



NOTITIE

Onderwerp	Trillingsanalyse Grebbedijk
Project	Planuitwerking gebiedsontwikkeling Grebbedijk
Opdrachtgever	Waterschap Vallei en Veluwe
Projectcode	124281
Status	Definitief
Datum	7 mei 2024
Referentie	124281-2.6/24-006.568
Auteur(s)	Ir. A. Hoekstra

Gecontroleerd door	Ir. F. Besseling, ir. R. de Boer
Goedgekeurd door	Ir. H.J. van Strijp-Harms
Paraaf	

Bijlage(n)	I Sonderingen
	II Panden
	II Bodemprofielen CUR166

Aan	Waterschap Vallei en Veluwe
Kopie	

1 INLEIDING

De dijkversterking binnen het project Grebbedijk bevat onder andere een aantal langconstructies (in de vorm van damwanden). Wanneer deze trillend worden ingebracht kan het leiden tot trillingshinder en mogelijk zelfs schade in de directe omgeving. Schade dient voorkomen te worden door het nemen van beheersmaatregelen. Een veel gebruikte beheersmaatregel is het drukkend in plaats van trillend aanbrengen van damwanden. In dit document worden de risicocontouren voor schade door trillingen ten gevolge van het trillend installeren van damwanden afgeleid.

1.1 Projectbeschrijving

De Grebbedijk is een 5,5 kilometer lange dijk die de Gelderse Vallei beschermt tegen hoogwater vanuit de Nederrijn. Het traject ligt tussen de Wageningse Berg (dijkpaal 0) en de Grebbeberg bij Rhenen (dijkpaal 55+45), zoals weergegeven in afbeelding 1.1. De huidige dijk voldoet niet aan de waterveiligheidsnormen, met name op het gebied van stabiliteit binnenwaarts en piping. Binnen het project gebiedsontwikkeling Grebbedijk wordt gewerkt aan de planuitwerking van de dijkversterking, om te komen tot een voorlopig ontwerp en een projectbesluit. Op veel locaties zal gebruik worden gemaakt van versterking van grond, maar op een aantal plekken is een langconstructie gepland. Hierbij gaat het om ofwel een constructie met stabiliteitsfunctie ofwel een constructie tegen piping en heave, zonder stabiliteitsfunctie.

Afbeelding 1.1 Overzicht van het projectgebied Grebbedijk



1.2 Doel van dit document

Het doel van dit document is het vastleggen van de uitgangspunten, de berekeningsaanpak en de resultaten van een trillingsanalyse, zijnde de risicocontouren voor schade als gevolg van trillingen. Hierbij wordt ingezoomd op drie maatgevende locaties op het dijktraject waar sprake is van beleningen nabij de dijk, en waar dus sprake zou kunnen zijn van schade door trillingen. Deze risicocontouren geven een globale indicatie van het schaderisico aan panden in de nabije omgeving als gevolg van het intrillen van de damwanden. Een resultaat van de trillingsanalyse is de minimale afstand van de trillingsbron tot de bebouwing waarop het risico op schade acceptabel klein is.

Op basis van de uitkomsten van dit onderzoek kunnen de risico's voor de uitvoeringsmethode worden ingeschat. Er kan een afweging worden gemaakt of het mogelijk is om damwandenplanken in te trillen op de betreffende locaties, of er nog aanpassingen of aanvullende analyses nodig zijn, of dat er moet worden gekeken naar een alternatieve installatiemethode (zoals drukken).

2 UITGANGSPUNTEN

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste uitgangspunten voor het bepalen van de risicocontouren toegelicht. De analyse is gedaan volgens de geldende richtlijnen van de CUR166 6^e druk (ref. 3) en de SBR Trillingsrichtlijn A: schade aan bouwwerken (ref. 7). In paragraaf 2.1 wordt ingegaan op de drie locaties van het dijktraject waarvoor een analyse is gedaan. Vervolgens wordt in respectievelijk paragrafen 2.2, 2.3 en 2.4 de geotechnische informatie, de uitgangspunten voor het intrillen van de damwandplanken en informatie over de panden beschreven.

