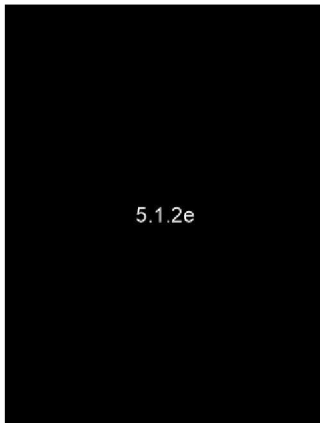


Effecten geïnduceerde aardbevingen op kritische infrastructuur Groningen

Quick Scan naar de sterkte van de infrastructuur



1208149-000

© Deltares, 2013, B

Titel

Effecten geïnduceerde aardbevingen op kritische infrastructuur Groningen

Opdrachtgever

Ministerie van Economische Zaken

Project

1208149-000

Konmerk

1208149-000-GEO-0006

Pagina's

87

t.a.v.

5.1.2e

Trefwoorden

aardbevingen, sterkte, gasnetwerk, waterkeringen, hoogspanningsnetwerk

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
01	juli 2013	5.1.2e				5.1.2e	
		zie voorzijde		5.1.2e			
02	aug 2013	5.1.2e				5.1.2e	
		zie voorzijde					

Status

definitief

Review

De Deltares review op het concept van dit rapport is uitgevoerd door 5.1.2e in samenwerking met 5.1.2e en 5.1.2e. Met het KNMI 5.1.2e is paragraaf 2.5 afgestemd en tevens heeft 5.1.2e de inhoud van deze paragraaf gereviseerd. Externe review heeft plaatsgevonden in de begeleidingscommissie en door de betrokken beheerders (Gasunie, Waterschappen Hunze en Aa's en Noorderzijlvest, Tennet). De definitieve versie is gecontroleerd door 5.1.2e.

Inhoud

Samenvatting Quick Scan Effecten geïnduceerde aardbevingen op kritische infrastructuur in Groningen	iv
Inleiding	iv
Effect van geïnduceerde aardbevingen	iv
Resultaten Quick Scan waterkeringen	v
Stabiliteit primaire keringen	v
Stabiliteit regionale keringen	v
Kunstwerken	vi
Aanbevelingen	vii
Resultaten Quick Scan gasnetwerk	viii
Resultaten Quick Scan voor hoogspanningsnetwerk en C2000	ix
1 Inleiding en probleemstelling	1
1.1 Vraagstelling	1
1.2 Inleiding	1
1.3 Aanpak	1
1.4 State-of-the-art	2
2 Geïnduceerde aardbevingen	3
2.1 Eigenschappen geïnduceerde aardbevingen	3
2.2 Hoe reageert de ondergrond op een aardbeving?	7
2.3 Hoe reageert een constructie op een aardbeving?	8
2.4 Eurocode 8	8
2.5 Aardbevingsbelasting	8
2.5.1 Magnitude	8
2.5.2 Invloed ondergrond	9
2.5.3 Amplitude en relatie met de afstand	10
2.5.4 Response spectra	11
2.5.5 Conclusies	15
3 Mogelijke faalmechanismen kritische infrastructuur	17
3.1 Waterkeringen	17
3.1.1 Inleiding	17
3.1.2 Eerder onderzoek	18
3.1.3 Scenario analyse waterkeringen (primair, regionaal en kunstwerken)	20
3.1.4 Aanpak analyse beïnvloeding waterkeringen	30
3.2 Buisleidingen	31
3.2.1 Literatuuronderzoek	31
3.2.2 Faalmechanismen	31
3.2.3 Gastransportnetwerk	34
3.2.4 Chloorleidingen	36
3.2.5 Rioolpersleidingen	37
3.3 Hoogspanning en C2000 netwerk	37
4 Resultaten Quick Scan	41
4.1 Verweking	41
4.1.1 Aanwezigheid verwekingsgevoelige lagen	41

4.1.2	Zanddichtheidskaart	42
4.1.3	Bepaling grenswaarde versnelling voor verweking	45
4.1.4	Bepaling straal verwekingsgebied	47
4.2	Waterkeringen	49
4.2.1	Vervormingen volgens Newmark analyse	49
4.2.2	Hydraulische kortsluiting en horizontaal evenwicht	50
4.2.3	Zakkingen volgens Ishihara en Yoshimine	53
4.2.4	Zakking (kunstwerken in) primaire waterkeringen bij verweking	55
4.2.5	Zakking (kunstwerken in) regionale waterkeringen bij verweking	55
4.2.6	Samenvatting resultaten zakking als gevolg van verweking	59
4.2.7	Resultaten primaire waterkeringen	60
4.2.8	Resultaten regionale keringen	61
4.2.9	Resultaten kunstwerken	62
4.3	Buisleidingen	62
4.3.1	Algemeen	62
4.3.2	Leidingstrekkingen	62
4.3.3	Bebouwing	68
4.3.4	Verweking	69
4.3.5	Resultaten buisleidingen	71
4.4	Hoogspanningsnetwerk	71
4.4.1	Componenten	71
4.4.2	Constructies	72
4.5	C2000 netwerk	72
5	Mogelijke maatregelen om effecten op constructies te verminderen	73
5.1	Algemeen	73
5.2	Waterkeringen (regionaal, primair en kunstwerken)	73
5.3	Buisleidingen (gas, chloor, rioolpers)	73
5.4	Hoogspanning en C2000	74
6	Conclusies	75
6.1	Waterkeringen	75
6.2	Buisleidingen	76
6.3	Hoogspanning en C2000	77
7	Aanbevelingen	79
7.1	Aanbevelingen waterkeringen	79
7.2	Aanbevelingen buisleidingen en hoogspanningsnetwerk	79
7.3	Nader onderzoek naar verwekingsgedrag	80
7.4	In kaart brengen van kritische infrastructuur en grondtypen (locatiespecifiek)	80
7.5	Uitwerken toetsingsmethodiek voor National Annex Eurocode 8	81
7.5.1	Aardbevingsbelasting	81
7.5.2	Beoordelingsmethodiek voor verwekingsgevoeligheid van grond	81
7.5.3	Beoordelingsmethodiek voor kwetsbaarheid van kritische infrastructuur	81
	Referenties	83
	Symbolenlijst	87

Bijlage(n)

A Berekeningsmethodiek waterkeringen en verweking	A-1
A.1 Stabiliteitsberekeningen volgens Newmark (inschatting vervormingen)	A-1
A.2 Methode bepaling verweking (ten behoeve van zakking)	A-12
A.3 PLAXIS berekeningen, afleiden MSF voor geïnduceerde aardbevingen	A-27
B Verslag risico sessie met waterschappen	B-1
B.1 Aantekeningen brainstormsessie Groningen donderdag 25 april 2013.	B-1
B.2 Discussie bij inleiding:	B-1
B.3 Discussie bij primaire keringen:	B-1
B.4 Discussie bij regionale keringen:	B-2
B.5 Discussie Kunstwerken:	B-3
C Literatuuronderzoek leidingen	C-1
D Rapportage TNO	D-1
E Kaarten met ondergrondinformatie	E-1

Samenvatting Quick Scan Effecten geïnduceerde aardbevingen op kritische infrastructuur in Groningen

Inleiding

Het Ministerie van Economische zaken heeft Deltares gevraagd de risico's van geïnduceerde aardbevingen in het Groningenveld voor de kritische onderdelen van de infrastructuur (waterkeringen, het gastransportnetwerk en het hoogspanningsnetwerk) in beeld te brengen.

Voor de gegevens van de infrastructuur heeft Deltares gebruik gemaakt van de informatie van de beheerders van de infrastructuur (Rijkswaterstaat, waterschap Noorderzijlvest, waterschap Hunze en Aa's, Gasunie, Noordgastransport b.v., TenneT en de Veiligheidsregio). Een deel van de analyses voor de gevoeligheid voor geïnduceerde aardbevingen is in opdracht van Deltares uitgevoerd door TNO Bouw.

Bij het uitvoeren van de Quick Scan is op basis van beschikbare rekenmethoden voor de verschillende onderdelen van de infrastructuur bepaald welke (piek)grondversnelling aan de oppervlakte (uitgedrukt in g-niveau) door de infrastructuur nog weerstaan kan worden. Deze "sterkte" van de infrastructuur kan in een latere fase worden vergeleken met de belasting van een aardbeving met zekere magnitude en bijbehorende kans van voorkomen. De kansen en gevolgen van de mogelijke schade kunnen dan worden beschouwd en gewogen. Op basis van deze beschouwing kunnen indien nodig maatregelen worden getroffen.

Allereerst is een vergelijking gemaakt van de rekenmethoden met de tot nu toe opgetreden versnellingen, waarbij geen schade aan kritische infrastructuren bekend zijn. Vervolgens zijn de berekeningen geëxtrapoleerd voor grotere versnellingen. Omdat de te verwachten aardbevingsbelasting nog niet vaststaat is in overleg met het KNMI gerekend met een ruime bandbreedte tot 0,5g. Tevens zijn de eigenschappen van een representatief aardbevings signaal afgeleid en gebruikt. Dit signaal is gebaseerd op een gemeten signaal in Westeremden ten gevolge van de aardbeving die plaats vond onder Huizinge 2012. Dit signaal is gekozen, omdat de hierbij berekende effecten (responspectra) het goed overeen komen met de vigerende literatuur (Akkar et al. 2013). De gebruikte rekenmethoden zijn veelal afgeleid voor tektonische aardbevingen en niet specifiek gevalideerd voor de Groningse omstandigheden met geïnduceerde bevingen. Hiermee is zoveel mogelijk rekening gehouden, doch dit zorgt voor enige onzekerheid in de onderstaande conclusies. Aan het eind van deze samenvatting worden aanbevelingen gedaan voor validaties die deze onzekerheid kunnen verkleinen. Ook zijn aanbevelingen gedaan om kritische infrastructuur volledig te kunnen toetsen en ontwerpen op aardbevingsbelasting. Aan de hand hiervan kan het risico worden vastgesteld en kunnen maatregelen worden geprioriteerd.

Effect van geïnduceerde aardbevingen

De aardgaswinning in Groningen leidt tot spanningsveranderingen in de bodem die tot geïnduceerde aardbevingen kunnen leiden. Deze aardbevingen veroorzaken trillingen die schade kunnen aanrichten aan constructies, gebouwen en inventaris, alsmede blijvende grondvervormingen tot gevolg hebben.

De horizontale versnellingen in de grond tijdens een aardbeving leiden tot extra schuifspanning. Vooral losgepakt zand zal hierdoor willen verdichten. Voor verdichting moet het water tussen de korrels eerst uitstromen, maar hier is tijdens de aardbeving geen tijd voor, zodat wateroverspanningen optreden. Deze leiden tot tijdelijke vermindering van

korrelspanningen en daarmee tot vermindering van sterkte en stijfheid van het zand. Als de trilling sterk is kan het zand zijn sterkte en stijfheid zelfs compleet verliezen (dit wordt verweking genoemd). Bij de tot op heden opgetreden aardbevingen in Groningen zijn geen locaties vastgesteld waar verweking is opgetreden. Bij een sterkere aardbeving (vanaf ongeveer 0,2 g) neemt de kans op verweking volgens de huidige inzichten sterk toe. Dit aspect dient in meer detail beschouwd te worden voor lokale omstandigheden omdat het beperkt is tot gebieden waar (losgepakt tot matig gepakt) zand voorkomt. Dichter gepakt zand kan ook verweken als de versnelling toeneemt tot boven de 0,35g. Voor klei en veenlagen bestaat dit gevaar niet of nauwelijks.

Een constructie in of op de grond zal ook gaan bewegen door de beweging van de grond. Deze dynamische respons van de totale constructie wordt beïnvloed door de massa, stijfheid en sterkte van de constructiedelen, en de interactie met de omringde of onderliggende grond. Het is in Nederland niet vereist om constructies te berekenen op aardbevingen (met enkele uitzonderingen). De kritische infrastructuren zijn dus ook niet op een aardbevingsbelasting ontworpen. Dat wil echter niet zeggen dat ze geen enkele aardbevingsbelasting zouden kunnen weerstaan. Per onderdeel is hierna aangegeven welke piekversnelling ten gevolge van een aardbeving nog kan worden weerstaan.

Resultaten Quick Scan waterkeringen

Voor piekversnellingen die groter zijn dan 0,2 g is met name voor regionale keringen en kunstwerken nog niet aangetoond dat de inundatierisico's overal voldoende klein zijn. In meer detail per onderdeel zijn de resultaten hieronder weergegeven.

Stabiliteit primaire keringen

Voor de primaire keringen is de gemiddelde waterstand aanzienlijk lager dan de maatgevende. Dit geeft een extra veiligheid in geval van een aardbeving. Bij aardbevingen met piekversnellingen tot 0,1 g wordt geen of slechts beperkte schade aan de waterkeringen verwacht (max. 10cm zakking). Bij aardbevingen met piekversnellingen groter dan 0,2 g kan er aanzienlijke schade (zakkingen tot 60cm, vervormingen, schade aan bekledingen) aan de waterkeringen optreden, maar de kans op inundatie lijkt voor primaire waterkeringen beperkt door aanwezigheid van een restprofiel met voldoende kerende hoogte. Om te bepalen of die kans voldoende klein is zal de gecombineerde kans moeten worden bepaald van een optredende piekversnelling én gelijktijdige waterstand en hun onzekerheid, en moet worden vastgesteld welke faalkans als gevolg van aardbevingen acceptabel is. Op twee locaties (bij Eemshaven en bij Vierhuizergat) komt de stroomgeul dicht bij de waterkering waardoor er mogelijk onvoldoende restprofiel beschikbaar is in geval van verweking van de onderwateroever. Deze locaties dienen in elk geval nader te worden onderzocht aan de hand van meetgegevens van het bodemprofiel.

Stabiliteit regionale keringen

Bij regionale keringen is het verschil tussen dagelijks peil en normpeil (en dus de reserve in stabiliteit en hoogte) kleiner dan bij primaire keringen. Aan regionale waterkeringen worden bovendien lagere stabiliteitseisen gesteld dan aan primaire keringen, waardoor deze gevoeliger zijn voor extra belasting in de vorm van aardbevingen. Door de aardbevingsbelasting kan een zakking van de kruin (max. 30cm) optreden die tot schade kan leiden. De door Deltares uitgevoerde analyses hebben vooral betrekking gehad op de dijken langs het Eemskanaal en zijn niet zonder meer van toepassing op alle regionale keringen. Langs het Eemskanaal is het verschil tussen streefpeil en normpeil ongeveer 70 centimeter. Bij het Eemskanaal is daarom de verwachting dat de kans op inundatie (daadwerkelijk zulke grote vervormingen dat de kruin met meer dan 70 cm zakt) ook bij een piekversnelling van

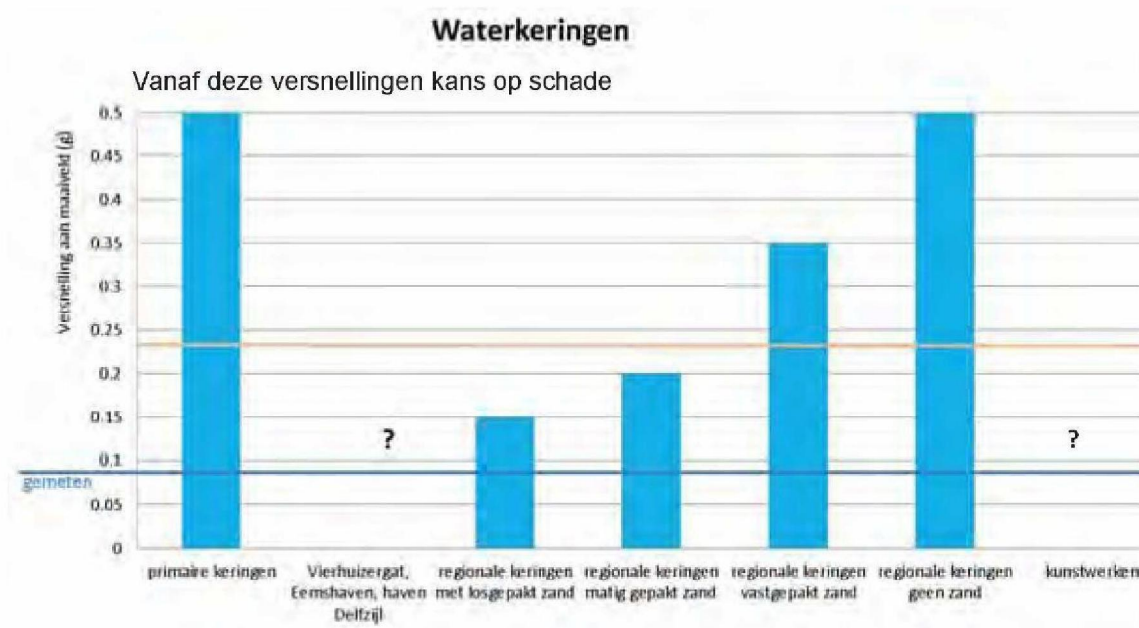
0,5 g nog beperkt is. Om te bepalen of die kans voldoende klein is zal een probabilistische analyse moeten worden uitgevoerd, en moet er een uitspraak komen over welke faalkans als gevolg van aardbevingen acceptabel is. Voor de overige regionale keringen moet de sterkte nog lokaal worden bekeken, vooral voor die gebieden waar zand ondiep in de ondergrond voorkomt, de marge tussen normpeil en gemiddeld peil wellicht kleiner is dan 30cm en/of deze nu al een lage stabiliteitsfactor hebben. De extra bijdrage van aardbevingen op het ontstaan van hydraulische kortsluiting (wat leidt tot verlies van horizontaal evenwicht) als gevolg van aardbevingen kan op dit moment nog niet precies aangegeven worden. Bij een veenkade met een damwand langs de waterlijn, zandlagen op niet te grote diepte, droogte én een aardbeving bestaat er kans op verlies van horizontaal evenwicht. Nog niet gekwantificeerd is het risico van leidingen die waterkeringen kruisen.

Bij versnellingen tussen 0,2 en 0,5g kan er aanzienlijke schade (zakkingen en vervormingen) aan de regionale waterkeringen optreden, doch dit leidt niet automatisch tot inundatie (overstroming). Regionale keringen lopen vooral kans op schade (afschuiving of kruindaling) in geval losgepakt zand aanwezig is of als het droge (veen)kades met damwanden en/of kades met een lage stabiliteitsfactor in de normale toetsingen betreffen.

Kunstwerken

In het gebied komen diverse kunstwerken voor met een waterkerende functie (sluizen, kades, coupures en damwanden). Ten aanzien hiervan is vooral gekeken naar zakkingen in de ondergrond en naar de mogelijke verschilzetting die bij een kunstwerk op kan treden. Dit is afhankelijk van de lokale opbouw van de ondergrond. Aan de kust waar dikkere Holocene, relatief losgepakte, zandlagen voorkomen is dit effect groter. Ook hier is het al dan niet optreden van verweking doorslaggevend. Afhankelijk van de aanwezigheid van zandlagen worden zakkingen tot 60 cm niet uitgesloten. Daarbij kan ook sprake zijn van aanzienlijke zettingsverschillen over de constructie. Of een constructie dit aan kan hangt af van de sterkte en stijfheid van de constructie en van de funderingswijze. Op dit moment zijn nog geen individuele waterkerende constructies beschouwd, maar in generieke zin kan schade aan en niet functioneren van kunstwerken niet worden uitgesloten bij piekversnellingen groter dan 0,2g in gebieden waar zand in de ondergrond aanwezig is. Voor keringen waarin damwanden zijn opgenomen en kans op hydraulische kortsluiting bestaat dient apart een toets te worden uitgevoerd.

Deze conclusies zijn samengevat in Figuur 1.



Figuur 1 Samenvatting sterkte waterkeringen uitgedrukt in maximale piekgrondversnelling die weerstaan kan worden (De oranje lijn is het berekende versnellingsniveau bij een aardbeving met magnitude 5)

Aanbevelingen

Aanbevolen wordt probabilistische analyses uit te voeren die gebiedsdekkend en locatie-specifiek zijn en regels op te stellen waar aan getoetst kan worden passend binnen de huidige veiligheidsfilosofie voor waterkeringen. Hierbij worden ook de gevolgen van inundatie meegewogen. Op deze manier wordt inzichtelijk waar de grootste risico's optreden en waar de prioriteit voor (eventuele) maatregelen moet liggen. (Regionale) keringen die nu niet voldoen aan de norm (zonder aardbeving) zouden de eerste prioriteit moeten hebben. Een tweede prioriteit zijn keringen die door een mogelijke aardbeving in stabiliteitsproblemen komen in gebieden met de hoogste belasting. De inzet van deze maatregelen dient in een maatschappelijke kosten-baten analyse te worden afgewogen.

Aanbevolen wordt het uitvoeren van nader onderzoek naar:

- Het gedrag van Groningse zandgronden onder de specifieke belasting van geïnduceerde aardbevingen in laboratorium en/of in het veld. Hiermee wordt vastgesteld wat de kans van optreden van verweking is en de mate van verdichting die optreedt. De huidige getallen zijn op basis van internationaal gebruikte methoden, en dus niet nationaal gevalideerd.
- Een nadere specificatie van de mogelijkheid van het optreden van hydraulische kortsluiting per type bodemopbouw.
- Effectiviteit van preventieve maatregelen zoals het aanbrengen van extra hoogte van de dijk of verflauwing van de taluds, danwel het verlagen van de (water)belasting door het verlagen van kanaal- of boezempeil of compartimenteren van boezem of kanaal.
- (Niet destructief) onderzoek naar constructieve staat van kunstwerken (o.a. fundering, aansluitingen), zeker op locaties waar verwekingsgevoelig zand voorkomt.

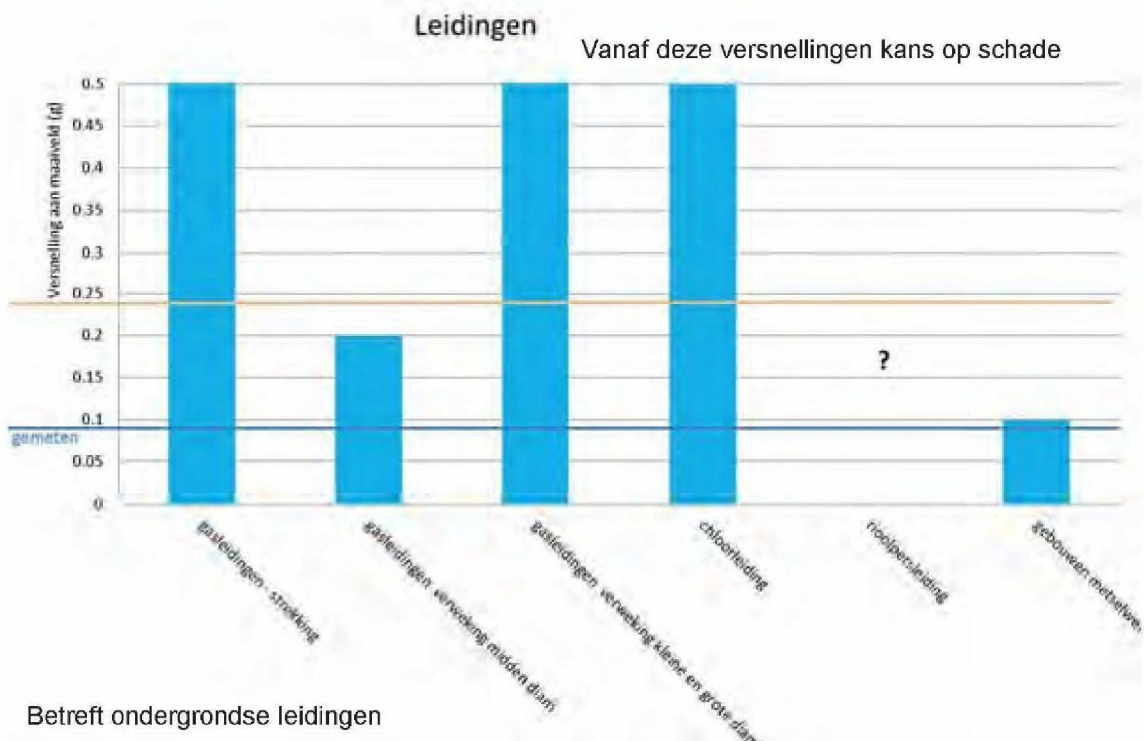
Resultaten Quick Scan gasnetwerk

De effecten van aardbevingen op rechte stalen leidingen voor gas en chloor transport van Gasunie, Noordgastransport en AKZO Nobel B.V. zijn beschouwd. Hieruit blijkt dat bij 0,5 g er geen schade te verwachten is. De berekende spanningen zijn kleiner dan de toelaatbare spanningen in de leidingen. Bochten en aansluitingen zijn afzonderlijk in opdracht van Gasunie geanalyseerd. Bijzondere onderdelen (bovengrondse leidingen, stations, oude leidingen en flensverbindingen) zijn nog niet beoordeeld, zodat daar op basis van nader onderzoek eventueel nog maatregelen nodig zouden kunnen blijken.

Gebouwen met bedieningselementen kunnen bij een aardbevingsversnelling van 0,1 g of hoger bezwijken in geval van metselwerk. Indien hierdoor stations uitvallen kan het transport ontregeld raken. Dit hangt samen met de alternatieve mogelijkheden (bypasses) die op dat moment voor het beschikbaar zijn. Deze situatie wordt sterk bepaald door de ligging van het epicentrum en de ruimtelijke scheiding tussen de alternatieve transportroutes.

Bij versnellingen vanaf 0,2 g kan verweking optreden, net als bij waterkeringen, waardoor er schade kan optreden aan stations en aansluitingen van leidingen aan constructies en mogelijk aan enkele leidingtypen.

Deze conclusies zijn samengevat in Figuur 2.



Figuur 2 Samenvatting sterkte buisleidingen uitgedrukt in maximale piekgrondversnelling die weerstaan kan worden (De oranje lijn is het berekende versnellingsniveau bij een aardbeving met magnitude 5)

Aanbevolen wordt:

- Een nadere analyse van de kans op verweking en effecten op leidingen, stations en aansluitingen uit te voeren.
- De aansluitingen en bochten van leidingen te beoordelen.
- In beeld brengen waar het netwerk niet in optimale staat verkeerd en waar dus mogelijk een grotere kans is op schade bestaat dan in dit rapport is bepaald.
- Te beoordelen of de bestaande bypass mogelijkheden voldoende zijn voor leveringszekerheid (leidingen en stations) bij verschillende potentiële aardbevingslocaties (epicentra).
- Voor de secundaire systemen (gebouwen etc.) zijn wellicht versterkingen nodig, deze dienen in een gedetailleerde analyse te worden bepaald.

Na beschouwen van alle mechanismen zijn de beheerders in staat om de zwakke elementen uit het systeem te prioriteren, zodat in detail maatregelen kunnen worden getroffen.

