

TNO-rapport
NITG 03-185-C

Seismisch hazard van geïnduceerde aardbevingen
Rapportage fase 1

Princetonlaan 6
Postbus 80015
3508 TA Utrecht

www.tno.nl

T 030 2564850
F 030 2564855
info@nitg.tno.nl

Datum	november 2003
Auteur(s)	B.B.T. Wassing D. Maljers R.S. Westerhoff J.H.A. Bosch H.J.T. Weerts
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	77
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. BP Nederland Energie B.V. TotalNederland B.V. Wintershall Noordzee B.V.
Projectnaam	Kartering seismisch hazard geïnduceerde aardbevingen
Projectnummer	005.43025

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	3
1.1	Doelstelling van het project.....	3
1.2	Achtergrondinformatie	3
2	Site response	5
2.1	Inleiding.....	5
2.2	Factoren van invloed op de <i>site response</i>	5
2.2.1	Schuifgolfsnelheid V_s – schuifmodulus G	5
2.2.2	Dempingratio β	7
2.2.3	Amplificatie en eigenfrequentie	8
2.2.4	Overige factoren	10
2.3	Reactie van constructies: Respons spectra	11
3	Bepaling van het seismische hazard en de <i>site response</i>: de Eurocode 8 en overige literatuur	12
3.1	Inleiding.....	12
3.2	Eurocode 8.....	12
3.3	Toepassing van de Eurocode 8 voor geïnduceerde aardbevingen in Nederland.....	14
3.4	Beschrijving overige normen en literatuur	15
3.5	Keuze methode kartering <i>site response</i>	19
4	Beschrijving van de afzettingen in het onderzoeksgebied.....	20
5	Resultaten van het veldonderzoek – schuifgolfsnelheden	24
5.1	Oppervlaktegolfmetingen	25
5.2	Seismische sonderingen.....	26
5.3	Interpretatie van de resultaten.....	26
6	Onderbouwing amplificatiefactoren: resultaten van de ProShake berekeningen .	29
6.1	ProShake.....	30
6.2	Referentielokatie Roswinkel ROS1	31
6.3	Resultaten ProShake berekeningen.....	31
6.4	Vergelijking ProShake factoren met amplificatiefactoren van Borchardt	37
7	Conclusie en samenvatting.....	40
8	Referenties.....	42

Appendix A. Overzicht klassen *site response* op basis van literatuur

Appendix B. Beschrijving geologische formaties

Appendix C. Resultaten ConsoliTest metingen

Appendix D. Resultaten seismische sonderingen (SCPT's)

1 Inleiding

In het kader van de per 1 januari 2003 gewijzigde Mijnbouwwet moeten per 1 januari 2003 seismische risico analyses in het winningsplan opgenomen worden. In het geval van olie- en gaswinning gaat het hierbij om geïnduceerde seismiciteit. Het consortium van partijen bestaand uit Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., BP Nederland Energie B.V., TotalNederland B.V en Wintershall Noordzee B.V. heeft TNO-NITG opdracht verleend de mogelijke schade aan bebouwing ten gevolge van seismische activiteit als gevolg van de winning van olie en gas in kaart te brengen. TNO-Bouw treedt op als onderaannemer in het project en brengt haar expertise op het gebied van schade aan bebouwing in. KNMI treedt op als adviseur en data-leverancier voor de algemene seismische hazard analyse voor de olie- en gasvelden. TNO-NITG brengt haar expertise in op het gebied van het mechanisch gedrag van de ondergrond en voert de projectleiding.

1.1 Doelstelling van het project

Het doel van het project is het bepalen van de mogelijke schade aan gebouwen door geïnduceerde seismiciteit rond op het Nederlandse vaste land in concessie zijnde olie- en gasvelden. Daarbij wordt rekening gehouden met de invloed van de ondiepe ondergrond, de zogenaamde *site response*, op het schade-risico. De mogelijke schade aan bebouwing wordt bepaald op basis van de op dit moment best beschikbare kennis en techniek op het gebied van Seismisch Risico Analyse (SRA) voor geïnduceerde aardbevingen.

Het project is opgesplitst in twee fasen. In fase 1 wordt onderzocht welke methode het best gebruikt kan worden om het risico op schade in kaart te brengen. Daarnaast omvat fase 1 een veldonderzoek om de dynamische eigenschappen van de afzettingen in het onderzoeksgebied te karakteriseren. In fase 2 van het project wordt de *site response* in kaart gebracht en de seismische risico analyse en de risico-kartering uitgevoerd.

Dit rapport beschrijft de resultaten van fase 1 van het project.

1.2 Achtergrondinformatie

De mate waarin een seismische belasting schade kan toebrengen hangt af van:

1. De sterkte en frequentie-inhoud van de seismische bron en de mate waarin de trilling gedempt wordt en van frequentie-inhoud verandert als gevolg van voortplanting vanaf de bron tot dicht onder het aardoppervlak (de zogenaamde 'attenuation').
2. De *site response*. Eenmaal dicht bij het oppervlak beïnvloedt de reactie van de ondiepe lagen in sterke mate de frequentie-inhoud en de amplitude van het aardbevingssignaal. Deze invloed/reactie van de ondiepe ondergrond op het signaal wordt het *site effect*/de *site response* genoemd.
3. De aard van de constructie. Het type constructie en de staat waarin de constructie verkeert bepalen eveneens de mogelijke schade.

De maximaal te verwachten magnitude van de aardbeving, de algemene karakteristieken van het signaal (frequentie-inhoud, tijdsduur) en de inschatting van de *attenuation* van het signaal worden vastgelegd in de ‘algemene’ seismische hazard studie. Deze algemene hazard studie is uitgevoerd door het KNMI en wordt gerapporteerd in een apart document.

In de algemene hazard analyse wordt nog geen rekening gehouden met de variaties in lokale *site response*. De studie naar de *site response* is uitgevoerd door TNO-NITG. Dit deelrapport beschrijft de invloed van de *site response* op het signaal. Hiervoor is allereerst literatuuronderzoek verricht naar het effect van de ondiepe ondergrond op de sterkte en de frequentie-inhoud van het aardbevingssignaal. Tijdens fase 1 is tevens geïnteriseerd welke typen afzettingen in de bovenste tientallen meters van de ondergrond van het onderzoeksgebied worden aangetroffen. Daarnaast is in deze fase van het onderzoek een uitgebreid veldonderzoek verricht naar de dynamische eigenschappen van deze afzettingen.

Aanvullend op het literatuuronderzoek zijn enkele modelberekeningen in het programma ProShake uitgevoerd op een aantal ondergrondprofielen die typerend zijn voor het onderzoeksgebied. Met behulp van deze berekeningen wordt het effect van de ondergrond op het signaal gekwantificeerd. De uitkomsten van de modelberekeningen zijn vergeleken met de resultaten van het literatuuronderzoek. Op basis van de resultaten van het literatuuronderzoek en de ProShake-berekeningen is een klassificering opgezet, waarmee de respons van de verschillende typen ondergrond in kaart gebracht kan worden.

De resultaten van het literatuuronderzoek worden behandeld in hoofdstuk 2 en 3. De geologische inventarisatie en het veldonderzoek worden behandeld in de hoofdstukken 4 en 5. De resultaten van de ProShake berekeningen worden beschreven in hoofdstuk 6. In hoofdstuk 7 wordt een klasse-indeling gepresenteerd en de definitieve methode voor de kartering van de *site response* verder uitgewerkt.

In fase 2 zal de kartering van de ondergrondklassen en de *site response* worden uitgevoerd. Ook de bepaling van de invloed en aard van de constructie en de kartering van het risico op schade zal in deze fase plaatsvinden. De resultaten van fase 2 zullen aan het eind van het project worden gerapporteerd.

2 *Site response*

2.1 **Inleiding**

Uit wereldwijde registraties van aardbevingen die in het verleden hebben plaatsgevonden en waarnemingen van de schade die door deze aardbevingen is veroorzaakt blijkt dat er een duidelijke relatie bestaat tussen het risico op schade en de samenstelling van de ondiepere ondergrond (Idriss, 1990). Afhankelijk van de aard van het aardbevingssignaal en de lokale samenstelling van de ondiepe ondergrond kan er een amplificatie van de beweging van de grond optreden, een verschuiving van de dominante frequenties in het signaal plaatsvinden en kunnen bepaalde frequenties in het signaal sterk worden gedempt. De lokale reactie van de ondiepe ondergrond op het aardbevingssignaal wordt de *site response* genoemd. Door de laterale afwisseling van afzettingen in de ondiepe ondergrond kan de *site response* variëren.

De *site response* is van een aantal factoren afhankelijk:

- De schuifmodulus (G) of de schuifgolfsnelheid (V_s) in de bovenste (tientallen) meters van de ondergrond;
- De demping (dempingratio β) die optreedt in de bovenste (tientallen) meters van de ondergrond;
- De eigenfrequentie van de site (f_{site}) of de site periode (T_{site}) en het al dan niet voorkomen van grote impedantieratios (I) in de ondergrond, waardoor resonantie en amplificatie van het signaal kan optreden;
- de diepte tot 'bedrock';
- de sterkte, frequentie-inhoud en tijdsduur van het aardbevingssignaal zelf en het aantal cycli (N);
- topografische effecten;
- 3D-variatie in de opbouw van de ondergrond.

In de onderstaande paragrafen wordt kort ingegaan op de verschillende factoren die van belang zijn voor de *site response*. Tevens worden enkele begrippen behandeld die veel gebruikt worden bij seismische risico analyses, zoals amplificatie en respons spectra.

2.2 **Factoren van invloed op de *site response***

2.2.1 *Schuifgolfsnelheid V_s – schuifmodulus G*

Slappe, weinig geconsolideerde afzettingen als klei en veen hebben een lagere schuifmodulus en schuifgolfsnelheid dan stijve vastgepakte zand- en grindafzettingen en gesteente. De amplitude van een golfbeweging (en daarmee de piekversnellingen) in veen of klei zal, bij een gelijke dynamische belasting en demping, groter zijn dan in zand of grindhoudende afzettingen en gesteente.

De grootte van de schuifmodulus G is afhankelijk van een aantal factoren, die worden weergegeven in tabel 1. Van de geotechnische eigenschappen van het sediment zelf is met name het poriëngetal belangrijk voor zowel cohesieve als niet-cohesieve sedimenten. Het poriëngetal (e) is als volgt gedefinieerd:

$$e = \frac{n}{100 - n}$$

Waarbij n het poriëngehalte of de porositeit van de grond is (%). Het poriëngetal zelf is een dimensieloze grootte.

De schuifmodulus neemt toe met een afnemend poriëngetal. Voor cohesieve afzettingen is de verzadigingsgraad een belangrijke parameter; de schuifmodulus neemt af bij een toenemende verzadigingsgraad.

Tabel 1. Overzicht van invloed van parameters op de schuifmodulus en dempingratio. +, 0 en - betekent resp. grote, matige, kleine invloed op de modulus of demping ratio (op basis van Hardin et al., 1972).

Parameter	Modulus		Demping	
	Zand	Cohesief	Zand	Cohesief
Rek (<i>strain</i>)	+	+	+	+
Gemiddelde effectieve grondspanning	+	+	+	+
Poriëngetal	+	+	+	+
Aantal cycli	-	-	+	+
Verzadigingsgraad	-	+	0	?
Overconsolidatiegraad	-	0	-	0
Frequentie van de belasting	-	-	-	0
Overige tijdseffecten (thixotropie)	-	0	-	0
Karakteristieken van de korrels (grootte, afronding, gradatie, etc)	-	-	-	-
Plasticiteitsindex	-	+	-	+
Structuur van de grond	-	-	-	-

Naast bovengenoemde factoren speelt de gemiddelde effectieve grondspanning en daarmee de diepteligging een belangrijke rol voor zowel cohesieve als niet-cohesieve sedimenten. Diepere afzettingen hebben een hogere schuifmodulus dan vergelijkbare afzettingen op een kleinere diepte. Een voorbeeld van een relatie waarin de afhankelijkheid van G_{\max} van de verschillende parameters wordt weergegeven (Hardin & Drnevich, 1972).

Cohesief:

$$G_{\max} = 1230 * \frac{(2,973 - e)^2}{(1 + e)} (OCR)^K (\sigma_0')^{0,5}$$

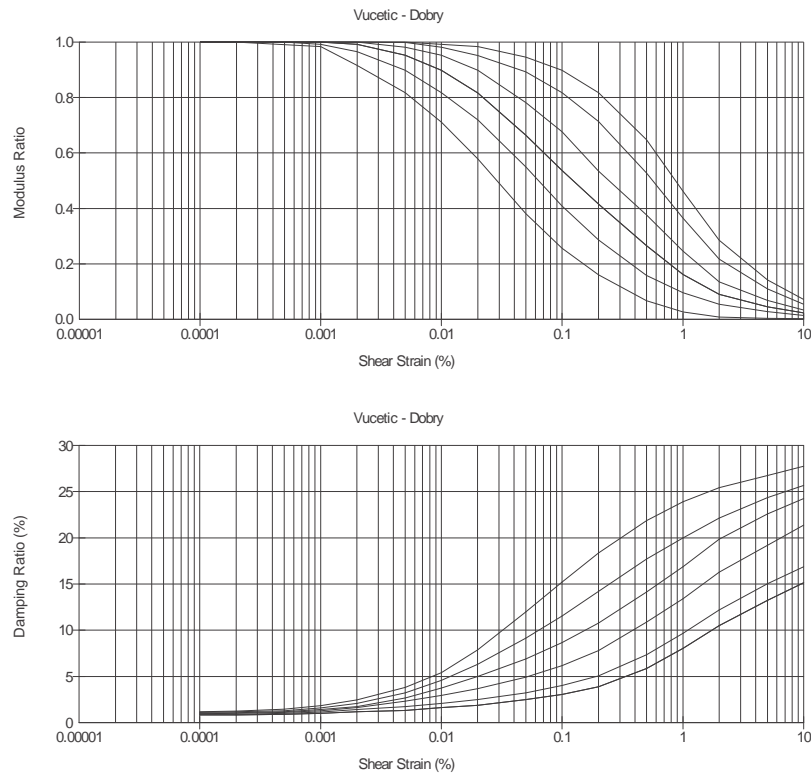
Waarbij: e het poriëngetal, OCR de overconsolidatiegraad, σ_0' de gemiddelde effectieve grondspanning en K een exponent is die afhangt van de plasticiteitsindex van de grond.

Niet-cohesief:

$$G_{\max} = 1000 * K_2 * (\sigma_0')^{0,5}$$

Met K_2 een empirische constante afhankelijk van het poriëngetal en de relatieve dichtheid van het materiaal.

De schuifmodulus voor één en hetzelfde type sediment op een vaste diepte is niet constant, maar vertoont een niet-lineaire afname met toenemende schuifdeformatie (dus met een toenemende piekversnelling). Figuur 1 toont een voorbeeld van de afname van de schuifmodulus met toenemende schuifdeformatie.



Figuur 1. Afname van G en toename van de dempingratio met toenemende shear strain, voor afzettingen met plasticiteitsindex PI 0, 15, 30, 50, 100 en 200%. De bovenste lijn voor de modulus is voor $PI=200\%$; de onderste lijn voor $PI=0\%$. De onderste lijn voor de dempingratio is voor $PI=200\%$; de bovenste lijn voor $PI=0\%$. De mate van niet-lineair gedrag hangt dus in sterke mate af van de PI van de grond. Grondsoorten met een hoge plasticiteitsindex vertonen een lange range van lineair gedrag (dus weinig afname, resp. toename van de G -modulus en demping met toenemende shear strain). (Uit ProShake, naar Vucetic en Dobry, 1991).

2.2.2 Dempingratio β

Een hogere materiaaldemping (uitgedrukt in de dempingratio van het sediment) leidt tot een snellere afname van de amplitude van het signaal. De demping toont net als de schuifmodulus een sterke niet-lineaire afhankelijkheid van de schuifdeformatie; de demping neemt sterk toe met toenemende schuifdeformatie (zie figuur 1). Daarnaast is er een duidelijke relatie tussen de dempingratio en het aantal belastingscycli N : de dempingratio neemt af met het toenemende aantal cycli (Hardin et al., 1972). De demping is daarmee, naast van de amplitude van de versnelling, ook afhankelijk van de tijdsduur van de aardbeving en het aantal cycli. Andere factoren die de demping in sterke mate beïnvloeden zijn de gemiddelde effectieve grondspanning, direct afhankelijk van de diepte van de afzettingen en een eventuele overconsolidatie ratio (afname van de demping met een toenemende grondspanning en OCR), het poriëngetal

(toenemende demping met een toenemend poriëngetal). Als laatste is ook de plasticiteitsindex van de grond een belangrijke factor (zie figuur 1).

2.2.3 *Amplificatie en eigenfrequentie*

De *site response* is groot wanneer de eigenfrequentie van de site (f_{site}) of de eigenfrequentie van een laag met een groot impedantiecontrast met aangrenzende lagen in de buurt ligt van de dominante frequenties in de aardbeving. In de literatuur wordt ervan uitgegaan dat het belangrijkste impedantiecontrast gevormd wordt door de overgang van ‘bedrock’ naar bovenliggend sediment. In de ondergrond van Nederland wordt deze overgang pas op zeer grote diepte aangetroffen en speelt deze overgang een minder belangrijke rol. In de ondiepe ondergrond van Noord-Nederland en West-Nederland wordt in de bovenste tientallen meters wel een belangrijk impedantiecontrast aangetroffen op de grens van de slappe cohesieve holocene afzettingen (met name bij de veenlagen) en de stijve pleistocene afzettingen.

Een eerste indicatie of amplificatie op de eigenfrequenties van de relatief slappe holocene lagen een rol speelt in het onderzoeksgebied kan verkregen worden door gebruik te maken van een simpele schematisatie van de ondergrond in twee lagen. De bovenste laag bestaat hierbij uit slap holocene (veen) en de onderste laag uit een halfruimte met stijve pleistocene afzettingen (zie figuur 2, Dobry et al., 2000). In figuur 2 wordt ook een situatie aangegeven waarbij het slappe holocene ontbreekt en het pleistoceen direct aan het maaiveld ligt.

De eigenfrequentie van de slappe holocene laag is (bij lineair gedrag van de grond) af te leiden uit de volgende vergelijking (Dobry, 2000):

$$f_{\text{holocene}} = \frac{V_{s,\text{holocene}}}{4H_{\text{holocene}}}$$

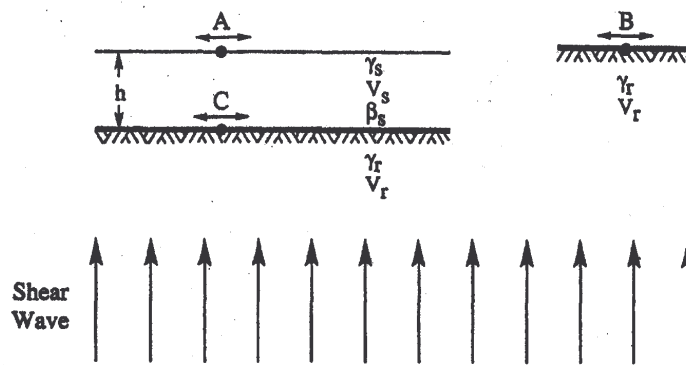
Waarbij f_{holocene} de eigenfrequentie (Hz) van de holocene laag, $V_{s,\text{holocene}}$ de schuifgolfsnelheid (m/s) van de veenlaag en H_{holocene} de dikte (m) van de veenlaag is.

Tabel 2a. Eigenfrequenties van holocene veenlagen met variërende diktes. Tabel 2b geeft de gemiddelde rekenwaarden voor de verschillende afzettingen. Tabel 2c geeft de amplificatiefactoren voor de afzettingen.

A. Dikte (m)	$f_{\text{eigen veen}}$ (Hz)
1	12,5
1,5	8,3
2	6,3
2,5	5,0
3	4,2
3,5	3,6
4	3,1
4,5	2,8
5	2,5
>5	<3

B. Afzetting	Volumiek gewicht γ (kN/m ³)	V _s (m/s)	Impedantie ratio	Dempingratio
Holoceen veen	10	50	10	0,025
Pleistocene laag	20	260	1	0,01

C.	Amplificatiefactor (-)
holoceen veen	7



Figuur 2. Vereenvoudigde modellering van amplificatie – 2-lagenmodel gevormd door Pleistoceen (halfruimte) en Holoceen. Rechts Pleistoceen tot aan het oppervlak (naar Dobry et al., 2000).

Voor de berekening van de amplificatiefactoren voor dit tweelagen model wordt uitgegaan van een zich verticaal voortplantende harmonische schuifgolf met een frequentie f_{golf} . Deze schuifgolf zorgt zowel in het holoceen aan maaiveld (A figuur 2) als in het pleistoceen aan maaiveld (B figuur 2) voor een horizontale versnelling met een amplitude A_a (holoceen) en A_b (pleistoceen). De amplificatieratio F is nu gedefinieerd als de verhouding A_a/A_b (dus niet als A_a/A_c !). De amplificatieratio $F=A_a/A_b$ is een functie van de verhouding van de frequentie $f_{\text{golf}}/f_{\text{holoceen}}$ van de dempingratio β_{holoceen} en van de impedantieratio I van het holoceen en het onderliggende pleistoceen:

$$I = \frac{\gamma_{\text{pleistoceen}} * V_{s,\text{pleistoceen}}}{\gamma_{\text{holoceen}} * V_{s,\text{holoceen}}}$$

Met: γ : volumiek gewicht van de grond (kN/m³) en V_s de schuifgolfsnelheid (m/s).

De maximum amplificatie treedt op nabij $f_{\text{golf}}=f_{\text{holoceen}}$, dus wanneer de eigenfrequentie van de site ongeveer samenvalt met de frequenties in de aardbeving (Dobry, 2000):

$$F_{\max} = \left[\frac{A_A}{A_B} \right]_{\max} \approx \frac{1}{\left(\frac{1}{I}\right) + \left(\frac{\pi}{2}\right)\beta_{holocene}}$$

De maximale amplificatiefactoren (F_{\max}) voor dit tweelagen model staan weergegeven in tabel 2c. Tabel 2a geeft als voorbeeld de diktes weer van de veenlagen met een eigenfrequentie om en nabij 10Hz. 10Hz is een frequentie die in de geregistreerde aardbevingen dominant aanwezig is. Uit tabel 2c blijkt dat deze veenlagen een amplificatiefactor van circa 7 kennen. Bovenstaand vereenvoudigd model kan gebruikt worden om een eerste indicatie te krijgen welke afzettingen gevoelig zijn voor het optreden van amplificatie. Daarbij dient men er echter rekening mee te houden dat bovenstaande getallen maximale amplificatiefactoren zijn, die slechts gelden wanneer de eigenfrequentie van de laag ongeveer samenvalt met de frequentie-inhoud van de beving.

Bij bovenstaande berekeningen is nog geen rekening gehouden met het optreden van niet-lineair gedrag van de grond bij een toenemende schuifdeformatie (hogere versnellingen). Bij grotere schuifdeformaties neemt de schuifmodulus van de lagen, en daarmee de schuifgolfsnelheid, af, waardoor de eigenfrequentie van de holocene laag verschuift naar een lagere frequentie.

Bovenstaande formules geven een eerste indicatie in welk type ondergrond amplificatie op de eigenfrequenties van de lagen kan optreden. Ook wanneer de eigenfrequenties van de lagen niet samenvallen met de frequentie-inhoud van de beving kan amplificatie in slappere afzettingen ten opzichte van een stijve referentie conditie optreden. Deze amplificatie zal echter lager zijn dan de amplificatie die optreedt bij de eigenfrequenties.

Naast een verschuiving van de eigenfrequentie van de site heeft het niet-lineaire grondgedrag ook invloed op de demping van de lagen. Bij een grotere piekversnelling en een grotere schuifdeformatie neemt de waarde voor de demping toe. De amplificatiefactoren zijn hiermee afhankelijk van de grootte van de piekversnelling – de amplificatie zal bij hogere piekversnellingen gemiddeld lagere waarden aannemen dan bij kleinere versnellingen. Juist bij kleine versnellingen speelt amplificatie dus een belangrijke rol.

In hoofdstuk 6 worden met behulp van het programma ProShake amplificatiefactoren berekend voor enkele typische ondergrondprofielen. Hierbij wordt onder meer aandacht besteed aan de invloed van de frequentie-inhoud van de beving, eigenfrequenties van de lagen en het optreden van niet-lineair grondgedrag op de grootte van de amplificatiefactoren. Deze berekeningen worden mede gebruikt om de klasse-indeling vast te stellen.