2.1 Locaties

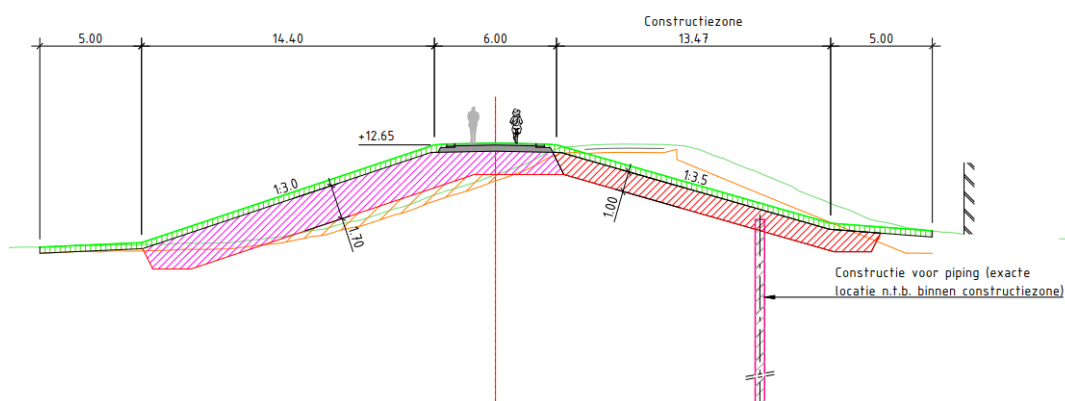
Het projectgebied van de Grebbedijk is opgedeeld veertien dijkvakken. Er zijn drie locaties geselecteerd voor een trillingspredictie. Op deze locaties is er sprake van gevoelige panden of monumenten die zich dicht bij de dijk bevinden en mogelijk schade zouden kunnen oplopen door het intrillen van damwand constructies.

Informatie over de locaties samen met de geplande werkzaamheden zijn vastgesteld op basis van het ontwerp uit de ontwerpnota dijk (inclusief bijbehorende tekeningen) en weergegeven in tabel 2.1. Op de eerste locatie is de installatie van een heavescherm zonder stabiliteitsfunctie gepland, die wordt geplaatst in de binnenteen met een puntniveau rond NAP -1m. Hierlangs bevinden zich twee panden op locatie 1a en 1b die mogelijk schade zouden kunnen ondervinden als gevolg van trillingen. Langs het traject bij de tweede en derde locatie is de installatie van een stalen damwand met respectievelijk een stabiliteitsfunctie en een stabiliteits- en heavefunctie gepland als onderdeel van de inpassingsopgaven. Deze worden halverwege de binnentalud geplaatst, met een puntniveau van respectievelijk NAP -2 en -3 m. Een indicatief dwarsprofiel van alle drie de locaties is te zien in afbeelding 2.1 tot en met afbeelding 2.3.

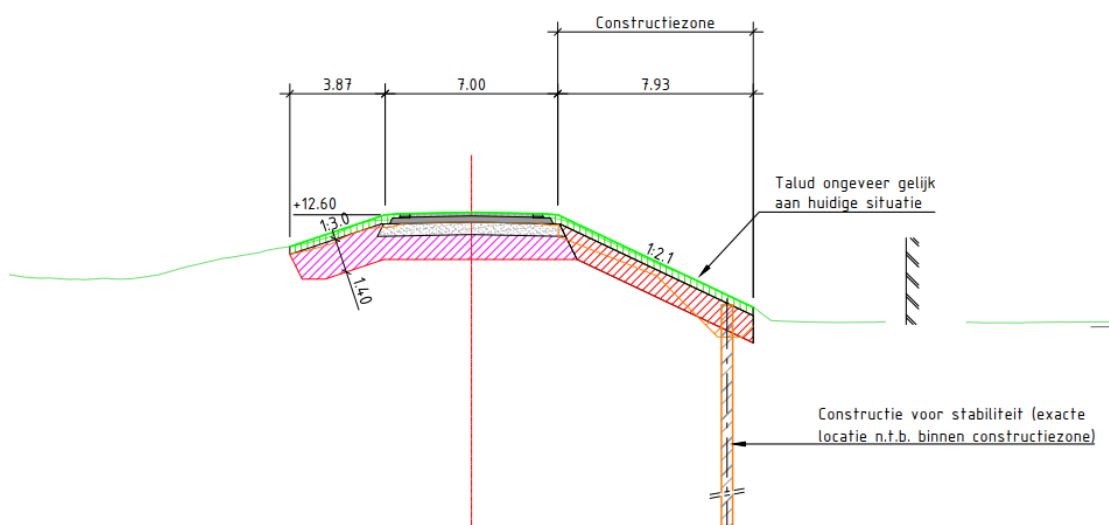
Tabel 2.1 Achtergrondinformatie geselecteerde locaties voor trillingspredictie