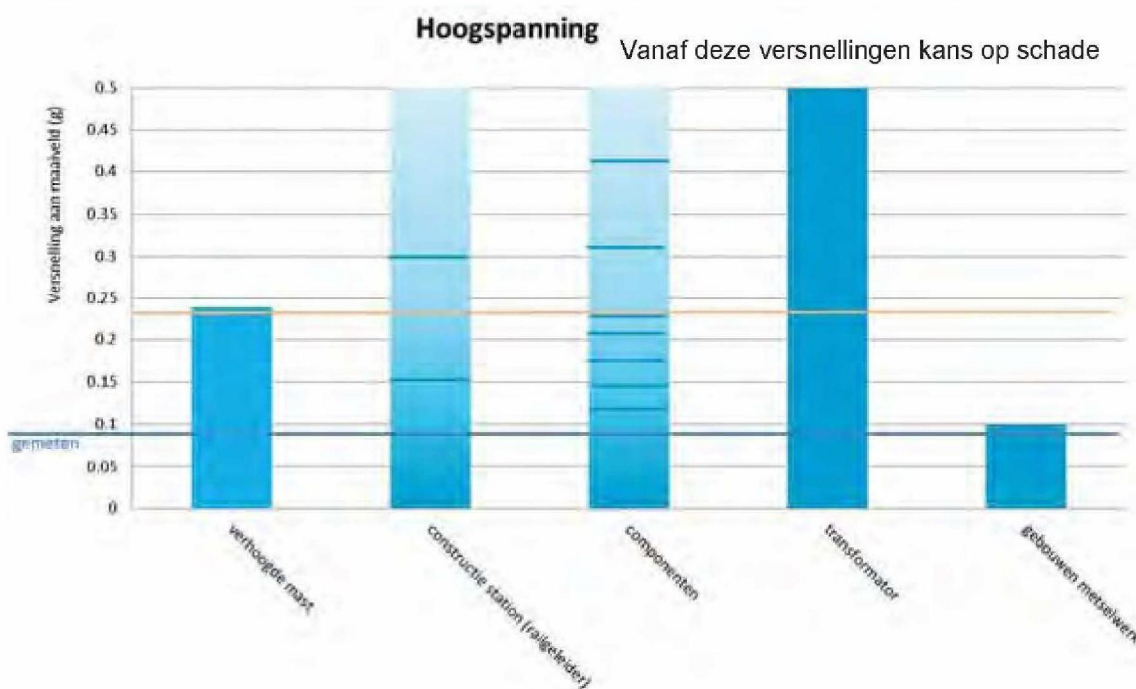
Resultaten Quick Scan voor hoogspanningsnetwerk en C2000

Uitval van elektriciteit bij aardbevingen komt internationaal relatief vaak voor. Tot op heden is er bij de optredende aardbevingen in Groningen geen schade gerapporteerd. In Groningen staan meerdere verdeelstations van TenneT voor het hoofdnet en van lokale beheerders voor de lagere spanningen. Het onderzoek in de Quick Scan heeft betrekking op de hoogspanningsstations van 380 kV en deels ook 220 kV en 110 kV van TenneT. Naast stations zijn er ook verbindingen met masten, die zelf ook gevoelig kunnen zijn voor de aardbeving.

Ten gevolge van een aardbeving bestaat de kans dat een component van het station door te hoge trilling uitvalt. De meeste componenten zijn standaard toegerust in klasse AF3, wat overeen komt met een versnelling van 0,3g. Van een aantal componenten is niet bekend tegen welke versnelling ze bestand zijn. Uit een analyse op basis van vergelijking met maatgevende kortsluitkrachten volgt dat deze componenten bestand zijn tegen een versnelling tussen 0,1 en 0,2g. De meeste transformatoren zijn ontworpen op 0,5 g. Als tweede effect kan een aardbeving de constructie van het station doen falen. De meeste elektrische componenten zijn geplaatst op kolommen of portalen die een versnelling van minimaal 0,15 tot 0,3g kunnen weerstaan. Secundaire systemen (zoals bedieningsfuncties) kunnen in gevaar komen als de behuizing bezwijkt, dit kan vanaf 0,1g al optreden in geval van metselwerk gebouwen. Verder geldt dat ook voor de hoogspanningsstations de kans op verweking wordt bepaald door de eventuele aanwezigheid van los zand in de ondergrond, net als bij de overige onderdelen. Voor de verbindingen (masten) geldt dat deze een versnelling van minimaal circa 0,25g aankunnen. Dit is gebaseerd op een hoge mast. Verwacht wordt dat lagere masten een hogere versnelling zonder schade kunnen weerstaan.

Voor het C2000 netwerk geldt dat de geselecteerde mast een versnelling van meer dan 0,5g aan kan.

Deze conclusies zijn samengevat in Figuur 3.



Figuur 3 Samenvatting sterkte hoogspanningsinfrastructuur uitgedrukt in maximale piekgrondversnelling die weerstaan kan worden (De oranje lijn is het berekende versnellingsniveau bij een aardbeving met magnitude 5)

Aanbevelingen voor het hoogspanningsnetwerk zijn:

- Steekproef uitbreiden voor de elektrische componenten en deze controleren op de maatgevende aardbevingsbelasting.
- Voor de secundaire systemen (gebouwen etc.) zijn wellicht versterkingen nodig, deze dienen in een gedetailleerde analyse te worden bepaald.
- De masten kunnen met meer gedetailleerdere berekening worden beoordeeld, waardoor mogelijk geen versterking nodig zal blijken te zijn.
- Aanbevolen wordt voor de stations ook het risico van verweking van de ondergrond te toetsen.
- Een gevolgenanalyse maken (uitval van 1 station/mast is nog geen einde levering) en aan de hand hiervan normen stellen is nodig om definitieve beoordelingen te maken. Aan de hand hiervan kunnen zo nodig hogere eisen worden gesteld aan nieuwe componenten afhankelijk van de uitkomst van de gevolgenanalyse en de onzekerheid in de optredende versnelling.
- Aanbevolen wordt in beeld te brengen waar het netwerk niet in optimale staat verkeerd en waar dus mogelijk een grotere kans is op schade bestaat dan in dit rapport is bepaald.

1 Inleiding en probleemstelling

1.1 Vraagstelling

Het Ministerie van Economische zaken heeft Deltares gevraagd de risico's van geïnduceerde aardbevingen in het Groningenveld voor de kritische onderdelen van de infrastructuur (waterkeringen, het gastransportnetwerk en het hoogspanningsnetwerk) in beeld te brengen. Hiervoor is een Quick Scan uitgevoerd aan de hand van de volgende vragen:

- Welk schade is er te verwachten aan deze kritische infrastructuur als gevolg van geïnduceerde aardbevingen ten gevolge van de aardgaswinning?
- Welke maatregelen zijn mogelijk om kritische infrastructuur zodanig te beschermen dat deze functioneel blijft?

1.2 Inleiding

De aardgaswinning in Groningen leidt tot spanningsveranderingen in de bodem die tot geïnduceerde aardbevingen kunnen leiden. Deze aardbevingen veroorzaken trillingen die schade kunnen aanrichten aan constructies, gebouwen en inventaris, alsmede blijvende grondvervormingen tot gevolg hebben. Deltares boordeelt in deze Quick Scan de sterkte van de kritische infrastructuur bij het optreden van een geïnduceerde aardbeving van verschillende magnitudes. Deze sterkte kan in een latere fase worden vergeleken met de belasting van een aardbeving met een zekere magnitude en bijbehorende kans van voorkomen. De gevolgen van de mogelijke schade kunnen dan op een probabilistische wijze worden beschouwd. Op basis van deze beschouwing kunnen de benodigde maatregelen worden uitgewerkt, geprioriteerd en toegepast.

Voor de gegevens van de infrastructuur heeft Deltares gebruik gemaakt van de informatie van de beheerders van de infrastructuur (Rijkswaterstaat, waterschap Noorderzijlvest, waterschap Hunze en Aa's, GTS (Gasunie), Noordgastransport b.v., TenneT, KLPD). Een deel van de analyses voor de gevoeligheid voor geïnduceerde aardbevingen is in opdracht van Deltares uitgevoerd door TNO Bouw, zie Bijlage D.

1.3 Aanpak

Een voorspelling van de effecten van aardbevingen wordt doorgaans in een aantal stappen uitgevoerd. Allereerst wordt de mogelijke kracht van een aardbeving bepaald en de plaats waar deze op kan treden. Tevens wordt de kans op het optreden in relatie tot de tijd bepaald. Uit voortplantingsrelaties tussen de kracht van de aardbeving bij de haard (op ca. 3 km diepte), de afstand en de opbouw van de ondergrond wordt vervolgens de aard van de beweging van een punt op of aan het oppervlak bepaald. De beweging wordt weergegeven in een bodemtrillingssignaal, waarbij kenmerkende eigenschappen als piekversnelling en -snelheid en frequentie inhoud de kracht van het signaal beschrijven. De laatste stap is de respons van een constructie (dijk, gasleiding, etc.) op deze bodembeweging en de mogelijke gevolgen hiervan.

Om snel inzicht te krijgen in de meeste kritische onderdelen van de infrastructuur is allereerst een Quick Scan uitgevoerd naar de risico's. De aanpak hiervoor heeft bestaan uit de volgende onderdelen:

- Onderbouwing aardbevingsbelasting.
- Infrastructuur data ruimtelijk in beeld brengen op basis van gegevens beheerders.
- Vaststellen state-of-the-art (inter)nationale methodieken voor toetsing.
- Vaststellen van maatgevende combinaties voor infrastructurele elementen.
- Vaststellen van mogelijke maatregelen.

De rapportage is opgebouwd aan de hand van een algemene introductie in de problematiek van geïnduceerde aardbevingen en een onderbouwing van de gehanteerde aardbevingsbelasting (Hoofdstuk 2). In Hoofdstuk 3 is aan de hand van de infrastructuur data een overzicht gegeven van mogelijke faalmechanismen, die in hoofdstuk 4 vervolgens zijn getoetst met behulp van enkele geselecteerde maatgevende combinaties en tot resultaten verwerkt. Hoofdstuk 5 stelt mogelijke maatregelen voor die in de toekomst locatie specifiek kunnen worden uitgewerkt. Hoofdstuk 6 en 7 geven de conclusies en aanbevelingen die volgen uit het onderzoek.

1.4 State-of-the-art

In de wereld is veel kennis en ervaring met tektonische aardbevingen. Met geïnduceerde aardbevingen boven een bepaalde magnitude is die kennis en ervaring er nauwelijks. Er is daarom langs verschillende sporen naar kwantificering van effecten gezocht:

- De gebruikelijke literatuurcorrelaties kunnen worden toegepast, maar deze zijn veelal gebaseerd op empirie van tektonische aardbevingen of experimenten met een groot aantal belastingswisselingen. Een geïnduceerde aardbeving door gaswinning uit zich als een kortdurende puls met slechts enkele (tot nu toe maximaal 4) belastingswisselingen (Dost en Kraaijenpoel, 2013).
- De beschikbare rekenregels voor stabiliteit en sterkte zijn toegepast, aangevuld met een belasting die de kracht van de aardbeving moet representeren (zie Bijlage A en Bijlage C). Bij deze aanpak kan de tijdsduur van de belasting niet in rekening worden gebracht, waardoor meestal een conservatief antwoord ontstaat.
- Berekeningen met eindige elementen model PLAXIS (zie bijlage A). In PLAXIS kan een werkelijk tijdssignaal van de belasting worden doorgerekend en kan mogelijk het effect van de korte tijdsduur van een gasbeving beter worden gekwantificeerd. Dit zijn complexe berekeningen met als voornaamste bezwaar dat de mogelijkheid van een goede validatie van de berekeningen aan metingen niet aanwezig is.

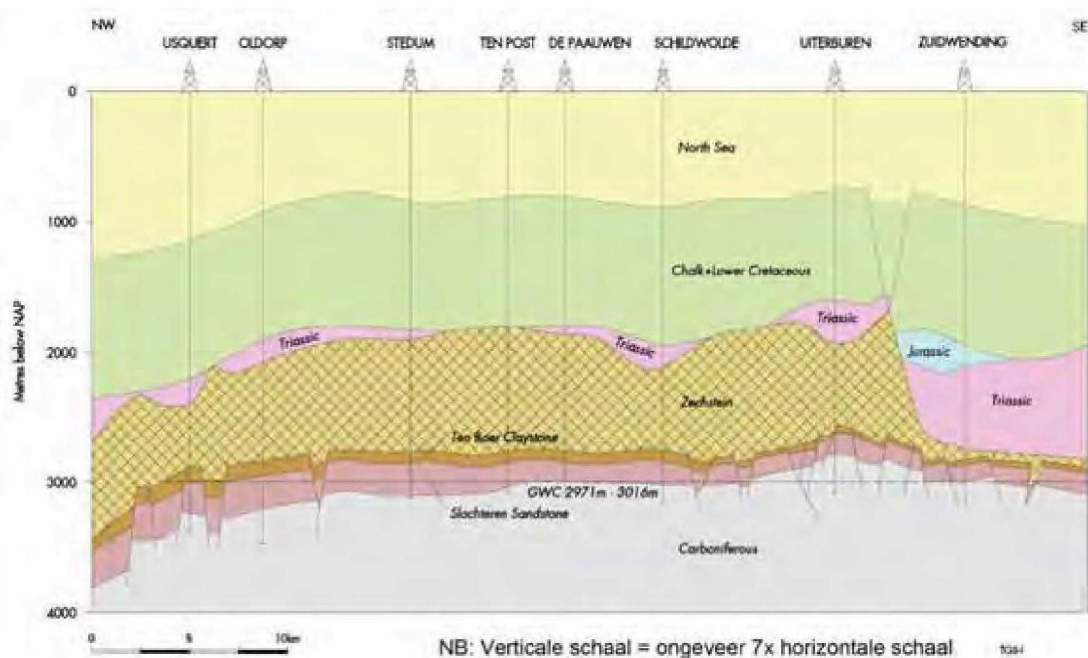
De resultaten van de gehanteerde methoden moeten dus gezien worden als indicatief. Alle berekeningen zijn zo mogelijk geijkt aan de tot op heden gemeten versnellingen.

De zwaarte van de aardbeving waarmee rekening moet worden gehouden is op dit moment nog niet vastgesteld. In dit rapport wordt daarom alleen gekeken naar de sterkte en wordt bekeken wanneer (bij welke kracht van de aardbeving) de kritische infrastructuur kan bezwijken. Het optreden van schade (zonder bezwijken) is geen onderdeel van deze studie.

2 Geïnduceerde aardbevingen

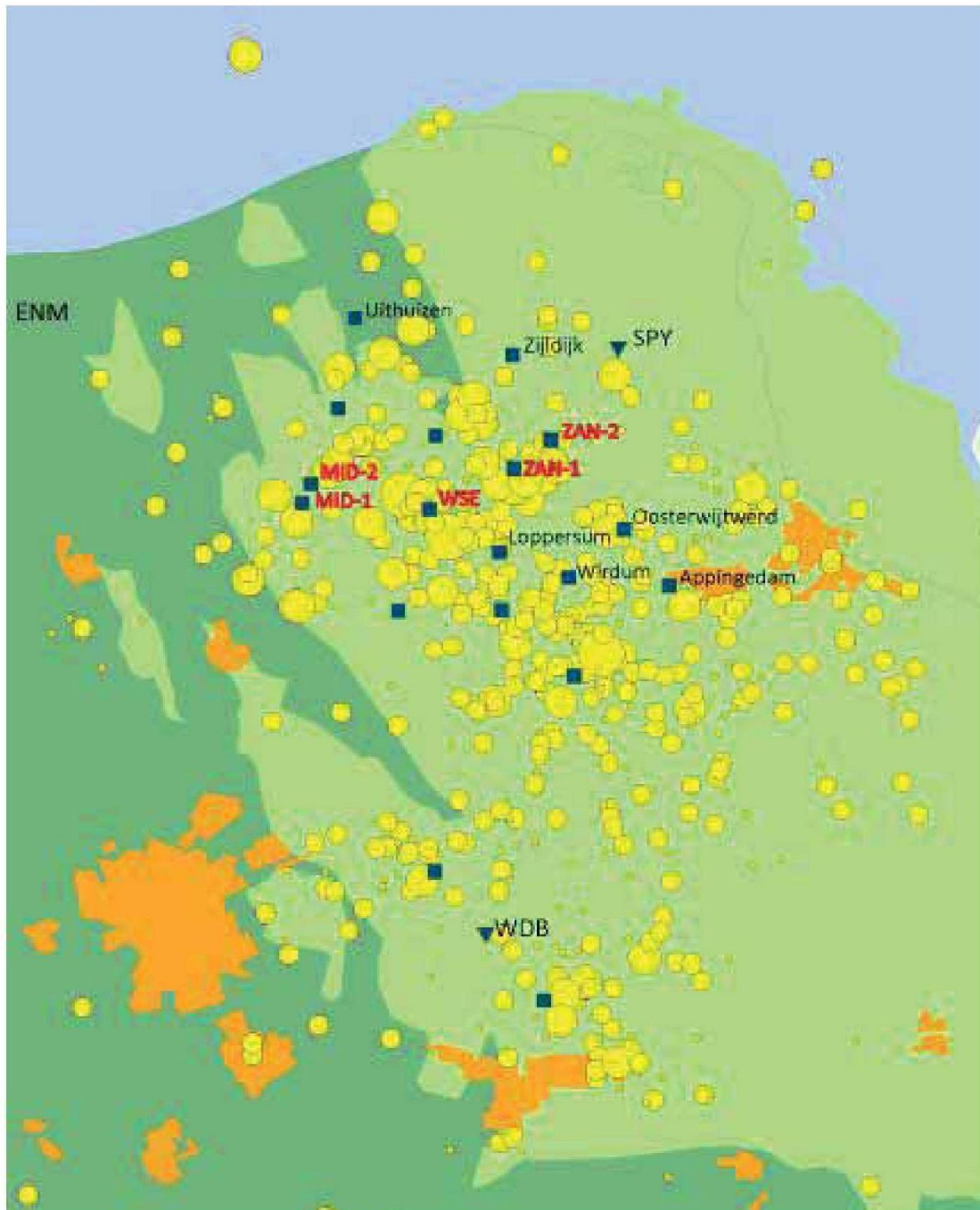
2.1 Eigenschappen geïnduceerde aardbevingen

De aardbevingen die in Groningen sinds 1986 zijn geregistreerd worden veroorzaakt door spanningen in de ondergrond, opgebouwd tijdens de winning van gas uit het Groningen gasveld. Door de drukdaling in het reservoir worden de verschillen met de omgeving als gevolg van de compactie van het reservoirgesteente zo groot dat de in het gesteente aanwezige breuken verschuiven. In de loop van de tijd is door het KNMI een netwerk van trillingsopnemers geplaatst, waardoor de plaats en diepte van de aardbevingen kan worden bepaald. Vast is komen te staan dat de haarddiepte van de bevingen zich bevindt op een diepte tussen 2.5 en 3.5 km. In aanmerking genomen dat de boven het reservoir gelegen Zechstein zoutlaag te ductiel is om een aardbeving te genereren betekent dit dat de bevingen plaatsvinden in het reservoirgesteente. In Figuur 2.1 is te zien dat het reservoir zich op een diepte van gemiddeld 3 km bevindt. Voor de verdere analyse wordt deze diepte als haarddiepte aangenomen.

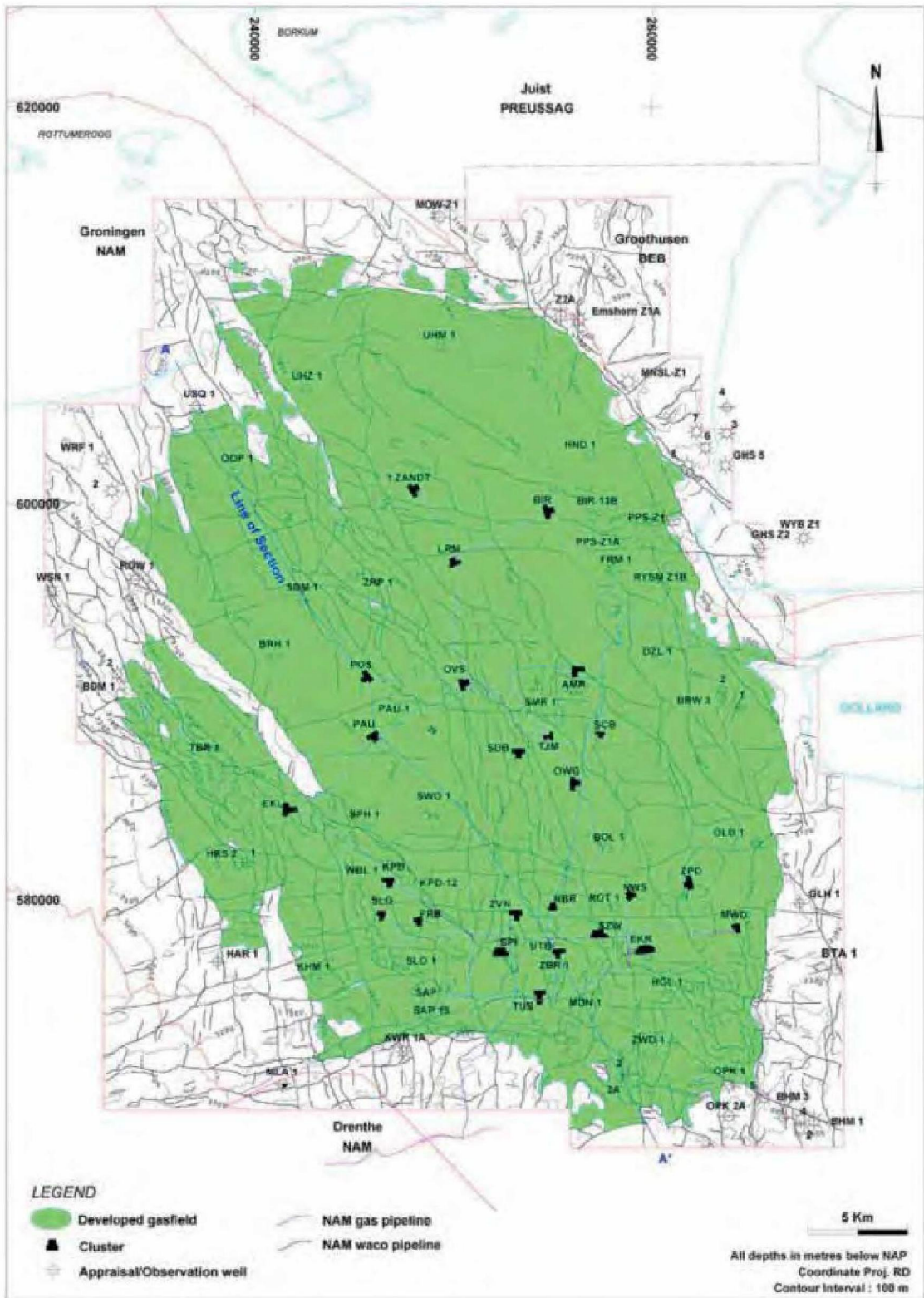


Figuur 2.1 Diepteligging reservoirgesteente (Slochteren Sandstone) (NAM, 2003)

Bij door gaswinning geïnduceerde aardbevingen treedt beweging op in vaak al bestaande breukvlakken. In Figuur 2.2 en Figuur 2.3 zijn de locaties van opgetreden aardbevingen en het breukenpatroon in relatie tot de contour van het gasveld weergegeven. Omdat momenteel nog niet vastgesteld is of er een nadere relatie bestaat tussen het optreden van de bevingen, de locatie van de breuken en het patroon van drukverlaging is de in het huidige rapport gebruikte werkhypothese, dat aardbevingen in het gehele veld kunnen voorkomen.