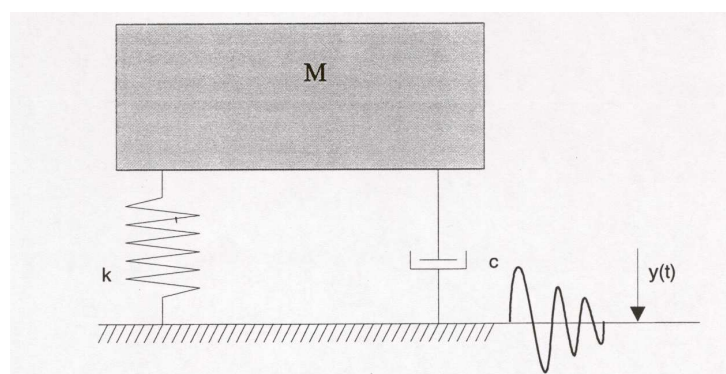
2.2.4 Overige factoren

Naast bovengenoemde factoren zijn ook de diepte tot 'bedrock', de karakteristieken van het aardbevingssignaal zelf, de topografie van het onderzoeksgebied en de 3D opbouw van de ondergrond bepalend voor de *site response*. Rodriguez-Marek (2001) meldt dat de hoeveelheid schade toeneemt met de diepte tot 'bedrock'. Dit geldt echter alleen wanneer 'bedrock' relatief dicht onder maaiveld wordt aangetroffen. De klasse-indeling die Rodriguez-Marek (2001) voorstelt om de *site response* te karakteriseren werkt in het

onderzoeksgebied wat betreft de diepte van de ‘bedrock’ niet onderscheidend; in het onderzoeksgebied wordt ‘bedrock’ pas op enkele honderden meters diepte aangetroffen. De *site response* hangt in sterke mate af van de karakteristieken van het aardbevingssignaal zelf. Reeds genoemd is de invloed van de sterkte van de beving op de schuifgolfsnelheid en demping van het sediment (niet-lineair grondgedrag). Daarnaast zal een sterke amplificatie optreden wanneer de dominante frequenties van de aardbeving samenvallen met de eigenfrequenties van de site. Ook de tijdsduur en het aantal cycli van de aardbeving zijn van invloed op de *site response*. Reliëf aan maaiveld kan leiden tot extra amplificatie. Amplificatie treedt met name op bij ruggen in het landschap. Als laatste beïnvloedt de 3D-opbouw van de ondergrond de respons van de site. De invloed van de 3D-opbouw van de ondergrond en de aanwezigheid van laterale heterogeniteiten (bijvoorbeeld de aanwezigheid van bekkens of geulinsnijdingen in de ondergrond) op de *site response* is in het algemeen moeilijk te voorspellen.

2.3 Reactie van constructies: Respons spectra

Een veelgebruikte grafiek om de reactie van een constructie op de groundbeweging weer te geven is het respons spectrum. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat een constructie kan worden gemodelleerd als een één-massa-veer-systeem met visceuze demping (zie figuur 3). Het respons spectrum geeft de maximale respons van het massa-veer-systeem weer op een specifieke belastingsfunctie, in dit geval de aardbeving (voor een vaste gekozen waarde voor de demping, vaak 5%). De eigenfrequentie van het massa-veer systeem is afhankelijk van zowel grootte van de massa als de stijfheid van de veer. Op de x-as van het respons spectrum staat de eigenfrequentie (of de reciproke waarde, de natuurlijke periode) van het massa-veer-systeem weergegeven; de y-as geeft de maximale respons van het systeem weer. De maximale respons kan weergegeven worden als een maximale verplaatsing, snelheid of versnelling. De maximale respons is een maat voor de verplaatsing, snelheid of versnelling die op zal treden in een constructie met een vergelijkbare eigenfrequentie of natuurlijke periode als het massa-veer-systeem (zie figuur 3).



Figuur 3. Een-massa-veer-systeem met demping gebruikt voor de modellering van de respons op de groundbeweging ($y(t)$) (Van Staalduinen en Geurts, 1998).

3 Bepaling van het seismische hazard en de *site response*: de Eurocode 8 en overige literatuur

3.1 Inleiding

De algemene seismische hazard en de lokale *site response* kunnen op verschillende wijzen in kaart gebracht worden. Zowel de Europese norm (Eurocode 8) als bijvoorbeeld de Amerikaanse Building Codes (Uniform Building Code 1997) en de achterliggende documenten van de NEHRP (Building Seismic Safety Council, 1997) beschrijven methoden om de algemene hazard en lokale *site response* te bepalen. Naast deze normen bestaan er vele verschillende artikelen die het onderwerp seismische hazard analyse en *site response* behandelen. In dit project is een korte inventarisatie gemaakt van bestaande methoden om de *site response* in kaart te brengen.

Het gebruik van een Europese norm, de Eurocode 8 (1998), voor de risico-analyse die in dit project wordt uitgevoerd lijkt voor de hand te liggen. De Eurocode 8 is een Europese norm die geschreven is voor het ontwerp van constructies op middelgrote tot zware aardbevingen: zwaardere aardbevingen met een langere tijdsduur, meerdere cycli en relatief lage frequenties. De geïnduceerde aardbevingen worden gekenmerkt door een sterke puls (korte tijdsduur) en een relatief hoge dominante frequentie (rond 10Hz). In deze fase van het project is onderzocht of de norm zonder meer toegepast kan worden om het risico op schade door lichte aardbevingen, op een korte afstand van de site, te bepalen. Daarnaast is nagegaan in hoeverre de Eurocode 8 aansluit op de bijzondere Nederlandse geologische omstandigheden, gekenmerkt door het voorkomen van vele honderden meters matig geconsolideerd tot ongeconsolideerd sediment.

In het eerste deel van dit hoofdstuk wordt de aanpak van de Eurocode 8 afgezet tegen de randvoorwaarden voor dit project. In het tweede deel van het hoofdstuk wordt, op basis van de resultaten van een literatuurstudie, nagegaan of er methoden zijn die beter aansluiten op de problematiek die speelt in dit project.

3.2 Eurocode 8

De Eurocode 8 gaat uit van een indeling van het onderzoeksgebied in seismische zones. Een seismische zone wordt gekarakteriseerd door één parameter, de effectieve piek grondversnelling (*effective peak ground acceleration*) of ontwerp grondversnelling (*design ground acceleration*). Binnen een seismische zone wordt deze ontwerp grondversnelling constant verondersteld. De Eurocode 8 legt niet vast hoe de effectieve piekversnelling bepaald moet worden.

De ontwerp grondversnelling is een parameter die geldt voor vast sediment. De *site response* is nog niet in deze parameter verdisconteerd. Naast de effectieve piek grondversnelling wordt in de Eurocode 8 het elastische respons spectrum en een eventuele amplificatiefactor gebruikt om de lokale *site response* te karakteriseren. Daartoe wordt in de Eurocode 8 (op basis van schuifgolfsnelheden, diepteligging en dikte van de lagen) een aantal ondergrondklassen onderscheiden:

Klasse A:

- Gesteente gekarakteriseerd door een schuifgolfsnelheid van tenminste 800 m/s, met ten hoogste 5 meter slapper materiaal aan het oppervlak; óf:
- Vastgepakte zand- of grindafzettingen of stijve overgeconsolideerde klei van tenminste enkele tientallen meters dikte, gekarakteriseerd door een geleidelijke toename van de schuifgolfsnelheid met de diepte en schuifgolfsnelheden van tenminste 400 m/s op een diepte van 10m.

Klasse B:

- Dikke afzettingen van matig vastgepakte zand- en grindafzettingen met een dikte van enkele tientallen tot honderden meters, gekarakteriseerd door schuifgolfsnelheden van tenminste 200 m/s op een diepte van 10m, toenemend tot 350 m/s op een diepte van 50m.

Klasse C:

- Losgepakte afzettingen zonder cohesie met of zonder enkele slappe cohesieve lagen, gekarakteriseerd door schuifgolfsnelheden lager dan 200 m/s in de bovenste 20m; óf:
- Afzettingen bestaand uit hoofdzakelijk slappe tot matig stijve cohesieve lagen, gekarakteriseerd door schuifgolfsnelheden lager dan 200 m/s in de bovenste 20m.

Naast de drie ondergrondklassen A t/m C worden in de Eurocode twee extra criteria (klassen) genoemd waarbij amplificatie-effecten kunnen optreden of extra onderzoek naar de *site response* moet worden uitgevoerd (*special study soils*). Voor alluviaal sediment met diktes tussen 5 en 20m op gesteente of sediment uit klasse A wordt een vaste amplificatiefactor voorgesteld van 1,4. De amplificatiefactor kan, indien dit nodig wordt geacht, worden bijgesteld. De amplificatiefactor wordt hierbij verondersteld onafhankelijk te zijn van de frequentie-inhoud en de grootte van de versnellingen.

Daarnaast wordt gesteld dat voor een ondergrond bestaand uit tenminste 10m dik sediment uit klasse C, bestaand uit slappe klei of siltlagen met een plasticiteitsindex hoger dan 40% en een hoog watergehalte, extra onderzoek verricht dient te worden (*special study soil*).

De drie ondergrondklassen (A t/m C) worden elk gekarakteriseerd door een (*smooth*) genormaliseerd elastisch respons spectrum. Koppeling van dit genormaliseerde elastische respons spectrum met de ontwerp grondversnelling levert het lokale elastische respons spectrum. Het elastische respons spectrum geeft de maximale respons (d.w.z. de maximale versnelling) op de grondbeweging weer van een systeem met één vrijheidsgraad, voor alle mogelijke natuurlijke frequenties van dit systeem (bij 5% demping, zie paragraaf 3.2). De Eurocode 8 omschrijft niet hoe de effectieve grondversnelling berekend dient te worden en hoe de koppeling van respons spectrum en effectieve grondversnelling tot stand komt.

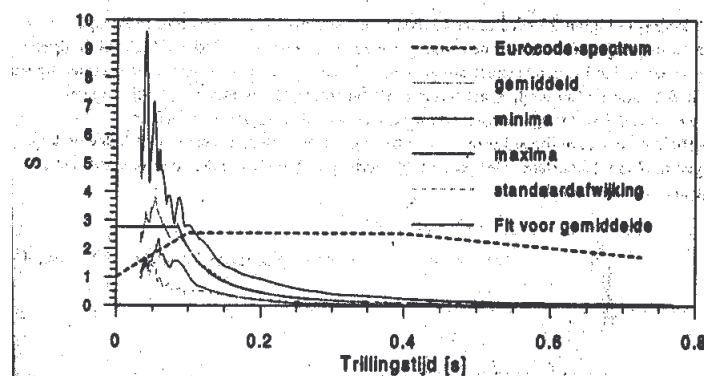
In de Eurocode 8 is vastgelegd dat, indien de bovengenoemde klasse-indeling in ondergrondklassen niet voldoet om de lokale ondergrond te karakteriseren, van deze indeling kan worden afgeweken.

3.3 Toepassing van de Eurocode 8 voor geïnduceerde aardbevingen in Nederland

De karakteristieken van de door de gaswinning geïnduceerde relatief lichte, ondiepe aardbevingen wijken af van de karakteristieken van de zwaardere diepe aardbevingen, waarvoor de Eurocode 8 is opgesteld. De lichte, ondiepe aardbevingen hebben een veel kortere duur (een enkele schok) en bevatten hogere trillingsfrequenties dan de diepere zwaardere aardbevingen.

De respons spectra uit de Eurocode 8 kunnen vergeleken worden met de respons spectra berekend op basis van een aardbeving geregistreerd in Roswinkel (Van Staalduinen en Geurts, 1998). Een vergelijking van de respons spectra toont aan dat de karakteristieken van de respons spectra voor Roswinkel duidelijk afwijken van het respons spectrum uit de Eurocode 8 (zie figuur 4).

- Het maximum van het respons spectrum van Roswinkel ligt bij hogere frequenties dan het maximum in het Eurocode 8 spectrum. Trillingen met frequenties van 10Hz en hoger zijn bij de kleine aardbevingen belangrijker (periodes <0.1s).
- De waarde van het respons spectrum is hoger dan de waarde in het Eurocode spectrum.



Figuur 4. Vergelijking respons spectrum Roswinkel (gemiddelde, minima en maxima) en respons spectrum uit de Eurocode 8 (Van Staalduinen en Geurts, 1998).

Een belangrijke conclusie die uit de vergelijking kan worden getrokken is dat het respons spectrum uit de Eurocode 8 de respons op een lichte aardbeving niet voldoende beschrijft (Van Staalduinen en Geurts, 1998).

De 'ondiepe' geologie in West-, Noord- en Noordoost Nederland wordt gekenmerkt door tientallen tot honderden meters dik sediment. Vast gesteente wordt pas op vele honderden meters diepte aangetroffen. In het Westen en Noorden van Nederland liggen overwegend matig slappe, tot zeer slappe holocene afzettingen aan maaiveld. Onder deze afzettingen wordt binnen een diepte van circa 30m beneden maaiveld de top van de pleistocene afzettingen aangetroffen. De Pleistocene afzettingen bestaan voor een groot deel uit goed tot (over)geconsolideerde kleien en lemlagen en matig tot zeer vastgepakte zandige afzettingen. Binnen een diepte van 30m is in veel gevallen dus een overgang aanwezig van slap sediment naar stijvere afzettingen. Deze overgang vormt

voor deze seismische risico-analyse mogelijk een belangrijke factor (zie paragraaf 2.2.3).

De Eurocode 8 kent een amplificatiefactor (1,4) toe wanneer er 5 tot 20m alluviaal sediment op gesteente ligt. Deze situatie komt in het onderzoeksgebied niet voor. Uit paragraaf 2.2.3 blijkt echter dat er ten gevolge van een stijfheidscontrast, bijvoorbeeld op de overgang Holocene/Pleistoceen, wel een sterke amplificatie kan optreden. De klasse-indeling in de Eurocode 8 sluit wat dat betreft onvoldoende aan op de situatie in het onderzoeksgebied. Ook buiten de eigenfrequenties van de slappe holocene lagen wordt er in de zeer slappe klei- en veenlagen een amplificatie van het signaal verwacht. Extra onderzoek naar de respons lijkt gerechtvaardigd wanneer deze afzettingen op de site worden aangetroffen. Dikke slappe klei- en siltlagen (dikker dan 10m) worden in de Eurocode 8 ingedeeld in de klasse 'special study soils'. De Eurocode 8 deelt de dikke slappe veenlagen op basis van schuifgolfsnelheid echter niet in in klasse 'special study soils', maar in klasse C, waarin ook stijvere afzettingen als matig stijve kleilagen vallen. Ook hier sluit de klasse-indeling van de Eurocode 8 niet goed aan op de geologische omstandigheden in het onderzoeksgebied.

Als belangrijkste bezwaren tegen het (zonder aanpassingen) gebruik van de Eurocode 8 worden hier genoemd:

- De berekeningswijze van de effectieve grondversnelling voor geïnduceerde aardbevingen is niet gespecificeerd en het is onduidelijk hoe de koppeling van de effectieve grondversnelling met het genormaliseerde elastische respons spectrum tot stand dient te komen.
- De vorm van het respons spectrum voor middelgrote tot zware aardbevingen komt niet overeen met de vorm van het respons spectrum voor lichte geïnduceerde aardbevingen.
- De klasse-indeling sluit slecht aan op de situatie die in het onderzoeksgebied wordt aangetroffen. Amplificatie wordt in het onderzoeksgebied niet veroorzaakt door de overgang bedrock – sediment, maar door het stijfheidsverschil in holocene slappe klei- en veenlagen en stijvere (holocene en pleistocene) zanden. De dikke veenafzettingen, die in Nederland worden aangetroffen, vallen in de Eurocode 8 klassificering niet onder de 'special study soils'.
- De Eurocode 8 houdt geen rekening met het optreden van niet-lineair grondgedrag; de amplificatiefactor wordt onafhankelijk verondersteld van de grootte van de grondversnelling. De amplificatiefactor wordt verder onafhankelijk verondersteld van de frequentie-inhoud van de beving.

3.4 Beschrijving overige normen en literatuur

Tabel A in appendix A geeft een overzicht van de literatuur die voor dit onderzoek naar het vaststellen van de seismische hazard en *site response* is gebruikt. In deze paragraaf wordt een korte beschrijving gegeven van de methoden die in deze literatuur worden genoemd. Daarbij wordt telkens ingegaan op de toepassingsmogelijkheden voor dit project.

Ondergrondklassen en amplificatiefactoren

Het probleem van de onduidelijke berekening van de effectieve grondversnelling en de koppeling met het respons spectrum kan omzeild worden door in de algemene seismische hazard studie niet de effectieve grondversnelling, maar rechtstreeks de

spectrale waarden van de versnelling uit het respons spectrum in kaart te brengen. Deze aanpak wordt onder andere voorgeschreven in de “NEHRP Recommended Provisions for the development of seismic regulations for new buildings” (Building Seismic Safety Council, 1997) en de “Uniform Building Code” (1997). Twee parameters, die verkregen kunnen worden uit de nationale seismic hazard kaarten (Algermissen (1991), Leyendecker (1994)), beschrijven de maximum te verwachten groundbeweging: S_s en S_l . Dit zijn de spectrale waarden voor de respons (versnelling) van een constructie gefundeerd op gesteente (klasse B) voor een maximaal verwachte aardbeving. S_s is de waarde uit het respons spectrum (5% damping) voor korte periodes ($0,1 - 0,5s = 2-10\text{Hz}$), S_l is de waarde uit het respons spectrum voor een periode van 1s (of 1Hz).

Het effect van de lokale geologische omstandigheden (site effect) kan worden meegewogen door de spectrale versnellingen uit het respons spectrum te vermenigvuldigen met een factor F_a (korte periodes), en F_v (lange periodes). S_s , S_l , F_a , en F_v zijn in principe voldoende om het volledige respons spectrum voor de site te definiëren. De amplificatiefactoren F_a en F_v zijn afhankelijk van de ondergrondklasse (zie tabel 3a en 3b) en van de versnelling die optreedt tijdens de aardbeving.

Hoewel ook hier geldt dat het respons spectrum dat wordt gegeven slecht past op het respons spectrum voor de kleine geïnduceerde aardbevingen, kan de factor F_a voor de korte periodes mogelijk wel gebruikt worden om de amplificatie bij een dominante frequentie van 10Hz te berekenen. Een nadeel is dat de documenten slechts amplificatiefactoren geven ten opzichte van ‘bedrock’, een situatie die voor dit project weinig relevant is.

Borcherdt (1994, 2002) geeft naast amplificatiefactoren ten opzichte van ‘bedrock’ ook amplificatiefactoren ten opzichte van een ‘reference soil’ (klasse SC(II+III)). De eigenschappen van de grond in deze klasse komen redelijk overeen met de gemiddelde eigenschappen van de pleistocene afzettingen in het onderzoeksgebied. De benadering van Borcherdt heeft als groot voordeel dat amplificatiefactoren ten opzichte van de groundbeweging in het Pleistoceen gegeven kunnen worden (hierbij wordt een geheel uit pleistocene afzettingen bestaande ondergrond als referentie-conditie gebruikt). Een overzicht van de klasse-indeling van Borcherdt (1994, 2002) en de bijbehorende amplificatiefactoren worden gegeven in de tabellen 3a en 3b. De amplificatiefactoren hangen af van de grootte van de versnelling; hierdoor kan rekening gehouden worden met het optreden van niet-lineair grondgedrag.

Tabel 3a. Klasse-indeling Borchardt (1994, 2002)

Klasse Borchardt (1994, 2002) (NEHRP, 1997)	Omschrijving
SC-Ia (A)	Hard rock $V_s > 1400$ m/s (NEHRP: >1500 m/s)
SC-Ib (B)	Firm to hard rock $700 \text{ m/s} < V_s < 1400$ m/s (NEHRP: 760-1500 m/s)
SC-II (C)	Gravelly soils and soft to firm rocks: $375 \text{ m/s} < V_s < 700$ m/s (dikte > 10 m) (NEHRP: 360-760 m/s)
SC-III (D)	Stiff clays and sandy soils: $200 \text{ m/s} < V_s < 375$ m/s (dikte > 5 m) (NEHRP: 180 – 360 m/s)
SC-IVa (E)	Non-special study soft soils $100 \text{ m/s} < V_s < 200$ m/s (thickness > 3 m) (NEHRP: <180 m/s)
SC-IVb (F) (‘special study soil’)	Soft soils and liquefiable soils Quick and highly sensitive clays Peats and highly organic clays Very high plasticity clays (PI $>75\%$) Thickness > 3 m Also: Soft soils > 37 m. (NEHRP: > 8 m for very high plasticity clays and > 36 m soft clays)

Tabel 3b. Amplificatiefactoren F_a voor de ‘short-period range’ en F_v voor 1s (Borchardt (1994, 2002))

Versnelling (g)	Amplificatie tov SC-(II+III)			
	Sc(II+III)	Sc-IV	Sc(II+III)	Sc-IV
	F_a	F_a	F_v	F_v
0.1	1	1,5	1	2,0
0.2	1	1,3	1	1,9
0.3	1	1,1	1	1,8
0.4	1	0,9	1	1,6

De amplificatiefactoren zijn bepaald op basis van in-situ metingen tijdens de Loma Pietra aardbeving (VS). De amplificatiefactoren gelden per discrete grondklasse; dit betekent dus dat een bepaalde bandbreedte van $V_{s,30}$ gekarakteriseerd wordt door één amplificatiefactor. Uit een latere toetsing aan in-situ metingen van amplificaties ten opzichte van ‘bedrock’ tijdens de Northridge aardbeving (VS) blijkt, dat de amplificatiefactoren een betrouwbaarder schatting geven voor een ondergrond met een $V_{s,30}$ rond het midden van de grondklasse dan voor een ondergrond met een $V_{s,30}$ nabij de grenswaarden van de klasse. Nabij de ondergrens van de klasse kunnen de factoren een onderschatting van de amplificatie geven (Borchardt, 2002). Deze toetsing is alleen uitgevoerd voor amplificaties in de stijvere ondergrondklassen (SC-III en hoger) ten opzichte van ‘bedrock’. Er wordt geen inzicht gegeven in de betrouwbaarheid en de

spreiding van de amplificatiefactoren in de slappe klasse SC-IV ten opzichte van de stijve klasse (II+III).

De amplificatiefactoren die door Borchardt worden genoemd geven een gemiddelde respons voor ‘vergelijkbare’ sites. Door de respons van een groep sites te middelen wordt voorbijgegaan aan het feit dat elke site een specifieke respons op de groundbeweging vertoont (bijvoorbeeld door het optreden van resonantie). Door de respons van de sites te middelen worden de pieken in de spectrale respons statistisch afgevlakt (Seed et al., 2001). Deze benadering kan zowel een onderschatting als overschatting geven van de respons die in werkelijkheid optreedt.

De amplificatiefactoren zijn bepaald op basis van in-situ metingen tijdens zwaardere aardbevingen, met een langere duur en meer belastingscycli dan de geïnduceerde aardbevingen. In hoofdstuk 6 zal met behulp van ProShake berekeningen voor enkele typische Nederlandse ondergrondprofielen berekend worden in hoeverre deze amplificatiefactoren gebruikt kunnen worden om de respons van de afzettingen op de geïnduceerde aardbevingen die optreden in het onderzoeksgebied te karakteriseren.

De klasse-indeling die Borchardt (1994, 2002) hanteert heeft als voordeel ten opzichte van de Eurocode 8 dat ook veen onder de categorie ‘special study soils’ valt. Borchardt gebruikt, naast lithologische en dikte criteria, de waarde voor de gemiddelde schuifgolfsnelheid ($V_{s,30}$) over de bovenste 30m als belangrijkste criterium voor de indeling in klassen, waarbij $V_{s,30}$ als volgt berekend wordt:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\left[\sum \left(\frac{h_i}{V_{s,i}} \right) \right]}$$

Met h_i – de dikte van de i^{de} laag en $V_{s,i}$ de schuifgolfsnelheid van de i^{de} laag.

Dit leidt tot een eenduidiger indeling dan de criteria van de Eurocode 8. De klasse-grenzen tonen overigens slechts een kleine verschuiving ten opzichte van de grenzen vastgelegd in de Eurocode 8 (zie tabel A1 in appendix A).

Elton en Martin (1989) kiezen een afwijkende methode voor de kartering van de *site response*. Om het risico op schade te kunnen inschatten en het ontwerp van constructies op aardbevingen aan te passen brengen zij de natuurlijke site periode of eigenfrequentie van de site in kaart. Dit is een methode die als aanvulling op de door Borchardt beschreven methode toepasbaar is voor dit project. Uit indicatieve berekeningen (paragraaf 2.2.3) is gebleken dat in slappe holocene klei- en veenlagen gelegen op stijvere afzettingen sterke amplificatie kan optreden op de eigenfrequenties van de slappe holocene veen- en kleilagen. Deze veen- en kleilagen kunnen op basis van hun dikte en eigenfrequentie worden ingedeeld als een risicovolle ondergrondklasse en apart in kaart gebracht worden.

Overige methoden

Rodriquez-Marek et al. (2001) baseert de klasse-indeling niet op de gemiddelde V_s snelheden van de bovenste 30m maar op criteria als diepte tot vast gesteente, lithologie, ouderdom en diktes. De methode levert echter alleen amplificatiefactoren voor relatief stijf sediment ten opzichte van bedrock. Voor het huidige project is juist de amplificatie van het signaal ten opzichte van het pleistoceen van belang. Hossier (1986, 1987)

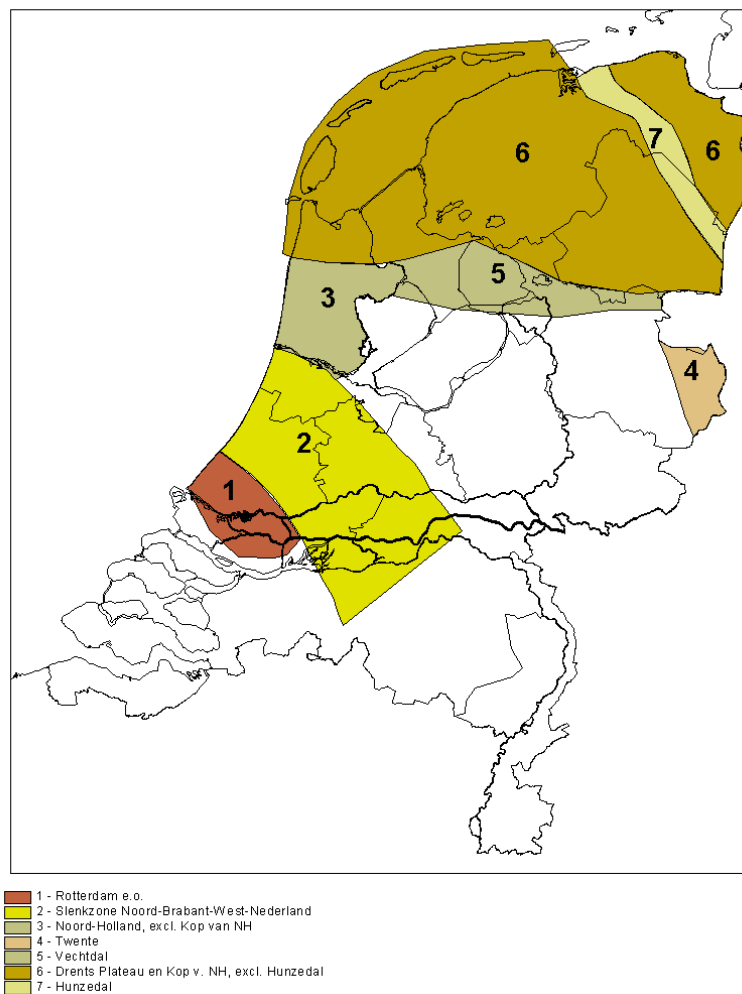
hanteert een klasse-indeling in drie klassen die weinig onderscheidend werkt voor de Nederlandse bodemopbouw. Noack en Fah leveren een kwalitatieve analyse die moeilijk is om te zetten naar een kwantitatieve inschatting van het risico op schade.