	Dijkvak	Dichtstbijzijnde dijkpaalnummer	Type damwand	Positie damwand	Hoogte maaiveld binnenteen	Puntniveau
locatie 1a	1D	DP3+60	heave/piping- scherm	binnenteen	NAP 9.2 m	NAP -1 m (voor piping)
locatie 1b	1E	DP6+50	heave/piping- scherm	binnenteen	NAP 8.5 m	NAP -1 m (voor piping)
locatie 2	3C	DP36	stalen damwand voor stabiliteit	halverwege binnentalud	NAP 7.9 m	NAP -2 m (10 m onder maaiveld)
locatie 3	3D	DP48	stalen damwand voor stabiliteit + heave/piping	halverwege binnentalud	NAP 8.1 m	NAP -3 m (voor piping)

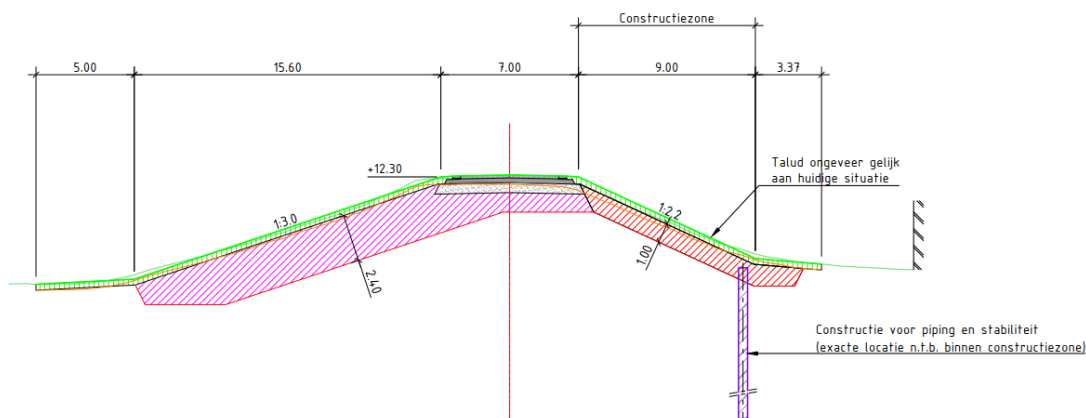
Afbeelding 2.1 Dwarsprofiel locatie 1, dijkvak 1D, DP3+60 en dijkvak 1E, DP6+50



Afbeelding 2.2 Dwarsprofiel locatie 2, dijkvak 3C, DP36



Afbeelding 2.3 Dwarsprofiel locatie 3, dijkvak 3D, DP48



2.2 Uitgangspunten geotechniek

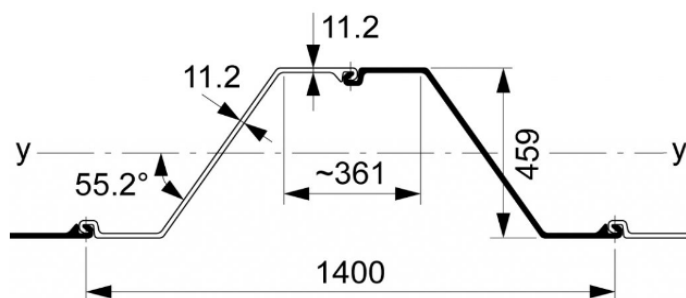
Trillingscontouren bij installatie van damwanden worden beïnvloed door de bodemopbouw. De eigenschappen van de bodem zijn zowel van invloed op de sterkte van de brontrilling, als op de voortplanting van de golven tussen bron en ontvanger. Op basis van sonderingen in de kruin en de binnenteen op de drie locaties uit tabel 2.1 is vastgesteld dat de grondslag op alle locaties vergelijkbaar is. In de binnenteen bestaat de bodem uit een deklaag van twee tot vier meter van voornamelijk klei, met daaronder zandlagen. Het dijklichaam zelf bestaat voornamelijk uit klei. De maatgevende gehanteerde sonderingen zijn weergegeven in bijlage i.

In de CUR166 (ref. 3) worden zeven karakteristieke bodemprofielen onderscheiden. Hoewel geen van deze bodemprofielen exact overeenkomen met de grondslag in dit projectgebied, zijn de bodemprofielen van Tiel en Eindhoven het meest representatief. Deze zijn daarom als uitgangspunt genomen in de verdere analyses. De karakteristieke bodemprofielen van Tiel en Eindhoven volgens de CUR166 (ref. 3) zijn weergegeven in bijlage 7iii.