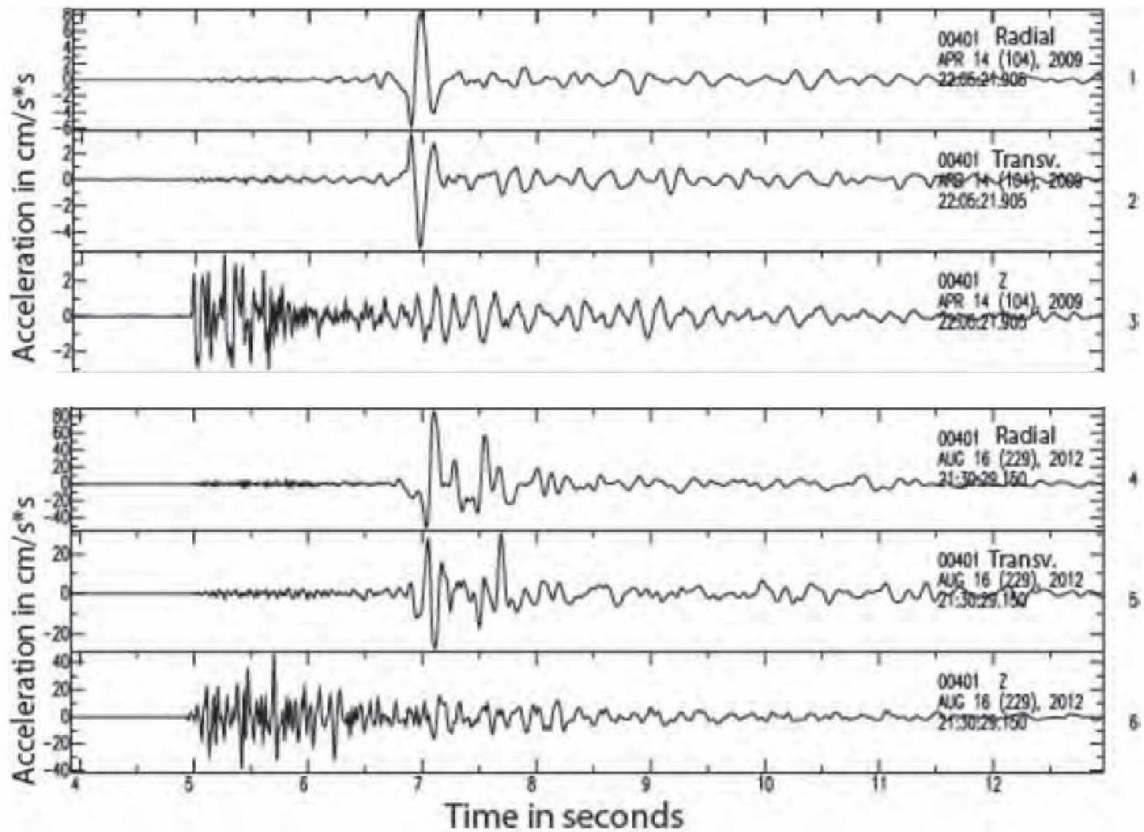


Figuur 2.2 Overzicht opgetreden aardbevingen (straal is maat voor magnitude) en bestaande en geplande meetstations. De vierkanten zijn oppervlakte versnellingopnemers. De registraties van de stations WSE en MID-1 worden in dit rapport nader beschouwd in de bepaling van een representatief ontwerpsignaal. (Dost en Kraaijenpoel, 2013)

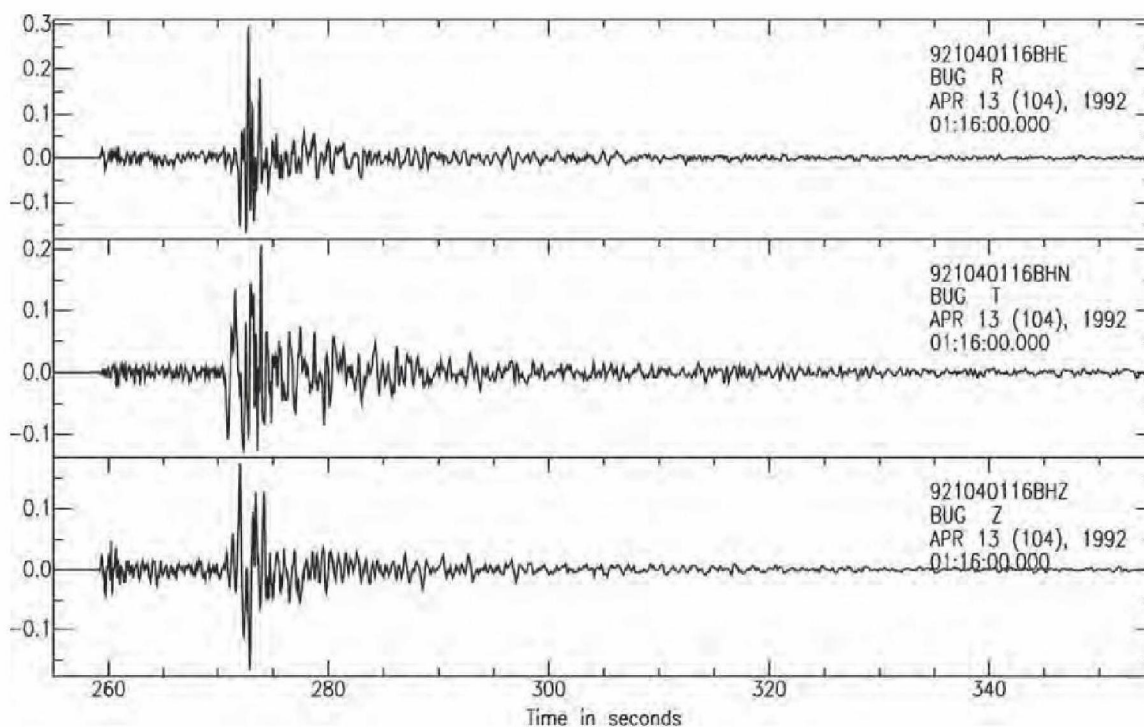


Figuur 2.3 Ligging van het Groningenveld en breukenpatroon in het reservoirgesteente (NAM, 2003)

Figuur 2.4 vergelijkt de op 16 augustus 2012 gemeten versnellingen bij Middelstum met die van een eerdere beving in 2009. De maximum grondversnelling PGA bedroeg (PGA) 85 cm/s^2 (of $0,085g$), wat correspondeert met een maximum grond snelheid (PGV) van $3,45 \text{ cm/s}$. In paragraaf 2.5 wordt de afleiding van de PGA en PGV bij een magnitude van $M=5$ verder toegelicht. Figuur 2.5 laat de metingen zien van de tektonische aardbeving van Roermond in 1992, gemeten in Duitsland op 100 km afstand.



Figuur 2.4 Vergelijking van versnelling gemeten in station Middelstum-1 voor de aardbevingen van 14 april 2009 $ML = 2.7$ (bovenste drie) en van 16 augustus 2012 in Huizinge (onderste drie). (1,4=radiaal, 2,5=transversaal, 3,6=verticaal). (Dost en Kraaijenpoel, 2013)



Figuur 2.5 Gemeten snelheid in m/sec voor de magnitude $ML = 5.8$ aardbeving op 100 kilometer epicentrale afstand (Roermond 1992) gemeten in station BUG in Duitsland. Bovenste component geeft radiale snelheid, middelste geeft transversale snelheid en onderste de verticale snelheid. (Dost en Kraaijenpoel, 2013)

Uit de figuren blijkt dat de respons aan het oppervlak bij een geïnduceerde aardbeving in vergelijking met een tektonische aardbeving van kortere duur is en hoogfrequentier. Het gemeten diagram van een geïnduceerde beving toont doorgaans maar één piek met een significant grote amplitude. De metingen uit 2012 laten in afwijking hiervan meer dan één significante piek zien.

2.2 Hoe reageert de ondergrond op een aardbeving?

De horizontale versnellingen in de grond tijdens een aardbeving leiden tot extra schuifspanning. Vooral losgepakt zand zal hierdoor willen verdichten. Voor verdichting moet het water tussen de korrels eerst uitstromen, maar hier is tijdens de aardbeving geen tijd voor, zodat wateroverspanningen optreden. Deze leiden tot tijdelijke vermindering van korrelspanningen en daarmee tot vermindering van sterkte en stijfheid van het zand. Als de trilling sterk is kan het zand zijn sterkte en stijfheid zelfs compleet verliezen (dit wordt verweking genoemd). Verwekingsgedrag kan zowel optreden bij een snelle eenmalige schuifspanningsverhoging (statisch), als bij snelle herhaalde schuifspanningswisselingen (cyclisch). Naast de grootte van de extra schuifspanning is dus ook het aantal schuifspanningswisselingen van invloed.

Bij de tot op heden opgetreden aardbevingen in Groningen zijn geen locaties vastgesteld waar verweking is opgetreden. Bij een sterkere aardbeving (vanaf ongeveer 0,2 g) neemt de kans op verweking volgens de huidige inzichten sterk toe. Dit aspect wordt beschouwd in paragraaf 4.1. Voor klei en veenlagen bestaat dit gevaar niet of nauwelijks.

2.3 Hoe reageert een constructie op een aardbeving?

Een constructie in of op de grond zal ook gaan bewegen door de beweging van de grond. Deze dynamische respons van de totale constructie wordt beïnvloed door de massa, stijfheid en sterkte van de constructiedelen, en de interactie met de omringende of onderliggende grond. Het is in Nederland niet vereist om constructies te berekenen op aardbevingen (met enkele uitzonderingen zoals grote energiecentrales). De kritische infrastructuren zijn dus ook niet op een aardbevingsbelasting ontworpen. Dat wil echter niet zeggen dat ze geen enkele aardbevingsbelasting zouden kunnen weerstaan.

2.4 Eurocode 8

De Eurocode 8 (EC8) geeft voorschriften voor het ontwerpen op aardbevingsbelasting, maar is in Nederland niet voorzien van nadere methoden en belastingen en zelfs niet officieel van kracht. Wel kan de denkwijze van EC8 worden gevolgd, wat op enkele onderdelen dan ook gedaan is. Verder is gebruik gemaakt van specifiek afgeleide methoden uit de literatuur. Aanbevolen wordt EC8 geschikt te maken voor toepassing in Groningen, zie hiervoor de aanbevelingen in paragraaf 7.5.

De Eurocode 8 geeft voorschriften voor het ontwerpen op aardbevingsbelasting. De Eurocode 8 kent 6 delen:

1. Algemene regels, seismische belastingen en regels voor gebouwen.
2. Bruggen.
3. Beoordeling en verbetering van gebouwen.
4. Silo's, opslagtanks en pijpleidingen.
5. Funderingen, grondkerende constructies en geotechnische aspecten.
6. Torens, masten en schoorstenen.

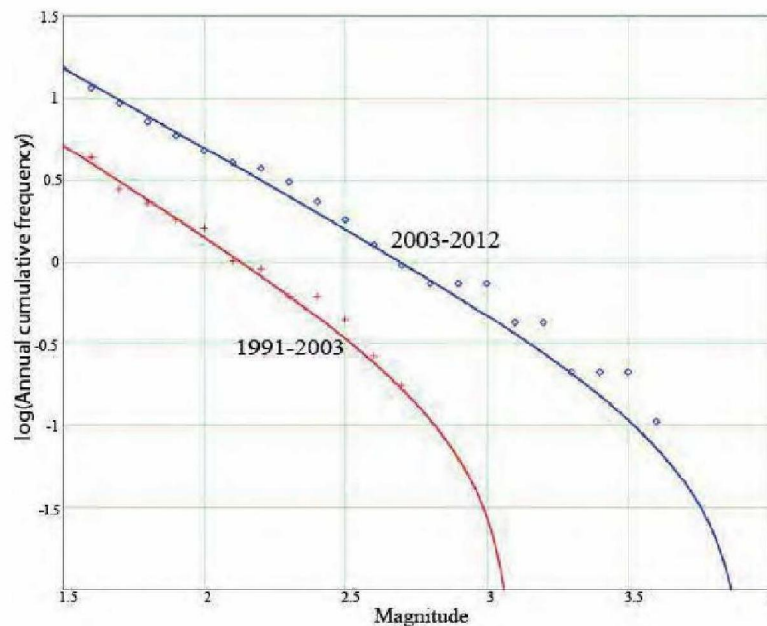
Voor pijpleidingen en hoogspanningsmasten worden dus specifieke regels gegeven in respectievelijk deel 4 en deel 6. Voor taludstabiliteit (van belang voor waterkeringen) worden regels gegeven in deel 5.

2.5 Aardbevingsbelasting

Voor het bepalen van de standzekerheid van grondconstructies en bouwwerken worden de effecten van een aardbeving eerst kwantitatief vertaald in de mate van groundbeweging, welke doorgegeven wordt aan de constructies. Een aardbevingstrilling kent enkele karakteristieken die aan de grond of constructie opgelegd worden, namelijk de sterkte (amplitude, variërend in de tijd), de duur, de frequentie inhoud en de richting. Deze karakteristieken variëren als functie van onder meer de magnitude van de aardbeving. Voor deze Quick Scan is een ontwerpssignaal afgeleid van een geregistreerd signaal. Het resultaat hiervan is vergeleken met modelsignalen. De keuze van het signaal waarmee de standzekerheidsberekeningen zijn uitgevoerd is in overleg met het KNMI gemaakt.

2.5.1 Magnitude

Figuur 2.6 toont het Gutenberg-Richter diagram voor de frequentie van voorkomen van aardbevingen in Groningen voor verschillende magnitudes. Daaruit wordt duidelijk dat vanaf 2003 meer bevingen met hogere magnitudes optreden.



Figuur 2.6 Illustratie van het niet-stationaire karakter van de relatie tussen magnitude en frequentie van optreden (Dost en Kraaijenpoel, 2013)

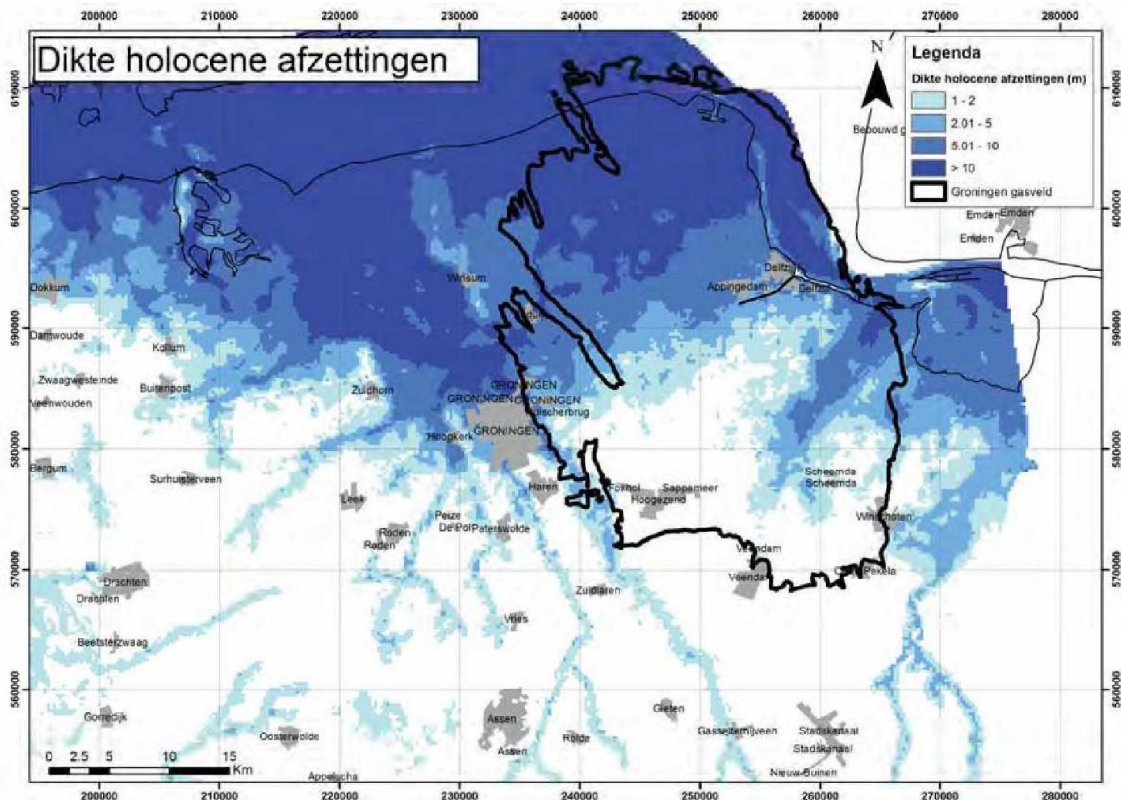
De voorlopig zwaarste beving in Groningen (magnitude $M_w = 3,6$, piekversnelling PGA = 0,085 g) vond plaats op 16 augustus 2012. Het epicentrum lag bij Huizinge.

De bepaling van de maximum magnitude maakt deel uit van de studies die eind 2013 opgeleverd zullen worden. In deze studie worden de effecten op kritische infrastructuur bij verschillende magnitudes onderzocht met de magnitude van $M_w = 5$ als bovengrens.

2.5.2 Invloed ondergrond

Zowel de sterkte van de beving als het trillingsspectrum worden bepaald door de opbouw van de ondiepe ondergrond. Bij een slappe ondiepe ondergrond kan het signaal versterkt worden, ook wel opslingering genoemd. Onder het grote Groningen gasveld varieert de ondiepe ondergrond in het gebied sterk. In het zuiden van het gebied liggen relatief dichte pleistocene zanden aan het oppervlak, naar het noorden toe neemt de dikte van de holocene afzettingen toe (Figuur 2.7). Op het Drents plateau, in het zuiden, is keileem dicht onder het maaiveld aanwezig (Formatie van Drente, gevormd door het landijs in het Saalien). Onder het pleistocene zand bevindt zich op verschillende plekken zware, bruinzwarte klei (*potklei*), die tientallen meters tot meer dan 100 meter dik is. De potklei is in geulsystemen afgezet, de diepste geulen liggen bij Appelscha, Zuidlaren, Hoogezand en Scheemda (Berendsen, 2004). De keileem en potklei zijn relatief stijve formaties. De pleistocene formaties vallen in de Eurocode 8 categorieën B tot C (zie Tabel 2.1). Deze ondergrond vertoont weinig tot geen opslingering.

De Holocene afzettingen bestaan uit een aaneengesloten dik pakket slappe tot vaste klei, afgewisseld met matig vast gepakt kleilig zand (Formatie van Naaldwijk), eventueel met veen inschakelingen (Hollandveen Laagpakket, Formatie van Nieuwkoop). Meestal is bovenop het pleistocene pakket 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 (Verheij et al, 2002). Deze ondergrond valt in de categorieën C tot D (zie Tabel 2.1).



Figuur 2.7 Dikte van de holocene afzettingen (DINO, 2013)

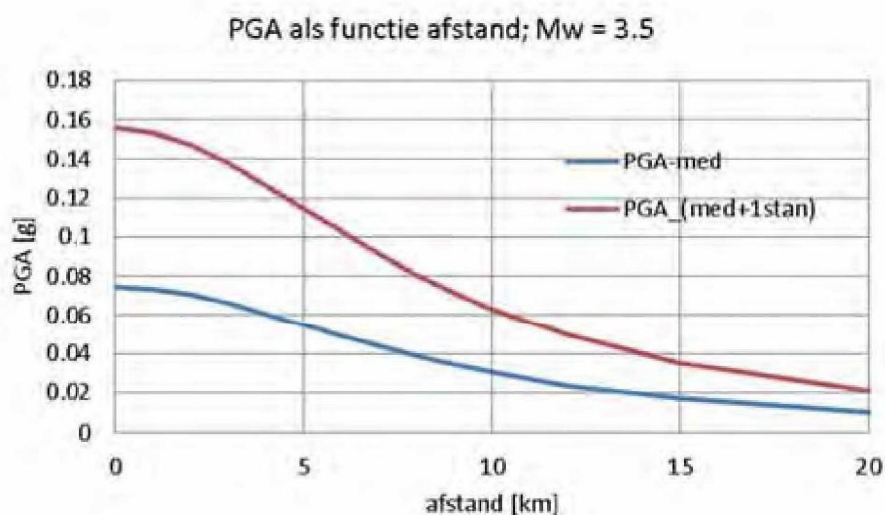
2.5.3 Amplitude en relatie met de afstand

De amplitudes van de bewegingen worden uitgedrukt in piek grondsnelheid (PGV), -versnelling (PGA) en -verplaatsing. De relatie hiervan met magnitude, haarddiepte, afstand en grondgedrag wordt uitgedrukt in empirische dempingsrelaties, afgeleid uit (verzamelingen van) geregistreerde trillingssignalen. Eerder zijn dempingsrelaties afgeleid voor de aardbevingen in Groningen en vergeleken met relaties in gebruik in de internationale praktijk (Dost et al. 2004). Deze relaties vertonen echter een grote onzekerheid op korte afstanden (enkele kilometers) van het epicentrum. Recentelijk is een nieuwe dempingsrelatie opgesteld, gebaseerd op een aanmerkelijk grotere dataset dan voorheen (Akkar et al 2013). Er wordt rekening gehouden met het breuktype en de stijfheid van de ondiepe ondergrond. Hiermee wordt de voorspelling van de PGA en PGV op korte afstanden sterk verbeterd. De PGV en PGA behorend bij een Mw=5 magnitude is met deze relatie berekend. De gebruikte input parameters zijn:

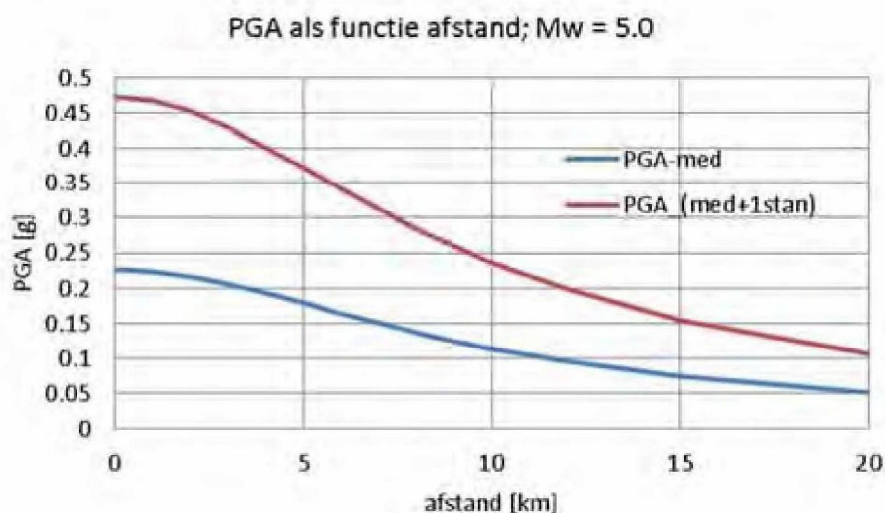
Moment Magnitude	5	
Soort breukvlak (Normal: 0, Reverse:1, Strike-slip:2)	0	
Vs30 (m/s) (schuifgolfsnelheid: maat voor stijfheid bovenste 30 m)	184	Middelstum (Wassing et al., 2003)
Diepte (km)	3	

De gemiddelde waarden in het epicentrum zijn dan respectievelijk PGA = 0,23 g en PGV = 0,12 m/s. Om rekening te houden met de onzekerheid in de bepaling van de PGA en PGV worden de constructies beoordeeld tot aan een PGA van 0,5g en een PGV van 0,23 m/s, dit komt overeen met de waarde van de mediaan plus 1 standaarddeviatie volgens Akkar et al

(2013). Met deze relatie is voor verschillende combinaties van magnitude en afstand de PGA te bepalen. Voor de moment magnitude $M_w=3.5$ en $M_w=5$ is in Figuur 2.8 en Figuur 2.9 het verloop van de PGA als functie van de afstand gegeven. In elke figuur zijn zowel de mediane waarde als de mediane waarde plus 1 keer de standaard deviatie, volgend uit de spreiding in de database, gegeven. Voor de PGV zijn vergelijkbare relaties op te stellen. Uit een vergelijking door KNMI met de geregistreerde $M_w=3.6$ signalen van de Huizinge aardbeving bleek dat deze binnen het betrouwbaarheidsinterval van 1 standaarddeviatie vallen (pers. comm. Dost, 2013).



Figuur 2.8 PGA als functie afstand, $M_w = 3,5$



Figuur 2.9 PGA als functie afstand, $M_w = 5$

2.5.4 Response spectra

De interactie tussen de karakteristieken van de trilling wordt uitgedrukt in een “response spectrum”. Eurocode 8 bevat model response spectra voor verschillende klassen tektonische aardbevingen. Ook in de studie van Akkar et al. (2013) worden spectrale versnellingen

(versnellingen aan constructies als reactie op de aardbeving)) als functie van de trillingsperiode berekend. Deze worden vergeleken met het response spectrum berekend aan de hand van twee registraties van de augustus 2012 Mw=3.6 beving van Huizinge, in aanmerking genomen dat het spectrum van een zwaardere aardbeving hiervan kan verschillen.

EC8 geeft model response spectra voor tektonische aardbevingen. Onderscheid wordt gemaakt tussen lichte aardbevingen (type 2, magnitude $M_s < 5.5$) en zware aardbevingen (type 1, $M_s > 5.5$). Voor Groningen kiezen we voor type 2. Model spectra voor verschillende typen ondergrond conform EC8 zijn weergegeven in Figuur 2.10.

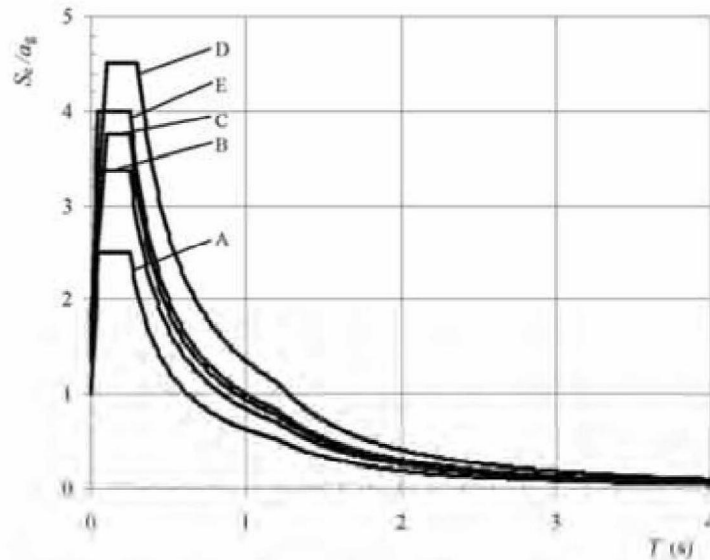


Figure 3.3: Recommended Type 2 elastic response spectra for ground types A to E (5% damping)

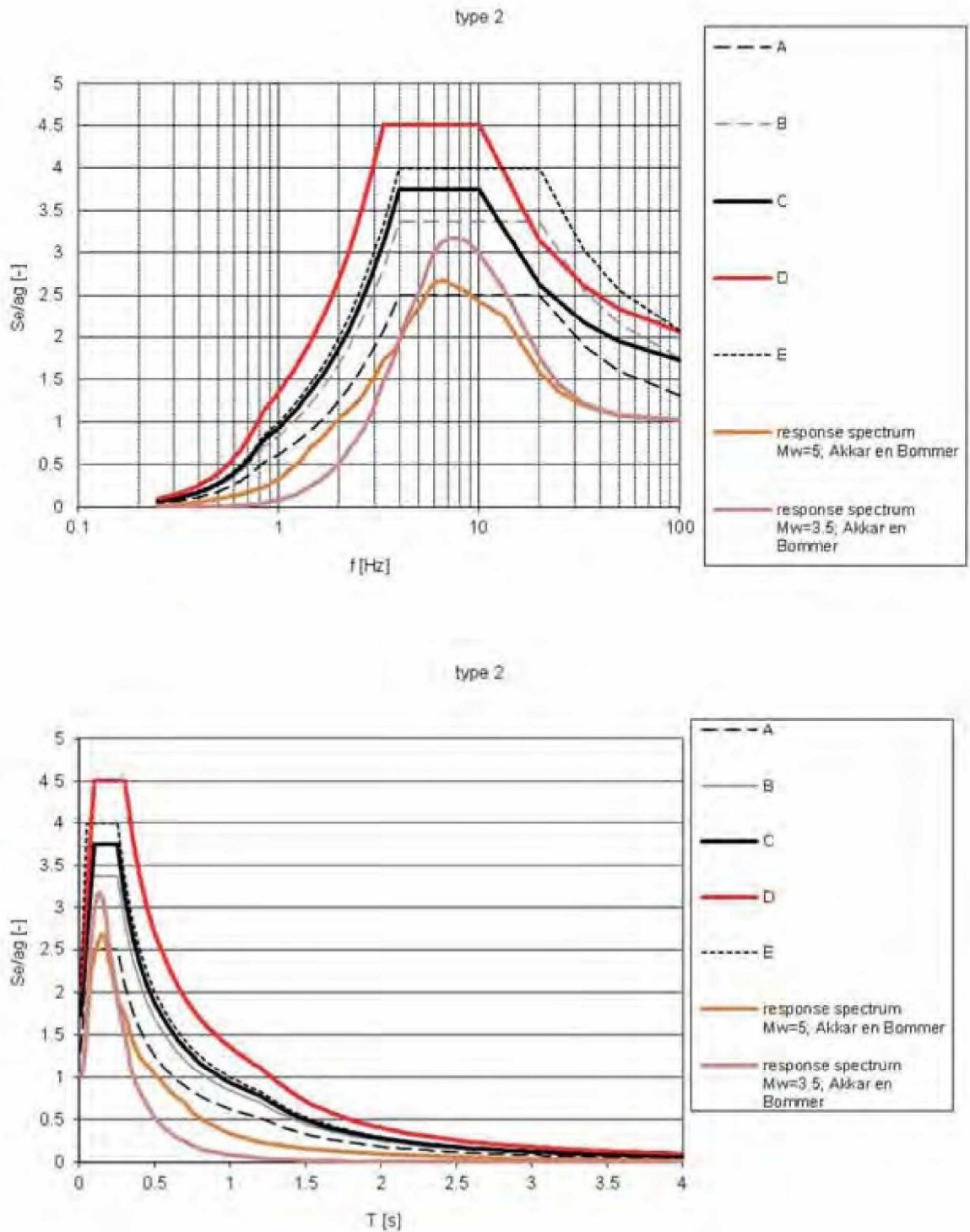
Figuur 2.10 Response spectra type 2, uit EC8

