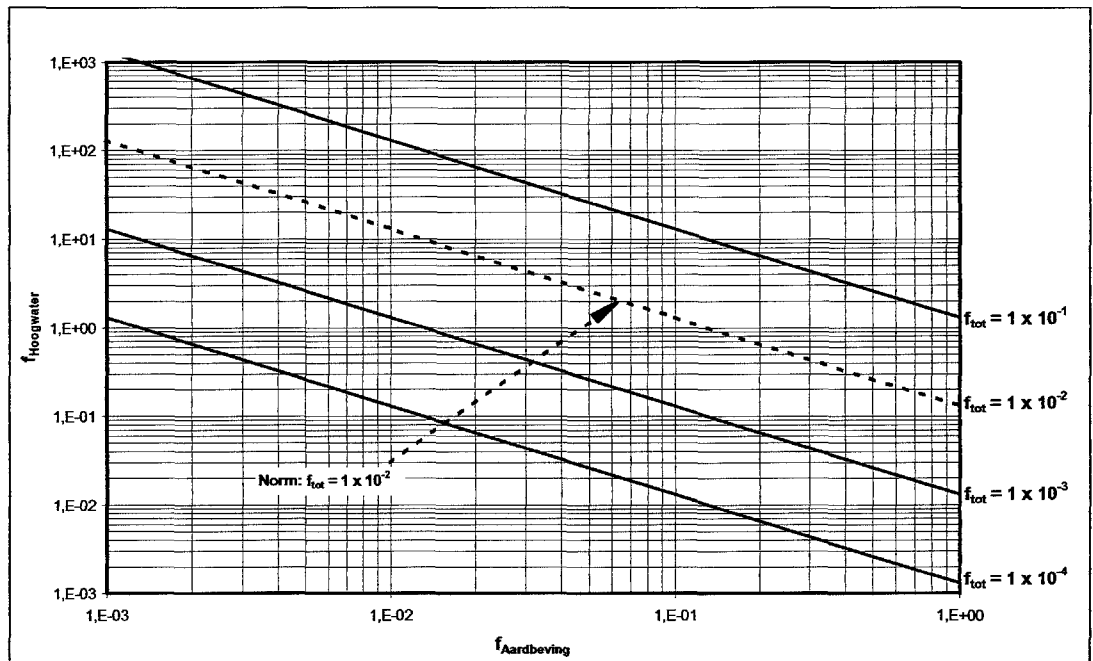
In de uitgevoerde oriënterende studie naar de invloed van aardbevingen op waterkeringen in de regio's Roermond, Bergen/Alkmaar en Groningen+Roswinkel is gebruik makend van nieuwe kennis en inzichten, opnieuw onderzocht of het inderdaad terecht is dat het belastingsgeval “aardbeving” mag worden genegeerd. Deze studie heeft geresulteerd in een aantal conclusies en aanbevelingen.

7.1 Conclusies

Hoofdconclusie van het uitgevoerde onderzoek is dat als uitsluitend wordt gekeken naar de frequenties van het gecombineerde voorkomen van extreme aardbevingen of gasgeïnduceerde bevingen én hoge waterstanden overeenkomend met MHW of normpeil, er een verwaarloosbaar kleine kans is op een verminderde veiligheid tegen overstromen. De bijbehorende frequenties zijn een orde lager dan de norm (Figuur 7.1 en Figuur 7.2).



Figuur 7.1 Gecombineerde frequentie van voorkomen voor de regio Roermond van een aardbeving en een hoog water tijdens de periode van herstel van 4 weken van de schade aan de waterkering.



Figuur 7.2 Gecombineerde frequentie van voorkomen voor de regio's Alkmaar/Bergen en Groningen+Roswinkel van een aardbeving en een hoog water tijdens de periode van herstel van 4 weken van de schade aan de waterkering.

Als wordt gekeken naar de gevolgen van een natuurlijke aardbeving of gasgeïnduceerde aardbeving dan leidt dat weliswaar tot schade aan de dijk (maximale verplaatsingen van 10-40 mm in de regio Roermond en 1 mm bij Alkmaar en in Groningen), maar deze schade is dermate gering dat de kans dat hierdoor inundatie optreedt te verwaarlozen is.