2.3 Uitgangspunten intrillen damwandplanken

Voor de dijkversterking werkzaamheden wordt op de drie geselecteerde locaties uitgegaan van een dubbele damwand van type AZ24-700 die trillend wordt ingebracht in de grond¹. Een dubbele plank heeft een breedte van 1,4 meter en een weerstandsmoment van $2.430 \text{ cm}^3/\text{m}$. De schematische weergave van dit type plank met afmetingen is weergegeven in afbeelding 2.4.

Afbeelding 2.4 Afmetingen dubbele damwand type AZ24-700 (ref. 2)



Bij de keuze van het materieel voor het intrillen van de damwandplanken wordt bekeken wat er nodig is om de damwandplanken schadevrij op diepte te krijgen. Hieruit volgt een inschatting van de benodigde slagkracht, als functie van planklengte en -type en het bodemprofiel, en daaraan gekoppeld een inschatting van de trillingsamplitude (de bronsterkte). De systematiek hiervoor volgt uit de CUR 166 (ref. 3).

Standaard wordt bij het intrillen van dubbele stalen damwandplanken voor stabiliteit gebruik gemaakt van hoogfrequent (38 Hz) trilblokken. In de predicties in dit document is uitgegaan van een frequentie van 30 Hz, omdat in de praktijk de frequentie van de trilblokken lager uit kunnen vallen. De slagkracht die benodigd is om de planken op diepte te plaatsen is ingeschat aan de hand van de NVAF/PSD-grafieken van de CUR166 (ref. 3). Deze grafieken geven aan de hand van de planklengte en het weerstandsmoment aan of de plank schadevrij op diepte kan komen bij een bepaald grondprofiel en welke slagkracht hiervoor nodig is. Vanwege een verandering van plankeigenschappen sinds dat de grafieken zijn opgesteld, moet er een correctiefactor op het weerstandsmoment worden meegenomen.

Zoals benoemd in paragraaf 2.2 zijn de bodemprofielen van Tiel en Eindhoven het meest representatief voor de grondslag. Op locatie 1 wordt de damwand geplaatst in de tot een diepte van NAP -1 m, wat een planklengte van ongeveer 10 meter geeft. Op locatie 2 en 3 wordt de damwand geplaatst halverwege het binnentalud tot een diepte van NAP -2 tot -3 m. Dit geeft een planklengte van ongeveer 15 meter. Ondanks dat op locatie 1 de damwanden een kortere lengte hebben, is het aanneembaar dat de benodigde slagkracht vergelijkbaar is met de installatie van de planken op locatie 2 en 3. Het verschil in diepte dat moet worden overbrugd bestaat namelijk met name uit kleilagen in de dijk die makkelijker doordringbaar zijn.

De NVAF/PSD-grafieken van Tiel en Eindhoven voor hoogfrequent trillen volgens de CUR166 (ref. 3) staan weergegeven in Bijlage 7iii. De NVAF/PSD-grafiek bij een bodemprofiel van Eindhoven geeft een benodigde slagkracht van 1150 kN. De benodigde slagkracht die volgt uit de grafiek bij een bodemprofiel voor Tiel zit in het overgangsgebied van 1150 naar 2000 kN. De NVAF/PSD-grafieken geven een stapsgewijze toename van slagkracht, maar in de praktijk zijn er ook tussenliggende niveaus mogelijk. De waardes voor de slagkracht in de NVAF/PSD-grafieken kunnen worden gezien als een bovengrens, waarbij verzekerd kan worden dat de planken tot de gewenste diepte kunnen worden geïnstalleerd. Het meer conservatieve bodemprofiel van Tiel is als uitgangspunt is genomen. Zoals hierboven genoemd, volgt uit de NVAF/PSD-grafiek van dit

¹ In het geval dat het scherm alleen een heavefunctie voor piping heeft, dan is het scherm in kunststof uitgevoerd. Echter, is er voor het installeren van een kunststof scherm ook een begeleidende stalen damwandprofiel noodzakelijk, zie paragraaf 2.3.1.

bodemprofiel dat de benodigde slagkracht in het overgangsgebied van 1.150 naar 2.000 kN zit. Er is gekozen voor een tussenliggende waarde voor de slagkracht van 1.600 kN, omdat de bovengrens van 2.000 kN zeer conservatief is. In toekomstige fases van het project kunnen de uitgangspunten verder aangescherpt worden indien dit relevant blijkt.