De indeling in ondergrondtypen is als volgt:

Ground type	Description of stratigraphic profile	Parameters		
		v_{s20} (m/s)	N_{125} (blowes/10cm)	c_u (kPa)
A	Rock or other rock-like geological formation, including at most 5 m of weaker material at the surface.	> 800	–	–
B	Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least several tens of metres in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth.	360 – 800	> 50	> 250
C	Deep deposits of dense or medium-dense sand, gravel or stiff clay with thickness from several tens to many hundreds of metres.	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil.	< 180	< 15	< 70
E	A soil profile consisting of a surface alluvium layer with v_s values of type C or D and thickness varying between about 5 m and 20 m, underlain by stiffer material with $v_s > 800$ m/s.			
S_1	Deposits consisting, or containing a layer at least 10 m thick, of soft clays/silts with a high plasticity index ($PI > 40$) and high water content	< 100 (indicative)	–	10 - 20
S_2	Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A – E or S_1			

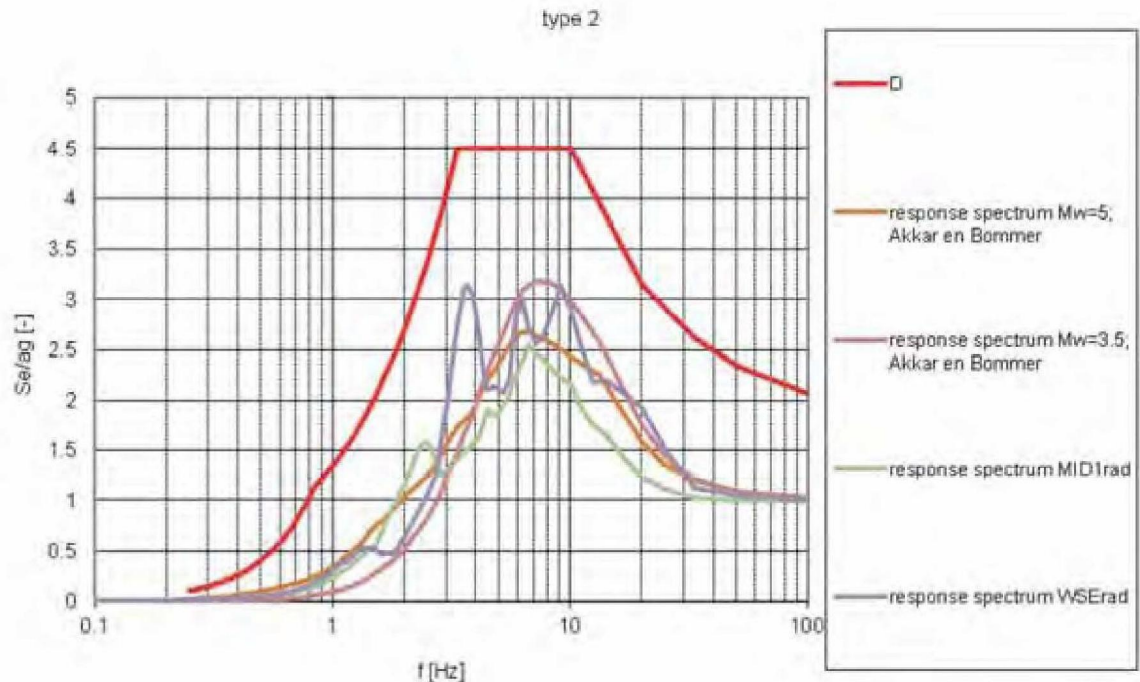
Tabel 2.1 Beschrijving van type ondergrond, EC8

Voor Groningen is type D in principe representatief voor het holocene kleigebied. Met de studie van Akkar et al. (2013) kunnen response spectra worden berekend voor de input parameters gegeven in paragraaf 2.5.2. In Figuur 2.11 worden deze genormaliseerde spectra vergeleken met de spectra uit EC8. Getoond wordt de versnelling van een constructie (S_e) als functie van de eigenfrequentie (f) van deze constructie in de bovenste grafiek of de eigenperiode (T) in de onderste grafiek, ten opzichte van de versnelling die in de grond is gemeten (a_g).



Figuur 2.11 Vergelijking van verschillende ontwerpspectra voor belasting (boven in frequentiedomein, onder in tijddomein) op basis van Eurocode 8 (A t/m E) en Akkar et al (2013) ($M_w=5$ en $M_w=3.5$)

De EC8, type D en Akkar et al. (2013) spectra worden in Figuur 2.12 vergeleken met twee spectra die gebaseerd zijn op geregistreerde signalen van de Huizinge beving. Hiervoor zijn de registraties van Middelstum (MID1rad) en Westeremden (WSErad) gebruikt.



Figuur 2.12 Vergelijking tussen geregistreerde en model spectra

Het spectrum van de geregistreerde trilling WSErad komt overeen met de spectra berekend volgens Akkar et al. (2013). Het MID1rad spectrum ligt er iets onder. De relatieve amplitude van het EC8 type D spectrum voor tektonische aardbevingen met een magnitude kleiner dan 5,5 overschat de gemeten en berekende respons spectra sterk, maar de kantelfrequenties (ca. 3 Hz en 10 Hz) zijn wel vergelijkbaar.

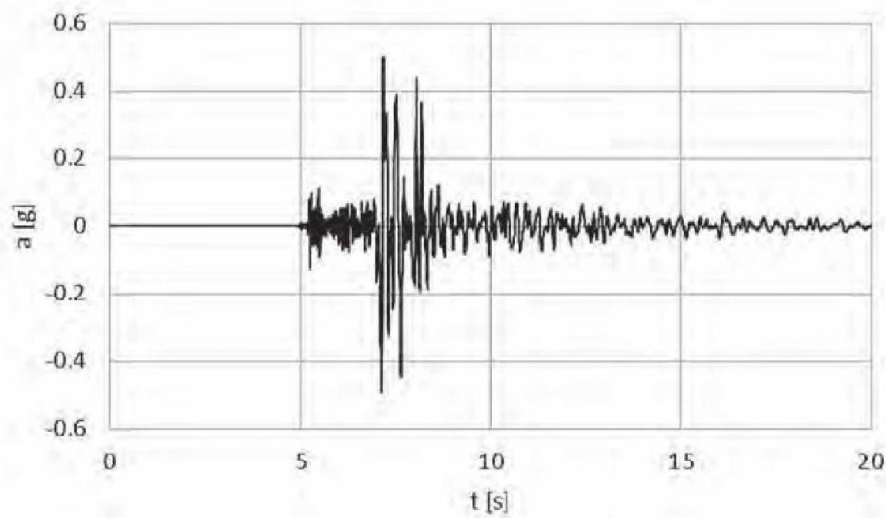
2.5.5 Conclusies

Gekozen is om een geregistreerd aardbevings signaal te gebruiken als basis voor een afgeleid representatief ontwerpsignaal bij hogere magnitudes. Het geregistreerde signaal is vervolgens opgeschaald naar de te beschouwen magnitude. De piek- en spectrale belastingen zijn in overleg met KNMI berekend met een empirisch rekenmodel van Akkar et al. (2013). Uit een vergelijking van de berekende spectra met de metingen van de Huizinge 2012 aardbeving blijkt dat het spectrum van de meting van het station Westeremden (WSErad) het meest overeenkomt met de gemodelleerde spectra. Bij een aardbeving met Mw=5 is de amplitude van de response op basis van de meting groter dan die van de modellering van Akkar et al. (2013), wat als conservatief kan worden beschouwd. Het WSErad signaal is verkozen boven het MID1rad signaal omdat het WSErad signaal meerdere cycli vertoont, wat ook als een conservatieve aanpak kan worden beschouwd.

Het EC8 spectrum wordt voor de Quick Scan niet gebruikt. Ten opzichte van de gemeten respons en de database van Akkar et al. (2013) voor geïnduceerde bevingen wordt deze op dit moment als te conservatief voor toepassing in Groningen beoordeeld, waarschijnlijk

veroorzaakt door de karakteristieke eigenschappen van de tektonische aardbevingen waarop dit is gebaseerd.

Het gebruikte signaal, opgeschaald naar 0,5g is weergegeven in Figuur.2.13.



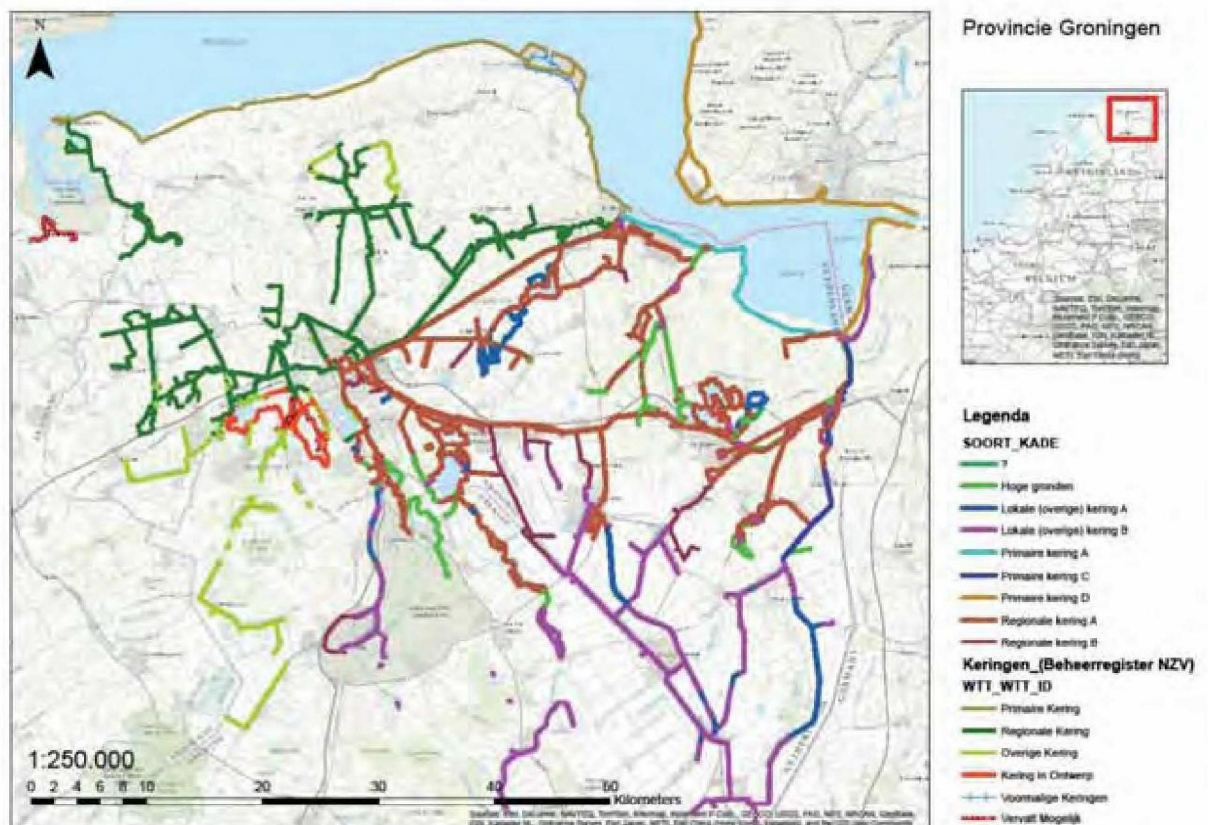
*Figuur.2.13 Gebruikt representatieve signaal (verschaald WSErad signaal, PGA = 0,5g), schalingsfactor tijd is 1,0)
Voor lagere versnellingen (0 – 0,5g) is de piekversnelling naar rato verlaagd*

3 Mogelijke faalmechanismen kritische infrastructuur

3.1 Waterkeringen

3.1.1 Inleiding

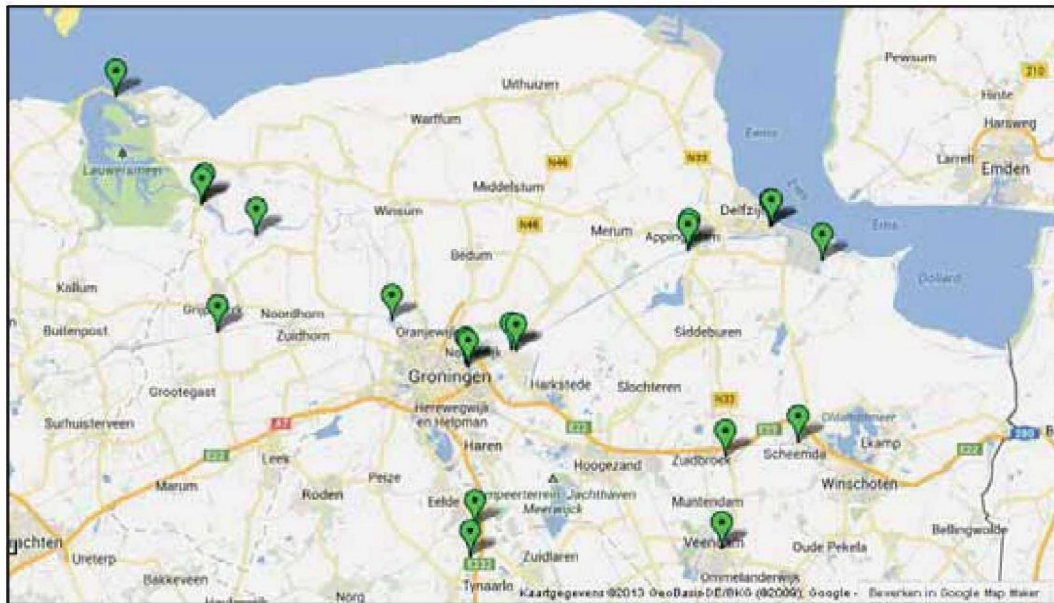
In Groningen ligt ongeveer 90 kilometer primaire waterkering en ongeveer 1000 kilometer regionale waterkering. De ligging van de waterkeringen is aangegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Ligging primaire en regionale waterkeringen in Groningen

In deze primaire en regionale waterkeringen bevindt zich een groot aantal waterkerende kunstwerken zoals schutsluizen, doorvoeren van gemalen en coupures. In Figuur 3.2 wordt een deelloverzicht van de door Provincie Groningen beheerde (schut)sluizen gegeven. In Bijlage B is een uitgebreider overzicht van de aanwezige kunstwerken te vinden. De kunstwerken in de regionale keringen zijn nog niet door de waterschappen getoetst, zodat er relatief weinig bekend is over de actuele toestand.

De vraag die in deze Quick Scan moet worden beantwoord is of door gaswinning geïnduceerde aardbevingen een risico vormen voor het waterkerend vermogen van de waterkeringen en daarmee voor de waterveiligheid van de regio. In deze studie wordt alleen het risico dat de waterkerende functie wordt aangetast met mogelijk inundatie als gevolg als risico beschouwd. In deze studie hanteren we hiervoor de term 'standzekerheid van de waterkering'. In deze definitie wordt schade aan de waterkering zonder inundatie, hoewel de kans daarop reëel is bij grotere magnitude van de aardbeving, niet als risico beschouwd.



Figuur 3.2 Ligging door Provincie Groningen beheerde (schut)sluizen (Google Maps)

In deze Quick Scan is vooral generiek gekeken of aardbevingen een risico kunnen vormen voor de standzekerheid van de waterkeringen. Er worden geen locatiespecifieke conclusies getrokken of locatiespecifieke aanbevelingen gedaan.

In Nederland kennen we voor waterkeringen een veiligheidsfilosofie waarin, naast het rekenen met (ongunstige) karakteristieke waarden, extra partiële veiligheidsfactoren worden gehanteerd. Dit is strenger dan de voorschriften uit de Eurocode, waarin alleen karakteristieke waarden voor parameters worden voorgeschreven. In deze studie is er van uitgegaan dat de Nederlandse, dus strengere, aanpak onverkort van toepassing is.

3.1.2 Eerder onderzoek

In 1998 is een studie uitgevoerd naar het effect van ondiepe aardbevingen op verweking van zand (Kruse, 1998). Voor de studie is gekeken naar een combinatie van (ongunstige) omstandigheden zoals die zich in Noord-Nederland zou kunnen voordoen:

- Een aardbevingsbelasting afgeleid van de sterkste in Noord-Nederland gemeten aardbevingsignalen.
- Een opbouw van de ondergrond met onder andere een 11 meter dik pakket losgepakt zand gelegen op een slappe laag.
- Een geometrie met een hoog relatief steil onderwatertalud (helling 1 : 8) met aansluitend een 9 meter hoog dijklichaam.

Het aardbevings signaal (Roswinkel, 16 februari 1997) is doorgerekend met een 2D lineair elastisch eindig elementenmodel (DIANA). Het aardbevings signaal had een horizontale piekversnellingswaarde van 0,3g. Op basis van in de literatuur gerapporteerde waarden van piekversnellingen (gemiddelde waarde plus 1 standaardafwijking) horend bij een beving van magnitude 3,35 werd die echter als een extreme uitschieter beschouwd en is een waarde van 0,2g gebruikt voor de berekening. Als vaker voorkomend signaal werd ook gerekend met een waarde van 0,125g. Het losgepakte zand werd representatief geacht voor snel opgevulde getijdengeulen zoals die langs de kust voorkomen.

De berekeningen met een piekversnelling van 0,125g leverden nauwelijks een verhoging van de waterspanning op. De berekeningen met 0,2g leverden wel significante wateroverspanningen op, mede afhankelijk van de aangenomen stijfheid van de slappe laag onder het zand tot volledige verweking van de bovenste meters van het onderwatertalud. Onder de dijk was de waterspanningsgeneratie klein (maximaal 3 %). Uit stabiliteitsberekeningen bleek dan ook dat de dijk stabiel was, maar dat vooral op het onderwatertalud glijcirkels berekend werden. Omdat de helling van het onderwatertalud 1 : 8 was bleef echter ook het onderwatertalud stabiel. Geconcludeerd werd dat enige aantasting van het onderwatertalud door stroming van het verweekte zand aan het oppervlak niet kon worden uitgesloten, maar dat de dijkfunctie en geometrie niet significant werd beïnvloed.

In het rapport staat verder een interessante verwijzing naar de literatuur over de opbouw van wateroverspanning bij explosies (Charlie et al, 1985, Kok, 1987). Genoemd wordt dat waterspanningen zich bij piekversnellingswaarden vanaf 0,1g kunnen gaan opbouwen. Deze waarde komt overeen met wat uit studies naar opgetreden verweking bij aardbevingen naar voren komt.

Een tweede rapport dat ingaat op de invloed van aardbevingen op waterkeringen in Nederland is 'Invloed van aardbevingen op overstromingsrisico's' (Verheij et al, 2002). In het rapport wordt ingegaan op de regio's Roermond (tektonische aardbevingen), en Bergen/Alkmaar en Groningen/Roswinkel (geïnduceerde aardbevingen door gaswinning). Het rapport geeft een beschouwing van de frequenties van voorkomen van gecombineerde gebeurtenissen (een aardbeving met een bepaalde magnitude én het optreden van een hoogwaterstand). Als maatgevend mechanisme voor de waterkeringen is gekeken naar de stabiliteit van de taludhellingen van de dijk/kade. Aangezien het gaat om overstromingsrisico is de opeenvolging beschouwd van een zware aardbeving die schade aan de waterkering veroorzaakt gecombineerd met het optreden van een hoogwater voordat de schade is gerepareerd.

Voor de regio Groningen/Rosmalen werd verondersteld dat de condities bij boezemkaden (relatief) kritieker zijn dan bij de primaire waterkeringen. De situatie bij de Tussenklappolder werd beschouwd, waarbij bij gebrek aan gegevens werd aangenomen dat de kade onder normomstandigheden (normpeil NAP +1,42 m) een reserve van 10 % in stabiliteitsfactor zou hebben en bij een jaarlijks optredende waterstand (NAP + 0,7 m) een reserve van 20 %. Verder werden de volgende uitgangspunten gebruikt:

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

In de stabiliteitsanalyse werd met een Newmark aanpak (zie paragraaf 3.1.4) voor een taludhelling van 1 : 2 en een hoek van inwendige wrijving van 30 graden bij deze kortdurende piek een verplaatsing van slechts 1 mm berekend bij de maximum piekversnelling. Verweking

werd niet beschouwd, omdat verwacht werd dat onder de kaden slechts sporadisch los gepakt zand voor zou komen. Dit leidde tot de conclusie dat vanwege de korte duur van de beving en het optreden van slechts één puls de gasbevingen een verwaarloosbare invloed hadden op de kans op doorbraak van boezemkaden. In de conclusie van de studie wordt echter nadrukkelijk gewezen op het oriënterende karakter van de studie en op de onzekerheden in aannames en rekenmethoden. Daarom is de stelling dat op basis van de studie niet eenduidig kon worden vastgesteld dat bij de veiligheidsbeoordeling geen rekening hoeft te worden gehouden met natuurlijke en geïnduceerde aardbevingen.

In het Voorschrift Toetsen op Veiligheid Primaire Waterkeringen (2007) wordt in kern 4 Belastingen in paragraaf 3.6 de belasting door aardbevingen en aardschokken behandeld. De letterlijke tekst:

“In zuidoost Nederland (provincie Limburg, het oostelijk deel van Noord-Brabant en zuidoost Gelderland) is de kans op een aardbeving met een intensiteit die schade tot gevolg kan hebben, ongeveer 1/1.000 per jaar. In de regio's Groningen/Roswinkel en Bergen/Alkmaar kunnen aardschokken voorkomen die het gevolg zijn van aardgaswinning. In de overige delen van het land is de kans op aardbevingen of aardschokken aanzienlijk kleiner.

Omdat een aardbeving en extreem hoog water twee onafhankelijke gebeurtenissen zijn, is de bijdrage aan de kans op falen van de waterkering te verwaarlozen. Bovendien zal de schade bij waterkeringen met een taludhelling van 1 : 3 of flauwer slechts in bijzondere gevallen (als de ondergrond bestaat uit zeer los gepakt zand) gepaard gaan met afname van kerende hoogte. Zowel de kans op een aardbeving tijdens hoogwater als het effect van een aardbeving op een waterkering is dusdanig klein dat waterkeringen niet getoetst worden voor dit belastinggeval.”

De Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen (2007) is hierover kort:

“De kans op falen van de kering ten gevolge van aardbevingen en aardschokken is te verwaarlozen. Deze belasting hoeft zodoende niet te worden beschouwd.”

3.1.3 Scenario analyse waterkeringen (primair, regionaal en kunstwerken)

Er is een scenario-analyse naar het bezwijken van waterkeringen als gevolg van geïnduceerde aardbevingen uitgevoerd. Hierbij zijn alleen die faalmechanismen of vormen van schade behandeld waarvan, op basis van de risicosessie tussen Deltares en de waterschappen Noorderzijlvest en Hunze en Aa's (zie Bijlage B) en ervaringen elders, wordt verondersteld dat deze beïnvloed kunnen worden door geïnduceerde aardbevingen. Daarbij is, waar nodig, onderscheid tussen primaire en regionale keringen gemaakt.

In deze paragraaf wordt ingegaan op waterkerende kunstwerken in primaire en regionale waterkeringen. Daaronder worden de volgende typen objecten onderscheiden:

- Uitwendige grondkeringen: kade- en keerwanden, coupures.
- Inwendige grondkeringen: zelfstandig waterkerende langsconstructies (type I), waterkerende langsconstructies als onderdeel van het grondlichaam (type II).
- Uitwendige waterdoorvoeren: keer-, stroom- en schutsluizen.
- Inwendige waterdoorvoeren: in-/uitlaatkokers, doorvoerkokers (gemaal).

Primaire en regionale keringen

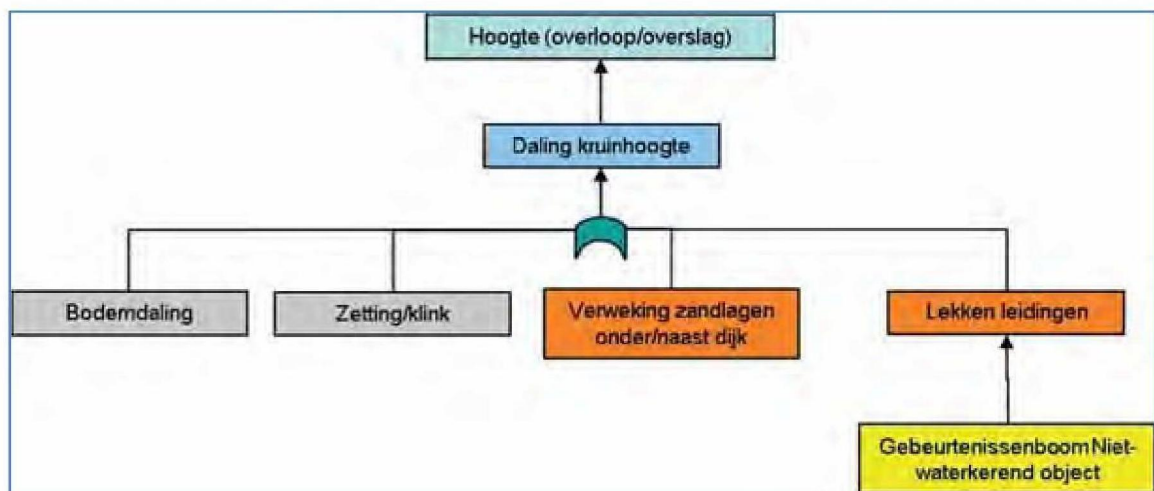
Volgens het VTV (RWS, 2007) moet een primaire waterkering (onder invloed van een hoogwaterbelasting) worden getoetst aan de *directe faalmechanismen* overloop/overslag, opbarsten en piping, macrostabiliteit binnenwaarts, macrostabiliteit buitenwaarts, microstabiliteit, bekledingen en aan de *indirecte faalmechanismen* stabiliteit voorland en Niet-waterkerende objecten (NWO's).

Voor regionale keringen wordt gebruik gemaakt van de "Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen" (STOWA, 2007). Feitelijk worden dezelfde mechanismen beschouwd als bij primaire waterkeringen, met daarbij de aanvulling dat aan de belastingkant ook gekeken wordt naar droogte bij droogtegevoelige (veen)kades.

Geïnduceerde aardbevingen kunnen een additionele bijdrage leveren aan de kans dat een waterkering volgens één van de bovenstaande bezwijkmechanismen faalt.