3.5 Keuze methode kartering *site response*

In navolging van NEHRP (Building Seismic Safety Council, 1997), UBC (1997) en Borchardt (1994, 2002) zullen de spectrale waarden uit het respons spectrum gebruikt worden voor de kartering van de algemene seismische hazard. Deze waarden worden als representatief beschouwd voor de grondbeweging in het pleistoceen (referentieconditie). Met behulp van de klasse-indeling en de amplificatiefactoren die door Borchardt (1994, 2002) worden gegeven kan de site respons gekarakteriseerd worden; de amplificatiefactoren geven een gemiddeld beeld van de respons in de verschillende klassen. De klasse-indeling is gebaseerd op zowel de lithologie, de dikte als de gemiddelde schuifgolfsnelheid van de bovenste 30m ($V_{s,30}$). De amplificatiefactoren zijn afhankelijk van zowel de ondergrondklasse, frequentie-inhoud als sterkte van de beving, zodat rekening gehouden wordt met het mogelijke optreden van niet-lineair grondgedrag. De veenlagen vallen in deze klassificatie in de klasse 'special study soils'. Daarnaast kan een extra risicoklasse in kaart worden gebracht: slappe holocene lagen op stijvere afzettingen met eigenfrequenties die samenvallen met de dominante frequenties in de aardbeving.

4 Beschrijving van de afzettingen in het onderzoeksgebied

Op basis van de geologische geschiedenis van het onderzoeksgebied en de verschillende typen afzettingen die in het onderzoeksgebied worden aangetroffen is het gebied onderverdeeld in 7 regio's (zie figuur 5). In deze paragraaf wordt een kort overzicht gegeven van de verschillende afzettingen die in de regio's worden aangetroffen. Het gaat hierbij om de opbouw van de bovenste 50 m van de ondergrond. Voor een uitgebreide beschrijving van de formaties wordt verwezen naar appendix B.



Figuur 5: Indeling in regio's gebaseerd op de geologische opbouw van de ondergrond tot 50 m beneden maaiveld.

Regio 1: Rotterdam e.o.

Holocene formaties:

Formatie van Nieuwkoop: veen

Formatie van Naaldwijk: klei op zand

Formatie van Echteld: klei

Pleistocene formaties:

Formatie van Kreftenheye: zand

Formatie van Stramproy: leem op zand
Formatie van Waalre: klei op zand

Regio 2: Slenkzone lopend van Noord-Brabant naar West-Nederland

Holocene formaties:

Formatie van Nieuwkoop: veen, voorkomend in West-Nederland
Formatie van Naaldwijk: klei op zand, voorkomend in West-Nederland
Formatie van Echteld: klei op zand, voorkomend in het rivierengebied

Pleistocene formaties:

Formatie van Kreftenheye: zand
Formatie van Urk en Sterksel: klei en zand

Regio 3: Noord-Holland noordelijk van Amsterdam excl. Kop van Noord-Holland

Holocene formaties:

Formatie van Nieuwkoop: veen
Formatie van Naaldwijk: klei op zand en Klei van Bergen (rondom Alkmaar)

Pleistocene formaties:

Formatie van Boxtel: zand
Formatie van Kreftenheye: zand
Eem Formatie: zand

Regio 4: Twente

Pleistocene Formaties:

Formatie van Boxtel: zand
Formatie van Drente: Laagpakket van Gieten (klei, leem) en Laagpakket van Schaarsbergen (zand)

Tertiaire formaties:

Formatie van Breda: klei

Regio 5: Vechtdal lopend van Coevorden tot Enkhuisen

Holocene formaties:

Formatie van Naaldwijk: klei

Pleistocene formaties:

Formatie van Boxtel: zand
Formatie van Kreftenheye: zand en Laagpakket van Zutphen (klei, veen)
Eem Formatie: klei en zand
Formatie van Drente: Laagpakket van Schaarsbergen (zand)
Formatie van Urk: zand

Regio 6: Drents plateau en Kop van Noord-Holland excl. vroegere Hunzedal

Kop van Noord-Holland

Holocene formaties:

Formatie van Naaldwijk: klei op zand

Pleistocene formaties:

Formatie van Boxtel: zand
Eem Formatie: klei/leem op zand
Formatie van Drente: zand
Formatie van Boxtel: Laagpakket van Drachten (zand)
Formatie van Peelo: zand en Laagpakket van Nieuwolda (klei)

*Drents plateau (Friesland), ten westen van het Hunzedal**Holocene formaties:*

Formatie van Naaldwijk: klei

Formatie van Nieuwkoop: veen

Pleistocene formaties:

Formatie van Boxtel: zand

Formatie van Drente: Laagpakket van Gieten (klei, leem)

Formatie van Boxtel: Laagpakket van Drachten (zand)

Formatie van Urk: Laagpakket van Tijnje (zand)

Formatie van Peelo: zand en Laagpakket van Nieuwolda (klei)

*Noord- en Oost-Groningen, ten oosten van het vroegere Hunzedal**Holocene formaties:*

Formatie van Naaldwijk: klei op zand

Formatie van Nieuwkoop: gecompacteerd veen

Pleistocene formaties:

Formatie van Boxtel: zand

Formatie van Drente: Laagpakket van Gieten (klei, leem)

Formatie van Peelo: Laagpakket van Nieuwolda (klei) en zand

Regio 7: Hunzedal*Holocene formaties:*

Formatie van Naaldwijk: klei op zand

Formatie van Nieuwkoop: ondiep veen

Pleistocene formaties:

Formatie van Boxtel: leem en zand

Eem Formatie: zand en klei

Formatie van Peelo: zand en Laagpakket van Nieuwolda (klei)

De schuifgolfsnelheid van de sedimenten hangt af van meerdere factoren, waaronder de diepteligging, het poriëngetal en de korrelgrootteverdeling, de plasticiteitsindex en de overconsolidatieratio. De laatste factor, de overconsolidatieratio, hangt af van de voorbelastingsgeschiedenis van het sediment. De regio's 4, 5, 6 en 7 zijn glaciaal beïnvloed. Hier zijn de oudere afzettingen voorbelast door het landijs. Daarom worden in deze afzettingen gemiddeld wat hogere schuifgolfsnelheden verwacht. Daarnaast kunnen ook oudere afzettingen die niet zijn voorbelast door het landijs, zoals de afzettingen van de Formatie van Breda, Sterksel, Waalre en Stramproy, overgeconsolideerd zijn door bijvoorbeeld het effect van 'aging'. Ook hier worden dan ook hogere schuifgolfsnelheden verwacht. Met name in de slecht tot matig geconsolideerde cohesieve holocene afzettingen worden lage schuifgolfsnelheden verwacht.

5 Resultaten van het veldonderzoek – schuifgolfsnelheden

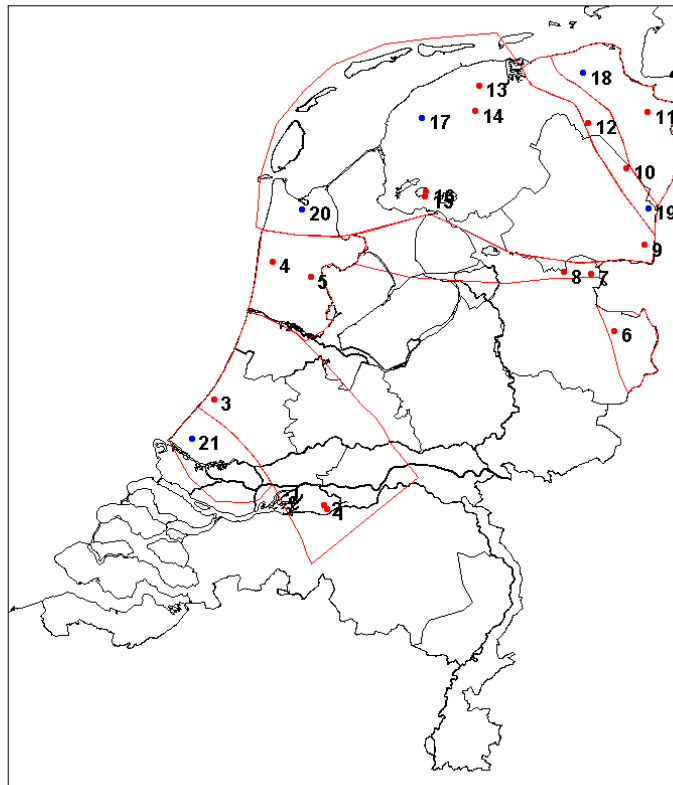
De schuifgolfsnelheden van de verschillende afzettingen zijn bepaald met behulp van oppervlaktegolfmetingen (ConsoliTest) en seismische sonderingen. In dit hoofdstuk worden de resultaten van het veldonderzoek gepresenteerd.

Uitgangspunt voor het veldonderzoek is geweest dat voor elke formatie (en “hoofd”lithologie) tenminste één meting van de schuifgolfsnelheid beschikbaar moet zijn. Deze schuifgolfsnelheid dient beschouwd te worden als een indicatieve waarde van de schuifgolfsnelheden die in de afzettingen kunnen voorkomen. De afzettingen in het onderzoeksgebied zijn zeer heterogeen van samenstelling, zodat ook een grote variatie in schuifgolfsnelheden verwacht wordt. Het is op basis van de resultaten van dit beperkte veldonderzoek niet mogelijk om uitspraken te doen over de variatie in schuifgolfsnelheden die in afzettingen kunnen voorkomen.

Tabel 5 geeft een overzicht van de lokaties en bijbehorende coördinaten van de 16 oppervlaktegolfmetingen en 5 seismische sonderingen. Fig. 6 geeft de lokaties van de oppervlaktegolfmetingen en seismische sonderingen op een kaart weer.

Tabel 5. Overzicht van de lokaties van de ConsoliTest-metingen en de seismische sonderingen. De nummers van de lokaties verwijzen naar lokatiekaart in figuur 6. SCPT staat voor seismische sondering.

Lokatie	Nr	X-coördinaat (RD)	Y-coördinaat (RD)	Label	Type meting
Eethen (N-Br)	1	132308	415853	A	Oppervlaktegolf
Babyloniënbroek (N-Br)	2	131122	417456	B	Oppervlaktegolf
Wassenaar (Z-H)	3	85683	461402	A	Oppervlaktegolf
Beets (N-H)	4	125481	512014	B	Oppervlaktegolf
Alkmaar (N-H)	5	110124	518395	C	Oppervlaktegolf
Fleringen (Ov)	6	251790	490040	A	Oppervlaktegolf
Gramsbergen (Ov)	7	242280	513530	A	Oppervlaktegolf
Dedemsvaart (Ov)	8	230760	514110	B	Oppervlaktegolf
Klazienaveen (Dr)	9	264221	525296	mislukt	Oppervlaktegolf
Gasselternijveenschemond (Dr)	10	256742	557532	A	Oppervlaktegolf
Oostwold (Gr)	11	265665	580740	B	Oppervlaktegolf
Onnen (Gr)	12	240778	576304	B	Oppervlaktegolf
Dokkum (Fr)	13	195471	591824	mislukt	Oppervlaktegolf
Hardegarijp (Fr)	14	193906	581050	C	Oppervlaktegolf
Sloten (Fr)	15	173080	545490	C	Oppervlaktegolf
Spannenburg (Fr)	16	173510	547650	C	Oppervlaktegolf
Dronrijp (Fr)	17	171960	578380	A	SCPT
Middelstum (Gr)	18	238877	597058	A	SCPT
Roswinkel (Dr)	19	265863	540738	A	SCPT
Slootdorp (NH)	20	121940	540330	A	SCPT
Naaldwijk (ZH)	21	76513	445142	A	SCPT



Figuur 6. Lokaties van de ConsoliTest-metingen en seismische sonderingen. ConsoliTest-metingen zijn weergegeven in rood, seismische sonderingen in blauw.

5.1 Oppervlaktegolfmetingen

De oppervlaktegolfmetingen zijn volgens de door TNO-NITG opgezette “ConsoliTest”-methode uitgevoerd. Elke oppervlaktegolfmeting wordt vergeleken met een sondering, die op het midden van de meetlijn is uitgevoerd. De sonderingen zijn uitgevoerd door Fugro Ingenieursbureau B.V.

Er zijn oppervlaktegolfmetingen verricht op 16 lokaties in Nederland. Het dieptebereik van de ConsoliTest metingen hangt sterk af van de lokale bodemopbouw. De verticale resolutie van de gemeten schuifgolfsnelheid neemt af met toenemende diepte.

Op iedere lokatie is vier keer gemeten om de consistentie van de data te verifiëren. Aan elk van de oppervlaktegolfmetingen is een kwaliteitslabel toegekend (zie tabel 5):

- A: Goed
- B: Voldoende
- C: Onvoldoende

Van de 16 metingen zijn er 14 van een dusdanige kwaliteit dat er een profiel van de schuifgolfsnelheid kan worden bepaald. 10 Van deze 14 metingen hebben het kwaliteitslabel “goed” of “voldoende” (A of B). Opvallend is dat de lokaties in Friesland allemaal een kwaliteitslabel C hebben. Dit is te wijten aan het feit, dat op al deze lokaties een zeer stijve zandlaag van meer dan enkele meters dik boven op een slappere laag ligt, een bodemopbouw waarbij de ConsoliTest een minder betrouwbaar resultaat oplevert. (Het gaat hier om de Formatie van Urk en Formatie van Boxtel, Laagpakket van Drachten). Op de lokaties met kwaliteitslabel C kunnen nog wel schuifgolfsnelheden worden bepaald, deze zullen echter minder betrouwbaar zijn dan de resultaten met een kwaliteitslabel A of B. De resultaten worden voldoende betrouwbaar geacht voor een overzichtskartering van de *site response*.

De resultaten van de oppervlaktegolfmetingen en de sonderingen staan weergegeven in appendix C. Het grootste deel van de metingen laat zien, dat de trend die de conusweerstand van de sondering heeft ook wordt gevolgd door de ConsoliTest meting (zie Appendix C). Tabel C15 in Appendix C geeft een samenvatting voor alle lokaties waar oppervlaktegolfmetingen zijn verricht; per formatie wordt hier de minimum en maximum schuifgolfsnelheid aangegeven.

5.2 Seismische sonderingen

Op 5 lokaties zijn seismische sonderingen uitgevoerd door Fugro Ingenieursbureau B.V. TNO-NITG heeft de meetresultaten van de seismische sonderingen verwerkt en geïnterpreteerd. De lokaties van de seismische sonderingen zijn weergegeven in tabel 5. De diepte van alle seismische sonderingen, met uitzondering van de seismische sondering op de lokatie Naaldwijk, bedraagt 30m. De diepte op de lokatie Naaldwijk bedraagt 50m; hier zijn de diepere formaties van Waalre en Stramproy bemonsterd. De verticale resolutie van de seismische sonderingen is ca. 1m.

De resultaten van de seismische sonderingen worden getoond in Appendix D.

5.3 Interpretatie van de resultaten

De resultaten van de snelheden voor de verschillende formaties en metingen zijn niet direct met elkaar te vergelijken. De gemeten schuifgolfsnelheid is namelijk niet alleen afhankelijk van de eigenschappen van de afzetting (korrelgrootteverdeling, overconsolidatiegraad, plasticiteitsindex, poriëngetal), maar wordt in sterke mate bepaald door de effectieve grondspanning, die weer afhankelijk is van de diepteligging van het sediment, de waterspanning en het bovenliggende sediment. Om toch een vergelijking mogelijk te maken van de schuifgolfsnelheden gemeten op verschillende dieptes in verschillende afzettingen en om een voorspelling te kunnen doen van de schuifgolfsnelheden op een bepaalde diepte is een dieptecorrectie toegepast. Daartoe zijn de schuifgolfsnelheden omgerekend naar schuifgolfsnelheden op vaste diepteniveaus. Hier is aangenomen dat de diepte-afhankelijkheid wordt gegeven door $(\sigma'_0)^{0.5}$ volgens de relaties in paragraaf 2.2.1. Tabel 6 geeft de schuifgolfsnelheden voor verschillende formaties en lithologieën op een diepte van 10m beneden het maaiveld.

Tabel 6. Schuifgolfsnelheden per afzetting op een diepte van 10m beneden maaiveld.

Formatie en lithologie	Schuifgolfsnelheid (op een diepte van 10m -mv)
Nieuwkoop veen	85 m/s
Naaldwijk zand	205 m/s
Naaldwijk klei	150 m/s
Naaldwijk klei van Bergen	175 m/s
Echteld zand	225 m/s
Echteld klei	130 m/s
Boxtel zand	255 m/s
Boxtel leem	180 m/s
Boxtel Drachten zand	355 m/s
Kreftenheye zand	220 m/s
Kreftenheye Zutphen klei/veen	100 m/s
Eem zand	160 m/s
Eem klei	165 m/s
Drente Schaarsbergen zand	205 m/s
Drente Gieten (kei)leem	205 m/s
Urk zand	250 m/s
Urk klei	190 m/s
Peelo zand	220 m/s
Peelo klei	195 m/s
Sterksel zand	180 m/s
Waalre klei	170 m/s
Waalre zand	180 m/s
Stramproy klei	170 m/s
Stramproy zand	290 m/s
Breda klei	205 m/s

Na een correctie voor de diepte waarop de afzettingen zijn aangetroffen blijkt dat de hoogste snelheden worden gevonden in het Laagpakket van Drachten van de Formatie van Boxtel. Dit is een afzetting die door het landijs is voorbelast. Hoge snelheden worden ook aangetroffen in de zandige afzettingen van de Formatie van Stramproy, de Formatie van Urk en de Formatie van Boxtel. In de zanden van de Eem Formatie en de oudere zanden van de Formaties van Waalre en Sterksel zijn ten opzichte van de overige pleistocene zanden relatief lage waarden gemeten (gemiddeld 160-180 m/s op 10 m –mv). De zanden van de Formatie van Drente (Laagpakket van Schaarsbergen), de Formatie van Peelo en de Formatie van Kreftenheye geven omgerekend op een diepte van 10m –mv een gemiddelde waarde van 205-220 m/s. De waarde op een diepte van 10 m –mv voor de pleistocene kleien van de Eem Formatie, de Formatie van Boxtel, de Formatie van Waalre en Stramproy ligt rond de 170-180 m/s m/s. De pleistocene kleien die zijn voorbelast door het landijs (de keileem uit de Drente Gieten en de Peelo klei) tonen gemiddeld hogere waarden (rond 200 m/s op 10m –mv). Ook in de oudere tertiaire klei van de Formatie van Breda worden relatief hoge snelheden gemeten.

Lage snelheden worden hoofdzakelijk gevonden in de holocene cohesieve afzettingen (Formaties van Echteld, Naaldwijk en Nieuwkoop). Van de pleistocene afzettingen heeft het Laagpakket van Zutphen (Formatie van Kreftenheye) een relatief lage schuifgolfsnelheid. In de holocene zanden zijn schuifgolfsnelheden bepaald die vergelijkbaar zijn met de schuifgolfsnelheden die ook in enkele pleistocene zandige afzettingen voorkomen.

6 Onderbouwing amplificatiefactoren: resultaten van de ProShake berekeningen

In paragraaf 3.4 zijn in tabel 3b amplificatiefactoren gegeven voor verschillende ondergrondklassen. De amplificatiefactoren zijn afhankelijk van de grootte van de versnelling. Deze amplificatiefactoren zijn empirisch bepaald en geven een gemiddelde respons voor ‘vergelijkbare’ sites, dat wil zeggen sites met een vergelijkbare gemiddelde schuifgolfsnelheid voor de bovenste 30m. Door de respons van een grote groep sites te middelen wordt voorbijgegaan aan het feit dat elke site een specifieke respons op de grondbeweging vertoont (bijvoorbeeld door het optreden van extra amplificatie op de eigenfrequentie van de site). Door de respons van de sites te middelen worden de pieken in de spectrale respons statistisch afgevlakt (Seed, 2001). Door deze benadering kan de werkelijke amplificatie onderschat worden.

Anderzijds zijn de amplificatiefactoren in tabel 3b gebaseerd op metingen van de *site response* bij aardbevingen (Northridge earthquake, Loma Pietra earthquake) die zwaarder zijn dan de geïnduceerde aardbevingen die voor deze studie relevant zijn. De kenmerken van deze bevingen verschillen van die van de geïnduceerde aardbevingen; zo kennen de zware aardbevingen vele cycli tegenover één of slechts enkele cycli bij geïnduceerde aardbevingen. Het grotere aantal cycli kan juist leiden tot een grotere amplificatie en dus een overschatting van de amplificatiefactoren voor de geïnduceerde aardbevingen.

In dit onderzoek is nagegaan of de amplificatiefactoren van Borchardt toegepast kunnen worden voor dit onderzoek. Daartoe zijn ProShake berekeningen gemaakt voor enkele voor het onderzoeksgebied typerende ondergrondprofielen. De berekeningen zijn gemaakt voor de ondergrondprofielen op de lokaties van de seismische sonderingen die geplaatst zijn voor dit onderzoek; op deze lokaties is het schuifgolfsnelheidsprofiel van de ondergrond met een grote verticale resolutie bekend:

- Roswinkel
- Dronrijp
- Middelstum
- Slootdorp
- Naaldwijk

Tevens zijn drie fictieve profielen doorgerekend waarin aan maaiveld een zeer slappe holocene veenlaag wordt aangetroffen. Daarbij is voor twee van de profielen de dikte van de slappe veenlaag (1,25 m en 2,5 m), zo gekozen dat de eigenfrequentie van de laag overeenkomt met een frequentie van 5Hz en 10Hz. Deze veenlagen liggen direct op een stijve zandige ondergrond. De veenlagen vallen door hun geringe dikte niet in de klasse ‘special study soil’; er wordt echter wel een sterke amplificatie verwacht (zie paragraaf 2.2.3.) aangezien de eigenfrequenties van de lagen samenvallen met frequenties die ook in de aardbeving sterk vertegenwoordigd zijn. Het laatste veenprofiel valt wel in de klasse ‘special study soil’ – dit profiel bestaat uit een veenlaag met een dikte van 4 m op een holocene kleilaag van 8 m dikte. Het stijve pleistocene zand wordt hier pas op grotere diepte aangetroffen (12 m –mv).

Op deze wijze is onderzocht of het noodzakelijk is de klasse ‘special study soils’ uit te breiden met veenlagen dunner dan 3 m, die direct op een stijvere zandige ondergrond

worden aangetroffen. Daarnaast geven de berekeningen inzicht in de grootte van de amplificaties die in de klasse ‘special study soils’ kunnen optreden.

De amplificatiefactoren in tabel 3b geven de amplificatie weer ten opzichte van een referentieconditie aan maaiveld. In hoofdstuk 3 is voorgesteld de groundbeweging op het vaste pleistocene oppervlak als referentie te gebruiken. Dit houdt in dat de lokatie Roswinkel (ROS1) als referentielokatie gebruikt kan worden (de ondergrond van lokatie Roswinkel ROS1 bestaat overwegend uit vaste pleistocene zanden). De gemiddelde schuifgolfsnelheid van het profiel in Roswinkel is 268 m/s; de ondergrond van deze lokatie valt hiermee in de klasse III van Borchardt (1994, 2002).

In tabel 7 staan de gemiddelde schuifgolfsnelheden van de vijf lokaties en de drie fictieve ondergrondprofielen met veen en slappe klei op stijvere zandafzettingen weergegeven. De profielen zijn op basis van deze gemiddelde schuifgolfsnelheid ingedeeld in een klasse. Daarnaast geeft de tabel voor elke lokatie weer welke amplificatiefactoren op basis van de $V_{s,30}$ worden verwacht.

Tabel 7. Ondergrondklassen en amplificatiefactoren voor de lokaties van seismische sonderingen en veen/kleiprofielen – factoren op basis van versnellingen voor 0,3g (signaal Roswinkel). F_a is de empirische amplificatiefactor voor de ‘short-band periode’ (0,1-0,5s), F_v is de empirische amplificatiefactor voor een periode van 1s.