Op basis van de studie moet worden geconcludeerd dat *nu niet eenduidig* kan worden geconcludeerd dat bij de veiligheidsbeoordeling *geen* rekening moet worden gehouden met aardbevingen (natuurlijke en gasgeïnduceerde). Daarvoor zijn de volgende redenen:

1. De onderhavige studie had een oriënterend karakter en was gebaseerd op literatuur en dat impliceert onzekerheid over de exactheid van de resultaten. Deze onzekerheden hebben niet zozeer betrekking op de seismiciteit, want deze is redelijk bekend. Onzekerheid is er wel ten aanzien van onder andere:
 - Definitie van de ontwerpaardbeving en de mate waarin de onzekerheid in piekversnellingen bij de bevingen moet worden meegenomen in relatie tot wat bij hoogwaterstanden gebruikelijk is;
 - Exacte opslingerfactor, die conform de geldende praktijkbenadering is, maar bijvoorbeeld geen rekening houdt met de duur van een beving;
 - Toegepaste model voor taludstabiliteit (model houdt geen rekening met vervormingen);
 - Veronderstelde reserve in de taludstabiliteit bij de berekening.

De onzekerheden op een aantal onderdelen zijn vooralsnog conservatief ingeschat, waardoor veiligheidsfactoren kleiner dan 1 worden berekend. Echter, er is geen zekerheid of minder conservatieve inschattingen altijd tot waarden groter dan 1 zullen leiden.

2. Er is geen lokatie-specifiek onderzoek gedaan (ook niet in de beschouwde regio's) en dat betekent dat lokaal toch problemen kunnen optreden afhankelijk van ondergrond en dijkopbouw. Dat op specifieke locaties problemen kunnen ontstaan, blijkt uit de ontstane scheur in de Maasdijk bij Asselt door de beving in 1992. De nu uitgevoerde oriënterende studie "voorspelt" een dergelijke schade, die groter is dan de berekende verplaatsingen, niet. Ook voor locaties buiten de onderzochte regio's geldt dat daar mogelijk sprake kan zijn van een verminderde veiligheid. Dit houdt verband met de uitstraling van een beving.

Anders gezegd: Op basis van deze oriënterende (literatuur) studie kan *niet eenduidig* worden geconcludeerd dat schade door bevingen altijd is uitgesloten en dat derhalve nooit sprake zal zijn van een verminderde veiligheid tegen overstromen. Dat geldt voor de drie onderzochte regio's, maar risico's voor andere gebieden zijn mogelijk ook aanwezig, maar zijn in dit verslag niet nader gekwantificeerd.

Meer in detail zijn de volgende conclusies van belang:

- In de regio Roermond kunnen aardbevingen optreden met versnellingen van (inclusief standaardafwijking) $2,5 \text{ m/s}^2$ of $0,25g$ bij een overschrijdingsfrequentie van 1/250 per jaar (10% kans dat versnelling in periode 25 jaar wordt overschreden). Dit leidt tot verplaatsingen van orde 10 mm en veiligheidsfactoren voor taludstabiliteit kleiner dan 1;
- In de regio's Bergen/Alkmaar en Groningen+Roswinkel dient van een maximale piekversnelling van $3,2 \text{ m/s}^2$ te worden uitgegaan (frequentie 1/100 jaar). De zeer korte duur van deze bevingen resulteert evenwel in de uitspraak dat schade zeer onwaarschijnlijk is (verplaatsingen kleiner dan 1 mm);
- Potentiële risico locaties zijn in principe te vinden in het gehele land, maar bekend is dat in het rivierengebied en de gebieden met holocene mariene afzettingen voldaan wordt aan de voorwaarden voor opslingering en/of verweking. Potentieel risicovolle locaties worden gekenmerkt door een dichte ondergrond en een slappe bovenlaag van minimaal 3 m, terwijl de dijk bestaat uit een slappe kern en steile taluds.

7.2 Aanbevelingen

Op basis van de algemene conclusie dat eenduidige antwoorden voor de onderzochte regio's niet kunnen worden gegeven op basis van de onderhavige beperkte studie, die is gebaseerd op literatuuronderzoek, wordt aanbevolen een vervolgstudie uit te voeren. Hierbij zou voor één of meer concrete locaties moeten worden gekwantificeerd wat de effecten van een beving zijn en wat de kans op verminderde veiligheid tegen overstroming is. Aanbevolen wordt minstens ook één of meerdere karakteristieke locaties te kiezen in het rivierengebied buiten de drie onderzochte regio's.