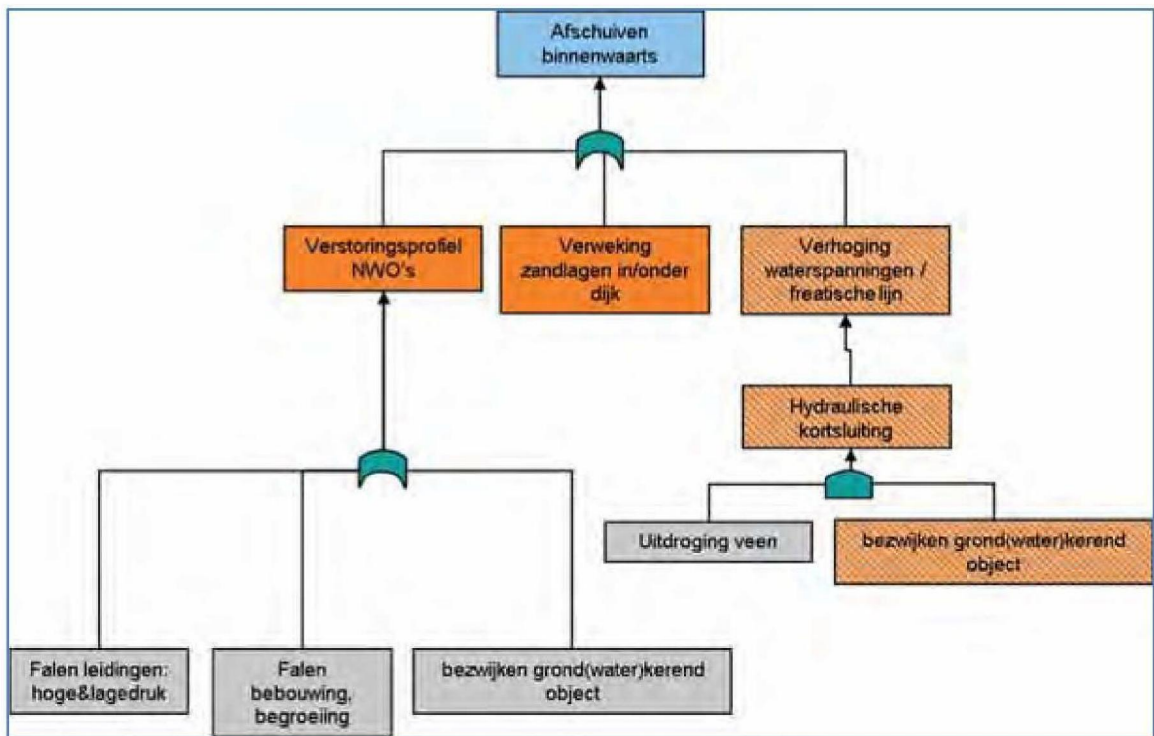
De kans op overstromen is het product van de kans op falen door een aardbeving en het optreden van een hoog water (d.w.z. een waterstand hoger dan restkruinhoogte na falen). Belangrijk verschil tussen regionale en primaire keringen is dat bij regionale keringen het reguliere peil relatief weinig verschilt van het toetspeil, waarmee de kans op falen door aardbeving vrij direct bij kan dragen aan de kans op overstromen. Bij primaire keringen is de kans op het optreden van een hoog water in de periode dat de dijk beschadigd is ten gevolge van een aardbeving over het algemeen kleiner.

Navolgend wordt voor elk van de directe faalmechanismen een gebeurtenissenboom gegeven, waarbij in de oranje vakjes de gebeurtenissen zijn aangegeven die beïnvloed kunnen worden door een geïnduceerde aardbeving (tijdens of direct na de beving). De indirecte faalmechanismen zijn in de foutenbomen verwerkt. Er wordt verondersteld dat de invloed van bevingen op de faalmechanismen microstabiliteit en bekledingen verwaarloosbaar is.

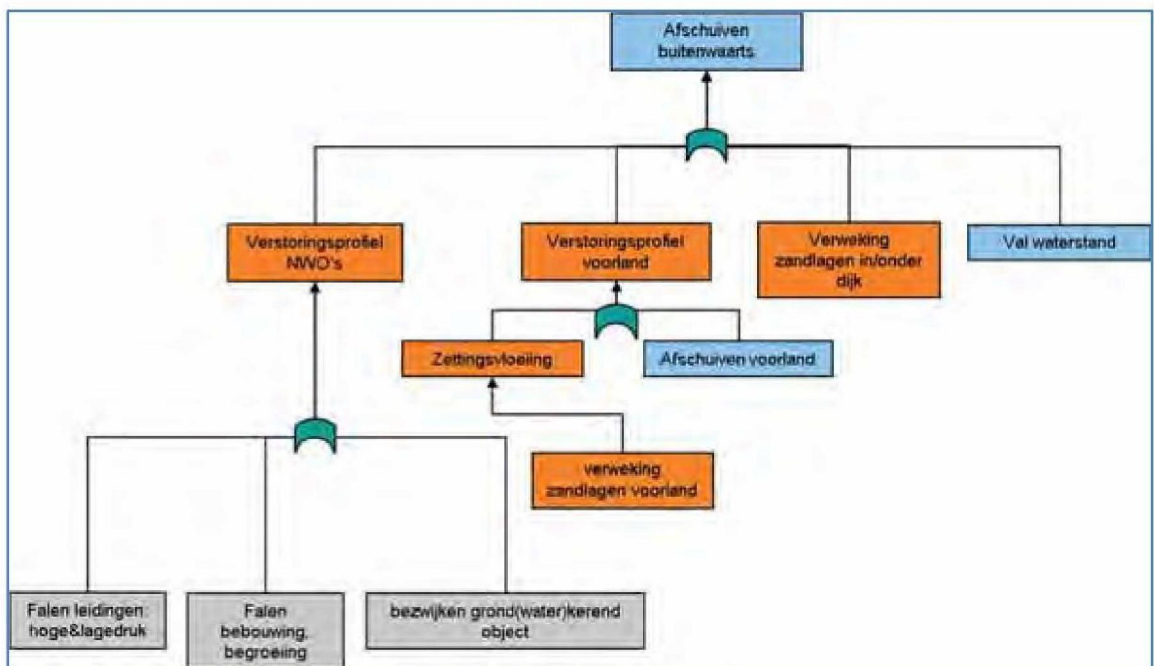


Figuur 3.3 Foutenboom behorend bij overloop/overslag

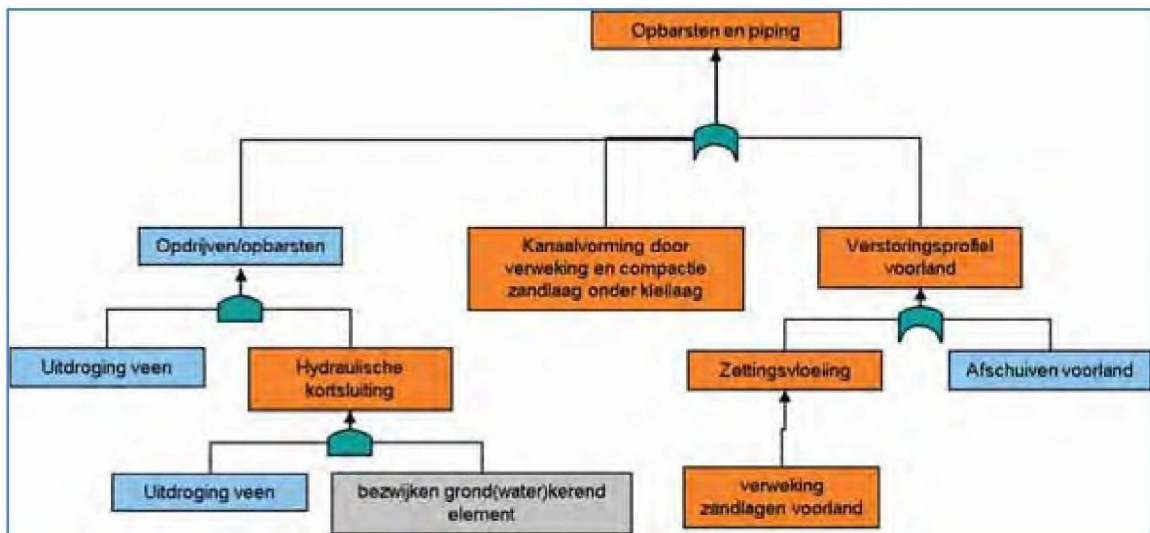
N.B. Het mechanisme van bodemdaling is ook gerelateerd aan onder andere de gaswinning. Dit indirecte effect is hier buiten beschouwing gelaten, maar speelt op langere termijn natuurlijk een rol in de hoogteligging van de kruin.



Figuur 3.4 Foutenboom behorend bij binnenwaartse macrostabiliteit



Figuur 3.5 Foutenboom behorend bij buitenwaartse macrostabiliteit



Figuur 3.6 Foutenboom behorend bij opbarsten en piping

In de gebeurtenissenbomen komen drie belangrijke gebeurtenissen/mechanismen naar voren die kunnen optreden ten gevolge van een geïnduceerde beving:

- A. Verweking.
- B. Hydraulische kortsluiting.
- C. Bezwijken niet waterkerende objecten.

Navolgend worden deze mechanismen toegelicht en hun relatie met de faalmechanismen schematisch weergegeven.

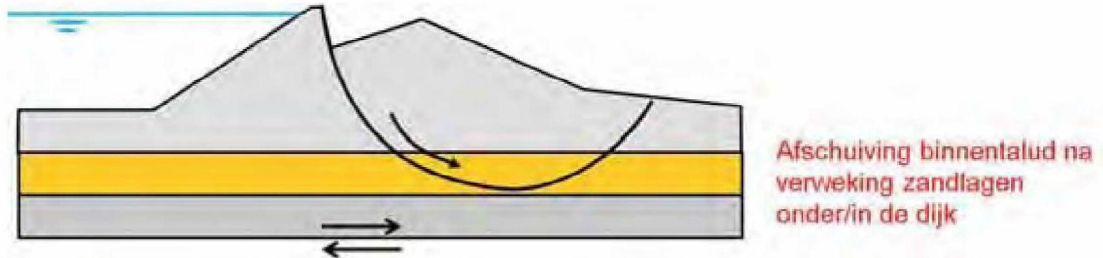
A Verweking

Er zijn twee typen verweking: cyclische verweking en statische verweking. Cyclische verweking betreft de cumulatieve opbouw van waterspanningen bij meerdere belastingswisselingen. Statische verweking betreft de opbouw van wateroverspanningen door het ineensstorten van het losgepakte korrelskelet. Hiervoor is in principe maar één voldoende grote belastingsverandering nodig. Andere voorwaarden zijn dat het zand losgepakt en waterverzadigd is. Onderscheid kan gemaakt worden tussen verweking van verzadigde en losgepakte zandlagen in en onder de dijk zelf en in het voorland.

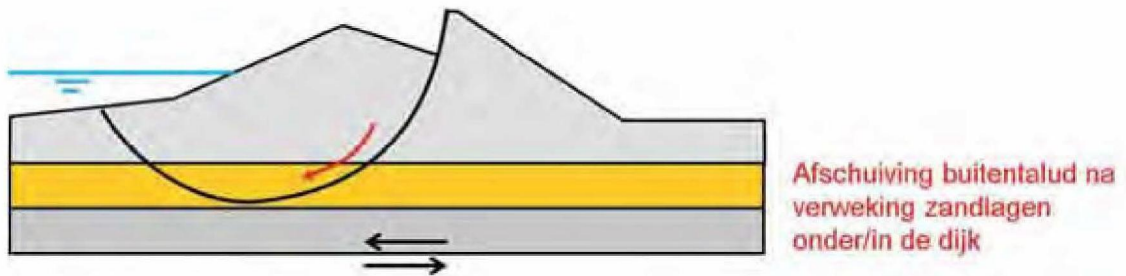
Verweking in en onder de dijk zal leiden tot verlaging van de schuifsterkte (wateroverspanningen) en kan daarmee leiden tot binnen- of buitenwaartse macroinstabiliteit (Figuur 3.7 en Figuur 3.8). Na enige tijd zal er in de verweekte lagen compactie (volumeverkleining) optreden. Dit kan leiden tot een daling van de kruinhoogte of, in geval van een kleidijk, het ontstaan van ruimte tussen de zandlaag en de kleidijk, waardoor piping kan ontstaan (Figuur 3.9 en Figuur 3.10).

Statische verweking van zandlagen in het onderwatertalud van het voorland kan leiden tot een zettingsvloeiing. Zettingsvloeiing leidt tot een reductie van de voorlandlengte. Dit kan leiden tot buitenwaartse macrostabiliteit en reductie van de beschikbare pipinglengte (figuren Figuur 3.11 en Figuur 3.12).

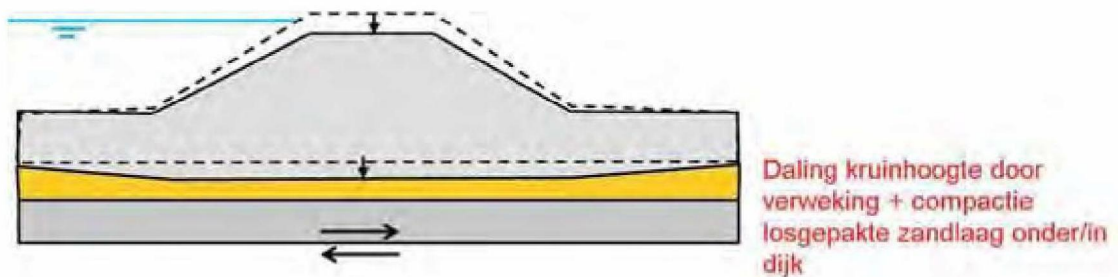
Verweking in losgepakte zandlagen onder/naast de dijk:



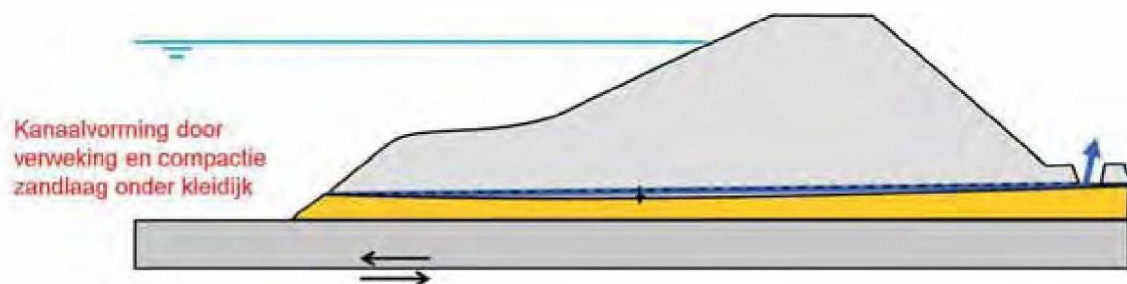
Figuur 3.7 Verweking losgepakte zandlaag en afschuiving binnentalud



Figuur 3.8 Verweking losgepakte zandlaag en afschuiving buitentalud

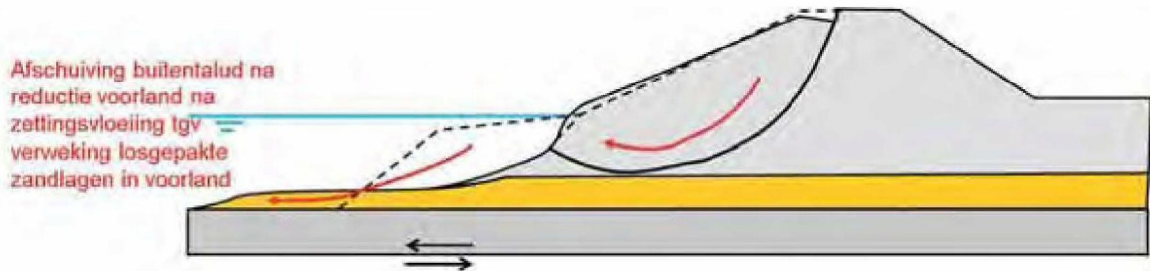


Figuur 3.9 Verweking + compactie losgepakte zandlaag en daling kruinhoogte

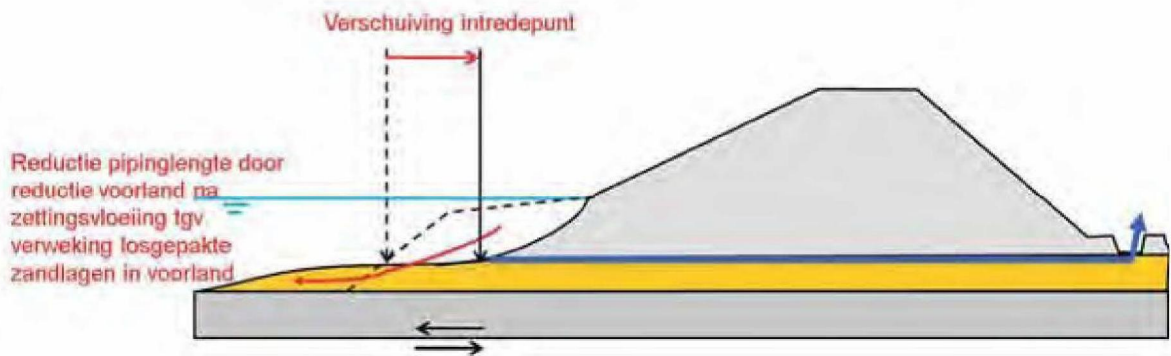


Figuur 3.10 Verweking losgepakte zandlaag onder kleilaag, compactie en vorming kanaal

Verweking in losgepakte zandlagen in het voorland:



Figuur 3.11 Verweking losgepakte zandlaag in voorland, zettingsvloeiing en afschuiving buitentalud



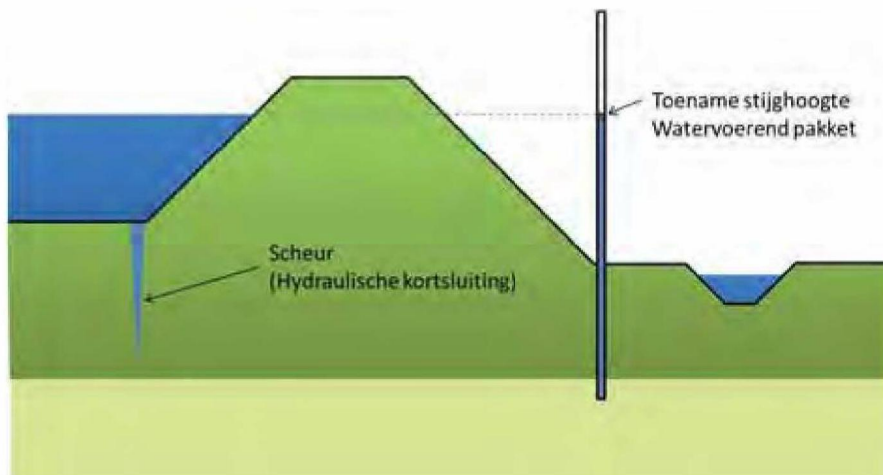
Figuur 3.12 Verweking losgepakte zandlaag in voorland, zettingsvloeiing en reductie pipinglengte

B Hydraulische kortsluiting

Onderstaande passage is ontleend aan “Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen” (Stowa, 2007).

Hydraulische kortsluiting is het ontstaan van een min of meer weerstandsvrije waterstroom tussen het oppervlaktewater en één of meer relatief horizontaal doorlatende grondlagen in of onder de kering (zie Figuur 3.13). Het ontstaan van hydraulische kortsluiting kan leiden tot een toename van de waterspanningen in die lagen. Dit kan een zeer ongunstige invloed hebben op de veiligheid tegen het optreden van verschillende mechanismen, met name de veiligheid tegen piping en tegen afschuiven van het binnentalud als gevolg van het wegvallen van de schuifsterkte langs een horizontaal grensvlak (in dit geval de bovenzijde van de beschouwde watervoerende laag).

Als een mogelijke oorzaak voor het ontstaan van hydraulische kortsluiting geeft de leidraad het horizontaal vervormen van de waterkering en ontstaan van grondbreuk in de waterbodem, zoals schematisch weergegeven is in Figuur 3.13. Dit scenario wordt niet ondenkbaar geacht in het geval van een aardbeving, met name daar waar langs de oeverlijn damwanden zijn aangebracht. Eveneens zou hierdoor piping meer maatgevend kunnen worden. Tijdens droge omstandigheden zou de kans op het ontstaan van hydraulische kortsluiting nog groter kunnen zijn.



Figuur 3.13 Toename stijghoogte (waterspanningen) als gevolg van hydraulische kortsluiting

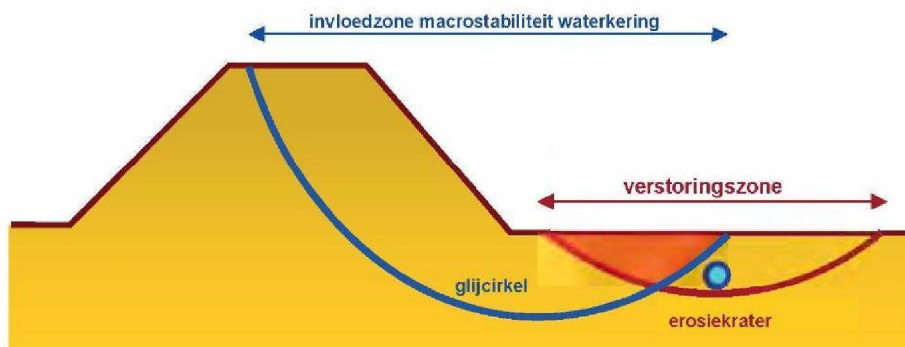
C Bezijken Niet waterkerende objecten (NWO's)

Een Niet Waterkerend Object (NWO) kan het waterkerend vermogen van de waterkering verstoren en daardoor een negatieve invloed hebben op de invloedzones behorende bij de verschillende faalmechanismen van de waterkering, zoals bijvoorbeeld de glijcirkel bij macrostabiliteit. Vaak is daarvan pas sprake als er sprake is van een calamiteit aan het NWO, bijvoorbeeld een ontwortelde boom, een lekke waterleiding of een geëxplodeerde gasleiding. Dit zijn in het geval van een aardbeving geen ondenkbare situaties.

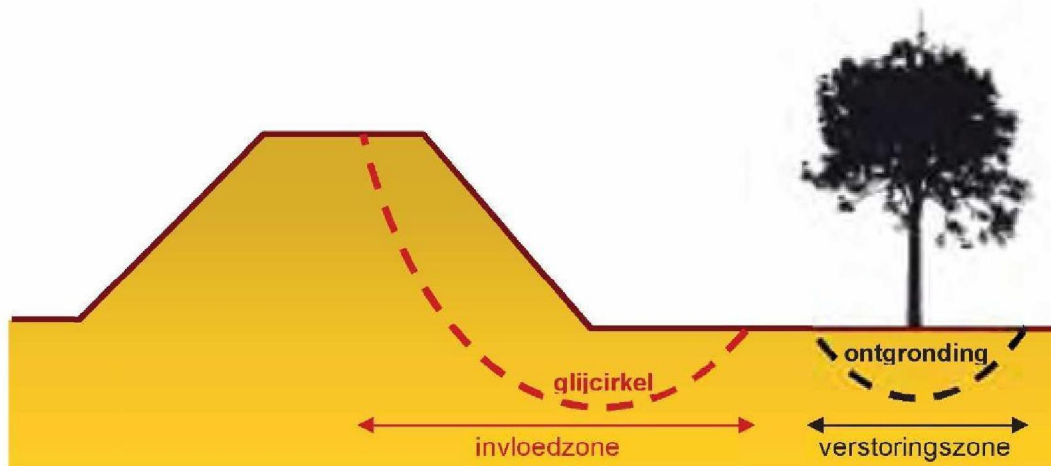
Bij de beoordeling van verstoringzones zijn van belang:

- De locatie van het NWO in het dwarsprofiel.
- De omvang van de verstoringzone.
- De staat van onderhoud van het object.

In Figuur 3.14 en Figuur 3.15 wordt schematisch de interactie weergegeven tussen de invloedzones van de waterkering en de verstoringzones van een NWO.

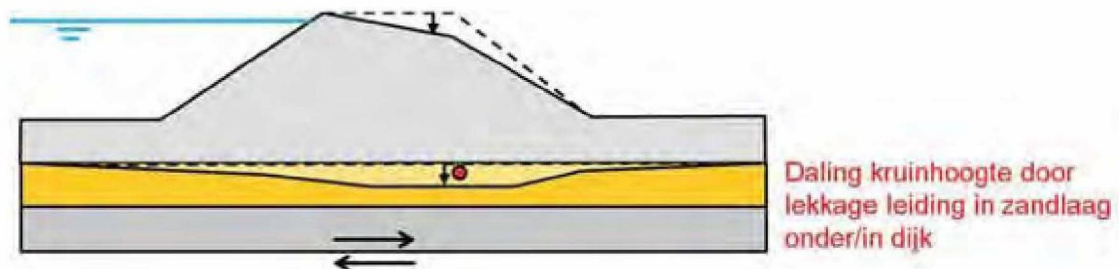


Figuur 3.14 Interactie tussen invloedzone waterkering en NWO



Figuur 3.15 Verstoringszone en invloedzone binnen een dwarsprofiel

In Figuur 3.16 wordt aangegeven hoe lekkage van een leiding kan leiden tot een daling van de kruinhoogte.

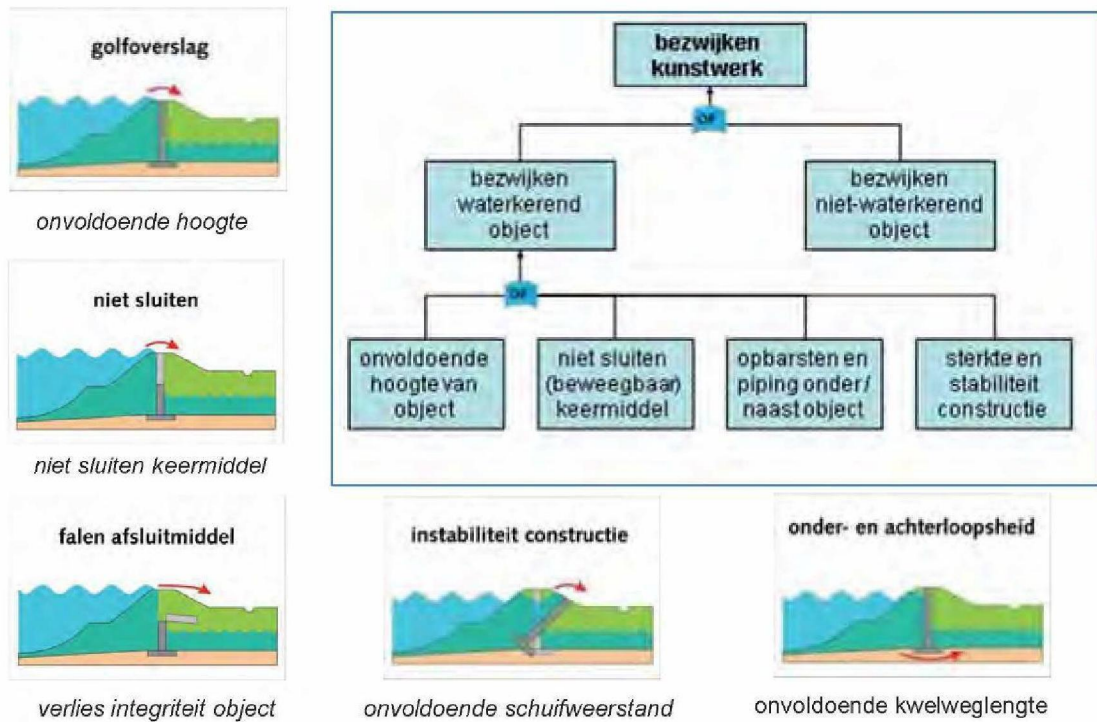


Figuur 3.16 Lekkage leiding + uitspoeling zand en daling kruinhoogte

Waterkerende kunstwerken

In de scenario-analyse naar het mogelijk bezwijken van of ontstaan van schade aan waterkerende objecten als gevolg van geïnduceerde aardbevingen worden alleen faalmechanismen omtrent waterkerende objecten beschouwd, zie Figuur 3.17. Dit impliceert ten eerste dat bezwijken of schade als gevolg van alleen een hoogwaterbelasting niet wordt beschouwd. Daarnaast vallen door deze afbakening niet-waterkerende objecten (zoals bebouwing, begroeiing, leidingen en duikers) hier buiten de scope.