Profiel	$V_{s,30}$	Klasse	F_a	F_v
Roswinkel	268 m/s	III	1	1
Dronrijp	231 m/s	III	1	1
Middelstum	184 m/s	IV	1,1	1,8
Slootdorp	138 m/s	IV	1,1	1,8
Naaldwijk	124 m/s	IV	1,1	1,8
Veen 10Hz	189 m/s	IV	1,1	1,8
Veen 5Hz	169 m/s	IV	1,1	1,8
Veen > 3m	-	‘Special study soil’	-	-

6.1 ProShake

ProShake is een software pakket waarmee de respons van de ondergrond op een verticaal invallende schuifgolf berekend kan worden. De methode die in ProShake gebruikt wordt om de *site response* te berekenen is gelijk aan de methode die in het oorspronkelijke pakket Shake gebruikt wordt (Schnabel, 1972). ProShake is gebaseerd op de oplossing van de golfvergelijking voor zich verticaal voortplantende schuifgolven. De ondergrond wordt in ProShake geschematiseerd als een opeenvolging van oneindig uitgestrekte, horizontale lagen, aan de onderzijde begrensd door een halfruimte. De lagen worden gekarakteriseerd door vier parameters: dikte h (m), schuifgolfsnelheid V_s (m/s) of schuifmodulus G_{max} (Mpa), volumiek gewicht γ (kN/m³) en dempingratio β (-). De grootte van zowel de schuifgolfmodulus G als de dempingratio wordt afhankelijk gesteld van de rek (niet-lineair gedrag). Voor uitgebreide informatie over ProShake wordt verwezen naar de ProShake User’s Manual.

6.2 Referentielokatie Roswinkel ROS1

De lokatie Roswinkel (ROS1) dient als referentielokatie voor de overige lokaties. Dit houdt in dat de amplificatiefactor op ROS1 per definitie op 1 wordt gesteld. Het signaal dat op het station ROS1 aan maaiveld is geregistreerd (piekversnelling 0,3g) is gebruikt als input voor de overige lokaties. Hiertoe is het signaal aan maaiveld eerst omgerekend naar een signaal op 30m diepte. Dit signaal op 30m diepte is vervolgens als input aan de basis van de modellen voor de overige lokaties gebruikt. Voor deze lokaties is vervolgens de respons aan maaiveld berekend. Vergelijking van de respons aan maaiveld met het oorspronkelijke signaal van Roswinkel aan maaiveld geeft de amplificatiefactoren voor de verschillende lokaties ten opzichte van de referentieconditie Roswinkel ROS1.

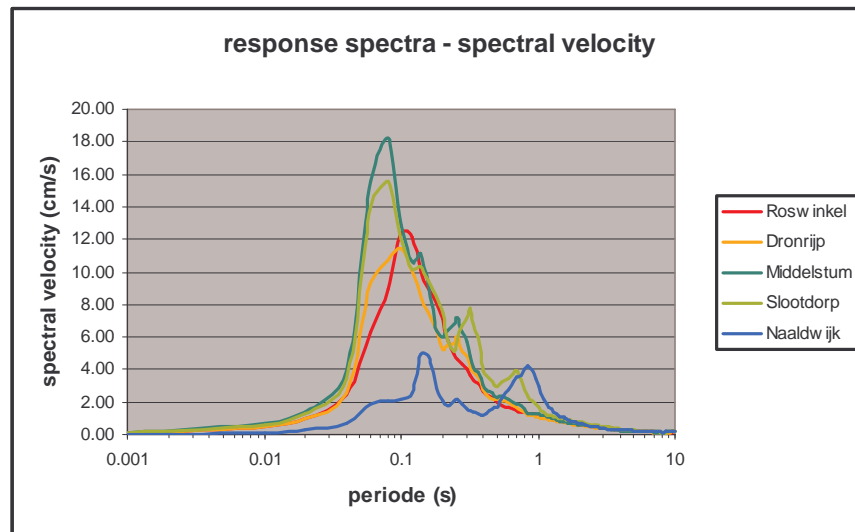
Het signaal ROS1 heeft een piekversnelling van ca. 0,3g. Bij deze versnelling wordt niet-lineair grondgedrag verwacht. Om het effect van het niet-lineaire grondgedrag op de *site response* en de amplificatiefactoren te kunnen onderzoeken is het signaal ROS1 verschaald naar een signaal met een piekversnelling van 0,1g. Hiervoor is een vereenvoudigde verschalingsmethode gebruikt (een verscaling van de amplitudes met een constante factor, waarbij geen filtering is toegepast); deze vereenvoudigde verschalingsmethode wordt voor dit signaal en deze toepassing voldoende nauwkeurig geacht (pers. comm. KNMI, Van Eck, 2003).

6.3 Resultaten ProShake berekeningen

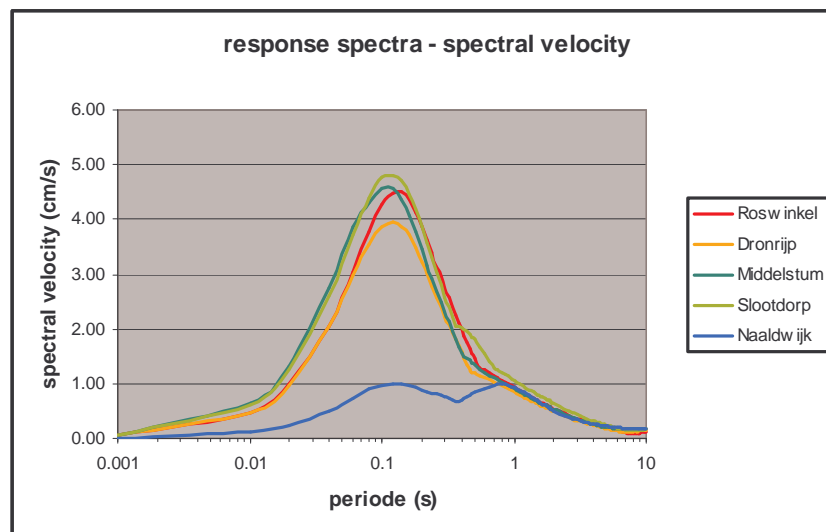
Signaal Roswinkel 0,3g

Met het signaal Roswinkel is in ProShake de respons van de afzettingen op de overige lokaties berekend. Het signaal Roswinkel heeft een piekversnelling van ca. 0,3g; de amplificatie die met behulp van ProShake berekend wordt dient te worden vergeleken met de amplificatiefactoren uit tabel 7.

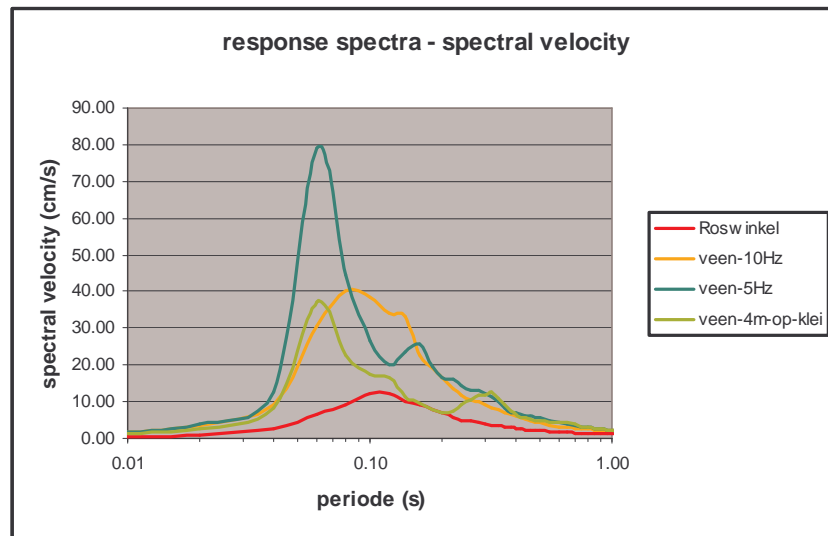
Onderstaande figuren 7a en 7b geven de spectrale snelheid van de lokaties Roswinkel, Dronrijp, Middelstum, Slootdorp en Naaldwijk weer bij 5, resp. 50% demping. De figuren 7c en 7d geven de spectrale respons van de slappe veenlagen aan maaiveld weer bij 5, resp. 50% demping van het massa-veersysteem.



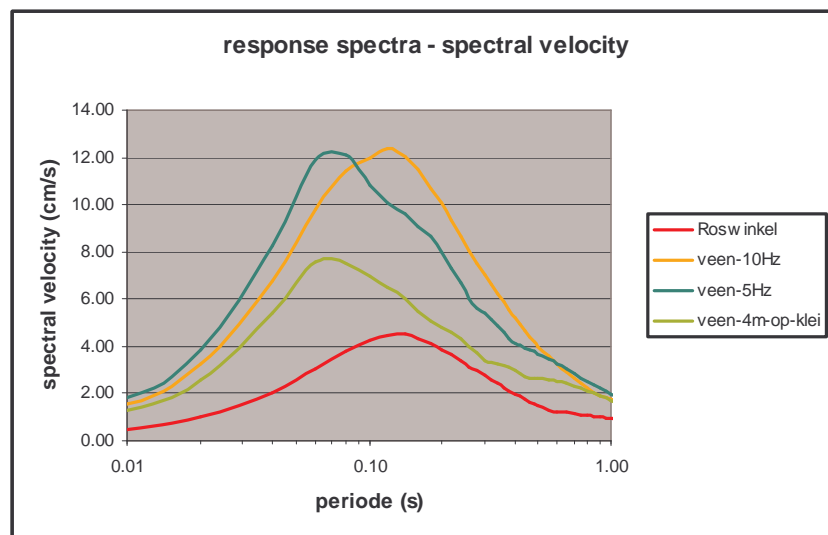
Figuur 7a. Respons spectra (spectrale snelheid in cm/s) voor de lokaties Roswinkel, Dronrijp, Middelstum, Slootdorp en Naaldwijk. De respons spectra geven de spectrale snelheid bij 5% demping. Inputsignaal ROS1 – 0,3g.



Figuur 7b. Respons spectra (spectrale snelheid in cm/s) voor de lokaties Roswinkel, Dronrijp, Middelstum, Slootdorp en Naaldwijk. De respons spectra geven de spectrale snelheid bij 50% demping. Inputsignaal ROS1 – 0,3g.



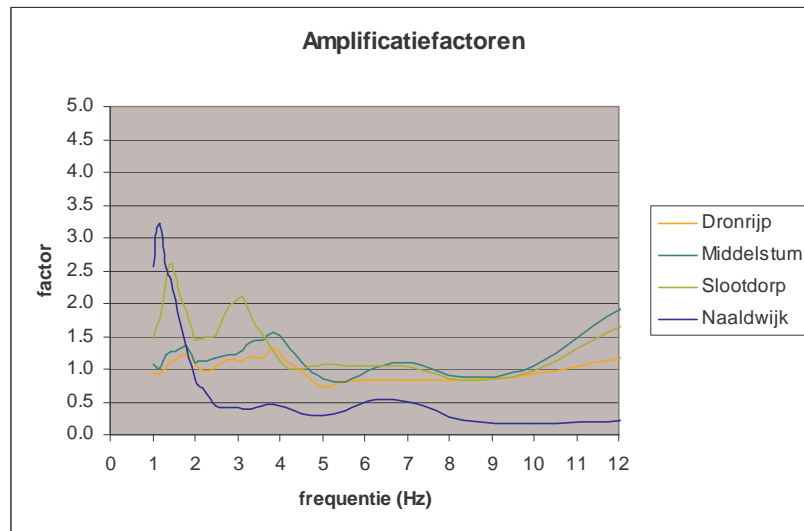
Figuur 7c. Respons spectra (spectrale snelheid in cm/s) voor de lokatie Roswinkel en 3 fictieve veenprofielen. De respons spectra geven de spectrale snelheid bij 5% demping weer. Inputsignaal ROS1 – 0,3g.



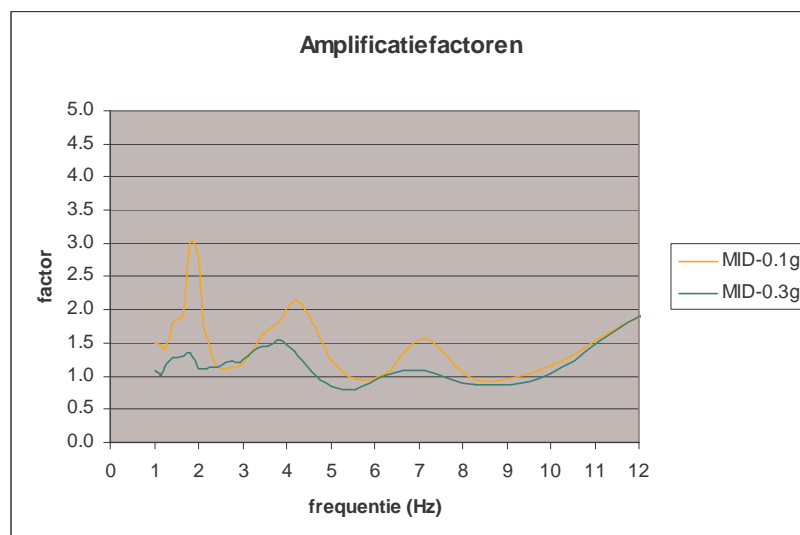
Figuur 7d. Respons spectra (spectrale snelheid in cm/s) voor de lokatie Roswinkel en 3 fictieve veenprofielen. De respons spectra geven de spectrale snelheid bij 50% demping weer. Inputsignaal ROS1 – 0,3g.

Niet-lineair grondgedrag: amplificaties bij signaal Roswinkel 0,1g en 0,3g

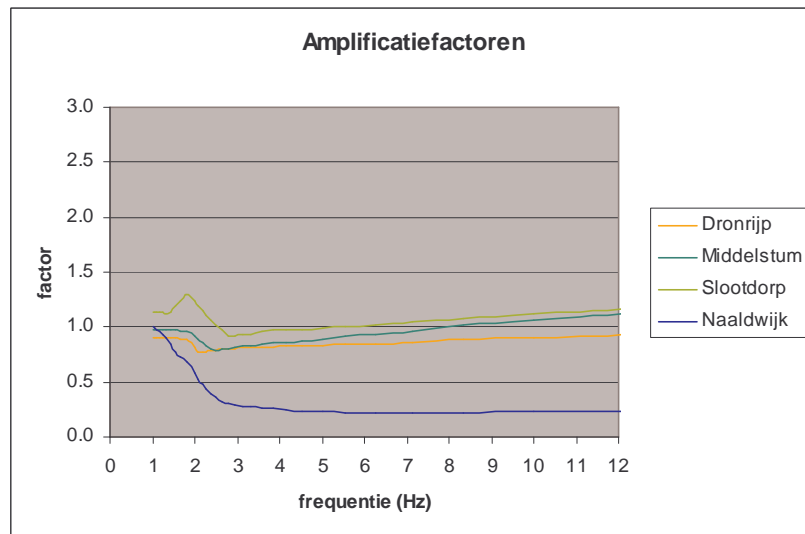
Onderstaande figuren 7e en 7g geven de amplificatiefactoren van de lokaties Dronrijp, Middelstum, Slootdorp en Naaldwijk (voor 5% en 50% demping van het massa-veer systeem). Om het effect van het niet-lineaire grondgedrag op de amplificatie te onderzoeken is de respons van het ondergrondprofiel Middelstum nogmaals doorgerekend bij een piekversnelling van 0,1g (figuur 7f – 5% demping van het massa-veersysteem).



Figuur 7e. Amplificatiefactoren ten opzichte van Roswinkel voor de lokaties Dronrijp, Middelstum, Slootdorp en Naaldwijk. De factoren geven de amplificatie bij signaal ROS1 – 0,3g. Amplificatie voor 5% demping.

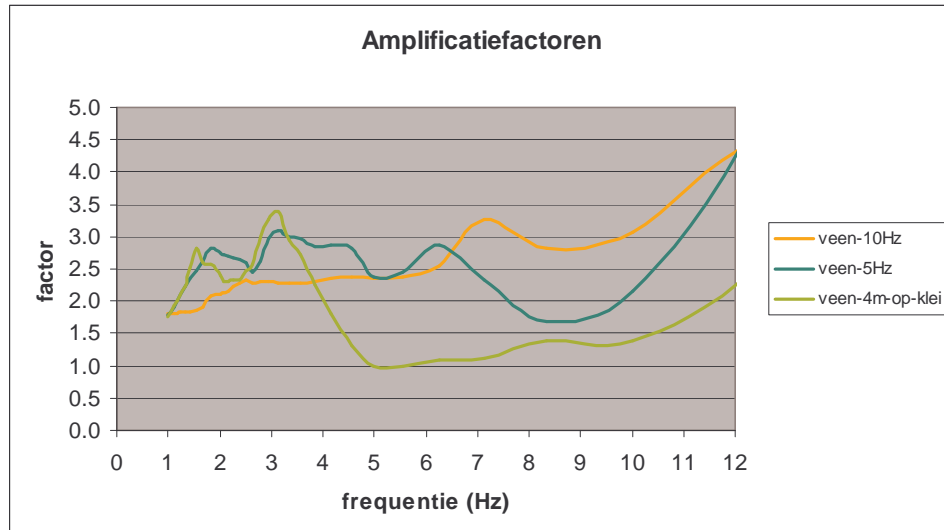


Figuur 7f. Amplificatiefactoren ten opzichte van Roswinkel voor de lokatie Middelstum bij signaal ROS1 – 0,1g en 0,3g. Voor 5% demping van het massa-veer systeem.

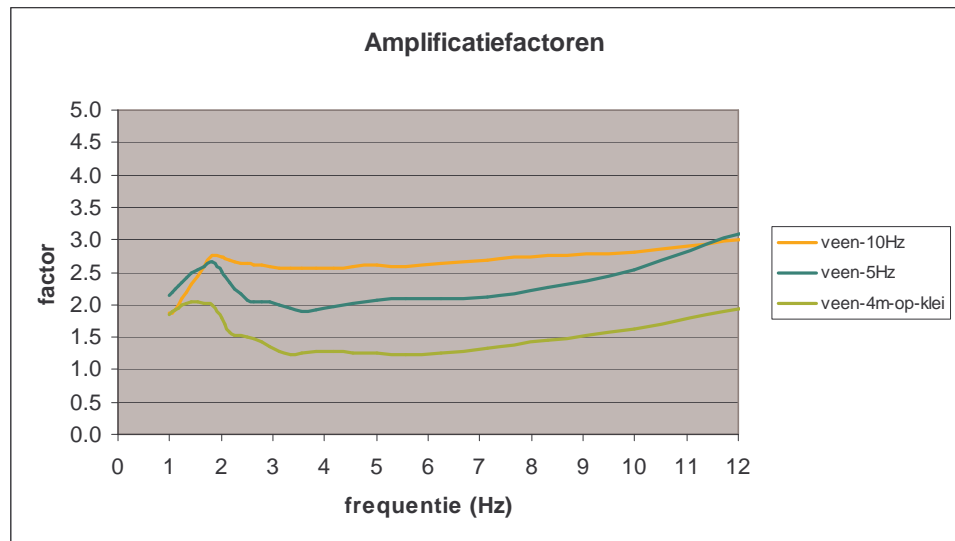


Figuur 7g. Amplificaties op de lokaties Dronrijp, Middelstum, Slootdorp en Naaldwijk bij 0,3g input signaal Roswinkel. Voor 50% demping van het massa-veer systeem.

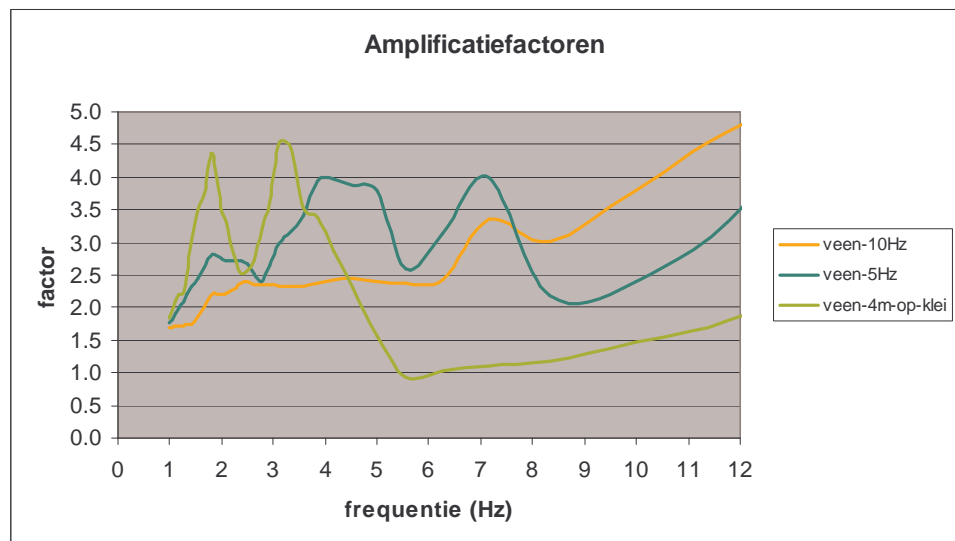
Onderstaande figuren 7h tot en met 7k geven de factoren voor de verschillende veenprofielen (voor 5% en 50% demping van het massa-veer systeem). Om het effect van het niet-lineaire grondgedrag op de amplificatie te onderzoeken is de respons van de verschillende profielen ook doorgerekend bij een piekversnelling van 0,1g.



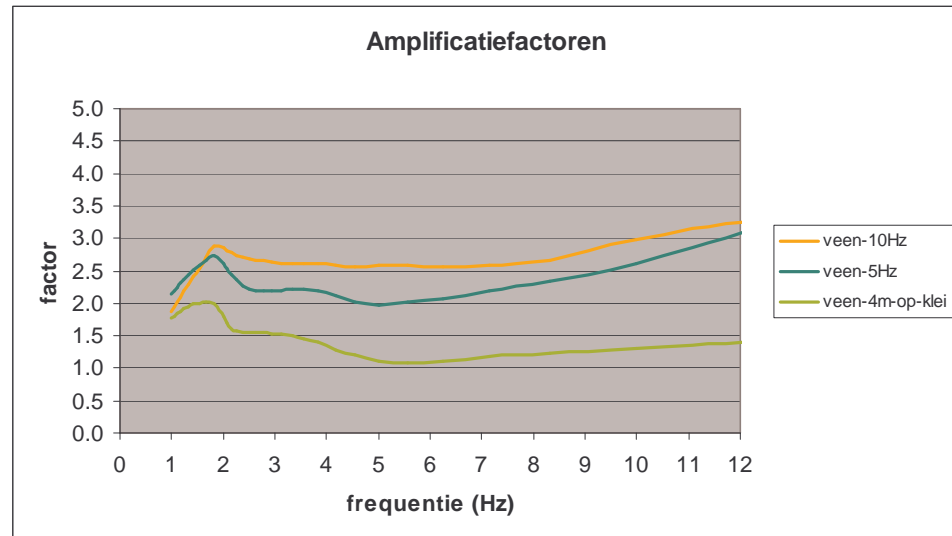
Figuur 7h. Amplificatiefactoren ten opzichte van Roswinkel voor veenprofielen. De factoren geven de amplificatie bij signaal ROS1 – 0,3g, berekend voor 5% demping.



Figuur 7i. Amplificatiefactoren ten opzichte van Roswinkel voor veenprofielen. De factoren geven de amplificatie bij signaal $ROS1 = 0,3g$, berekend voor 50% demping.



Figuur 7j. Amplificatiefactoren ten opzichte van Roswinkel voor veenprofielen. De factoren geven de amplificatie bij signaal $ROS1 = 0,1g$, berekend voor 5% demping.



Figuur 7k. Amplificatiefactoren ten opzichte van Roswinkel voor veenprofielen. De factoren geven de amplificatie bij signaal ROSI – 0,1g, berekend voor 50% demping

6.4 Vergelijking ProShake factoren met amplificatiefactoren van Borcherdts

Amplificaties bij piekversnelling 0,3g

Dronrijp, Middelstum, Slootdorp en Naaldwijk

De respons spectra in figuur 7a en 7b, berekend voor 5% en 50% demping, voor de locaties Roswinkel, Dronrijp, Middelstum, Slootdorp en Naaldwijk tonen de spectrale respons van het massa-veer systeem bij periodes tussen 0,1s en 1s (1Hz-10Hz). Zowel Middelstum als Slootdorp tonen in figuur 7a bij 5% demping van het massa-veer systeem een significante amplificatie ten opzichte van Roswinkel. Hierbij is met name de amplificatie en de snelheid op de lagere frequenties (<10Hz, >0,1s) belangrijk; dit zijn de frequenties waar de gebouwen sterk gevoelig voor zijn.

Figuur 7e toont de amplificatiefactoren voor de verschillende frequenties bij 5% demping van het massa-veersysteem. Uit de figuur blijkt dat in de ‘short-period range’ van 0,1s – 0,5s in de bodem van Middelstum en Slootdorp een gemiddelde amplificatie optreedt van een factor 1,2, resp. 1,4. Hierbij treedt met name veel amplificatie op voor de lagere frequenties (2Hz-5Hz). De amplificatie tussen 5 en 10Hz bedraagt voor beide locaties gemiddeld ca. 1,0. De voorspelde waarde voor de ‘short-period range’ is een factor 1,1. Ook de frequenties hoger dan 10 Hz laten voor Middelstum en Slootdorp een grote amplificatie zien. Er wordt echter getwijfeld aan de betrouwbaarheid van de berekende waarden voor de hogere frequenties: Uit eerder onderzoek (Zuidlaarderveen) is gebleken dat ProShake de amplificaties bij hogere frequenties sterk kan overschatten.

Dronrijp geeft bij de frequenties tussen 2 en 10Hz (‘short-period range’) een gemiddelde amplificatiefactor van 1,0. Ook hier vindt amplificatie met name plaats bij de lagere frequenties (2Hz-5Hz). In het traject van 5-10Hz vindt een lichte demping plaats met een gemiddelde factor van 0,8. Op basis van de factoren van Borcherdts wordt

hier geen amplificatie voorspeld (factor 1). Naaldwijk toont een afwijkend gedrag; hier vindt een zeer sterke amplificatie plaats op de lage frequenties rond 1Hz (factor 3). Bij de hogere frequenties vindt een sterke demping van het signaal plaats. Met de factoren van Borcherdt wordt op basis van de $V_{s,30}$ voor deze lokatie een factor 1,1 voorspeld.