Literatuur

- Ahorner, L., 1983a. Historical seismicity and present-day microearthquake activity of the Rhenish Massif, Central Europe. In: K. Fuchs, K. von Gehlen et al. (eds): *Plateau Uplift*. Springer, Berlin, pp. 198 – 221.
- Ahorner, L., 1983b. Protection of nuclear power plants against seismic effects, reference ground motion, practise followed in European countries. *European Appl. Res. Rept. Nucl. Sci. Technol.*, 4, 1325 – 1422.
- Alexandre, P., 1994. Historical seismicity of the lower Rhine and Meuse valleys from 600 to 1525: a new critical review. *Geologie en Mijnbouw*, 73, 431 – 438.
- Ambraseys, N.N. & Menu, J.M., 1988. "Earthquake-induced ground displacements. Earthquake engineering and structurale dynamics", Vol. 16, 985-1006.
- Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen (BOA), 1993. *Eindrapport Multidisciplinair onderzoek naar de relatie tussen gaswinning en aardbevingen in Noord-Nederland*. 76 pp.
- Berg, M. van den, K. Vanneste, BB. Dost, A. Lokhorst, M. van Eijk and K. Verbeeck, 2002. *Neth J. Geosciences / Geologie en Mijnbouw*, 81, 39-60.
- Bie, H.J.G.de, (2001), Liquefaction of a Meuse River Dike During the 1992 Roermond Earthquake, MSc Thesis, TuDelft
- BOA (Begeleidingscommissie Onderzoek Aardbevingen), 1993. *Eindrapport multidisciplinair onderzoek*
- Bungum, H., C.D. Lindholm, A. Dahle, G. Woo, F. Nadim, J.K. Holme, O.T. Gudmestad, T. Hagberg and K. Karthigeyan, 2000. New seismic zoning maps for Norway, the North Sea, and the United Kingdom. *Seismological Research Letters*, 71, 687 – 697.
- Camelbeeck, Th., 1994. Mécanisme au foyre des tremblements de terre et contraintes tectoniques à partir des données de reseaux séismiques locaux application à l'études d'unes zone intraplaque: La zone Belge. Thèse. Université Catholique de Louvain, belge. 343 pp.
- Camelbeeck, Th. and T. van Eck, 1994. The Roer Valley Graben earthquake of 13 April 1992 and its seismotectonic setting. *Terra Nova*, 6, 291 – 300.
- Camelbeeck, T., and M. Meghraoui, 1996, Large earthquakes in northern Europe more likely than once thought, *EOS, Transactions, AGU*, 77, 405,409.
- Camelbeeck, T., & Meghraoui, M., 1998, Geological and geophysical evidence for large paleoearthquakes with surface faulting in the Roer Graben (northwest Europe), *Geophysical Journal International* 132, 347-362.

- Campbell, K.W., 1997. Empirical Near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra. *Seismol. Res. Lett.*, 68, 154 – 179.
- Campbell, K.W., 2000. Erratum. *Seismol. Res. Lett.*, 71, 352 – 3554.
- Campbell, K.W., 2001. Erratum. *Seismol. Res. Lett.*, 72, 474.
- Committee on Earthquake engineering, 1985. “Liquefaction of Soils During Earthquake”, Commission on Engineering and Technical Systems, National research Council, National Academy Press, Washington DC.
- Crook, Th. De, 1996. A seismic zoning map conforming to Eurocode 8, and practical earthquake parameter relations for the Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, 75, 11-18.
- Crook, Th. de, B. Dost and H. Haak, 1998. Seismisch risico in Noord-Nederland. KNMI De Bilt TR-205.
- Crook, Th. De, 1993. Probabilistic seismic hazard assessment for The Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, 72, 1-13.
- Crook, Th. de en Wassing, B., 2001, Voorspelling van de opslingering van trillingen bij aardbevingen, *Geotechniek*, 5e jaargang, nr. 2, pp. 48-53.
- Dirkzwager, J.B., J.D. van Wees, S.A.P.L. Cloetingh, M.C. Geluk, B. Dost and F. Beekman, 2001. Geo-mechanical and rheological modelling of upper crustal faults and near 2002. surface expression in the Netherlands. *Global and Planetary Change*, 27, 67 – 83.
- Dost, B. (2001): *Aardbevingen in Nederland*
Aarde & Mens, jaargang 5, nummer 4, december 2001
- Eck, T. van and C.A. Davenport (eds), 1994. Seismotectonics and seismic hazard in the Roer Valley Graben: with emphasis on the Roermond earthquake of April 13, 1992. *Geologie en Mijnbouw*, 73, 2-4, 91-441.
- Eck, T. van and T. Stoyanov, 1996. Seismotectonics and seismic hazard modelling for southern Bulgaria. *Tectonophysics*, 262, 77 – 100.
- ENV 1998-1-1:1994, 1994. Eurocode-8 – *Design provisions for earthquake resistance of structures – Part 1-1: General rules – Seismic actions and general requirements for structures*. European Committee for Standardisation, 25 pp.
- Grünthal, G. and the GSHAP Region 3 Working Group, 1999. Seismic hazard assessment for central, North and Northwest Europe: GSHAP Region 3. *Annali di Geofisica*, 42, 999 – 1011.
- Grünthal, G. and R. Wahlström, 2001. Sensitivity of parameters for probabilistic seismic hazard analysis using a logic tree approach. *J. Earthquake Engineering*, 5, 309 – 328.