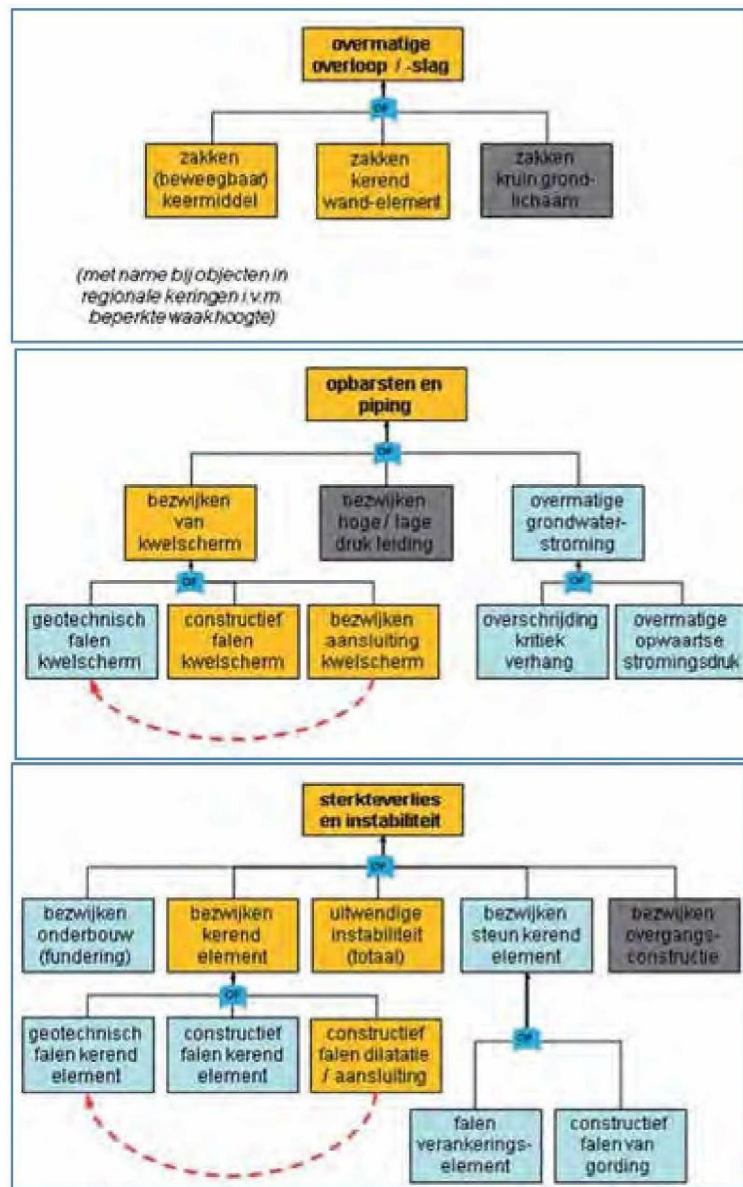
Er zijn dan volgens het VTV (RWS, 2007) vijf sporen waarop een waterkerend object onder invloed van een hoogwaterbelasting moet worden getoetst: hoogte, betrouwbaarheid sluiting, piping en heave, stabiliteit constructie & grondlichaam en sterkte constructie-onderdelen.



Figuur 3.17 Overzicht faalmechanismen waterkerende kunstwerken

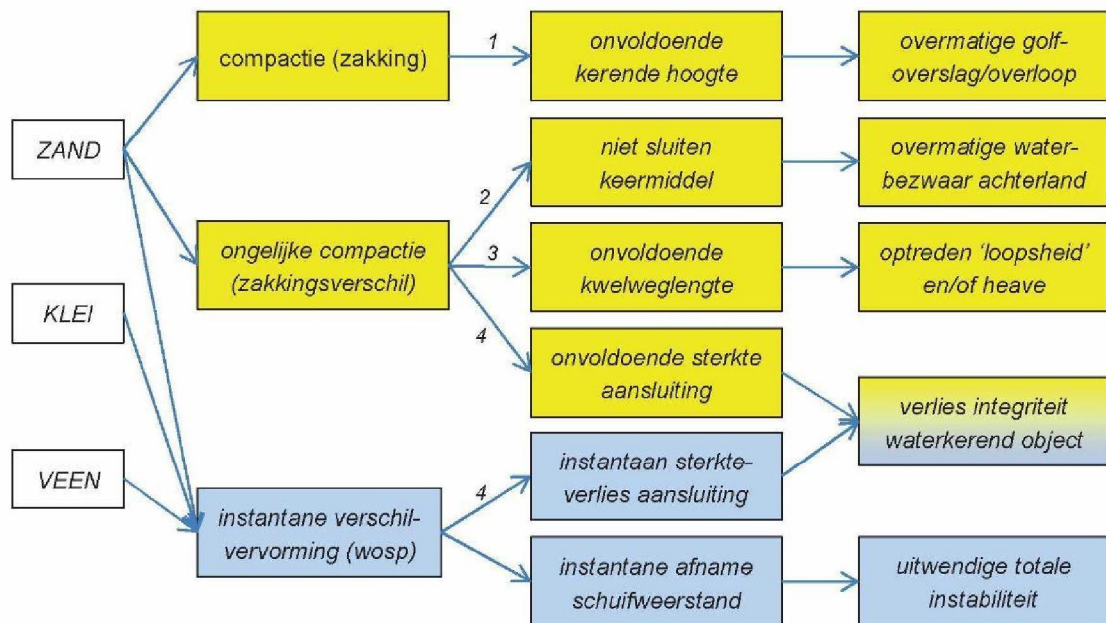
Geïnduceerde aardbevingen kunnen een additionele bijdrage leveren aan de kans dat een waterkerend object volgens één van de bovenstaande bezwijkmechanismen faalt of dat er schade aan het object ontstaat. Per toetsspoor is voor waterkerende objecten in Figuur 3.18 een faalkansboom opgezet, waarbij de oranje vakjes de gebeurtenissen aangegeven die door een geïnduceerde aardbeving kunnen worden beïnvloed.





Figuur 3.18 Overzicht faalmechanismen kunstwerken die beïnvloed worden door aardbevingen (oranje vakjes)

In Figuur 3.19 is voor de eerder genoemde fenomenen (compactie, verschilvorming, verlaging schuifsterkte) aangegeven op welke wijze deze tijdens (instantaan, blauw) of na (uitgesteld, geel) een geïnduceerde beving de vijf toetsporen voor waterkerende objecten negatief beïnvloeden:



- 1 Zakking keermiddel of grond(water)kerend element (bij afname geotechnische draagkracht).
- 2 Falen alarmering of technisch falen keermiddel (beweegbaar of demontabel).
- 3 Constructief falen aansluiting kwelscherm op object (bij ongelijke afname geotechnische draagkracht).
- 4 Constructief falen aansluiting constructieve elementen (bij ongelijke afname geotechnische draagkracht).

Figuur 3.19 Negatieve beïnvloeding van toetssporen waterkerende objecten door geïnduceerde aardbeving

3.1.4 Aanpak analyse beïnvloeding waterkeringen

In deze Quick Scan is de aandacht met name gericht geweest op twee schademechanismen: vervormingen (taludstabiliteit) en verweking. In de aardbevingsliteratuur zijn methoden te vinden voor het geven van inschattingen van de mate van vervorming (Bijlage A.1)) en het bepalen van de kans op gehele of gedeeltelijke verweking (Bijlage A.2) als functie van de belasting (PGA), de grondgesteldheid en de geometrie. Omdat er geen betere methoden beschikbaar zijn, zijn deze, veelal empirische, methoden voor tektonische aardbevingen onverkort toegepast. In een tweede, flankerend spoor zijn wel PLAXIS berekeningen uitgevoerd. Hieruit blijkt dat de korte duur van de geïnduceerde aardbevingen op basis van de huidige state-of-the art geen aanleiding geeft om de resultaten van de empirische methoden anders te interpreteren (Bijlage A.3).

Als derde schademechanisme is het optreden van hydraulische kortsluiting beschouwd. Normaal gesproken wordt hydraulische kortsluiting alleen beschouwd voor droogtegevoelige (veen)kaden met als argument dat alleen droogtegevoelige kaden onderhevig zijn aan uitdroging en daarmee gepaard gaande vervormingen. Voor aardbevingen is dit onderscheid niet te maken en moeten in principe alle kades worden beschouwd.

Voor hydraulische kortsluiting bij aardbevingen zijn wel twee andere voorwaarden waaraan getoetst kan worden. Kortsluiting wordt alleen een probleem geacht als er een damwand aanwezig is en als er op niet te grote diepte zand in de ondergrond aanwezig is. In dat geval kan er sprake van zijn dat de damwand anders op de bevingsbelasting reageert dan de omliggende grond en er een spleet tussen damwand en grond ontstaat. Dit moet zich voort kunnen zetten tot aan de zandlaag.

In het geval dat aan deze twee condities wordt voldaan dan kan een eerste conservatieve toets zijn om aan te nemen dat de stijghoogte in de zandlaag gelijk wordt aan het boezempeil. Indien de stabiliteit in dat scenario voldoet dan is de situatie voldoende veilig. Zo niet dan is aanscherpen van de aannames noodzakelijk.

3.2 Buisleidingen

3.2.1 Literatuuronderzoek

In de literatuur zijn enkele studies beschikbaar waarin aan de hand van de geconstateerde schade gevallen empirische relaties voor verwachte schade gegeven worden. Tevens tracht men op basis van post-analyse lessen te trekken voor beter ontwerp van een leiding of een heel netwerk. De schades aan leidingen worden vaak uitgedrukt in het aantal schades per km.

Op dit moment zijn geen studies naar de schade aan leidingen door geïnduceerde aardbevingen bekend. Internationaal wordt na het optreden van natuurlijke aardbevingen (met name in de VS) vaak een schade analyse uitgevoerd. Dash en Jain (2007) hebben waarnemingen van verschillende onderzoekers gebundeld en in een tabel weergegeven. Deze tabel is weergegeven in Bijlage C. Uit de tabel met gegevens van ernstige aardbevingen volgen verschillende vormen van schade. Schade door de passerende aardbevingsgolven en schade door blijvende grondverplaatsingen worden gerapporteerd (afschuivende grondmassa's, verweking van de grond). Daarnaast wordt vaak ernstige vervolg schade gerapporteerd, waaronder branden bij gebroken gasleidingen en het niet meer functioneren van het hele transport netwerk. De problematiek is dus niet a priori verwaarloosbaar. Er moet rekening gehouden worden met zowel de invloed van de tijdelijke grondbelasting als de invloed van de permanente grondbelasting.

In de literatuur is gezocht naar een methode voor de toetsing van leidingen bij geïnduceerde aardbevingen en natuurlijke aardbevingen, zie Bijlage C. Uit de literatuur bestaat de indruk dat grote diameter leidingen kwetsbaarder zijn dan kleine diameter leidingen. Het type leiding is eveneens relevant. De meeste schade wordt veroorzaakt door de permanente verplaatsingen als gevolg van de aardbevingen.

In de Eurocode 8 wordt onderscheid gemaakt tussen voorbijgaande tijdelijke groundbeweging en permanente grondverplaatsing. Indien er geen risico aanwezig is op het optreden van permanente grondverplaatsing (dit volgt uit een studie naar de grond waarin de leiding is aangelegd) kan de leiding worden beoordeeld door middel van een studie naar de voorbijgaande tijdelijke grondverplaatsingen. Bij deze studie dient aandacht te worden besteed aan:

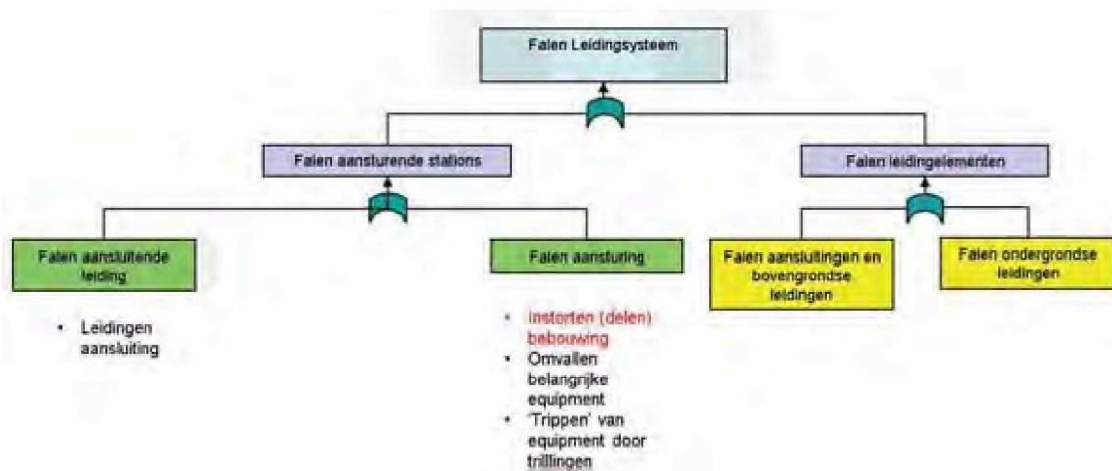
- Optredende rek.
- Optredende buiging.
- Optredende hoekverdraaiing (bij koppelingen van gelede leidingen).

Ten aanzien van de optredende rek worden er maximale waarden genoemd voor een situatie met trek en een situatie met compressie voor stalen gelaste leidingen.

3.2.2 Faalmechanismen

In Figuur 3.20 zijn de hoofdlijnen van de faalmechanismen van een leidingsysteem weergegeven. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de aansturende component en de

leidingelementen. Onder de aansturing vallen complete stations voor bijvoorbeeld het genereren van drukopbouw of onderdelen zoals pompen en kleppen.



Figuur 3.20 Foutenboom van een leidingsysteem (in rood de faalmechanismen die in dit rapport worden behandeld)

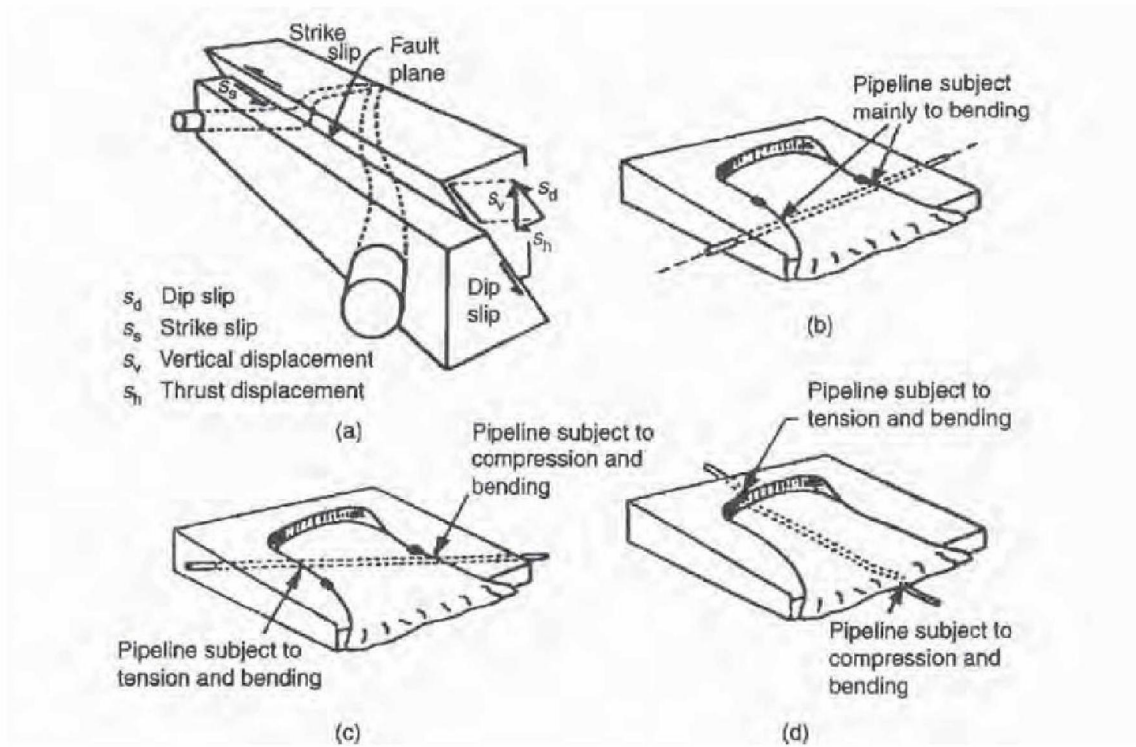
Daar waar de leidingelementen een overgang hebben naar aansturingcomponenten is sprake van een aansluiting. Deze aansluitingen kunnen zich bovengronds of ondergronds bevinden. In rood is in Figuur 3.20 aangegeven welke faalmechanismen in dit rapport worden behandeld.

De leidingelementen vormen het grootste deel van een leidingsysteem. Bij beschadiging van de leidingelementen zal er een lek ontstaan en kan het gas of de vloeistof uit de leiding ontsnappen.

Het falen van leidingelementen zal meestal worden veroorzaakt door grondbeweging. Deze grondbeweging kan van tijdelijke of permanente aard zijn.

- De tijdelijke grondbeweging ontstaat doordat een spanningsgolf passeert. Deze spanningsgolf ontstaat door het plotseling vrijwel instantaan ontlasten van de spanningen die ergens in de bodem opgebouwd zijn. Deze golven planten zich in alle richtingen voort, en komen dus ook aan het oppervlak. Daar zijn zij merkbaar door kortdurende, mogelijk intensieve bodembewegingen. De weg naar het aardoppervlak is in het geval van de geïnduceerde aardbevingen zo'n 3 km lang. Over deze afstand treedt ruimtelijke spreiding, materiaal demping en reflectie van de golven op. Aan het maaiveld kunnen grondlagen bij ongunstige omstandigheden versterking van de trilling geven.
- De volgende permanente grondbewegingen als gevolg van een aardbeving kunnen worden onderscheiden (O'Rourke, 1998):
 - Verweking van losgepakte granulaire gronden.
 - Verdichting van granulaire gronden.
 - Afschuiven van grondlichamen door de zwaartekracht.
 - Tektonische grondbeweging langs breuken.

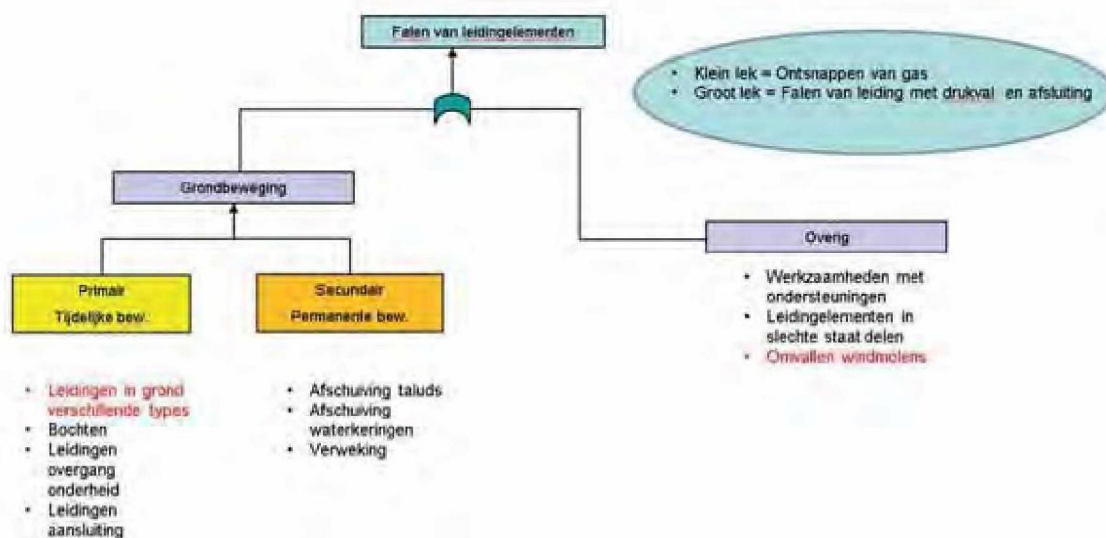
In Figuur 3.21 is een overzicht van verschillende permanente bewegingen en het effect daarvan op leidingen te zien.



Figuur 3.21 Permanente grondbewegingen (O'Rourke et al 2001)

Daarnaast kan een aantal overige faalmechanismen worden onderscheiden. Leidingen waaraan onderhoud wordt gepleegd zijn extra kwetsbaar voor belasting door aardbevingen tijdens de onderhoudsperiode. Bijvoorbeeld bij het ontgraven van ondergrondse leidingen of het tijdelijk bevestigen of ondersteunen van bovengrondse leidingen. Ook leidingdelen in een slechte staat vormen een risico. Het omvallen van objecten op leidingen kan eveneens tot schade leiden.

In de navolgende paragrafen worden per leidingstelsel een aantal faalmechanismen behandeld, die weergegeven zijn in Figuur 3.22.

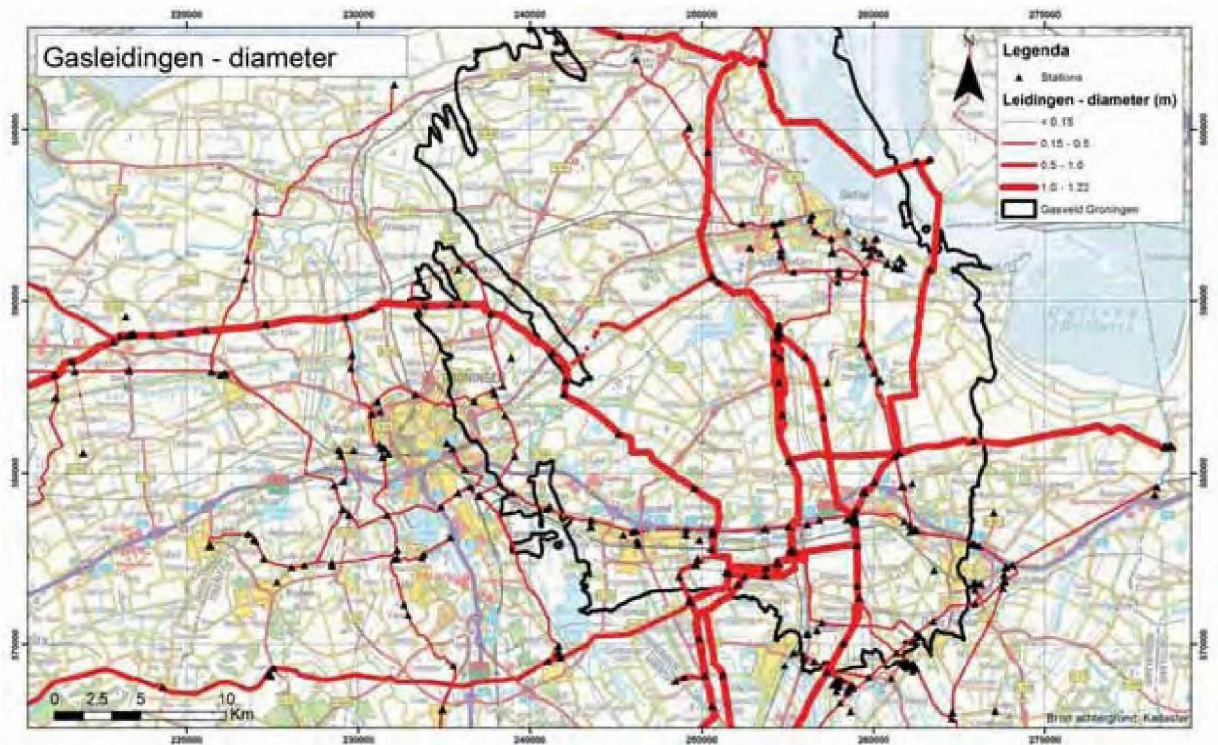


Figuur 3.22 Foutenboom falen van leidingelementen leidingsysteem (in rood de faalmechanismen die in dit rapport worden behandeld)

3.2.3 Gastransportnetwerk

In het onderzoeksgebied ligt ruim 2000 km aan gastransportleidingen waarvan een groot deel eigendom is van de Nederlandse Gasunie. Het betreft hier een hoofdtransportsysteem en een regionaal transportsysteem. In deze rapportage is eveneens een leiding met een diameter van 168,30 mm van Noordgastransport meegenomen.

Het netwerk van Gasunie betreft een regionaal transportsysteem dat bestaat uit grotere en kleinere leidingen aangelegd vanaf 1955 (Figuur 3.23 en Figuur 3.24). Naar het zuiden toe lopen langs drie lijnen in totaal negen leidingen: drie langs de westelijke, twee langs de middelste en vier langs de oostelijke lijn (zie Figuur 3.23 voor de drie lijnen). Daarnaast loopt er een grote leiding richting Duitsland, een richting het noorden en twee richting het westen, die ca. 10km ten zuidwesten van Drachten samenkomen en verder richting Noord-Holland lopen.