Uit figuur 7f voor de lokatie Middelstum blijkt duidelijk het effect van het niet-lineaire grondgedrag. De amplificaties die berekend worden voor 0,1g zijn beduidend hoger dan de amplificaties berekend voor 0,3g. Het niet-lineaire effect is het duidelijkst waar te nemen op de frequenties rond 2, 4 en 7Hz.

Ook bij 50% van het massa-veer systeem (figuur 7g) treedt amplificatie op in de ondergrondprofielen van Middelstum en Slootdorp ten opzichte van Roswinkel. De amplificaties liggen hier (in tegenstelling tot de amplificaties bij 5% demping van het massa-veersysteem) hoger bij de frequenties van 5-10Hz dan bij de frequenties van 2-5Hz. Rond 10Hz is de amplificatie voor Middelstum en Slootdorp een factor 1,1.

Uit een vergelijking van resultaten van de modellering voor de lokaties Middelstum, Slootdorp en Naaldwijk blijkt dat de respons van de individuele sites, die alle drie op basis van de $V_{s,30}$ kunnen worden ingedeeld in klasse IV, sterk verschilt. De amplificatiefactoren die de respons van een grondklasse karakteriseren dienen beschouwd te worden als een gemiddelde waarde voor de respons in deze klasse.

Slappe holocene lagen

Figuur 7c en 7d tonen de respons van drie ondergrondprofielen met slappe veenlagen aan het maaiveld bij 5% en 50% demping van het massa-veer systeem. De figuren tonen tevens de respons op de lokatie Roswinkel aan maaiveld.

Bij de veenlagen met een eigenfrequentie van 10 Hz treedt een amplificatie op rond de frequentie van 10Hz; hier wordt een amplificatie van een factor 3 (5% demping) en 2,8 (50% demping) berekend voor een versnelling van 0,3g. Op basis van tabel 7 en de gemiddelde schuifgolfsnelheid van dit profiel wordt een amplificatie van een factor 1,1 voorspeld.

Ook in de veenlaag met een eigenfrequentie van 5Hz wordt nog een sterke amplificatie verwacht van circa een factor 2 à 2,5 gevonden bij frequenties rondom 10 Hz (voor 5% en 50% demping). Ook treedt in dit signaal een sterke amplificatie op de lagere frequenties; de spectrale snelheid is bij de lagere frequenties echter lager dan de snelheid rond 10 Hz. De spectrale snelheid bij de hogere frequenties (rond 15Hz) ligt hier wel aanzienlijk hoger. Er wordt echter getwijfeld aan de betrouwbaarheid van de berekende waarden voor de hogere frequenties: Uit eerder onderzoek (Zuidlaarderveen) is gebleken dat ProShake de amplificaties bij hogere frequenties sterk kan overschatten.

De veenlaag (4m veen op klei) uit de klasse 'special study soils' toont met name amplificaties tussen 1 en 4 Hz. De amplificatie rond 10Hz bedraagt circa een factor 1,5 (voor 5% en 50% demping). Ook hier geldt weer dat de resultaten voor de hogere frequenties ($\gg 10$ Hz) als minder betrouwbaar worden beschouwd.

Wanneer de respons van de veenlagen bij 0,1g vergeleken wordt met de respons bij 0,3g blijkt duidelijk het effect van het niet-lineaire grondgedrag. Bij hogere versnellingen worden gemiddeld lagere amplificatiefactoren voorspeld (figuren 7h tot en met 7j). Zo

wordt bijvoorbeeld voor 0,3g een factor 3 voorspeld bij 10Hz tegenover een factor 3,7 bij 0,1g (5% demping).

Uit de vergelijking van de resultaten voor de veenlagen dunner dan 3m (direct op stijve afzettingen gelegen) en de resultaten voor de veenlagen dikker dan 3m ('special study soils') blijkt dat de amplificaties rond 10Hz bij de dunnere veenlagen groter zijn dan bij de dikke veenlagen die oorspronkelijk in de klasse 'special study soils' vallen. Daarom wordt er voor gekozen dunne veenlagen (1-3m) die direct op stijve zandige of stijve pleistocene afzettingen liggen toe te voegen aan de klasse 'special study soils'.

7 Conclusie en samenvatting

Uit literatuuronderzoek blijkt dat de *site response* in sterke mate afhangt van de schuifgolfsnelheid in de bovenste tientallen meters van de ondergrond. Diverse normen, zoals de Eurocode 8 en de Amerikaanse Building Codes, gebruiken een klassificering van de ondergrond op basis van schuifgolfsnelheid om de gemiddelde *site response* te karakteriseren. De klassificering die gebruikt wordt in de Eurocode 8 sluit niet goed aan op de situatie in het onderzoeksgebied. De methode en klassificering die wordt beschreven door Borchardt (1994, 2002) en die ten grondslag ligt aan de Amerikaanse Building Codes is voor het onderzoeksgebied wel goed toepasbaar. Borchardt onderscheidt 6 klassen, waarvan er 3 in het onderzoeksgebied voorkomen, nl. klasse SC-III, SC-IV en de klasse 'special study soils'. Deze klassen worden weergegeven in tabel 3a.

De amplificatiefactoren die door Borchardt voor deze klassen gegeven worden zijn gemiddelde amplificatiefactoren ten opzichte van een referentie ondergrond bestaand uit vaste sedimenten aan maaiveld, d.w.z. een referentie ondergrond die qua snelheden redelijk overeenkomt met een gemiddelde pleistocene ondergrond. De amplificatiefactoren geven daarmee de amplificatie ten opzichte van een lokatie met pleistoceen aan maaiveld.

Tijdens dit eerste deel van het onderzoek is geïnventariseerd welke geologische afzettingen in het onderzoeksgebied binnen de bovenste 50m onder het maaiveld worden aangetroffen. Op basis van deze inventarisatie is een keuze gemaakt van lokaties die geschikt zijn voor het uitvoeren van veldmetingen. Tijdens veldonderzoek is met behulp van oppervlaktegolfmetingen en seismische sonderingen de schuifgolfsnelheid van de verschillende afzettingen bepaald. Deze metingen geven een eerste indicatieve waarde van de schuifgolfsnelheid voor de diverse afzettingen en kunnen gebruikt worden om de *site response* in kaart te brengen.

Met behulp van ProShake berekeningen is onderzocht of de amplificatiefactoren van Borchardt ook toegepast kunnen worden voor dit onderzoek. De ProShake berekeningen voor de lokaties Dronrijp, Middelstum, Sloodorp en Naaldwijk (die elk kunnen worden ingedeeld in klasse III of IV) laten zien dat de amplificatiefactoren wat orde van grootte betreft overeenkomen met de factoren genoemd door Borchardt. Wel blijkt duidelijk dat de respons op alle vier individuele lokaties zeer sterk verschilt. Daarnaast geven deze profielen met name amplificatie bij de lagere frequenties (2-5Hz). Hoewel de factoren verschillen vertonen is er onvoldoende informatie beschikbaar om op grond van dit beperkte aantal ProShake berekeningen andere amplificatiefactoren voor de kartering van de site respons te gebruiken. De *site response* zal daarom met behulp van de factoren van Borchardt in kaart gebracht worden; de *site response* kaart geeft hiermee een zeer gemiddeld beeld van de amplificaties die op de verschillende sites kunnen optreden.

Borchardt (1994, 2002) onderscheidt een extra klasse 'special study soils' die bestaat uit ondiep voorkomende veenlagen >3m, kleilagen met een hoge plasticiteitsindex >8m en zeer dikke slappe kleilagen >37m. De laatste twee komen in het onderzoeksgebied niet of nauwelijks voor (of kunnen op basis van de beschikbare gegevens niet worden uitgekarteerd). Veenlagen met diktes groter dan 3m komen in het gebied wel voor. Uit de ProShake berekeningen blijkt dat bij deze veenlagen sterke amplificaties optreden,

met name op frequenties lager dan 5Hz. De amplificatie rond 10Hz bedraagt hier ongeveer een factor 1,5. Uit de vergelijking van de resultaten voor de veenlagen dunner dan 3m (direct op stijve afzettingen gelegen) en de resultaten voor de veenlagen dikker dan 3m ('special study soils') blijkt dat de amplificaties rond 10Hz bij de dunnere veenlagen groter zijn dan bij de 'special study soils'. Deze veenlagen vallen echter in Borchardt's indeling niet in de klasse 'special study soils'. Er is in deze studie voor gekozen om de dunne veenlagen (1-3m) die direct op stijve zandige of stijve pleistocene afzettingen liggen toe te voegen aan de klasse 'special study soils'.

Borchardt noemt geen amplificatiefactoren voor de klasse 'special study soils', maar raadt voor deze klasse extra lokatiespecifiek onderzoek aan. Met behulp van ProShake zijn voor de drie veenmodellen amplificatiefactoren berekend. De gemiddelde amplificatiefactor voor de 'short period range (0.1-0.5s)' voor deze drie modellen bedraagt een factor 2,0 (voor 50% demping van het massa-veer systeem). Voor deze studie wordt voor deze klasse een gemiddelde amplificatiefactor van 2 gebruikt.

8 Referenties

- [1] Algermissen, S.T., Leyendecker, E.V., Bollinger, G.A., Donovan, N.C., Ebel, J.E., Joyner, W.B., Luft, R.W., Singh, J.P., 1991. Probabilistic ground-motion hazard maps of response spectral ordinates for the United States. In: Proceedings of Fourth International conference on seismic Zonation. Stanford University, August, Vol. II, pp.687-694.
- [2] Algermissen S.T., Leyendecker, E.V., 1992. A technique for uniform hazard spectra estimation in the US. In: Proceedings of the tenth World Conference, Earthquake Engineering, pp. 391-397.
- [3] Borchardt, R.D. , Wentworth, C.M., Janssen, A., Fumal, T., Gibbs, J., 1991. Methodology for Predictive GIS Mapping of Special Study Zones for Strong Ground Shaking in the San Francisco Bay Region, California. In:Proceedings of the Fourth International Conference on Seismic Zonation, Stanford, California, pp. 545-552.
- [4] Borchardt, R. D.,1994-1. Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). In: Earthquake Spectra, Vol. 10, No.4, pp.617-654.
- [5] Borchardt, R.D., 1994-2. Simplified Site Classes and Empirical Amplification factors for site-dependent code provisions. In Proceedings of the NCEER. SEAOC/BSSC workshop on site response during earthquakes and seismic code provisions, University of Southern California, Los Angeles, November 18-20, edited by G.M. Martin.
- [6] Borchardt, R.D., 2002. Empirical evidence for site coefficients in building code provisions. In: Earthquake Spectra, Vol. 18, No. 2, pp. 189-217.
- [7] Building Seismic Safety Council, 1997.1997 Edition - NEHRP Recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings. Federal Emergency Management Agency Washington, D.C. part 1 & part 2.
- [8] Campbell, K.W., Bozorgnia, Y., 2003. Updated near-source ground motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration response spectra. In press: Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, February 2003.
- [9] De Mulder, E.F.J., Geluk, M.C., Ritsema, I., Westerhoff, W.E. en Wong, T.E., (red.), 2003. De ondergrond van Nederland. Geologie van Nederland, deel 7.
- [10] Dobry, R., Borchardt, R.D., Crouse, C.B. Idriss, I.M., Joyner, W.B., Martin, G.R., Power, M.S., Rinn, E.E., Seed, R.B., 2000. New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions. In: Earthquake Spectra, Vol. 16, No.1, February 2000, pp. 41-67.
- [11] Elton, D.J. and Martin II, R.J., 1989. Dynamic Site Periods in Charleston, South Carolina. In: Earthquake Spectra, Vol. 5, No. 4, pp. 703-734.

- [12] Eurocode 8. Ontwerpbepalingen voor de bestandheid van constructies tegen aardbevingen. Deel 1-1: Algemene regels. Aardbevingsbelastingen en algemene eisen aan constructies. NVN-ENV 1998-1-1, maart 1995.
- [13] Finn, W.D., 1991. Geotechnical Engineering Aspects of Microzonation. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Seismic Zonation, Stanford, California, Vol. I, pp. 199-259.
- [14] Hardin, B.O., Drnevich, V.P., 1972-1. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects. In: Journal of the soil mechanics and foundations division. SM6, June 1972.
- [15] Hardin, B.O., Drnevich, V.P., 1972-2. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves. In: Journal of the soil mechanics and foundations division, June 1972, SM 7, pp667-693.
- [16] Hosser, D., 1986. Realistic seismic load assumptions for German Sites. In: Vogel and Brandes (Eds): Earthquake prognostics. Proceedings 2nd International seminar, Berlin, 1986.
- [17] Hosser, D., 1972. Realistische seismische Lastannahmen für Bauwerke. In: Bauingenieur 62, pp. 567-574.
- [18] Idriss, I.M., 1990. Response of soft soil sites during earthquakes. In: H. Bolton Seed Memorial Symposium Proceedings, Vol. 2, May, pp. 273-289.
- [19] Leyendecker, E.V., Algermissen, S.T et al, 1994. Use of spectral response maps and uniform hazard response spectra in building codes. Proceedings of the fifth US National conference on earthquake engineering, July 1994, Chicago Illinois, Vol. IV, pp.379-387.
- [20] Noack, Th., Fah, D. Earthquake microzonation: Site effects and local geology. A case study for the kanton of Basel-Stadt. Document beschikbaar op: <http://www.ndk.ethz.ch/downloads/publ/Noack.pdf>
- [21] ProShake Ground Response Analysis Program. Version 1.1. User's Manual. EduPro Civil Systems, Inc. Sammamish, Washington.
- [22] Rodriguez-Marek, A., Bray, J., Abrahamson, N.A., 2001. An empirical geotechnical seismic site response procedure. In: Earthquake Spectra, Vol. 17, No.1, February 2001, pp.65-87.
- [23] Schnabel, P.B., Lysmer, J., Seed, H.B., 1972. Shake: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, College of Engineering University of California, Berkeley, report No. EERC 72-12.
- [24] Seed, R.B., Cetin, K.O., et al., 2001. Recent advances in soil liquefaction engineering and seismic response evaluation. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Recent advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor W.D. Liam Finn, San Diego, March 26-32, 2001.

[25] Van Staalduinen P.C., Geurts, C.P.W. 1998. De relatie tussen schade aan gebouwen en lichte, ondiepe aardbevingen in Nederland: Inventarisatie. TNO-rapport 97-CON-R1523-1.

[26] Uniform Building Code 1997.

[27] Waarts, P.P.H., Ostendorf, C.H., 2002. SBR-deel A: Trilling: meet- en beoordelingsrichtlijnen, deel A - Schade aan gebouwen. Rotterdam, Stichting Bouwresearch, 2002.

A **Overzicht klassen *site response* op basis van literatuur**

Artikel Document	Klassen gebaseerd op:	Seismische zonering op basis van:	Respons spectra	Amplificatie	'Special study soils':	Klassen:
Eurocode 8 (1998)	Lithologie , indicatie V_s dikte	Effectieve ontwerp versnelling	Respons spectra verankerd aan effectieve piek versnelling. 3 genormaliseerde elastische respons spectra voor grondklasse A,B,C.	Amplificatie alleen t.o.v. gesteente, klasse A. Vaste amplificatiefactor [1.4] voor 5-20m alluvium op klasse A. Amplificatie door een grotere 'soil parameter' S [1.4]. Amplificatie onafhankelijk van intensiteit en frequentie.	Tenminste 10m klasse C, slappe klei/silt met $PI > 40\%$ en hoog watergehalte	<p>Klasse A: Gesteente, $V_s > 800$ m/s, (< 5m slap materiaal) of: Vastgepakt zand, grind of overgeconsolideerde klei, tientallen meters dik, $V_s > 400$ m/s op 10m diepte</p> <p>Klasse B: Diepe afzettingen van matig dicht zand, gravel en matig stijve klei, $V_s > 200$ m/s op 10m, 350 m/s op 50m</p> <p>Klasse C: Losse cohesieloze grond, of slappe tot matig stijve cohesieve grond, $V_s < 200$ m/s in de bovenste 20m</p>
Borcherdt (1994, 2002) Dobry (2000) NEHRP (1997) UBC(1997)	$V_{s,30}$ Lithologie Dikte	'Input ground-motion spectral levels', I_a en I_v voor de 'short- and midperiod bands'	'Site'afhankelijke respons spectra afgeleid uit I_a , I_v , en amplificatiefactoren F_a en F_v	Amplificatiefactoren voor 'shortperiod' en 'midperiod' band (F_a en F_v). Amplificatiefactoren afh. van intensiteit (niet-linear gedrag!). Amplificatie als functie van V_s referentie grond/gesteente, afh. van impedantieratio.	Liquefactiegevoelige grond, 'quick' en 'highly sensitive clays' veen sterk organische klei kleien met een hoge plasticiteitsindex ($PI > 75\%$) Dikte > 3m ook slappe gronds > 37m.	<p>SC-Ia: 'hard rock' $V_s > 1400$ m/s (NEHRP: >1500 m/s – A)</p> <p>SC-Ib: 'firm to hard rock' 700 m/s < V_s < 1400 m/s (NEHRP: 760-1500 m/s: B)</p> <p>SC-II: 'gravelly soils and soft to firm rock's: 375 m/s < V_s < 700 m/s (dikte > 10m) (NEHRP: 360-760 m/s: C)</p> <p>SC-III: 'stiff clays and sandy soils': 200 m/s < V_s < 375 m/s (dikte > 5m) (NEHRP: 180 – 360 m/s: D)</p> <p>SC-IVa: 'non special study soft soils' 100 m/s < V_s , 200 m/s (dikte > 3m) (NEHRP: <180 m/s , E)</p> <p>SC-IVb: zie 'special study soils' (NEHRP: F – idem Borcherdt, alleen ondergrens 8m voor 'very high plasticity clays' en ondergrens 36 m soft clays))</p>
Noack, Fah	Consolidatie Lithologie Dikte	Intensiteit	Geen respons spectra	Amplificatie in termen van +/- 1 op de intensiteitsschaal – kwalitatieve klassifikatie	Niet genoemd	Op basis van gevoeligheid voor amplificatieworden eenheden toegekend (0-22 eenheden) Een hoge eenheid betekent een hogere gevoeligheid

<i>Artikel Document</i>	Klassen gebaseerd op:	Seismische zonering op basis van:	Respons spectra	Amplificatie	'Special study soils':	Klassen:
	Variatie Liquefactie-potentieel					kwalitatieve methode
Elton, Martin (1989)	V_s Dikte	Dynamische site period	Respons spectra als voorbeeld, maar niet gekoppeld aan site geologie	Geen amplificatiefactoren; amplificatie treedt op als de frequentieinhoud v/d beving gelijk is aan de 'site period'	Niet genoemd	Zonering op basis van dynamische 'site period'
Hosser, (1986, 1987)	Lithologie V_s Dichtheid Poisson's ratio Dikte	Intensiteit	Respons spectra per grondklasse en intensiteitsklasse (3*3 response spectra);	Correctie van +/- 1 intensiteitsklasse op basis van site geologie	Niet genoemd	Klasse A: (holoceen) 'soft soils, sand and clay', $V_s < 400$ m/s Klasse M: 'medium dense sediments' $400 < V_s < 1100$ m/s Klasse R: 'sedimentary rock' $1100 < V_s < 2800$ m/s
Rodriguez-Marek (2001)	Lithologie Diepte tot bedrock dikte Holoceen /Pleistoceen Cohesief /niet-cohesief (V_s)	Niet gespecificeerd	Voorbeelden van respons spectra voor klasse B t/m D	Amplificatie factoren voor 'baseline rock' klasse B; factoren als a functie van spectrale periode en intensiteit Amplificatie factoren alleen voor C and D sites	Klasse F: Liquefactie gevoelige grond Veen	A 'Hard rock' B 'Rock' C-1 'weathered/soft rock (weathered zone > 6m en <30m)' C-2 'shallow stiff soil' (diepte > 6m en <30m) C-3 'intermediate depth stiff soil' (diepte >30m en <60m) D-1 'Deep stiff holocene soil, sand or clay' (diepte >60m en <200m) D-2 'Deep stiff pleistocene soils, sand or clay' (diepte >60m en <200m) D-3 'Very deep stiff soil' (diepte >200m) E-1 'Medium depth soft clay' (dikte 3-12m) E-2 'Deep soft clay layer' (dikte >12m)

<i>Artikel Document</i>	Klassen gebaseerd op:	Seismische zonering op basis van:	Respons spectra	Amplificatie	'Special study soils':	Klassen:
						F 'Special soils'

Tabel A1. In literatuur beschreven methoden voor seismische zonering en karakterisatie van de site response voor verschillende typen ondergrond.

B Beschrijving geologische formaties

De geologische beschrijving volgt de nieuwe lithostratigrafische indeling van Nederland die in 2003 door TNO-NITG is gepubliceerd. Voor meer specifieke informatie hierover wordt verwezen naar De Mulder et al. (red, 2003)). Gezien het doel van het onderzoek worden alleen formaties beschreven die in de omgeving van één of meerdere aardgasvelden in de bovenste 50 m van de ondergrond worden aangetroffen.

Het doel van een lithostratigrafische indeling is de ordening van sedimentpakketten in de ondergrond op grond van hun macroscopisch waarneembare lithologische eigenschappen en stratigrafische positie. Onder stratigrafische positie wordt de ruimtelijke positie verstaan die een sedimentpakket ten opzichte van andere sedimentpakketten inneemt. Een lithostratigrafische indeling is hiërarchisch van opzet. Van “groot” naar “klein” worden formaties, laagpakketten en lagen onderscheiden. Een formatie bestaat uit afzettingen met aan elkaar verwante karakteristieke lithologische eigenschappen. Zij zijn het gevolg van een samenhang in ontstaanswijze en herkomst. Een formatie is vaak lithologisch heterogeen en duidelijk van de begrenzendende formaties te onderscheiden. De boven- en ondergrens van een formatie worden veelal gekenmerkt door een erosievlak of een hiaat in sedimentatie. De dikte ervan varieert van minder dan 1 tot meer dan honderd meter. Laagpakketten en lagen zijn lithologisch homogener dan formaties. Ook zijn ze minder dik. Met name lagen komen alleen in geringe diktes voor.

Geologische beschrijving formaties

Formatie van Breda

Algemene lithologie:

De Formatie van Breda bestaat uit een complexe opeenvolging van ondiep mariene en in de kustzone gevormde afzettingen, afgezet tijdens het Mioceen (figuur B1). De aanwezigheid van glauconiet is, met uitzondering van de afzettingen gevormd in de kustzone, zeer kenmerkend voor de formatie. Over het algemeen bestaan de afzettingen van de formatie uit:

Zand: zeer fijn tot matig fijn (105 - 210 µm), siltig, grijsgroen tot zwartgroen, glauconiet- en kalkhoudend.

Klei: sterk zandig tot matig siltig.

Pakking:

De formatie bestaat voornamelijk uit sterk geconsolideerde zanden en kleien als gevolg van hun diepteligging, ontstaanswijzen ouderdom.

Formatie van Waalre

Algemene lithologie:

Het sediment kan in korrelgrootte variëren van grind, zeer grof zand tot klei, zwak siltig. De lithologische spreiding is als volgt samen te vatten:

Klei: sterk zandig tot zwak siltig, over het algemeen kalkloos, stevig, horizontaal gelaagd (soms met dunne laagjes uiterst fijn tot matig fijn (63 – 210 µm) zand), blauwgrijs en bruin-grijs. In de klei kunnen dunne veenlagen voorkomen.

Zand: uiterst fijn tot uiterst grof (63 – 2000 µm), kalkloos tot kalkrijk, sporadisch schelphoudend, weinig tot matig glimmerhoudend, spoor tot weinig donkere korrels, grijs tot witgrijs, soms bruingrijs, in de grovere fractie met (rood)bonte componenten.
Ondergeschikte lithologie:

Grind: Grind, zeer grof (16 - 63 mm), siltig tot uiterst zandig, witgrijs tot grijs, relatief hoog kwartsgehalte.

De formatie bestaat uit fluviatiele afzettingen van (een voorloper van) de Rijn, afgezet tijdens het Laat-Pliocene (Reuverien) en Onder-Pleistoceen (Praetiglien tot en met Menapien, zie Figuur B1).

Pakking:

De kleien en zanden zijn over het algemeen goed gepakt als gevolg van diepteligging en ouderdom.

Formatie van Stramproy

Algemene lithologie:

Zand: uiterst fijn tot zeer grof (63 – 420 µm), lichtgrijs, lichtbruin of grijswit, gebleekt, kalkloos tot kalkrijk.

Leem: grijs en bruingrijs.

De afzettingen van de Formatie van Stramproy worden gerekend tot de lokale afzettingen. De afzettingen zijn ten dele eolisch gevormd onder periglaciaire condities. Verder komen kleinschalige fluviatiele afzettingen voor (bestaand uit omgewerkte tertiaire afzettingen uit België), hellingafzettingen en afzettingen gevormd door sneeuwmeltwater. Het sediment is afgezet tijdens het Tiglien tot en met het begin van het Cromerien (zie Figuur B1).

Pakking:

Zanden en kleien van de Formatie van Stramproy zijn zeer goed gepakt.

Formatie van Sterksel

Algemene lithologie:

Zand: matig grof tot uiterst grof (210 - 2000 µm, zwak tot sterk grindig, kalkloos tot kalkrijk, grijsbruin, roodbonte (rossige) componenten, matig tot sterk glimmerhoudend.