De NVAF/PSD-grafieken van de CUR166 (ref. 3) zijn empirisch vastgesteld. De voorspellingen voor het trillingsniveau die hieruit volgen volgens de CUR166 (ref. 3) en CUR2175 (ref. 8) leiden tot zeer conservatieve inschattingen, met name wanneer het 99 %-betrouwbaarheidsinterval wordt gehanteerd. Om deze reden wordt in deze notitie ook het trillingsniveau bepaald via een methode op basis van een artikel van Massarch (Massarsch, 1993). Hierbij wordt de benodigde bodemversnelling voor verdichting als uitgangspunt genomen in plaats van de slagkracht. Dit wordt geïntroduceerd in paragraaf 4.1.1.

2.3.1 Uitgangspunten intrillen van kunststof damwandplanken

Kunststof damwandplanken voor piping zonder stabiliteitsfunctie worden met behulp van een stalen moederplank ingetrild. Op dit moment zijn er nog geen berekeningsmodellen bekend voor het intrillen van kunststof damwandplanken. Het is onbekend of de berekeningsaanpak voor brontrillingen van stalen damwandplanken volgens de CUR166 (ref. 3) ook representatief is voor trillingspredictie als gevolg van het intrillen van kunststof damwandplanken. Echter, tijdens onderzoek voor de dijkversterking van de IJsseldijk Zwolle-Olst is er door W+B ervaring opgedaan voor het installeren van kunststof damwandplanken door middel van trillingsmetingen en analyses op de trillingendata. De resultaten hiervan geven geen aanleiding om aan te nemen dat intrillen van kunststof damwandplanken met moederplank voor significant hogere of lagere trillingen zorgen, vergeleken met het intrillen van enkel de moederplank. Daarom is er in de huidige analyse voor gekozen om dezelfde uitgangspunten te nemen voor de trillingspredictie van kunststof damwandplanken als voor stalen damwandplanken.

2.4 Panden

De grenswaarden voor trillingen waarop wordt getoetst verschillen per situatie en pand en worden vastgesteld volgens de trillingsrichtlijn SBR A (ref. 7). De beoordeling van de panden op de locaties uit tabel 2.1 is uitgevoerd door middel van resultaten uit stakeholdergesprekken met eigenaars van de panden en waarnemingen op Google Maps. Een gedetailleerd overzicht van de locaties met afbeeldingen van de panden kan worden gevonden in bijlage II.

Het pand op locatie 1a stamt uit 2009. Het is aannemelijk dat de constructie hiervan beton is en het metselwerk aan de gevels esthetisch is. Hierdoor kan dit pand volgens de SBR Trillingsrichtlijn A: schade aan bouwwerken (ref. 7) worden beschouwd als gebouwcategorie 1 (voor de categorieën zie paragraaf 4.3.2). Omdat er geen speciale factoren zijn die erop duiden dat dit pand extra trillingsgevoelig is, is op deze locatie de bouwkundige status 'normaal' aangenomen. Het type fundering is niet bekend, maar vanwege de grondopbouw is het mogelijk dat het een fundering op staal is, wat een gevoeligheid voor zettingen kan hebben. Daarom wordt dit als uitgangspunt genomen in de analyse. Het pand bevindt zich op ongeveer 15 meter vanaf de kruin van de dijk.

Op locaties 1b, 2 en 3 is sprake van panden met metselwerk in de draagconstructie. Hierdoor kunnen de panden op deze locaties volgens de SBR Trillingsrichtlijn A: schade aan bouwwerken (ref. 7) worden beschouwd als gebouwcategorie 2. Van het pand op locatie 1b is bekend dat het een bouwjaar heeft van voor 1832. Het woonhuis op Grebbedijk 34 op locatie 2 is op palen gebouwd in 2006. Uit de risicoanalyse uitgevoerd door ABT (ref. 1) volgt dat de woonhuizen op locatie 2 op Grebbedijk 30 en 30a stammen uit 1911, opgetrokken uit kloostermoppen. Zowel op locatie 2 als 3 staan er panden met lange metselwerk wanden die gevoelig zijn voor trillingen (omdat de kans groot is dat door verschilzetting sprake is van spanningsopbouw in deze wanden). Op basis van bovengenoemde argumenten is voor de panden op alle drie de locaties 1b, 2 en 3 een bouwkundige status 'gevoelig' aangenomen. Met uitzondering van twee panden op locatie 2 is er geen informatie over de fundering van de panden. Ook hier is het aannemelijk dat

er sprake kan zijn van funderingen op staal en deze aanname wordt ook genomen in de risicoanalyse door ABT (ref. 1) voor de woonhuizen op locatie 2 op Grebbedijk 30 en 30a. Alle panden bevinden zich ongeveer 20 meter vanaf de kruin van de dijk. Tenslotte bevindt zich in de dijk op locatie 3 een dijkmagazijn met een monumentale status.