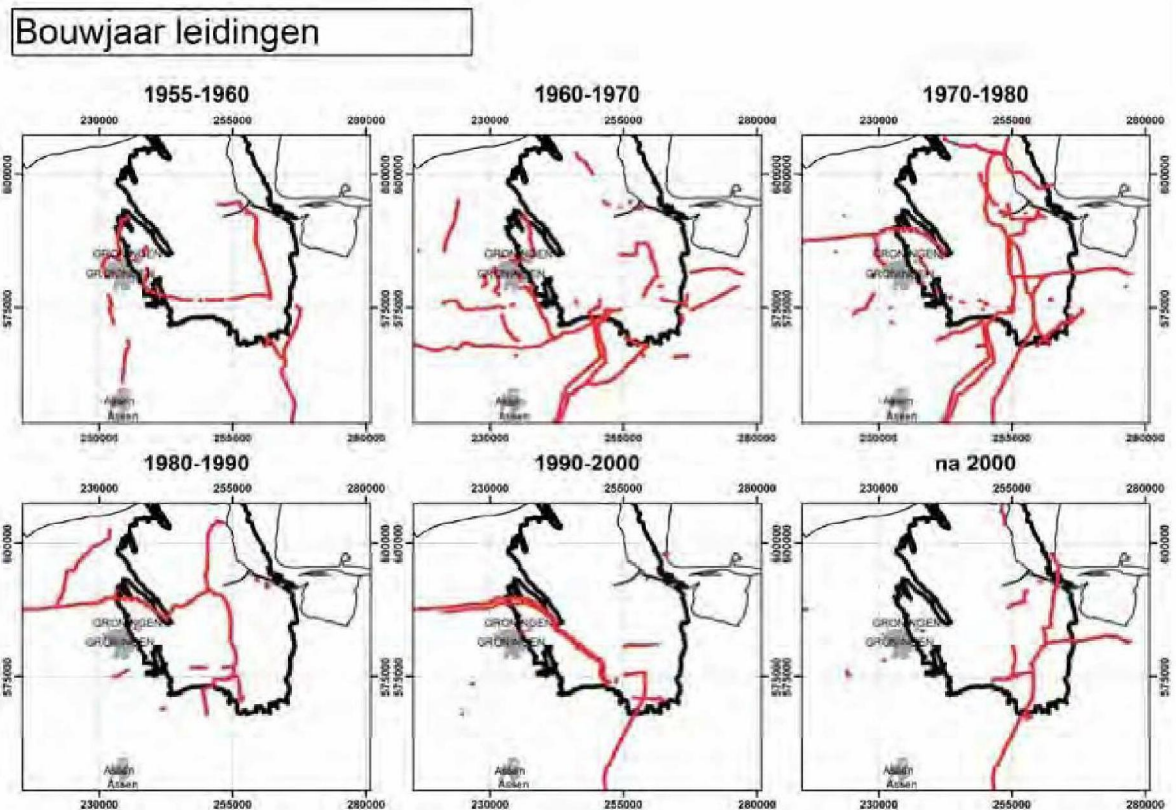


Figuur 3.23 Ligging en grootte gasleidingen in onderzoeksgebied

Uit het Gasleiding netwerk van Noordgastransport en Gasunie zijn de volgende leidingen geselecteerd om nader te beschouwen.

	Staalkwaliteit	Wanddikte [mm]	Diameter [m]	Diepte [m]
Gasunie	X70	15,9	1,2	1,5
Gasunie	X60	11,8	0,9	1,5
Gasunie	X56	9,32	0,8	1,5
Noordgas.	A106 Grade B	10,97	0,168	1,5
Gasunie	X52	8,5	0,1	1,5

Tabel 3.1 Geselecteerde gasleidingen voor analyse.



Figuur 3.24 bouwjaren gasleidingen van Gasunie

Er zijn negen verschillende types stations van Gasunie, in totaal 501 stations, hiervan liggen er 244 binnen het Groningen gasveld. De volgende types zijn aanwezig:

- Afsluiter station.
- Compressor station.
- Export station.
- Gasontvangst station (gemeentelijk en industrieel).
- Injectie station.
- Meet en regel station.
- Reduceer station.
- Virtueel station.
- Voeding station.

De faalmechanismen die horen bij de stations zijn geen onderdeel van deze studie met uitzondering van de bebouwing die op de stations aanwezig is.

3.2.4 Chloorleidingen

Van de chloorleidingen op het Chemieparkterrein in Delfzijl zijn van AKZO Nobel de volgende gegevens ontvangen.

Leiding-nummer	Diameter in mm	Wanddikte in mm	Materiaal	Werkdruk in bar
05.214	88,9	5,49	ASTM A 333M gr.6	23
05.215	88,9	5,49	ASTM A 333M gr.6	23
5148	88,9	5,49	ASTM A 333M gr.6	23
5148	60,3	3,91	ASTM A 333M gr.6	23
22010	48,3	3,69	ASTM A 333M gr.6	23
05.227	60,3	3,91	ASTM A 333M gr.6	23
B401B	60,3	5,54	ASTM A 333M gr.6	23

Tabel 3.2 Gegevens chloorleidingen Delfzijl

Van deze leidingen zijn de volgende leidingen geselecteerd om nader te beschouwen.

Staalkwaliteit	Wanddikte [mm]	Diameter [m]	Diepte [m]
S240	5,49	0,0889	1,5
S240	3,91	0,0603	1,5
S240	3,69	0,0483	1,5

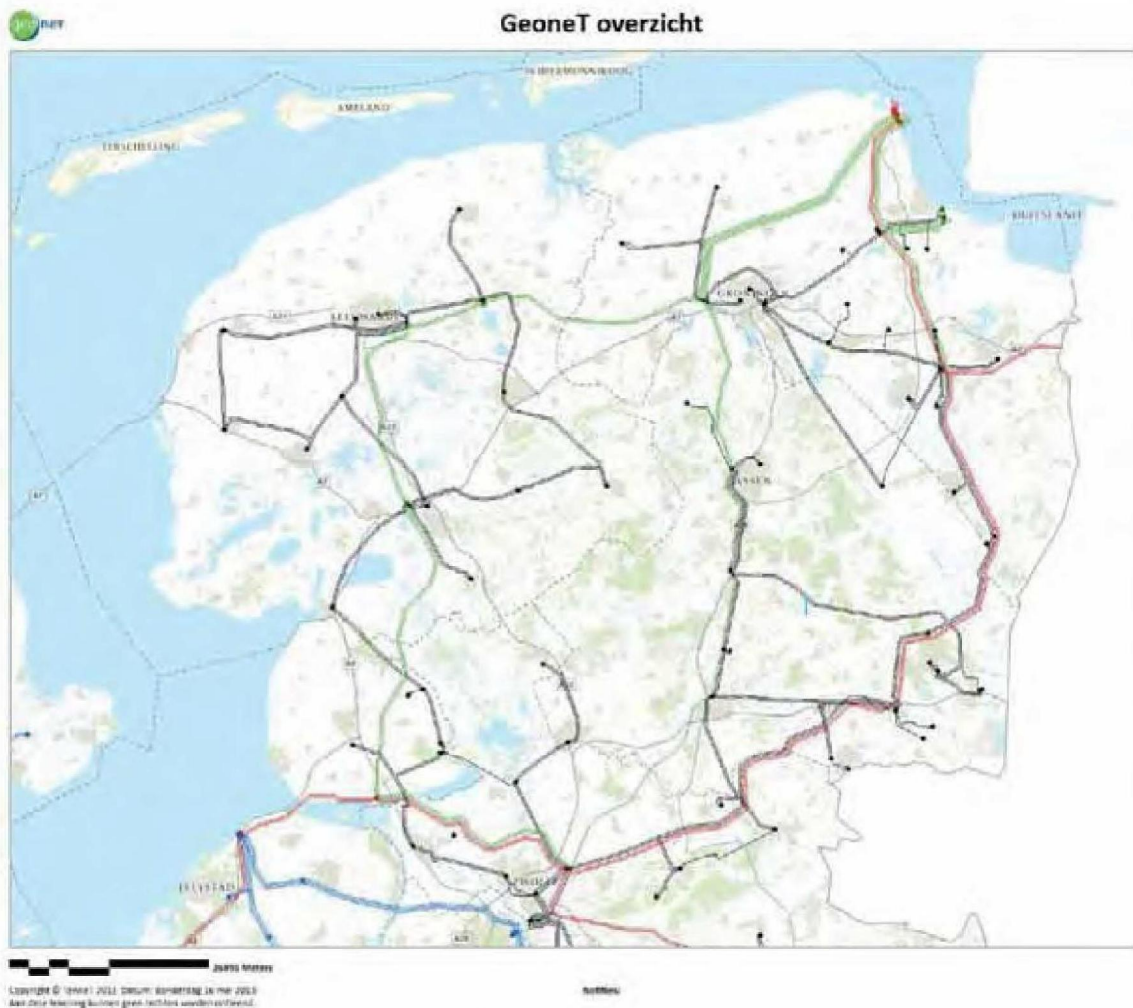
Tabel 3.3 Geselecteerde chloorleidingen Delfzijl

3.2.5 Riolpersleidingen

Van rioolpersleidingen is (nog) geen informatie ontvangen. Een beschouwing van de rioolpersleiding zal in een volgende fase moeten plaatsvinden.

3.3 Hoogspanning en C2000 netwerk

Uitval van elektriciteit bij aardbevingen komt internationaal relatief vaak voor. Tot op heden is er bij de optredende aardbevingen in Groningen geen schade gerapporteerd aan het hoogspannings- of communicatienetwerk. In Groningen staan meerdere verdeelstations van TenneT voor het hoofdnet en van lokale beheerders voor de lagere spanningen. Het onderzoek in de Quick Scan heeft betrekking op de hoogspanningsstations van 380 kV en deels ook 220 kV en 110 kV van TenneT, zie Figuur 3.25. Naast stations zijn er ook verbindingen met masten, die zelf ook gevoelig kunnen zijn voor de aardbeving, zie Figuur 3.26.

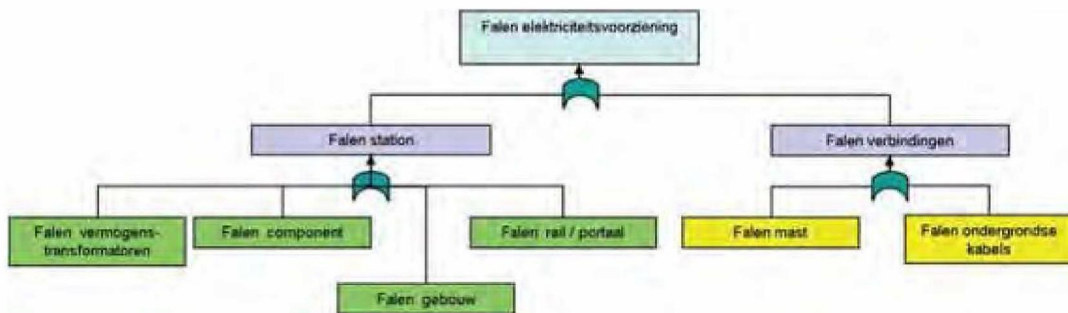


Figuur 3.25 Locatie TenneT stations en verbindingen



Figuur 3.26 Hoogspanningsmast en verdeelstation (voorbeelden)

De belangrijkste faalmechanismen zijn weergegeven in Figuur 3.27. Voor elk van de onderdelen is in Hoofdstuk 4 een beoordeling gemaakt.



Figuur 3.27 Faalmechanismen elektriciteitsvoorziening

Toegevoegd aan het onderzoek is de stabiliteit van de C2000 masten die in het gebied staan, zie Figuur 3.28. Het belangrijkste faalmechanisme dat hier kan optreden is het bezwijken van de vakwerkconstructie onder de trilling vanuit de aardbeving.



Figuur 3.28 C2000 mast (voorbeeld)

4 Resultaten Quick Scan

4.1 Verweking

Bij de tot op heden opgetreden aardbevingen zijn geen locaties vastgesteld waar verweking is opgetreden. Uitgaande van de relatie tussen verweking en versnelling, blijkt dit in lijn met de rekenmethodes (Idriss en Boulanger, 2008). Bij een sterkere aardbeving (vanaf ongeveer 0,2 g, dat is minder dan bij M=5 wordt verwacht) neemt de kans op verweking sterk toe.

In 1992 zijn in Roermond effecten van verweking geconstateerd, zie Figuur 4.1.



Figuur 4.1 Mogelijk effect in geval van verweking opgetreden in Roermond 1992 (bron: Drs. G. Houtgast/KNMI via kennislink.nl)

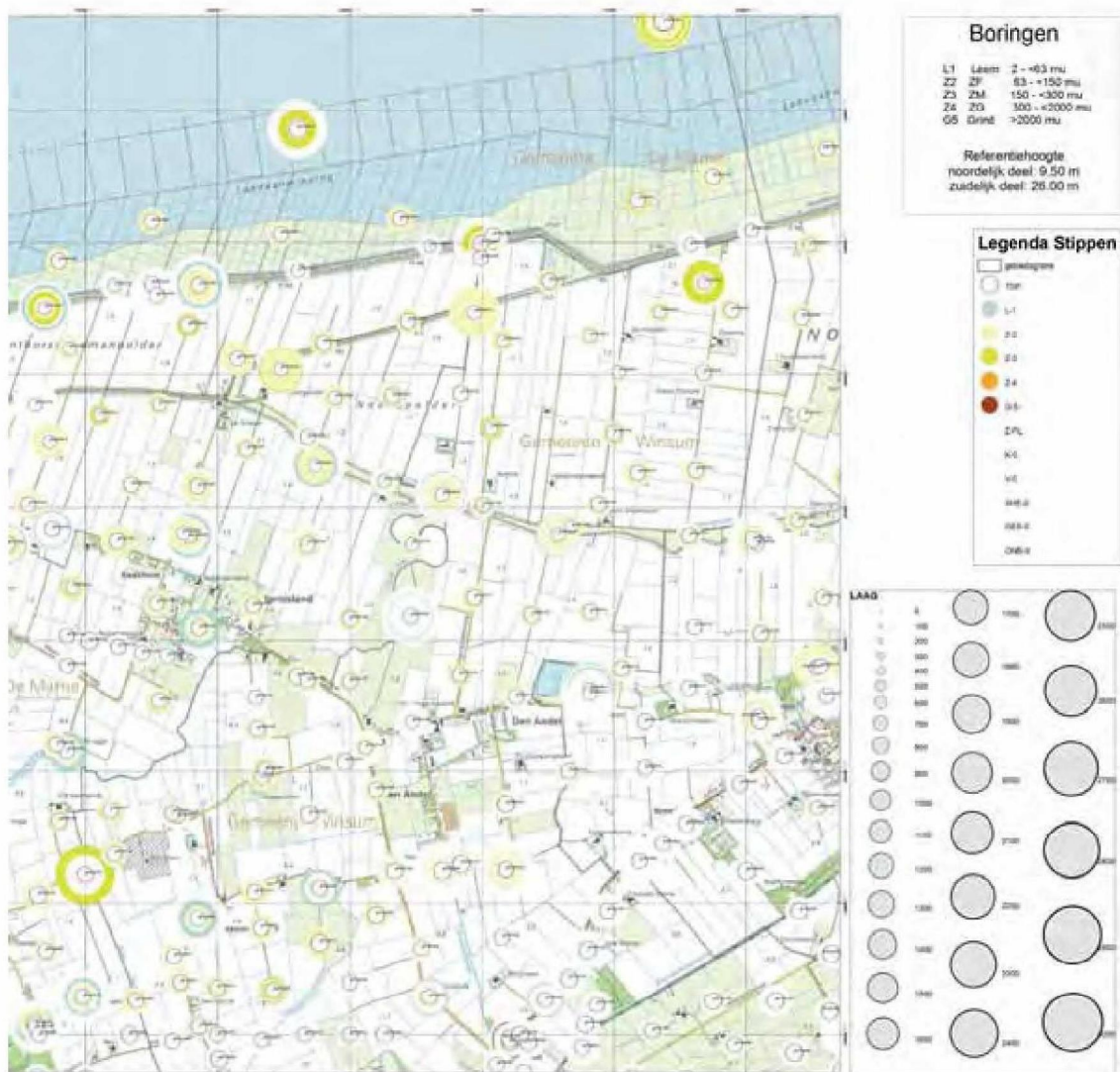
4.1.1 Aanwezigheid verwekingsgevoelige lagen

De belangrijkste basis grondeigenschappen in relatie tot verwekingsgevoeligheid zijn de grondsoort en de pakkingsdichtheid. Deze bepalen, naast de grondwaterstijghoogte, ook de grondspanning. Voor Groningen is nog geen gedetailleerd 3D-model in GeoTOP beschikbaar. Daarom is gekozen om de puntinformatie weer te geven in stippenkaarten. De in DINO beschikbare informatie over de samenstelling van de ondergrond in de vorm van boorbeschrijvingen en sondeergrafieken is geaggregeerd tot overzichtskaarten, waarmee een inzicht in de aanwezigheid van verwekingsgevoelige lagen kan worden verkregen.

In de stippenkaarten zijn om de locatie van de boringen en sonderingen de aangetroffen laagscheidingen als cirkels getekend, waarbij de straal van de cirkels een maat voor de diepte is. De laageigenschappen worden door middel van een (kleur)codering weergegeven. De stippenkaarten kunnen niet op een schaal weergegeven worden die een overzicht van het gehele studiegebied omvat. Deze kaarten zijn als GIS bestanden beschikbaar, zodat bij kritische constructies detailkaarten kunnen worden gemaakt. Om de informatie in overzichtskaarten weer te geven zijn gegevens gecombineerd.

Onder de aanname dat cohesieve grondsoorten als klei en veen niet verwekingsgevoelig zijn worden op de stippenkaart de dikte en diepte van de volgende grondsoorten (met korrelgrootte) getoond (Figuur 4.2)¹:

- Leem/silt, (2 -< 63 µmeter).
- Fijn zand, (63 -< 150 µmeter).
- Matig fijn tot matig grof zand, (150 -< 300 µmeter).
- Grof zand en grind, (> 300 µmeter).



Figuur 4.2 Voorbeeld stippenkaart met informatie uit boringen (zeedijk bij Pieterburen)

4.1.2 Zanddichtheidskaart

De boorbeschrijvingen bevatten geen informatie met betrekking tot de pakkingsdichtheid. Uit sonderingen kan met behulp van de formules van Baldi (1986) een relatieve dichtheid van

¹ Voor een betere resolutie zijn de kaarten ook in A3 formaat in Bijlage E beschikbaar bijgevoegd.

zand worden berekend. Hiertoe worden de sondeerwaarden eerst geïnterpreteerd in de grondsoorten zand, klei en veen. De formule van Baldi luidt:

$$Re = \frac{1}{2,41} \ln \left(\frac{qc}{157 \cdot \sigma'^{0,55}} \right)$$

Hierin is:

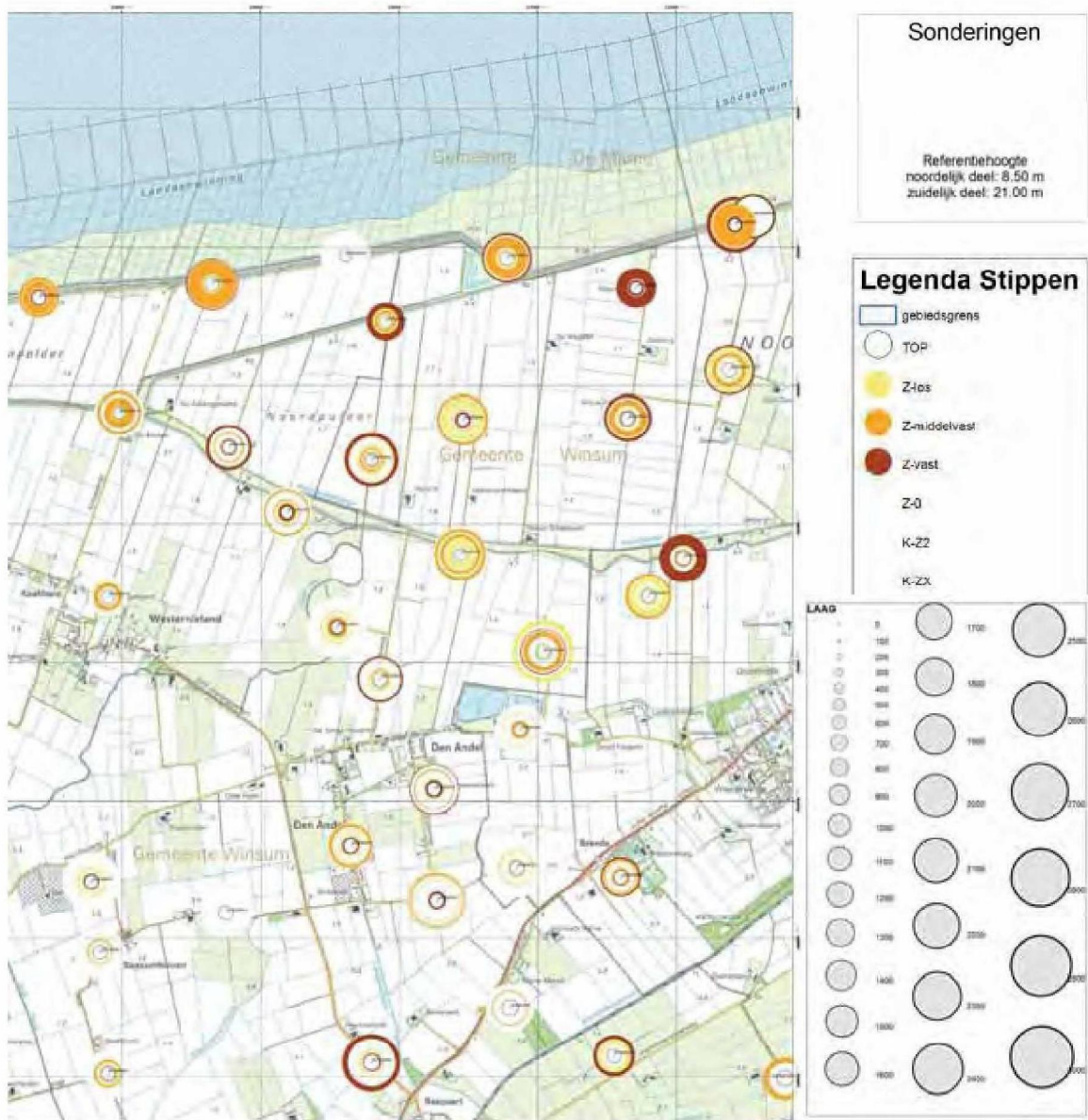
Re – relatieve dichtheid van zand.

qc - sondeerweerstand in kPa.

σ' – effectieve verticale grondspanning in kPa.

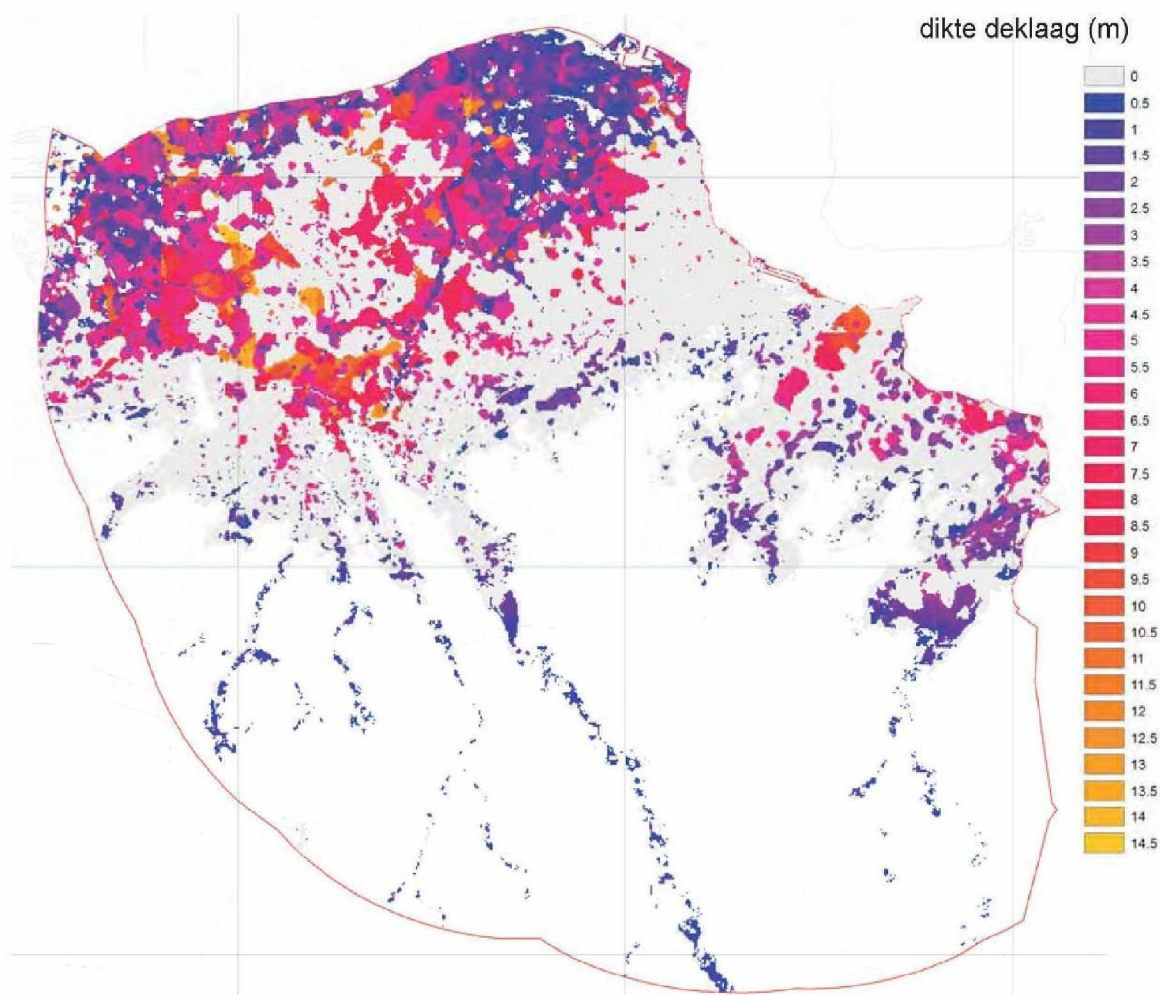
De effectieve grondspanning is berekend met een gemiddelde dichtheid van 16 kN/m³ en een diepte tot grondwater van 0,5 m. De sondeerwaarden, zijn per afzonderlijke laag gemiddeld. De gemiddelde sondeerwaarde is vervolgens vertaald in een relatieve dichtheid. Als grenzen voor los-middelvast en middelvast-vast zijn respectievelijk gekozen: 40% en 70%.

De zo verkregen dichtheidsprofielen zijn analoog aan de boorinformatie in een stippenkaart verwerkt (Figuur 4.3).



Figuur 4.3 Stippenkaart met zanddichtheid (Voorbeeld ter plaatse van zeedijk bij Pieterburen)

De overige kaarten van het gebied zijn op A3 formaat in Bijlage E beschikbaar. Hiermee kunnen nadere locatiespecifieke analyse worden gemaakt. In combinatie met de kaart waarin de dikte van de cohesieve deklaag op de bovenste zandlaag is weergegeven (Figuur 4.4) kan een snelle afweging van de aanwezigheid van verwekingsgevoelige ondergrond worden verkregen. De diepteligging van het pleistocene zand kan ingeschat worden met behulp van Figuur 2.7.