Grind: grijsbruin, roodbonte (rossige) componenten.

Klei: zwak tot uiterst siltig, blauwgrijs tot grijs, kalkloos tot kalkrijk, regelmatig met zeer dunne tot dunne (mm-cm) zandlaagjes.

De grove zanden en grinden zijn fluviatiele afzettingen van (een voorloper van) de Rijn en de Maas. De kleien, die een sterk gelaagd karakter vertonen (mm-cm) zijn gevormd in de restgeul van de rivieren. Het sediment is afgezet tijdens de overgang van het Onder-Pleistoceen naar het Midden-Pleistoceen (zie Figuur B1).

Formatie van Urk

Algemene lithologie:

Zand: matig fijn tot uiterst grof (150 – 2000 µm), grijs, na oxidatie geel tot bruin, bont (met roze korrels), zwak tot sterk grindig, kalkloos tot kalkrijk, fijne planten- en houtresten, weinig glimmer.

Grind: fijn tot zeer grof (2 – 63 mm), met een relatief hoog gangkwartsgehalte.

Ondergeschikte lithologie:

Klei: glimmerhoudend, plaatselijk met houtresten, humeus.

Laagpakket van Tijnje; Zand, matig grof tot zeer grof (210-420 μm), bont, zwak en matig grindig, kalkloos, spoor glimmers en lokaal dikke kleilagen. De eenheid wordt alleen onderscheiden in het gebied waar de Formatie van Peelo onder het laagpakket aanwezig is. Het voorkomen ervan is dan ook beperkt tot Noord-Nederland.

De afzettingen van de Formatie van Urk zijn fluviatiele afzettingen van de Rijn, stroomafwaarts in Noord-Nederland waarschijnlijk ook afzettingen uit een zoet getijden en estuarien milieu (deel van de kleiige inschakelingen). De afzettingen stammen uit het laatste deel van het Cromerien tot en met het Midden-Saalien (zie Figuur B1).

Pakking:

Kleien en zanden van de Formatie van Urk zijn als gevolg van hun diepteligging en de eventuele latere bedekking met landijs goed gepakt.

Formatie van Peelo

Algemene lithologie:

Zand: uiterst fijn tot uiterst grof (63-2000 μm), kalkloos tot kalkarm, geelgrijs, licht- tot donkergrijs en bruingrijs.

Klei: zwak tot matig siltig of zandig, (zeer) stevig, soms hard, veelal kalkrijk, licht- tot donkergrijs, bruinzwart tot zwart.

Opvallend in deze formatie is het voorkomen van diep in de ondergrond ingesneden geulen. Deze worden veelal geïnterpreteerd als door smeltwater gevormde sub-glaciale dalen gedurende de Elsterien glaciatie. De kleien in deze geulen worden ook wel potklei genoemd en worden gerekend tot het Laagpakket van Nieuwolda. De Formatie van Peelo bestaat uit glaciale afzettingen uit het Elsterien (zie Figuur B1).

Pakking:

De klei van de Formatie van Peelo is zeer stevig. Ook de zanden van de Peelo Formatie zijn vastgepakt.

Formatie van Drente

Algemene lithologie:

Zand: matig grof tot uiterst grof (210-2000 μm), zwak tot sterk grindhoudend.

Klei en leem: sterk zandig tot uiterst siltig, zwak tot sterk grindhoudend, grijsblauw tot bruingrijs.

Laagpakket van Gieten ("keileem"; grondmorene). Klei en leem, sterk zandig tot uiterst siltig, zwak tot sterk grindhoudend, grijsblauw tot bruingrijs met stenen, keien en blokken. In de grindfractie is veelal een glaciale (noordelijke) component aanwezig. *Laagpakket van Schaarsbergen*. Zand, matig fijn tot uiterst grof (150 – 2000 μm), zwak tot sterk grindhoudend, lichtgrijs, grijswit, geelbruin tot lichtgrijsgroen, kalkloos tot kalkhoudend. In het grind is een noordelijke component (o.a. vuursteen, graniet en overig kristallijn) aanwezig.

De Formatie van Drente bestaat uit sedimenten die zijn gevormd door of nabij het Saale landijs en zijn daarmee glaciële afzettingen (zie Figuur B1).

Pakking:

Het Laagpakket van Gieten is een goed gepakte eenheid als gevolg van voorbelasting door het ijs. Ook het laagpakket van Schaarsbergen kan door het ijs overreden zijn wat resulteert in goed gepakte zanden.

Formatie van Kreftenheye

Algemene lithologie:

Zand: matig grof tot uiterst grof (210 – 2000 µm), geelgrijs tot grijsbruin, kalkloos tot kalkrijk, bont, matig tot sterk grindhoudend.

Grind: matig tot zeer grof (5,6 – 63 mm), sterk zandig.

Ondergeschikte lithologie:

Klei: zwak siltig tot zandig, grijs, bruin of zwart, kalkloos tot kalkhoudend.

Veen: dun gelaagd, kleiig, bruin, kalkloos.

Het *Laagpakket van Zutphen* bestaat uit veen, klei en zand afgezet in het komgebied van de Rijn. Het laagpakket bestaat uit klei, zwak siltig tot zandig, grijs; veen, bruin tot zwart, en zand, matig fijn, grijs tot bruin, kalkhoudend tot kalkloos.

De afzettingen van de Formatie van Kreftenheye zijn gevormd door de Rijn vanaf het Laat-Saalien tot het Vroeg Holoceen (zie Figuur B1). De afzettingen van het Laagpakket van Zutphen zijn gevormd door een meanderende Rijn gedurende het Eemien. Een deel van de zandige top van de jongste afzettingen van de Formatie van Kreftenheye is gevormd door meanderende rivieren gedurende het Laat Weichselien en het Vroeg Holoceen.

Pakking:

Het zand uit de Formatie van Kreftenheye is goed gepakt. Afzettingen van het Laagpakket van Zutphen zijn slapper.

Eem Formatie

Algemene lithologie:

Zand: grijs, matig fijn tot zeer grof zand (150 – 420 µm), meestal kalkhoudend, met mariene schelpen, plaatselijk met schelpenlagen.

Klei: donkergrijs, meestal kalkhoudend, met mariene schelpen, plaatselijk met schelpenlagen.

De Eem Formatie bestaat uit mariene sedimenten afgezet tijdens het Eemien (zie Figuur B1).

Pakking:

De zanden en kleien uit de Eem Formatie zijn overwegend redelijk gepakt.

Formatie van Boxtel

Algemene lithologie

Zand: zeer fijn tot matig grof (105 – 300 µm), zwak tot sterk siltig, lichtgeel tot donkerbruin, kalkloos tot sterk kalkhoudend.

Leem: zwak tot sterk zandig, grijsbruin tot donkergrijs, kalkloos tot sterk kalkhoudend.
Ondergeschikte lithologie:
veen- en detrituslagen

Laagpakket van Drachten: zand, matig fijn tot matig grof, lichtgrijs tot geelgrijs, zwak siltig, kalkloos. Het betreft overwegend eolische afzettingen, gevormd onder periglaciaire omstandigheden. De afzettingen worden alleen in Noord-Nederland onderscheiden.

De Formatie van Boxtel betreft lokale afzettingen die grotendeels onder koude, periglaciaire omstandigheden zijn afgezet tijdens het Cromerien tot en met het Holoceen. Ten noorden van de maximale ijsuitbreiding is het grootste deel van het sediment van Weichselien-ouderdom (zie Figuur B1).

Pakking:

Leem uit de Formatie van Boxtel (voornamelijk voorkomend in de Roerdalslenk) is minder goed gepakt. Zand van het Laagpakket van Drachten is zeer goed gepakt.

Formatie van Nieuwkoop

Algemene lithologie:

Ondiep veen en gecompacteerd veen: veen, mineraalarm tot kleilig, kalkloos, bruin tot zwart. Veen op grotere diepte is gecompacteerd door het gewicht van het bovenliggende sediment.

Het veen is ontstaan als gevolg van de stijging van het grondwater gedurende het Holoceen, zie Figuur B1. In de kustvlakte is de stijging van het grondwater gerelateerd aan de stijgende zeespiegel. In de riviervlakte waren de Rijn en de Maas gedwongen hun verhang aan de zeespiegelstijging aan te passen waardoor het grondwater steeg en in kommen en op de vlakke waterscheidingen veengroei kon plaatsvinden.

Pakking:

Het veen dat direct aan maaiveld ligt is slap. Veen op grotere diepte is als gevolg van belasting van bovenliggend sediment gecompacteerd en dus minder slap.

Formatie van Naaldwijk

Algemene lithologie:

De Formatie van Naaldwijk wordt gekenmerkt door een sterke variatie in lithologische samenstelling, die varieert van zand, zeer fijn tot zeer grof (105 - 420 μm) tot klei, zwak siltig.

Kleien: Holocene kleien met een groot verbreidingsgebied en een dikte tot enkele meters. Deze kleien dekken meestal andere afzettingen van de Formatie van Naaldwijk af.

Laag van Bergen: kleiige invulling van het Zeegat van Bergen. Deze laag vormt een belangrijke marker binnen de lithostratigrafie maar komt alleen rond Alkmaar voor.

Duinzanden: Laagpakket van Schoorl. Dit laagpakket bestaat uit zand, zeer fijn tot matig fijn (105 – 210 μm), grijs tot wit of lichtgeel, kalkrijk tot kalkloos. *Strandzanden*: Laagpakket van Zandvoort. Dit laagpakket bestaat uit zand, matig grof tot zeer grof (210 – 420 μm), grijs tot bruingrijs, kalkrijk, schelphoudend.

Geulzanden: Bestaan uit zand, zeer fijn tot matig fijn (105 – 210 µm), kleiig of uiterst tot zwak siltig, grijs, kalkrijk en schelphoudend en klei, matig tot uiterst siltig of zandig, grijs, schelphoudend, kalkhoudend tot kalkloos, ten dele zwak tot sterk humeus. Onder in geulafzettingen komen soms schelpenlagen ('channel lags') voor.

De Formatie van Naaldwijk omvat klastische, mariene en lagunaire afzettingen alsmede strandafzettingen en kustduinen, die zijn gevormd onder invloed van de stijgende zeespiegel na het laatste glaciaal in het Holoceen (zie Figuur B1).

Pakking:

De kleien van de Formatie van Naaldwijk zijn slap tot zeer slap. Duin- en strandzanden zijn als gevolg van hun ontstaanswijze beter gepakt dan het zand van de geulafzettingen. De kleien van de Laag van Bergen zijn door de diepteligging iets stijver.

Formatie van Echteld

Algemene lithologie:

Kenmerkend voor de formatie is de grote interne lithologische heterogeniteit. Binnen de eenheid kunnen een aantal lithogenetische eenheden worden onderscheiden, die lithologisch vrij homogeen zijn. Gedurende dit onderzoek blijft het onderscheid beperkt tot het signaleren van het voorkomen dan wel afwezig zijn van geulzanden.

Geulzanden: zand, uiterst fijn tot uiterst grof (63 – 2000 µm), soms grindhoudend, kalkhoudend tot kalkloos, grijs tot bruin. Soms komt hierin ook klei, zandig of uiterst tot sterk siltig, kalkhoudend tot kalkloos voor. Zoetwaterschelpen worden regelmatig aangetroffen.

Ondergeschikte lithologie:

Klei: zandig tot zwak siltig, kalkloos tot kalkhoudend, sporadisch schelphoudend, massief tot horizontaal gelaagd (soms met zandlaagjes), soms humeus, grijs tot bruin.

De formatie bestaat grotendeels uit Holocene afzettingen (zie Figuur B1) van meanderende voorlopers van Rijn en Maas. Het fluviatiele milieu kent een kenmerkende afwisseling van lithogenetische eenheden waardoor een sedimentpakket is ontstaan waarin kleiige en zandige afzettingen op korte afstand van elkaar voorkomen.

Pakking:

De kleien van de Formatie van Echteld zijn slap tot zeer slap.

Glaciale beïnvloeding van de regio's

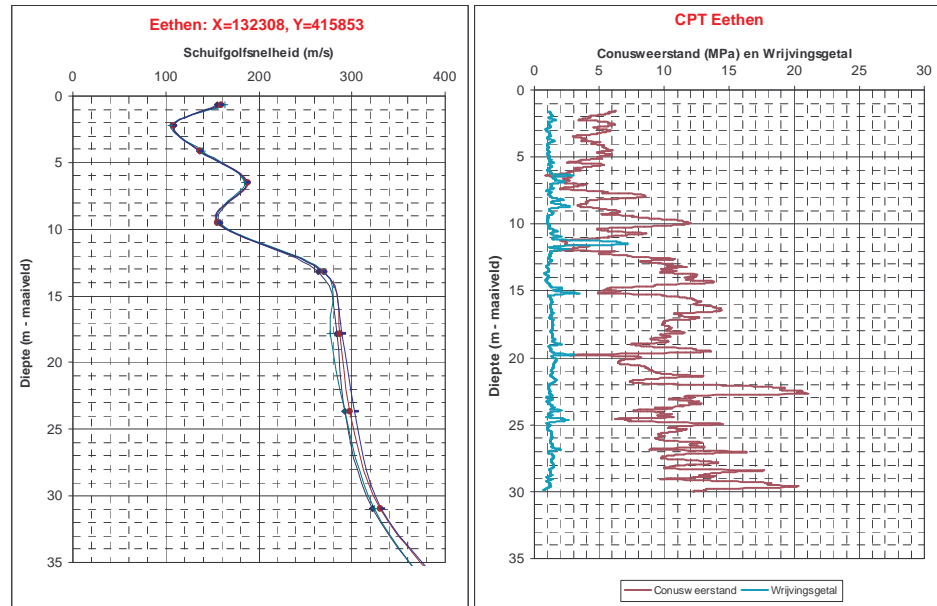
Regio 4, 5, 6 en 7 zijn glaciaal beïnvloed. Deze invloed is afkomstig van twee fases van ijsbedekking. De eerste fase was de Elster ijstijd, waarvan in het studiegebied de Formatie van Peelo het resultaat is. De tweede fase was de Saale ijstijd. Het ijs reikte toen maximaal tot de lijn Haarlem-Nijmegen. Deze ijstijd resulteerde onder andere in nu nog zichtbare landschappelijke fenomenen zoals de stuwwallen, bv de Utrechtse Heuvelrug. Verder heeft het Saale ijs afzettingen in de ondergrond achtergelaten, waaronder het duidelijke glaciale afzettingsniveau ("marker"), de keileem, die overal in de bovengenoemde regio's kan worden aangetroffen. Lokaal kan deze laag geërodeerd zijn.

Tijdschaal jaren voor heden / Time scale years before present	Nederland / The Netherlands		
	Periode Period	Tijdvak Epoch	Tijd Time
0	Kwartair	Holoceen	Subatlanticum
			Subboreaal
			Atlanticum
			Boreaal
			Praeboreaal
10000		Boven Pleistoceen	Weichselien
128000		Midden Pleistoceen	Eemien
			Saalien
			Holsteinien
			Elsterien
	Cromerien		
1000000	Onder Pleistoceen	Bavelien	
		Menapien	
		Waalien	
		Eburonian	
		Tiglien	
2600000	Neogeen	Praetiglien	
		Pliocene	
23000000	Paleogeen	Mioceen	
		Oligoceen	
		Eoceen	
65000000		Paleoceen	
	Tertiair		

Figuur B1. Geologische tijdschaal.

C Resultaten ConsoliTest metingen

Lokatie Eethen

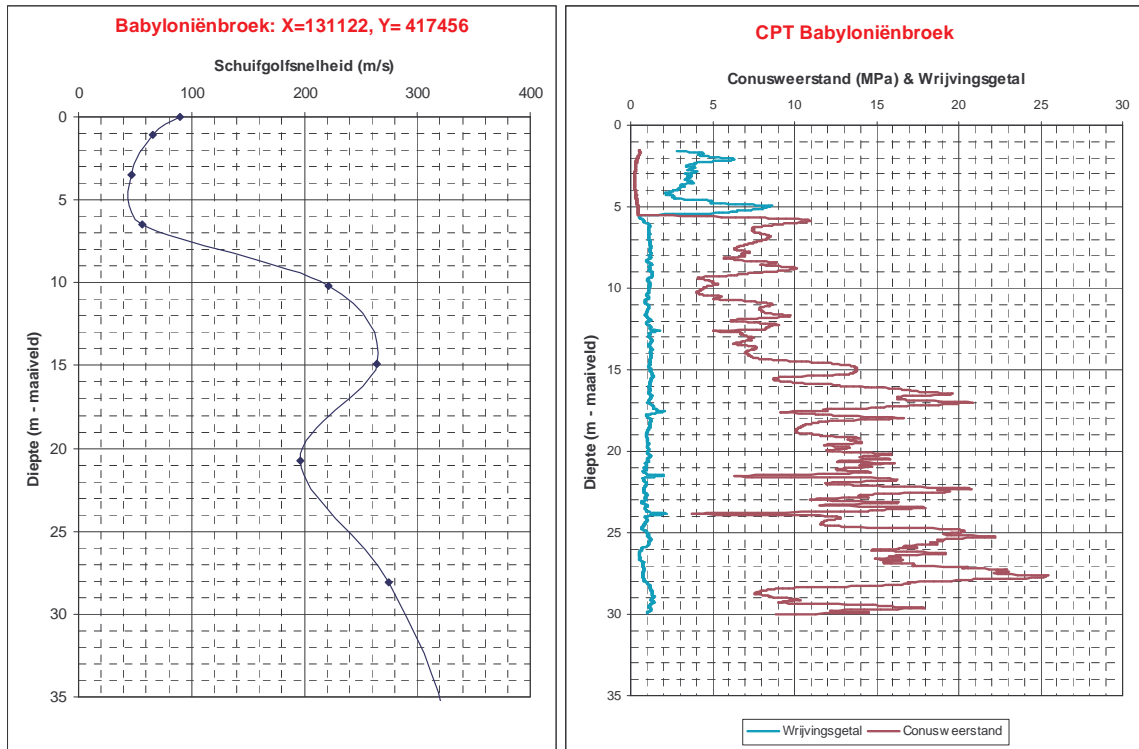


Figuur C1 Schuifgolfsnelheden en sondering Eethen. Het kwaliteitslabel van het ConsoliTest-resultaat is A.

Tabel C1 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden van de lokatie Eethen

Formatie/Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Formatie van Echteld	Zand	0,5 – 7 m	100 – 180 m/s
Formatie van Kreftenheye	zand/klei	7 – 12 m	160 – 240 m/s
Formatie van Kreftenheye	Zand	12 – 17 m	240 – 290 m/s
Formatie van Sterksel	Zand	23 – 30 m	280 – 320 m/s

Lokatie Babyioniënbroek

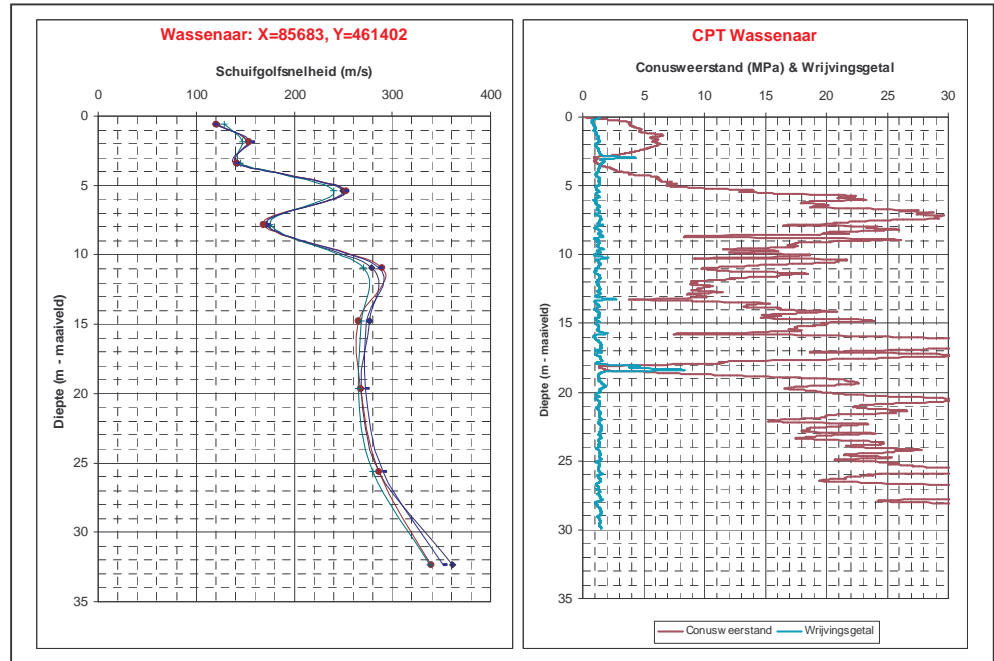


Figuur C2 Schuifgolfsnelheden en sondering Babyioniënbroek. Het kwaliteitslabel van de ConsoliTest-meting is B.

Tabel C2 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden van de lokatie Babyioniënbroek

Formatie/Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Formatie van Echteld	(slappe) klei	0 – 5,5	40 – 90
(Formatie van Bortel)	zand	5,5 – 9	100 – 200
Formatie van Kreftenheye	zand	5,5 (9) – 16	200 – 260
Formatie van Sterksel	zand	16 – 30	200 – 290

Lokatie Wassenaar

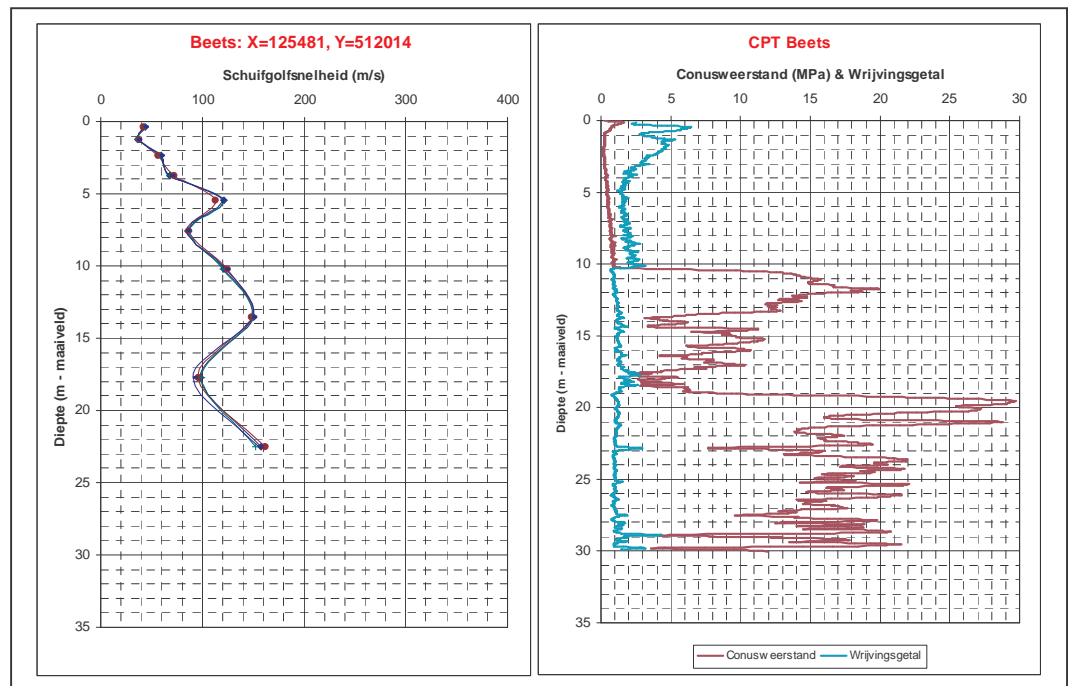


Figuur C3 Schuifgolfsnelheden en sondering Wassenaar. Het kwaliteitslabel van de meting is A.

Tabel C3 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden van de lokatie Wassenaar

Formatie/Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Form. v. Naaldwijk	zand	0 – 3	120 – 160
Form. v. Nieuwkoop	ondiep veen	3 – 4	< 140
Form. v. Naaldwijk	(strand)zand	4 – 11,5	170 – 250
Form. v. Naaldwijk	zand	11,5 – 16	260 – 290
Form. v. Boxtel	zand	16 - 18	260 – 280
Form. v. Kreftenheye	zand	18 – 30	270 – 330

Lokatie Beets

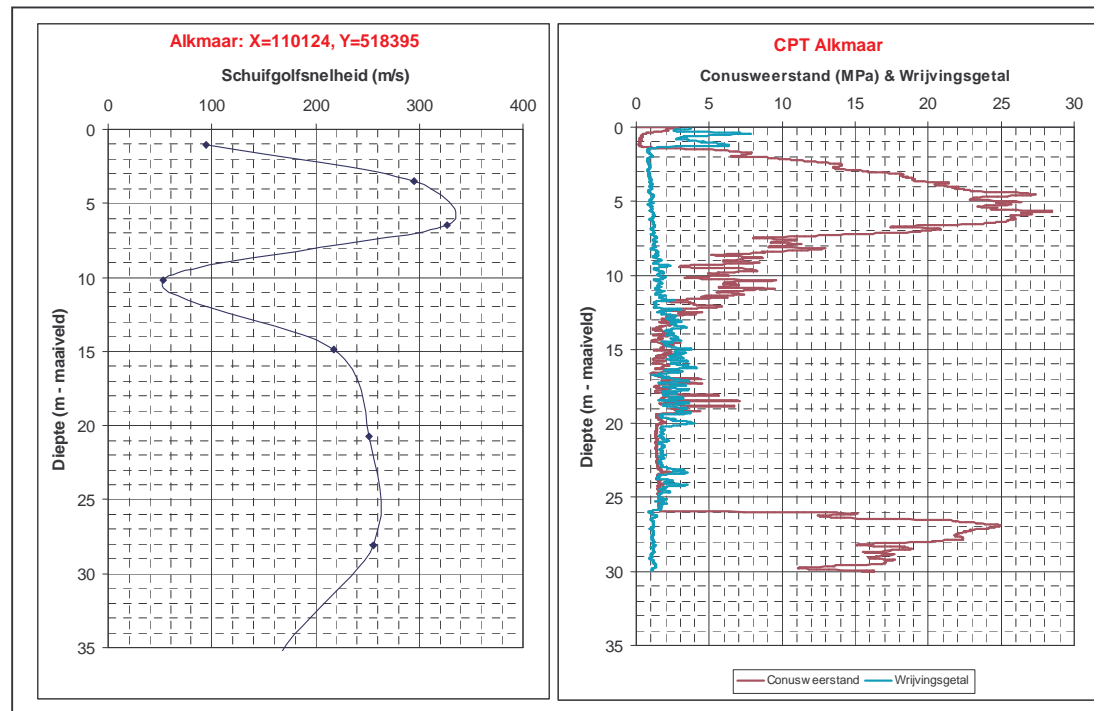


Figuur C4 Schuifgolfsnelheden en sondering voor de lokatie Beets. Omdat niet over het gehele dieptetraject tot 30 m schuifgolfsnelheden bepaald kunnen worden, is het kwaliteitslabel van de meting B.