- Haak, H.W., B. Dost en F.H. Goutbeek, 2001. Seismische analyse van aardbevingen bij Alkmaar op 9 en 10 september en Bergen aan Zee op 10 oktober 2001. KNMI De Bilt, TR-239.
- Heynert, K.V., et al (2001): *Hoogwater eindrapportage*
WL|Delft Hydraulics, Royal Haskoning en IWACO, verslag T2368, Delft
- HKV (2001): *Afvoerstatistiek voor Borgharen, Lith, Lobith en Olst*,
HKV verslag (in concept gereed), Lelystad
- Houtgast, G., 1991. Catalogus van aardbevingen in Nederland. KNMI De Bilt, publ. 179, 166 pp.
- Houtgast, R.F. and R.T. van Balen, 2000. Neotectonics of the Roer Valley Rift system, The Netherlands. *Global and Planetary Change*, 27, 131-146.
- Idriss, IM (1990). "Response of Soft Soil Sites During Earthquakes"; H. Bolton Seed Memorial Symposium Proceedings, Volume 2, May, pp. 273-289
- International Code Council, (2000), International Building Code 2000, Falls Church, VA
- Krinitzsky, E.L., J.P. Gould and P.H. Edinger, 1993. *Fundamentals of earthquake-resistant construction*. John Wiley & Sons, Inc. 299 pp.
- Lap, J.M.J., (1987), An evaluation of earthquake-induced liquefaction potential of the area South of Eindhoven, The Netherlands, Msc Thesis, TuDelft
- Leeuwen, E. van (1998): *Levende Berging - verkennende studie naar uitbreiding van berging in Noordhollands Noorderkwartier*
WL|Delft Hydraulics en Bureau Stroming, ISBN 09.74.647.42.1, Delft
- Lindenberg, J., 1996. Aardbevingen in Nederland – een gevaar voor de waterkeringen ? RWS, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft
- Makdisi, F.I. & Seed, H.B., 1978. "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake induced deformations", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, GT 7, 849-867
- Min V&W (1994). Onderzoek watersnood Maas. Deelrapport 10: Kades, dijken en bijzondere constructies, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 12 december 1994 ("Commissie Boertien II").
- Parmet, B. et al (2000): *Analyse van de maatgevende afvoer van de Maas te Borgharen*. RIZA, rapport 2001, Arnhem
- Reiter, L. 1990. *Earthquake Hazard Analysis: Issues and insights*. Columbia University Press, New York, 254 pp.
- Rosenhauer, W. and L. Ahorner, 1994. Seismic hazard assessment for the Lower Rhine Embayment before and after the 1992 Roermond earthquake. *Geologie en Mijnbouw*, 73, 415 – 424.

- Simmelink, H.J., L. Michon, J.C., Doornenbal and H.J.M. Pagnier, 2001. Tectonische zoneringskaart van Nederland. TNO verslag NITG-01-219-B.25 pp.
- TAW (1985). Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 – Bovenrivierengebied. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 's-Gravenhage: Staatsuitgeverij.
- TAW (1989). Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 2 – Benedenrivierengebied. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft: Waltman.
- TAW (1999). Leidraad Toetsen op Veiligheid. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft: Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- USA-DOD, (1997), Soil Dynamics and Special Design Aspects, Department of Defense Handbook MIL-HDBK-1007/3, Norfolk VA
- Vanneste, K., Meghraoui, M., & Camelbeeck, T., 1999, Late Quaternary earthquake-related soft-sediment deformation along the Belgian portion of the Fildbiss Fault, Lower Rhine Graben system, *Tectonophysics* 309, 57-79.
- WL (1997): *Evaluatie Waterhuishoudkundige Infrastructuur Noord-Holland*, WL | Delft Hydraulics, in opdracht van de stuurgroep EWI, verslag T1622, Delft
- WL (2002): *Faalkansanalyse Schermerboezem - uitvoerbestanden HYMOS*, WL|Delft Hydraulics, verslag Q3015, Delft
- Ziegler, P.A., 1994. Cenozoic rift system of western and central Europe: an overview. *Geologie en Mijnbouw*, 73, 99-127.



WL | Delft Hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