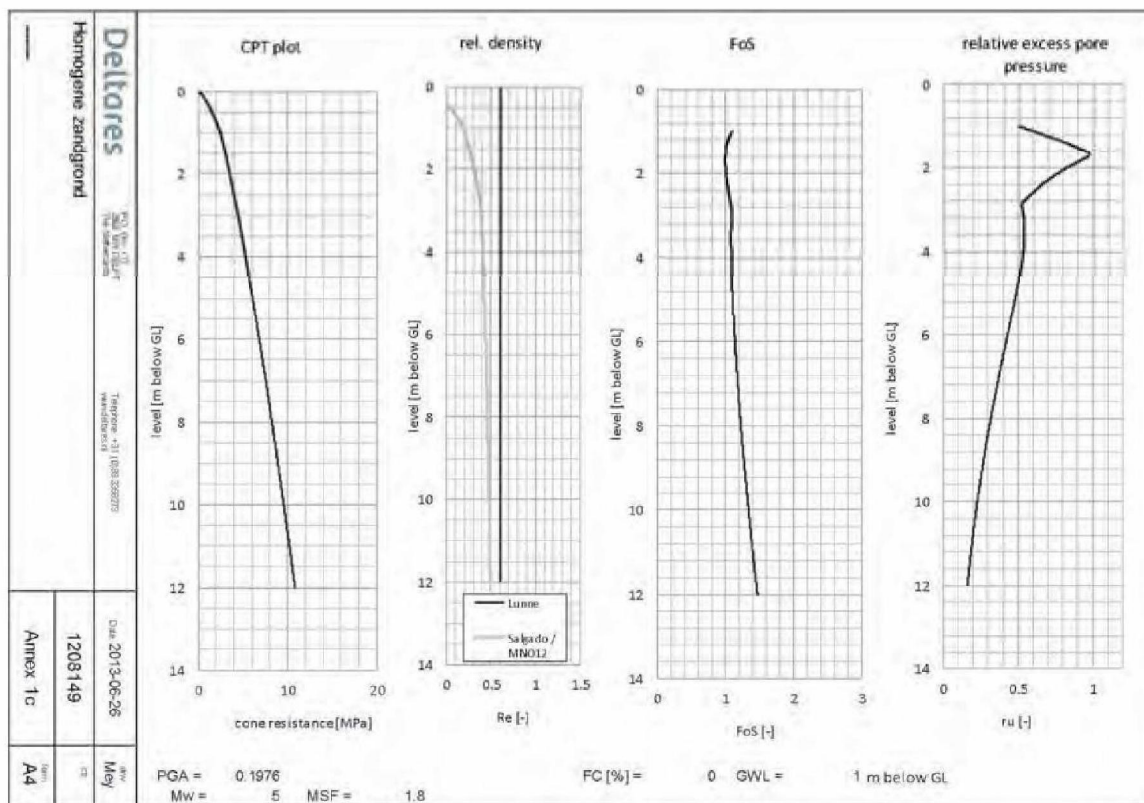


Figuur 4.4 De dikte van de cohesieve deklaag (klei en veen) bovenop de bovenste zandlaag.

Om de effecten van de aanwezigheid van het zand te interpreteren zijn indicatieve berekeningen uitgevoerd naar de relatie tussen piekversnelling en verweking bij bepaalde dichtheid van het zand (paragraaf 4.1.3), het bepalen van de straal van het gebied waar verweking optreedt als functie van de piekversnelling (paragraaf 4.1.4) en de afname van de piekversnelling met de afstand tot het epicentrum (paragraaf 2.5.3).

4.1.3 Bepaling grenswaarde versnelling voor verweking

Met de methode volgens EERI publicatie MNO-12 (Idriss en Boulanger, 2008) is de verwekingsgevoeligheid bepaald. Voor de analyse in dit hoofdstuk is uitgegaan van homogene ondergrond. Daaronder wordt hier verstaan zand met een constante relatieve dichtheid. Uit deze dichtheid is het bijbehorende verloop van de conusweerstand met de diepte bepaald, en hiermee de veiligheidsfactor tegen verweking. Iteratief is vervolgens per dichtheid bepaald bij welke PGA er in minstens 1 punt sprake is van verweking (veiligheidsfactor tegen verweking is 1). Figuur 4.5 geeft een voorbeeld van zo'n berekening. In dit voorbeeld is uitgegaan een homogene zandondergrond met een relatieve dichtheid van 60%. Bij $PGA = 0,2$ is er op 1,6 m onder maaiveld het eerste punt waar sprake is van verweking.



Figuur 4.5 Voorbeeld berekening verweking voor relatieve dichtheid 60% en $PGA = 0,2g$

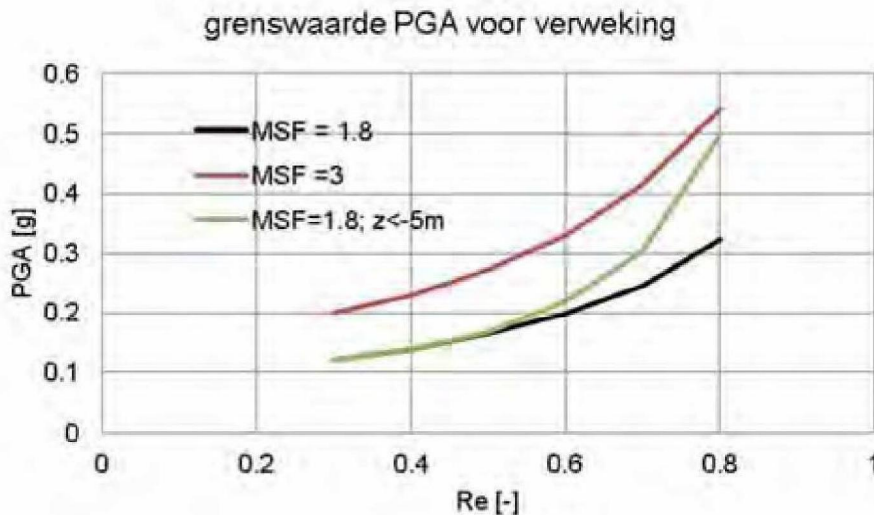
Op deze wijze is voor alle beschouwde dichtheden de grenswaarde voor de PGA bepaald waarbij verweking optreedt in het zand. De resultaten zijn grafisch weergegeven in Figuur 4.6.



Figuur 4.6 Grenswaarden PGA bij verschillende relatieve dichtheden (Re) voor begin verweking

Tevens is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Hierbij zijn twee situaties beschouwd. De eerste is de situatie dat de magnitude scaling factor MSF (zie Bijlage A) niet 1,8 maar 3,0 bedraagt. Op dit moment is dat een arbitraire keuze om de gevoeligheid van een mogelijk

effect van een kortdurend signaal te beoordelen. De tweede situatie is de veronderstelling dat de bovenste 5 m niet kan verweken, bijvoorbeeld omdat die uit cohesieve lagen bestaat. Voor die situatie zijn alleen die waarden van PGA bepaald waarbij op of onder 5 m diepte sprake is van verweking. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 4.7. Ter vergelijking zijn ook de waarden van Figuur 4.6 opgenomen.

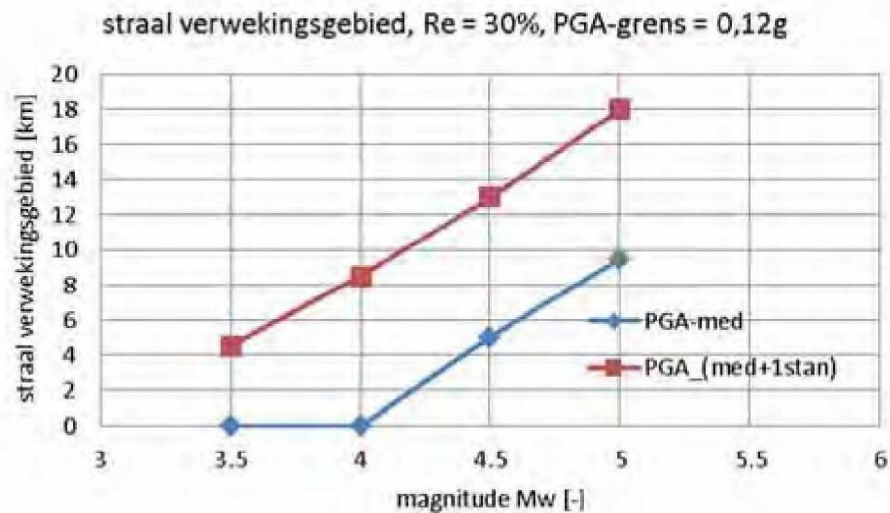


Figuur 4.7 Resultaten gevoeligheidsstudie grenswaarde PGA vs relatieve dichtheden (Re) voor begin verweking

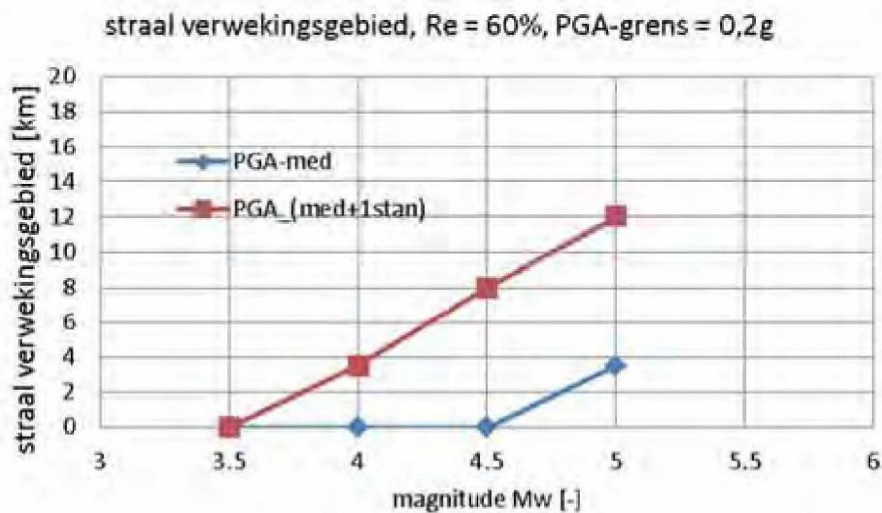
Zoals te verwachten heeft een hogere MSF-factor ook een hogere waarde van de grensvernelling tot gevolg. Een toplaag die niet kan verweken heeft voor losgepakte zandlagen nauwelijks effect op de grenswaarde, voor vastgepakte zandlagen is er wel sprake van een significante invloed. Indien de piekversnelling 0,5 g bedraagt is alleen bij een hoge dichtheid van het zand en een aanzienlijke dikte van de cohesieve toplaag er geen gevaar voor verweking meer.

4.1.4 Bepaling straal verwekingsgebied

Door combinatie van de grafieken voor de piekversnelling als functie van de afstand en de versnelling waarbij verweking optreedt als functie van de dichtheid is het gebied rond het epicentrum waarin zand met een bepaalde dichtheid kan verweken bepaald. Dit is hier voor twee dichtheden ($Re = 30\%$ en $Re = 60\%$) gedaan. Uitsluitend de situatie van een homogene ondergrond is beschouwd. Uit Figuur 4.6 volgt dat voor de twee te beschouwen dichtheden de grenswaarde van de versnelling (PGA) respectievelijk 0,12g en 0,2 g is. Voor deze waarden van de PGA is uit de grafieken vervolgens de straal van het verwekingsgebied afgelezen. Dit geeft per magnitude twee waarden, namelijk een voor de mediane schatting van de PGA en een voor de schatting bij de waarden inclusief 1 standaarddeviatie. Figuur 4.8 en Figuur 4.9 geven de resultaten weer voor respectievelijk losgepakt en matig vast gepakt zand.



Figuur 4.8 Straal verwekingsgebied als functie magnitude, los zand ($Re = 30\%$)



Figuur 4.9 Straal verwekingsgebied als functie magnitude, matig gepakt zand ($Re = 60\%$)

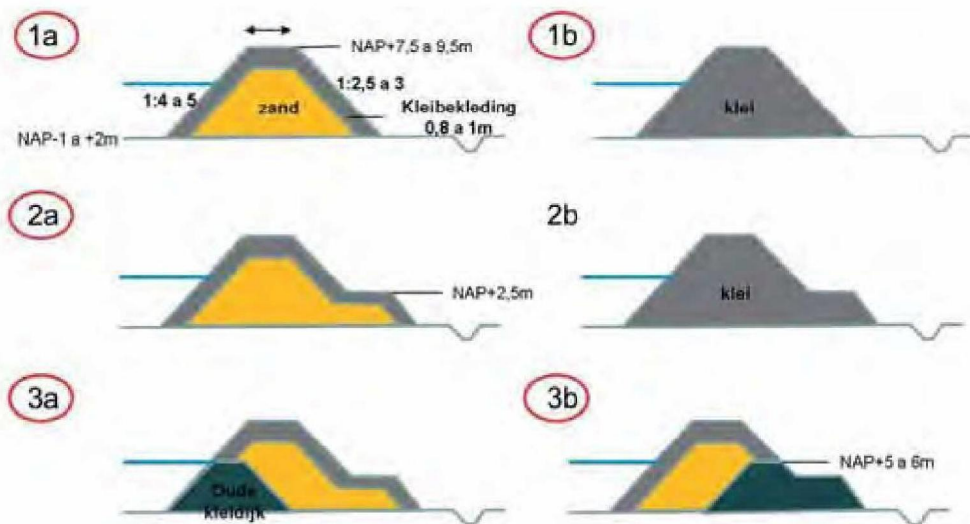
Voor de interpretatie van deze figuren kan worden gesteld dat onder de blauwe lijn verweking waarschijnlijk is (behoudens de onzekerheid over de toepasbaarheid van de gebruikte methode voor geïnduceerde aardbevingen). Boven de rode lijn is de kans op verweking klein.

Uitgaande van een gemiddelde waarde voor de versnelling (blauwe lijn) kan bij los zand verweking tot circa 8 km buiten het epicentrum optreden en bij matig gepakt zand tot circa 4 km. De resultaten van deze berekeningen zijn vertaald naar de effecten op de verschillende kritische infrastructuren.

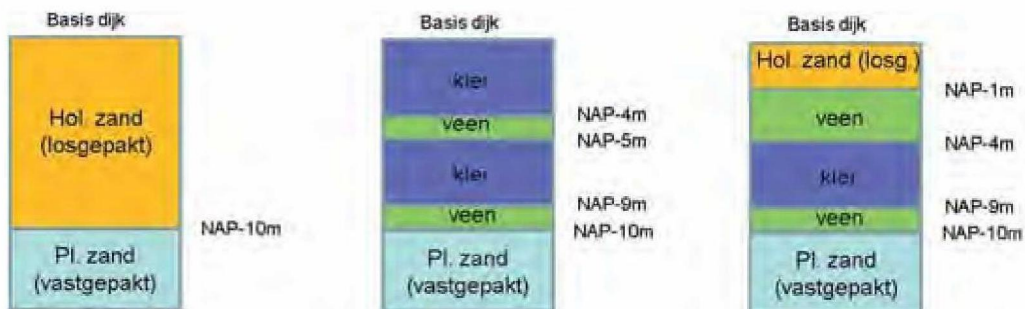
4.2 Waterkeringen

4.2.1 Vervormingen volgens Newmark analyse

Voor de bepaling van de te verwachten vervormingen in de primaire keringen bij een aardbeving is voor een aantal combinaties van geometrie en grondopbouw onder de dijk (zie Figuur 4.10 en Figuur 4.11) de grensversnelling bepaald die nodig is voor het bereiken van een veiligheidsfactor van 1. Dit is gedaan voor zowel buiten- als binnenwaartse macrostabiliteit. Omdat het doel van de exercitie is het bepalen van relaties tussen vervormingen enerzijds en initiële veiligheidsfactor, PGA en grondopbouw anderzijds, is de exacte schematisatie van waterspanningen en keuze van sterkteparameters minder relevant.

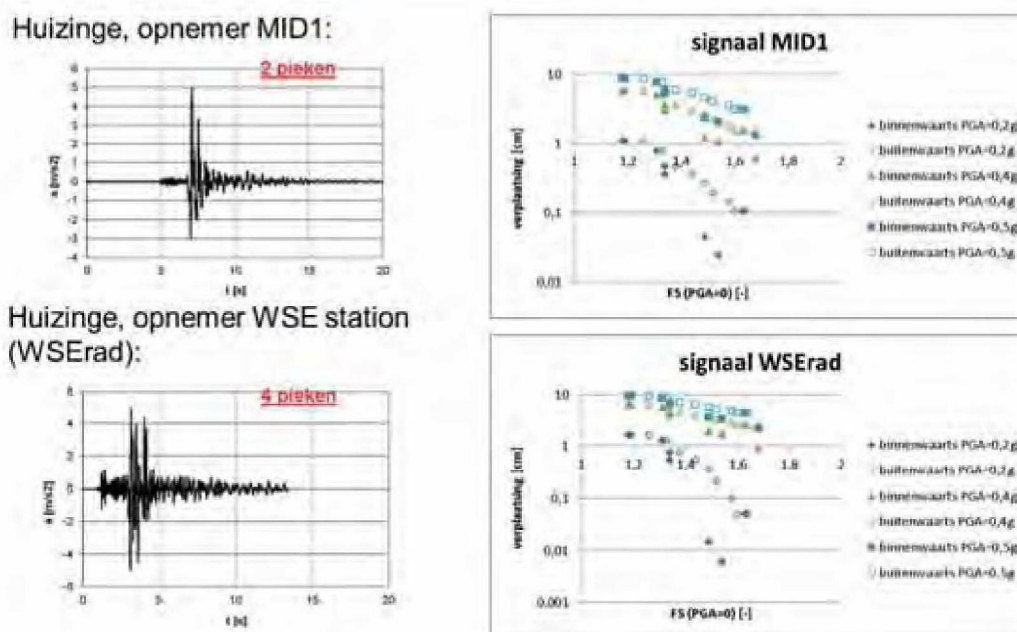


Figuur 4.10 Doorgerekende geometrieën primaire keringen



Figuur 4.11 Doorgerekende varianten in grondopbouw primaire keringen

Figuur 4.12 geeft de berekende vervormingen voor de twee in paragraaf 2.5 bepaalde signalen.



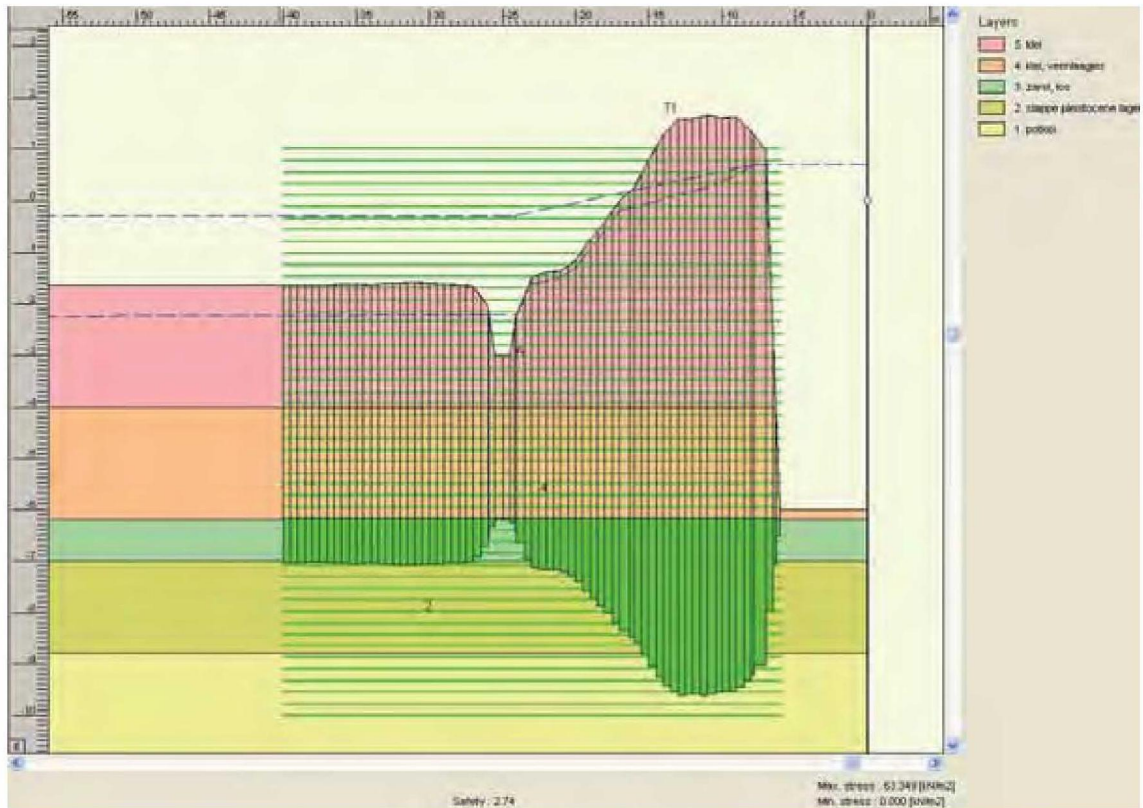
Figuur 4.12 Resultaten Newmark analyse voor twee signalen

Het is van belang op te merken dat de figuren stoppen bij een FoS (Factor of Safety) van 1,2. Beneden deze waarde nemen de vervormingen sterk toe. Het is dus aan te bevelen er voor te zorgen dat onder normale omstandigheden tenminste 20 % reserve in de stabiliteitsfactor aanwezig is.

4.2.2 Hydraulische kortsluiting en horizontaal evenwicht

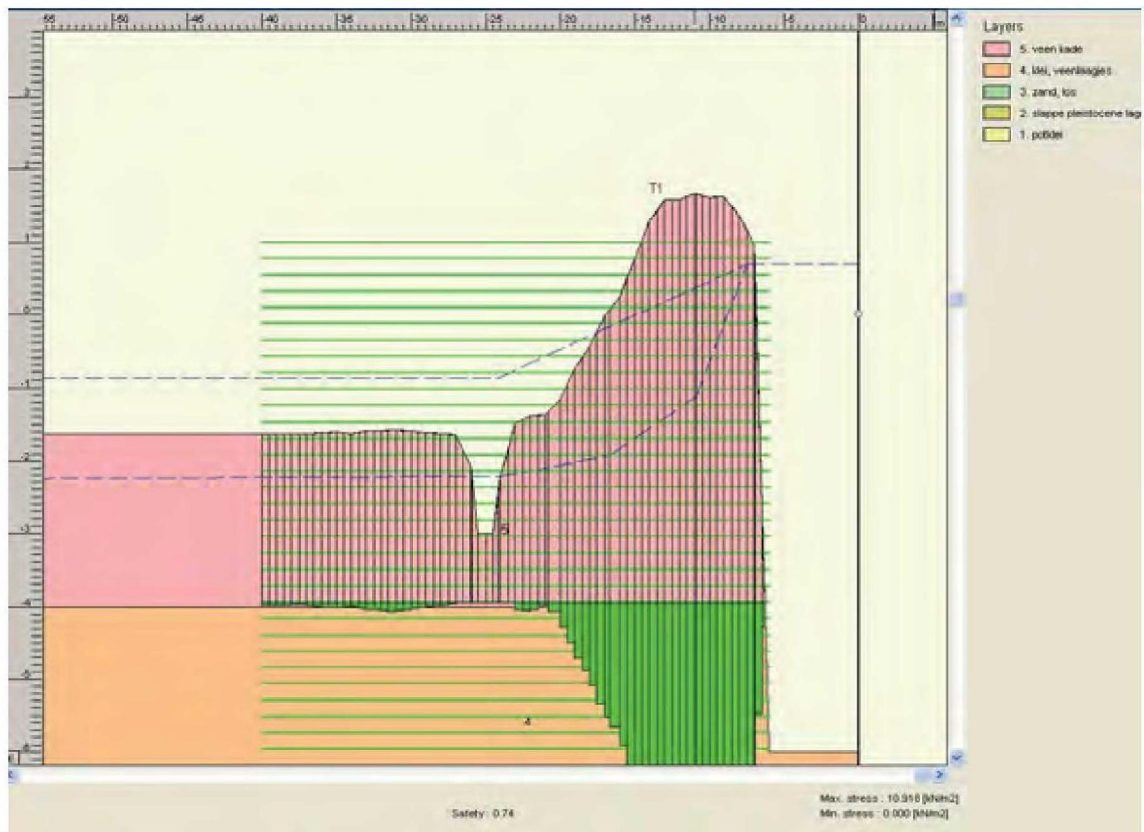
Het mechanisme 'hydraulische kortsluiting' wordt zonder aardbevingscondities alleen relevant verondersteld bij extreme droogte en bij veenkades. In geval van een aardbevingsbelasting kan dit effect mogelijk ook bij kleikades optreden. Bij een kade die geheel uit grond bestaat is de kans hierop klein: de kade en de ondergrond worden als geheel heen en weer bewogen. Echter, de situatie is ongunstiger als langs de waterlijn een damwand aanwezig is. Dat is bijvoorbeeld bij de Eemskanaaldijken het geval. Een star element als een damwand reageert anders op de aardbevingsbelasting dan de omliggende grond. In dat geval kan er een spleet tussen damwand en de grond ontstaan en dat kan aanleiding zijn tot hydraulische grondbreuk. Ook kan het mechanisme piping hierdoor kritischer worden, doch dit is in deze fase nog niet beschouwd.

Langs het Eemskanaal bestaan de dijken uit klei. Het zand ligt op enkele meters diepte onder het maaiveld. In een oriënterende berekening is voor een kenmerkende opbouw van de kade en de ondergrond aangenomen dat er hydraulische kortsluiting is ontstaan en is voor de stijghoogte in het zandpakket een in dat geval realistisch verloop geschematiseerd. Het horizontaal evenwicht van de kade onder deze omstandigheden is dan nog ruim voldoende. Behalve ter plaatse van de teensloot blijft er voldoende wrijvingskracht over om de kade niet horizontaal te laten verplaatsen, zie Figuur 4.13.



Figuur 4.13 Kleikade, horizontaal evenwicht bij hydraulische kortsluiting

Plaatselijk komen in Groningen veenkades voor. Als de aardbeving samenvalt met droge omstandigheden (lager volumiek gewicht van de dijk boven de freatische lijn) kan de horizontale stabiliteit in gevaar kan komen als er hydraulische kortsluiting ontstaat. Het wordt dan zeer van belang hoe een realistische schematisatie van het verloop van de stijghoogte in het zand moet worden aangenomen.



Figuur 4.14 Veenkade onder droge omstandigheden (reductie volumiek gewicht boven freatisch vlak), laag freatisch vlak

In het geval dat er een veenkade is, maar de beving treedt op terwijl er geen droogte heerst dan is de situatie gunstiger (zie Figuur 4.15). Bij een veenkade met een damwand langs de waterlijn, zandlagen op niet te grote diepte, droogte én een aardbeving bestaat er kans op verlies van horizontaal evenwicht. De precieze link tussen het ontstaan van de kortsluiting en de piekgrondversnelling van de aardbeving is op dit moment niet te geven, evenals de grootte van de kans dat deze combinatie voorkomt.