Tabel C4 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden voor de lokatie Beets

Formatie/Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Form. van Nieuwkoop	ondiep veen	0 – 1	35 – 45
Form. v. Naaldwijk	klei	1 – 10,5	60 – 120
Form. v. Naaldwijk	zand	10,5 – 17,5	120 – 150
Form. v. Nieuwkoop	basisveen	17,5 – 19	70 – 90
Form. v. Boxtel	zand	19 – 21,5	>160 m/s

Lokatie Alkmaar

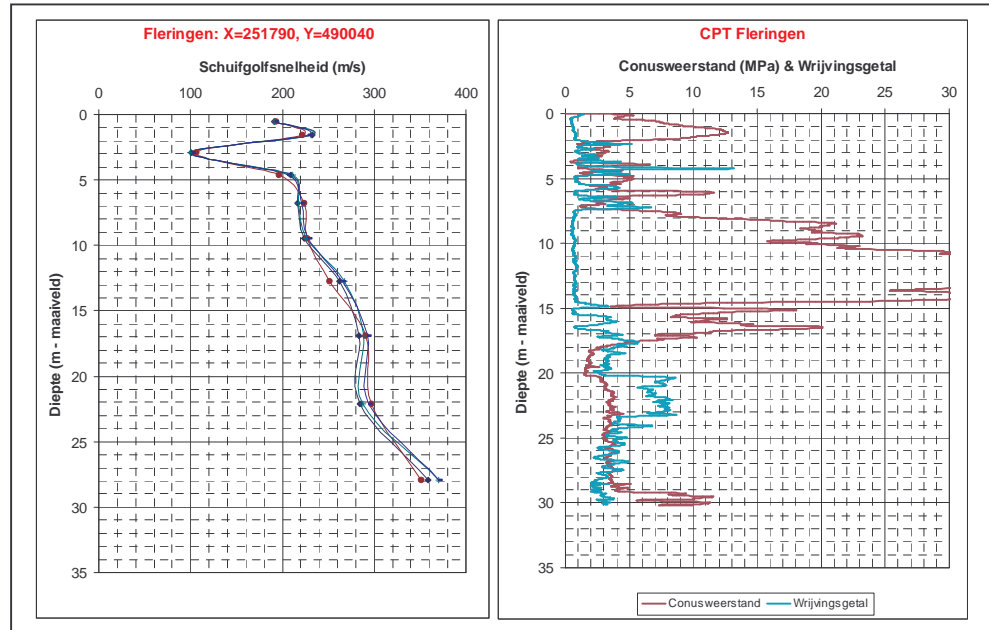


Figuur C5 Schuifgolfsnelheden en sondering Alkmaar. Het kwaliteitslabel van de meting is C.

Tabel C5 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden van de lokatie Alkmaar

Formatie/Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Form. v. Naaldwijk	(duin- en strand-) zand	1 – 11,5	180 - 330
Form. v. Naaldwijk	klei en zand (geulopvulling)	11,5 - 19	85 (klei) – 160 (zand)
Form. v. Naaldwijk, Laagpakket van Bergen	klei	19 - 26	220 –250
Form. v. Kreftenheye	zand	26 – 30	240 – 260

Lokatie Fleringen

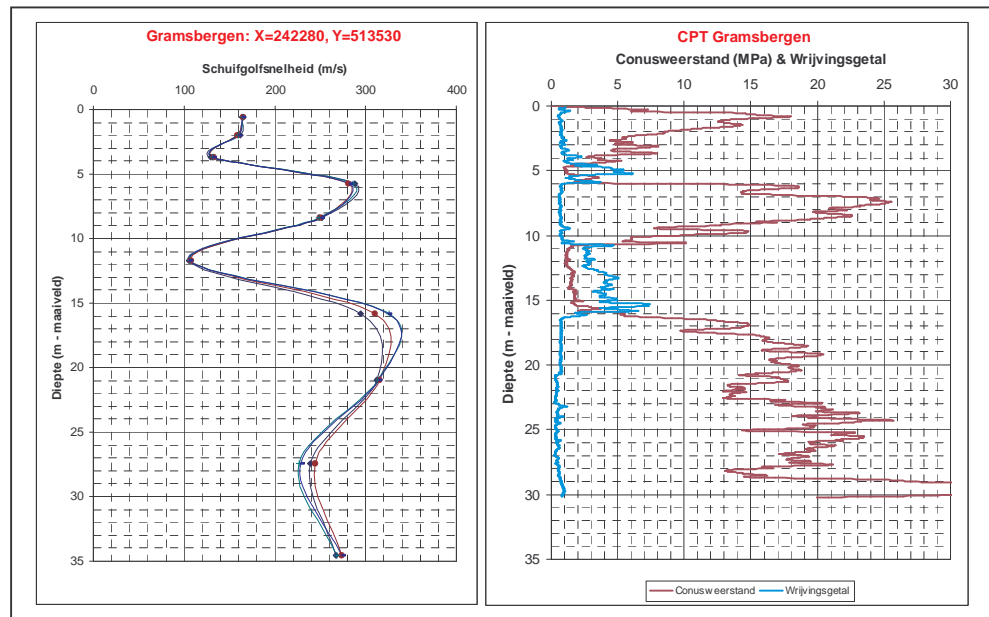


Figuur C6 Schuifgolfsnelheden en sondering voor de lokatie Fleringen. Het kwaliteitslabel van de ConsoliTest-meting is A.

Tabel C6 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden van de lokatie Fleringen

Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Form.v. Boxtel/Laagp.v. Wierden	Zand	0 – 2	180 – 240
Form.v. Boxtel	leem / veen / zand	2 – 7	100 (veen/leem) – 220 (zand)
Form.v. Drente/Laagp.v. Schaarsbergen	Zand	7 – 15	220 – 280
Form.v. Drente/Laagp.v. Gieten	leem (grondmorene)	15 – 17,5	280 – 290
Form. van Breda	klei / zand	17,5 – 30	280 – 370

Lokatie Gramsbergen

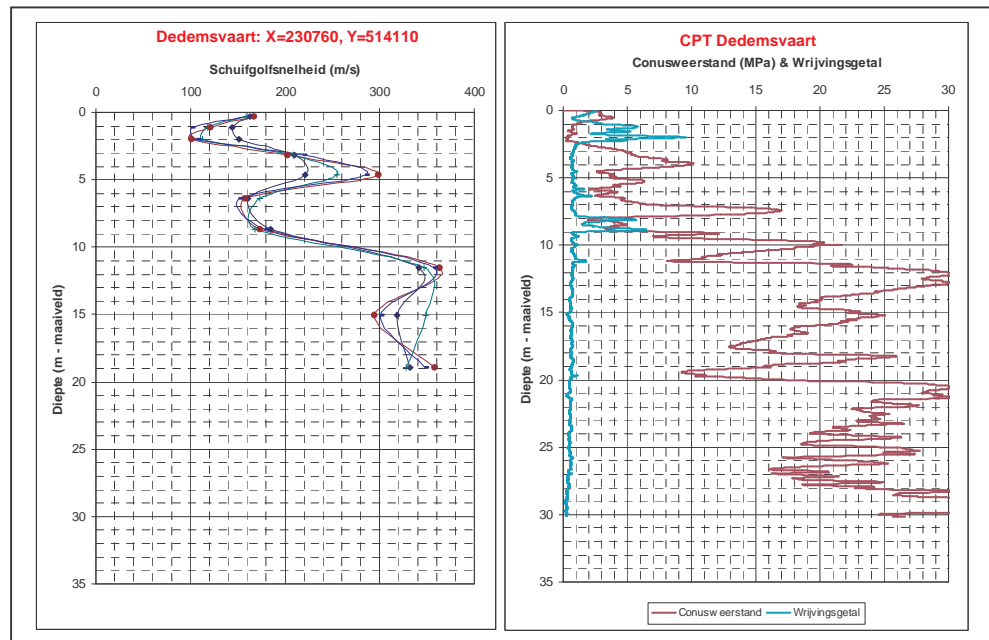


Figuur C7 Schuifgolfsnelheden en sondering voor de lokatie Gramsbergen. Het kwaliteitslabel van de ConsoliTest meting is A.

Tabel C7 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden van de lokatie Gramsbergen

Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Form.v. Bostel	leem/ zand	0 – 6	120 (leem) – 160 (zand)
Form.v. Kreftenheye	Zand	6 – 11	240 – 280
Form.v. Kreftenheye/Laagp. v. Zutphen	klei/veen	11 – 16	110
Form. v. Drente/Laagp. v. Schaarsbergen	zand	16 – 30	230 – 330

Lokatie Dedemsvaart

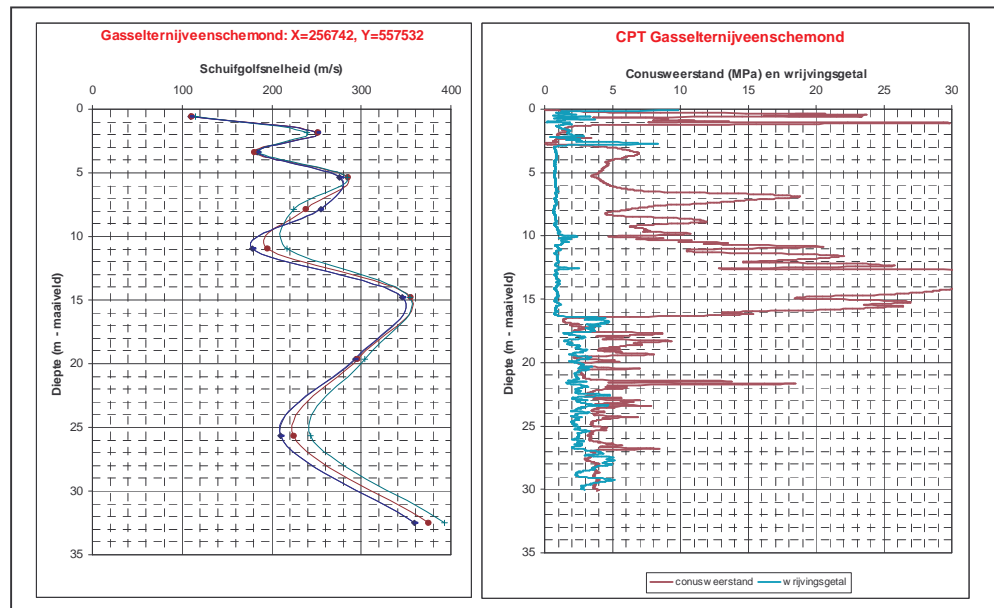


Figuur C8 Schuifgolfsnelheden en sondering voor de lokatie Dedemsvaart. Het kwaliteitslabel van de ConsoliTest-meting is B.

Tabel C8 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden van de lokatie Dedemsvaart

Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Antropogeen	onduidelijk	0 – 2,5	100 – 170
Form.v. Boxtel	leem/ zand	2,5 – 9	160 (leem) – 300 (zand)
Form.v. Kreftenheye	zand	9 – 20	295 – 360
Form. v. Urk	zand	-	-

Lokatie Gasselternijveenschemond

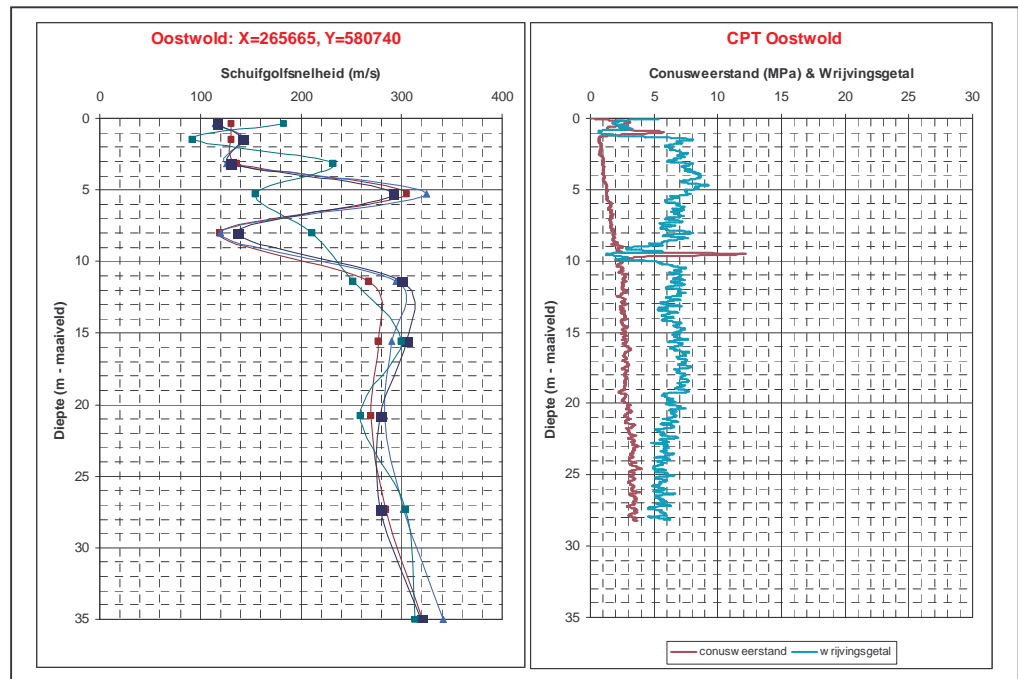


Figuur C9 Schuifgolfsnelheden en sondering voor de lokatie Gasselternijveenschemond. Het kwaliteitslabel van de meting is A.

Tabel C9 Interpretatie van de geologie en schuifgolfsnelheden voor de lokatie Gasselternijveenschemond

Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Antropogeen	klei, puin en zand	0 – 3	100 – 110
Form.v. Bostel	zand	3 – 10	180 – 280
Form.v. Drente/Laagp.v. Schaarsbergen	zand	10 – 16,5	180 – 360
Form.v. Drente/Laagp.v. Gieten	keileem	16,5 – 26,5	220 – 300
Form.v. Peelo	(pot)klei	26,5 – 30	ca. 300

Lokatie Oostwold

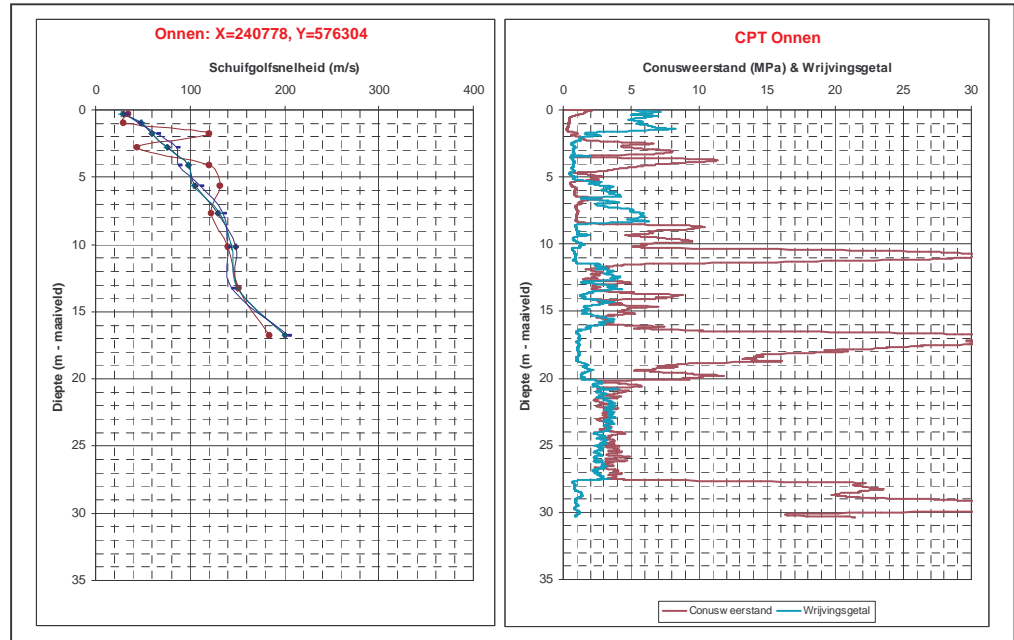


Figuur C10 Schuifgolfsnelheden en sondering Oostwold. Het kwaliteitslabel van de meting is B.

Tabel C10 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden van de lokatie Oostwold

Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Formatie van Peelo	klei	3 – 30	260 - 340

Lokatie Onnen

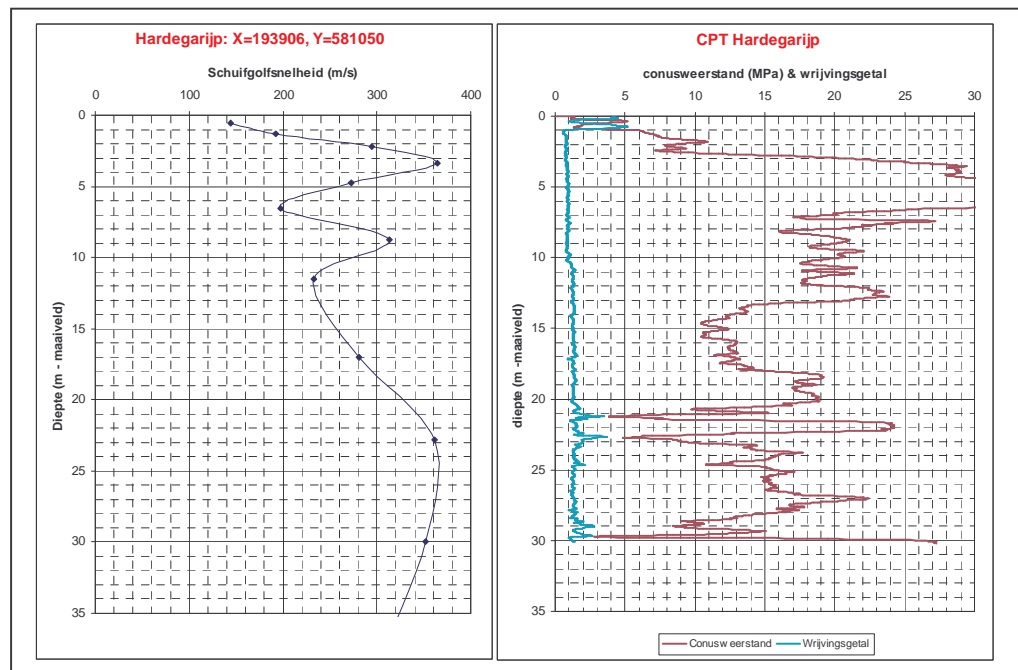


Figuur C11 Schuifgolfsnelheden en sondering Onnen. Het kwaliteitslabel van de ConsoliTest meting is B.

Tabel C11 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden van de lokatie Onnen

Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Formatie van Nieuwkoop	ondiep veen	0 – 3	40

Lokatie Hardegarijp

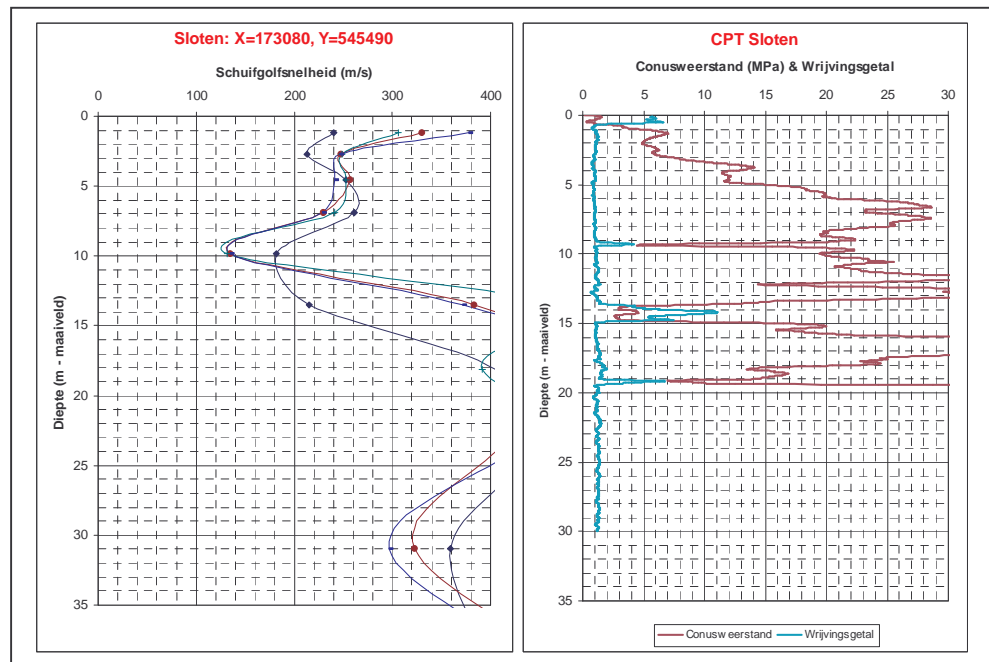


Figuur C12 Schuifgolfsnelheden en sondering Hardegarijp. Het kwaliteitslabel van de meting is C.

Tabel C12 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden van de lokatie Hardegarijp

Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Form.v. Naaldwijk	klei/zand	0 – 1	140 – 160
Form.v. Boxtel/Laagp.v. Drachten	zand	1 – 21,5	200 – 365
Form.v. Peelo	zand	21,5 – 30	300 – 360

Lokatie Sloten

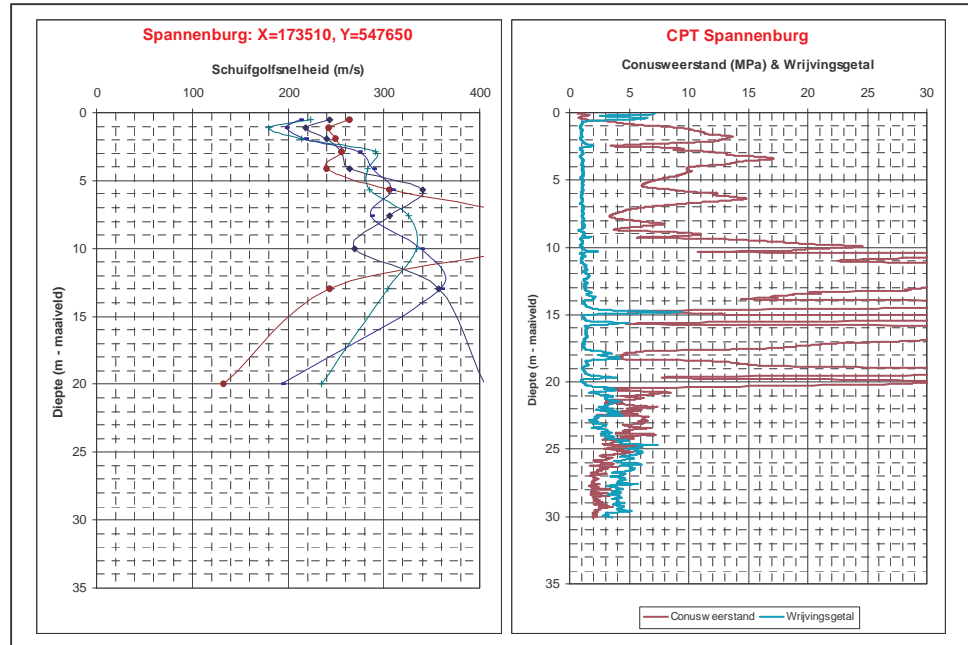


Figuur C13 Schuifgolfsnelheden en sondering voor de lokatie Sloten. Het kwaliteitslabel van de meting is C.

Tabel C13 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden van de lokatie Sloten

Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Form.v. Boxtel	Zand	1 – 5	220 – 260
Form.v. Boxtel / Laagp.v. Drachten	Zand	5 – 20	130 (klei) – 460
Form. v. Urk / Laagp. v. Tynje	Zand	20 – 30	400 – 540
Form.v. Peelo	Zand	> 30	300 – 360

Lokatie Spannenburg



FiguurC14 Schuifgolfsnelheden en sondering voor de lokatie Spannenburg. Het kwaliteitslabel van de meting is C.

Tabel C14 Interpretatie van geologie en schuifgolfsnelheden van de lokatie Spannenburg

Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Form.v. Boxtel	zand	0 – 10	200 – 300
Form.v. Boxtel / Laagp.v. Drachten	zand	10 – 20,5	??
Form. v. Urk / Laagp. v. Tynje	klei	20,5 – 30	300

Formatie	Laagpakket	lithologie	Vs min	Vs max	diepte	Plaats	Kwaliteit
Antropogeen		??	100	110	0 – 3	Gasselternijveenschemond	A
Antropogeen		?? (slap)	100	170	0 – 2,5	Dedemsvaart	B
Boxtel		leem / veen / zand	100 (veen/leem)	220 (zand)	2 – 7	Fleringen	A
Boxtel	Wierden	zand	180	240	0 – 2	Fleringen	A
Boxtel		zand	180	280	3 – 10	Gasselternijveenschemond	A
Boxtel		leem/ zand	120 (leem)	160 (zand)	0 – 6	Gramsbergen	A
Boxtel		zand	260	280	16 - 18	Wassenaar	A
Boxtel		zand	100	200	5,5 – 9	Babylonienbroek	B
Boxtel		zand	>160 m/s	160	19 – 21,5	Beets	B
Boxtel		leem/ zand	160 (leem)	300 (zand)	2,5 – 9	Dedemsvaart	B
Boxtel	Drachten	zand	200	365	1 – 21,5	Hardegarijp	C
Boxtel		zand	220	260	1 – 5	Sloten	C
Boxtel	Drachten	zand	130 (klei)	460	5 – 20	Sloten	C
Boxtel		zand	200	300	0 – 10	Spannenburg	C
Boxtel	Drachten	zand	??		10 – 20,5	Spannenburg	C
Breda		klei / zand	280	370	17,5 – 30	Fleringen	A
Drente	Gieten	keileem	280	290	15 – 17,5	Fleringen	A
Drente	Schaarsbergen	zand	220	280	7 – 15	Fleringen	A
Drente	Gieten	keileem	220	300	16,5 – 26,5	Gasselternijveenschemond	A
Drente	Schaarsbergen	zand	180	360	10 – 16,5	Gasselternijveenschemond	A
Drente	Schaarsbergen	zand	230	330	16 – 30	Gramsbergen	A
Echteld		zand	100	180	0,5 – 7	Eethen	A
Echteld		(slappe) klei	40	90	0 – 5,5	Babylonienbroek	B
Kreftenheye		zand/klei	160	240	7 – 12	Eethen	A
Kreftenheye		zand	240	290	12 – 17	Eethen	A
Kreftenheye		zand	240	280	6 – 11	Gramsbergen	A
Kreftenheye	Zutphen	klei/veen	110	110	11 – 16	Gramsbergen	A

Formatie	Laagpakket	lithologie	Vs min	Vs max	diepte	Plaats	Kwaliteit
Kreftenheye		zand	270	300	18 – 30	Wassenaar	A
Kreftenheye		zand	200	260	5,5 (9) – 17	Babylonienbroek	B
Kreftenheye		zand	295	360	9 – 20	Dedemsvaart	B
Kreftenheye		zand	240	260	26 – 30	Alkmaar	C
Naaldwijk		zand	120	160	0 – 3	Wassenaar	A
Naaldwijk		(strand)zand	170	250	4 – 11,5	Wassenaar	A
Naaldwijk		zand	260	290	11,5 – 16	Wassenaar	A
Naaldwijk		klei	60	120	1 – 10,5	Beets	B
Naaldwijk		zand	120	150	10,5 – 17,5	Beets	B
Naaldwijk		(duin- en strand-)zand	180	330	1 – 11,5	Alkmaar	C
Naaldwijk		klei en zand (geulopvulling)	85 (klei)	160 (zand)	11,5 - 19	Alkmaar	C
Naaldwijk	Bergen	klei	220	250	19 - 26	Alkmaar	C
Naaldwijk		klei/zand	140	160	0 – 1	Hardegarijp	C
Nieuwkoop		ondiep veen	<100	140	3 – 4	Wassenaar	A
Nieuwkoop		basisveen	70	90	17,5 – 19	Beets	B
Nieuwkoop		ondiep veen	35	45	0 – 1	Beets	B
Nieuwkoop		ondiep veen	40	40	0 – 3	Onnen	B
Peelo		(pot)klei	300	300	26,5 – 30	Gasselternijveenschmond	A
Peelo		klei	260	340	1,5 – 30	Oostwold	B
Peelo		zand	300	360	21,5 – 30	Hardegarijp	C
Peelo		zand	300	360	> 30	Sloten	C
Sterksel		zand	280	320	23 – 30	Eethen	A
Sterksel		zand	200	290	17 – 30	Babylonienbroek	B
Urk	Tynje	zand	400	540	20 – 30	Sloten	C
Urk	Tynje	klei	300	300	20,5 – 30	Spannenburg	C

Tabel C15 Samenvatting van de voorkomende snelheden op alle gemeten lokaties

D Resultaten seismische sonderingen (SCPT's)

Interpretatie formaties in seismische sonderingen:

Roswinkel

Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Boxtel	zand	0 – 21	180 – 400 m/s
Drente, Schaarsbergen	zand	21 – 27	280 – 340 m/s
Urk / Peelo	Klei (zand)	27 – 30	300 – 330 m/s

Dronrijp

Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Naaldwijk	zand	0 – 6	100 – 190 m/s
Naaldwijk	Klei	6 – 7	120 m/s
Nieuwkoop	veen	7 – 7.5	90 m/s
Boxtel	Zand	7.5 – 18	160 – 250 m/s
Drente Gieten	Keileem	18 – 24	270 – 390 m/s
Urk Tynje	Klei/zand	24 - 30	300 – 440 m/s

Middelstum

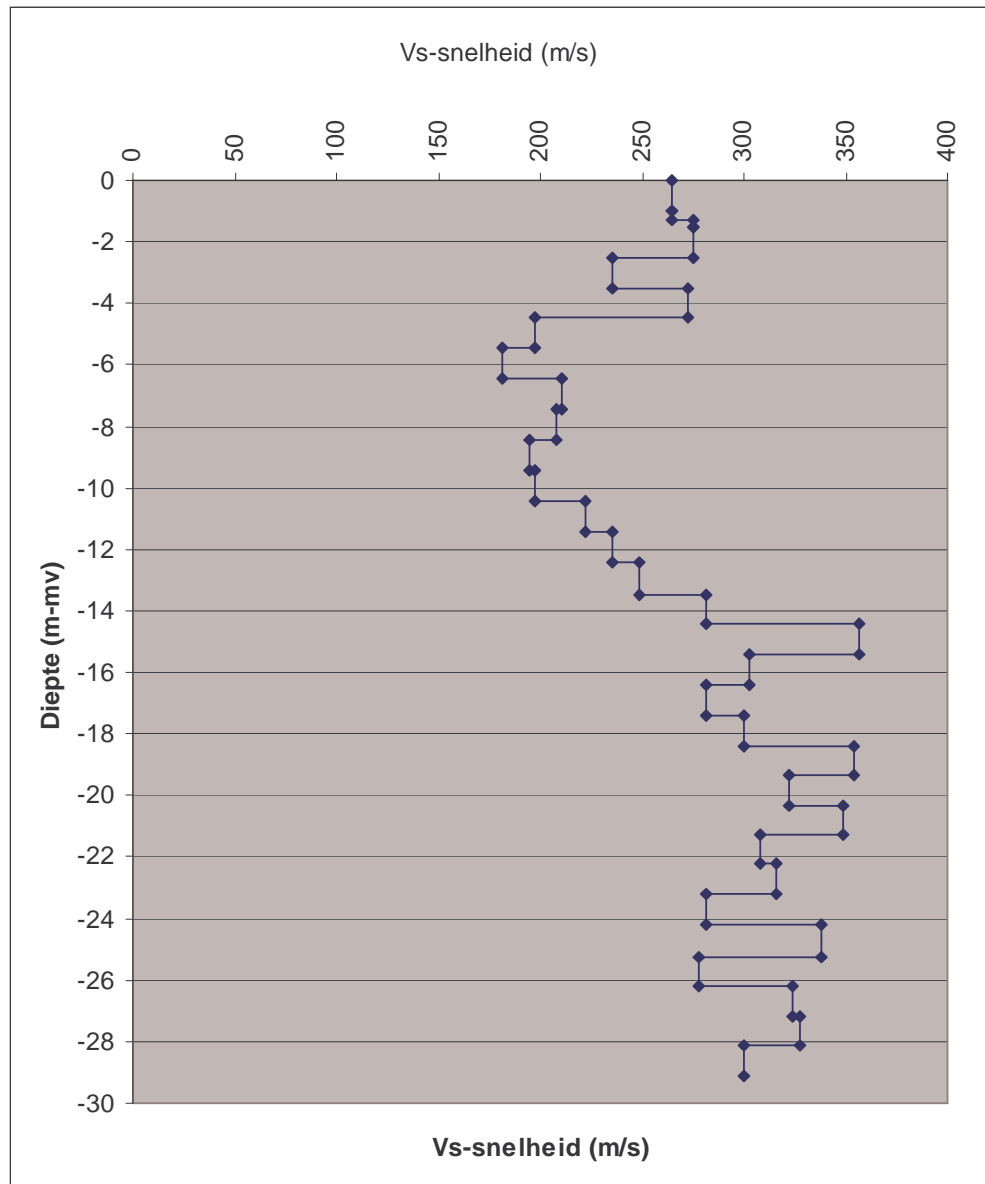
Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Naaldwijk	klei	0 – 4	100 – 210 m/s
Naaldwijk	klei/zand	4 – 11	130 - 220 m/s
Peelo - Nieuwolda	klei	11 - 30	160 – 350 m/s

Slootdorp

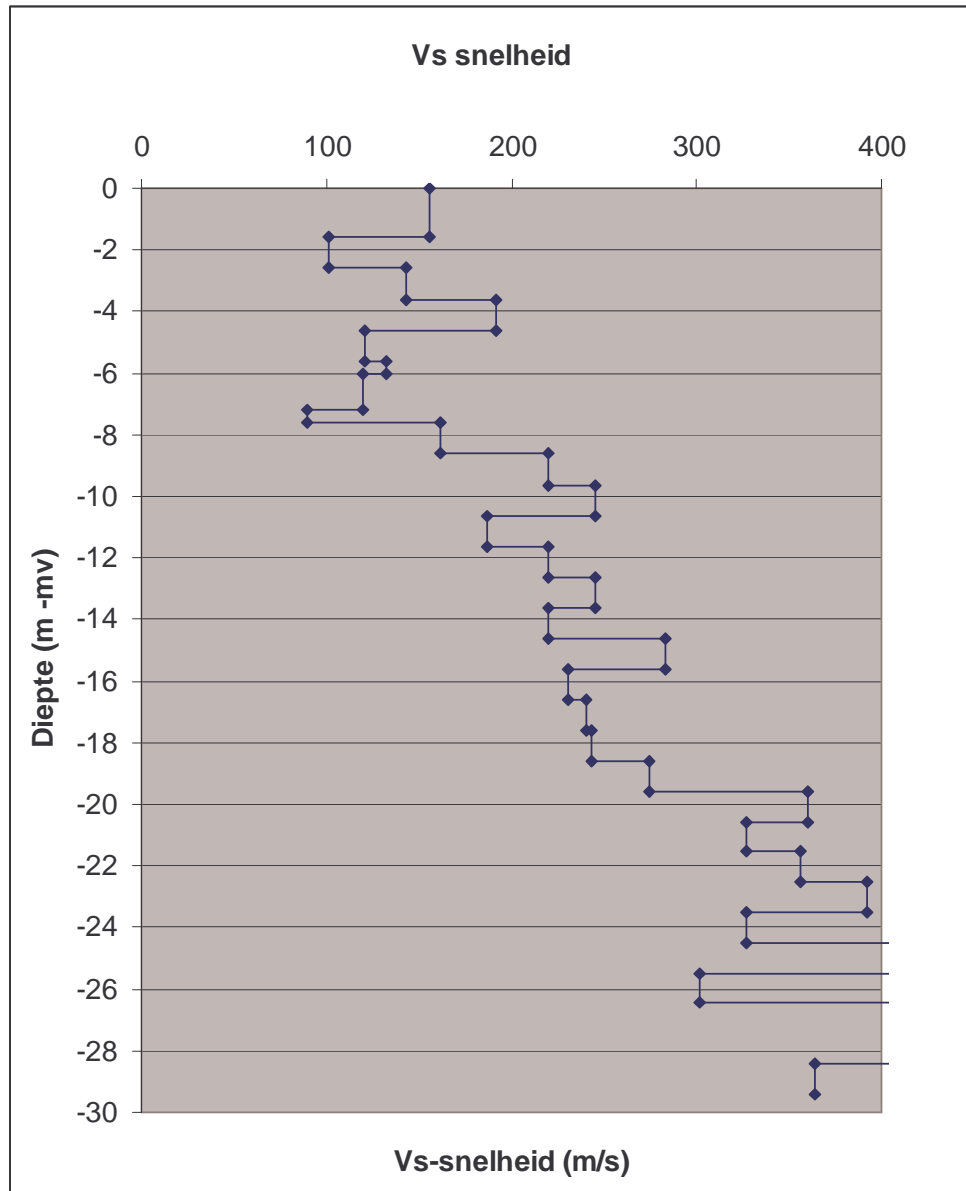
Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Naaldwijk	zand/klei	0 - 13	50 – 170 m/s
Eem	zand	13 – 23	170 – 305 m/s
Eem	klei	23 – 30	210 - 370 m/s

Naaldwijk

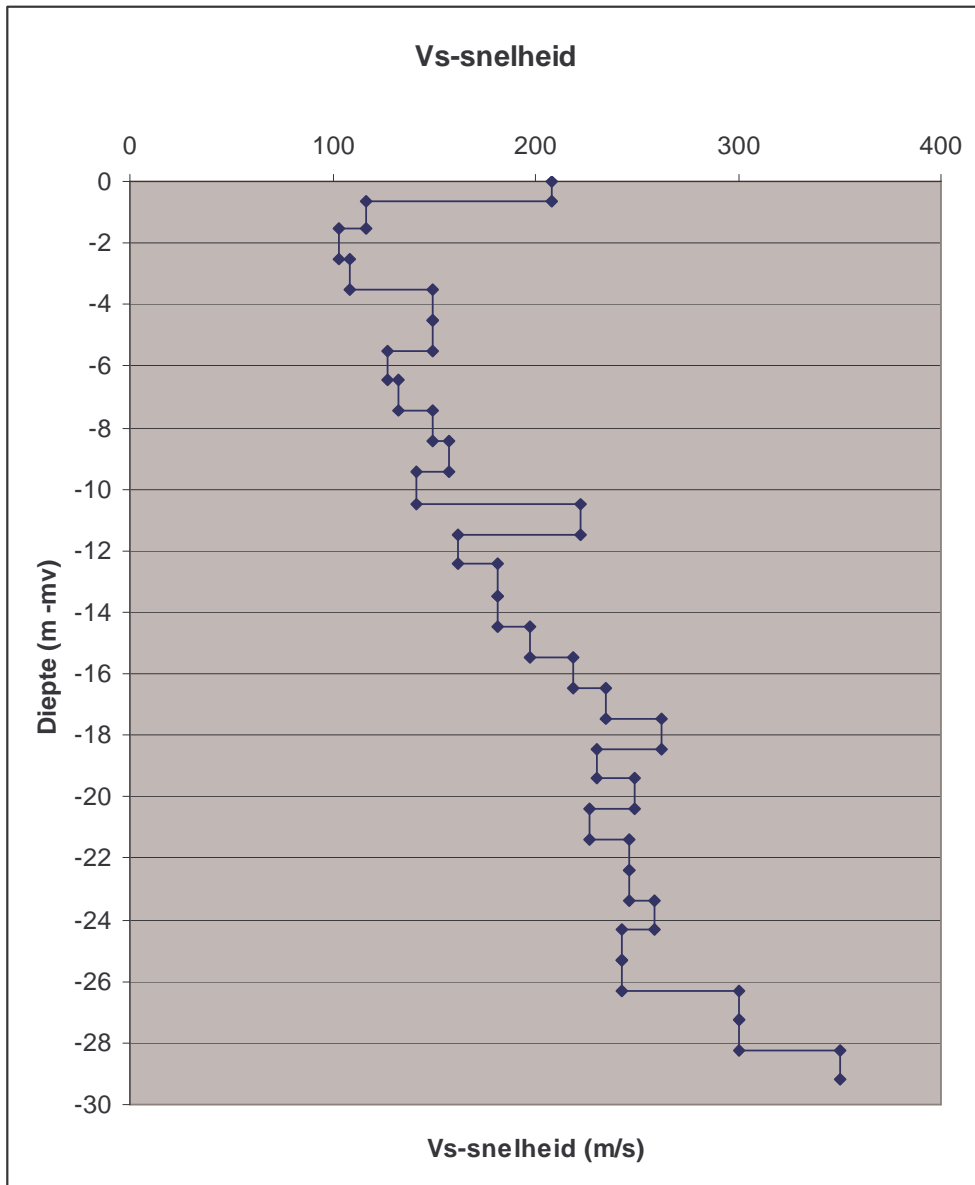
Formatie / Laagpakket	Lithologie	Diepte (m – m.v.)	Vs snelheden (m/s)
Naaldwijk	zand		120 m/s
Nieuwkoop	veen	1.5 – 2.5	15 m/s
Naaldwijk	Klei (zand)	2.5 – 6	60 – 150 m/s
Naaldwijk	Zand	6 – 18	140 – 190 m/s
Echteld	klei	18 – 19	250 m/s
Kreftenheye	Zand	19 – 36	230 – 580 m/s
Stramproy	Leem/zand	36 – 46	290 – 580 m/s
Waalre	Klei/zand	46 - 50	210 – 520 m/s



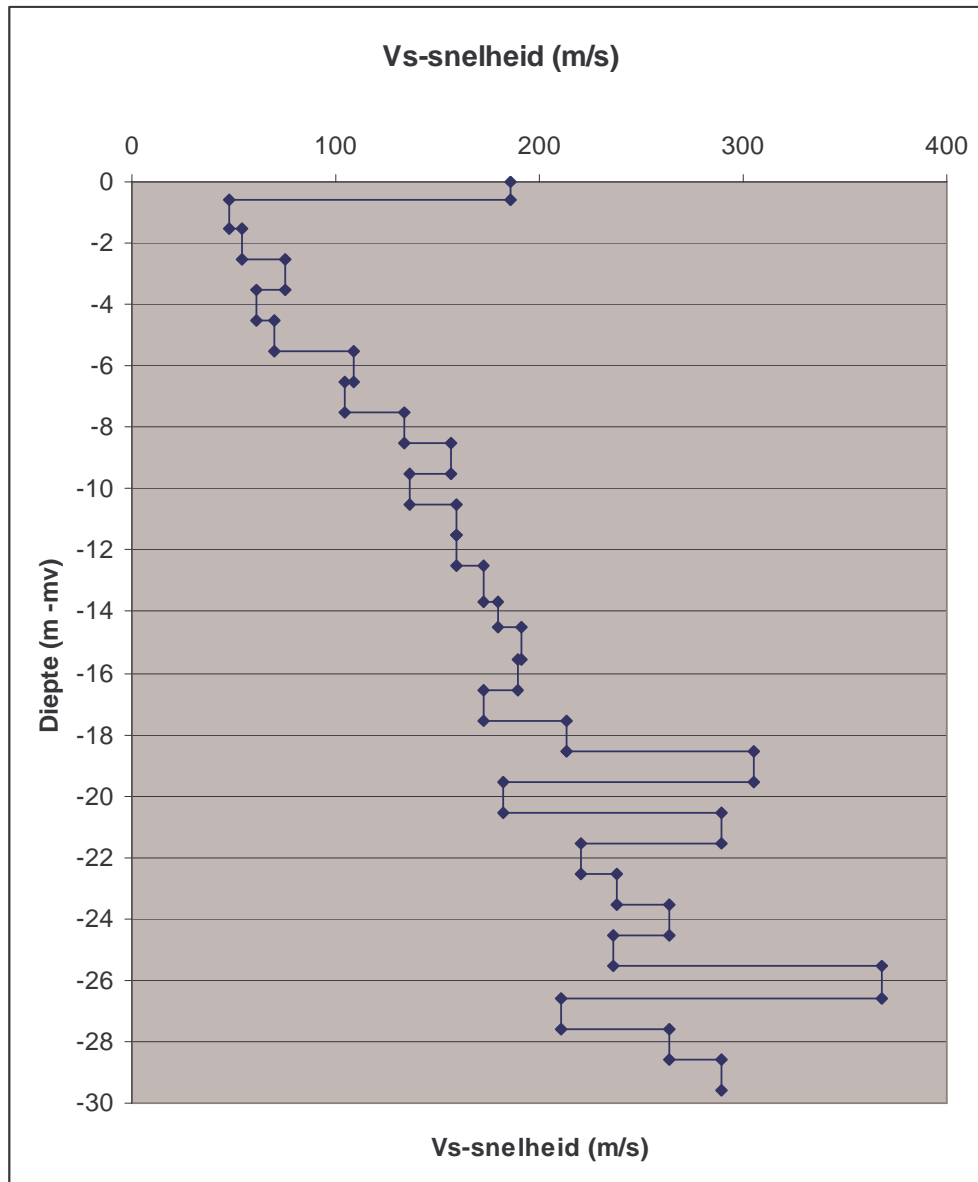
Figuur D1. Schuifgolfsnelheden lokatie Roswinkel en bijbehorende sondeerresultaten (zie volgende pagina)



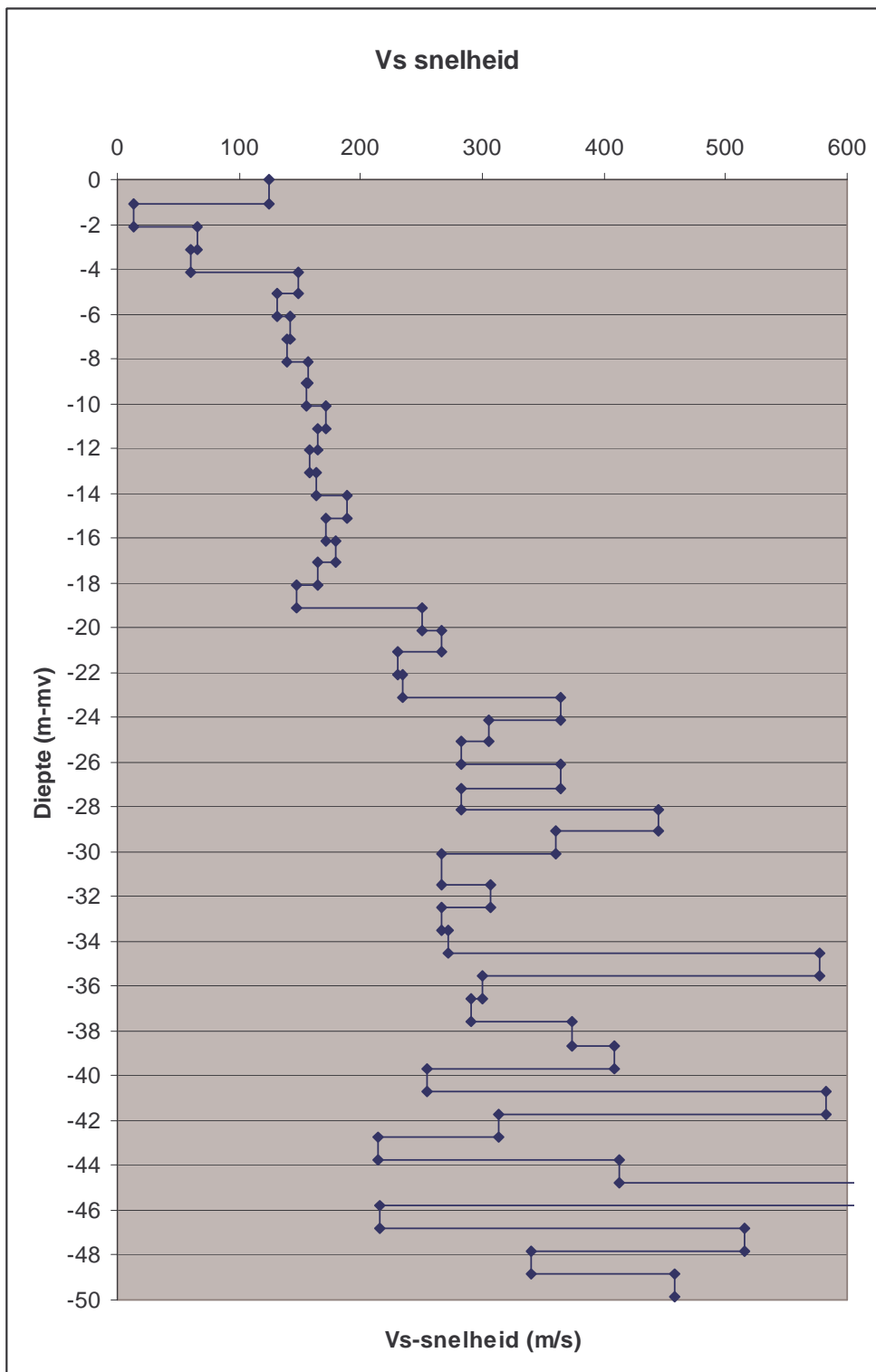
Figuur D2. Schuifgolfsnelheden locatie Dronrijp en bijbehorende sondeerresultaten (zie volgende pagina)



Figuur D3. Schuifgolfsnelheden lokatie Middelstum en bijbehorende sondeerresultaten (zie volgende pagina)



Figuur D4. Schuifgolfsnelheid lokatie Slootdorp en bijbehorende sondeerresultaten (zie volgende pagina)



Figuur D5. Schuifgolfsnelheid Lokatie Naaldwijk en bijbehorende sondeerresultaten (zie volgende pagina)