3 WERKWIJZE TRILLINGSPREDICTIE EN RISICOCONTOUREN

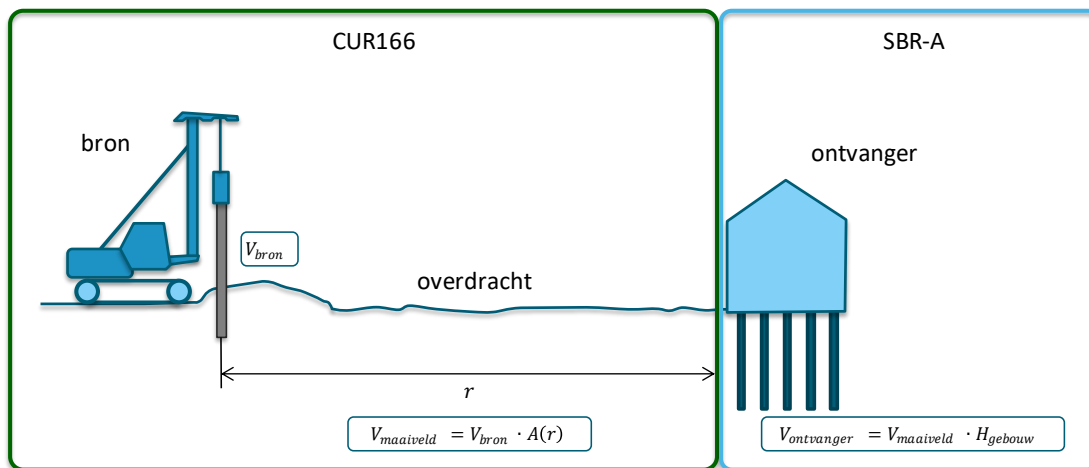
In dit hoofdstuk wordt de globale berekeningsaanpak beschreven voor de trillingspredictie en het bepalen van de risicocontouren. Deze methode en toetsing is gedaan volgens de SBR Trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken (SBRCURnet, 2017). In hoofdstuk 4 wordt dit in meer detail uitgewerkt.

De aanpak kan worden opgedeeld in de volgende onderdelen:

- 1 bepalen van de bronsterkte. Dit is afhankelijk van het planktype en de lokale grondeigenschappen;
- 2 bepalen van de trillingsoverdracht van de bron naar de ontvanger (het pand). Dit is wordt bepaald door de grondeigenschappen en is afhankelijk van de afstand;
- 3 bepalen van de trillingsniveaus in het pand;
- 4 bepalen van de grenswaardes van het pand gebaseerd op de eigenschappen van het pand en de trillingsbron;
- 5 toetsing van de berekende trillingsniveaus in het pand met de grenswaardes.

De trillingspredictie, inclusief het bepalen van de bronsterkte en de trillingsoverdracht naar het pand, is in de eerste plaats gebaseerd op de methodiek zoals beschreven in de CUR166 (ref. 3). De grenswaardes en toetsing volgen uit de richtlijnen opgesteld in de SBR deel A (ref. 7). In afbeelding 3.1 is schematisch weergegeven hoe deze twee methodieken met elkaar samenhangen en hoe ze worden gebruikt in de aanpak voor de berekening van de risicocontouren.

Afbeelding 3.1 Schematische weergave van de aanpak trillingspredictie



Bij de trillingspredictie zijn zowel het 99 %-betrouwbaarheidsinterval (gehanteerd voor schade) als het 50 %-betrouwbaarheidsinterval (verwachtingswaarde) gehanteerd voor de voorspelling van het verloop van de trillingsniveaus als functie van afstand. Dit is beschreven in paragraaf 4.1 en 4.2. Om deze predicties volgens de CUR166 (ref. 3) beter te kunnen duiden, is hiernaast aanvullend een methode gebaseerd op een artikel van Massarch (Massarsch, 1993) toegepast, zie hiervoor paragraaf 4.1.1.

Per locatie zijn er drie verschillende toetsen uitgevoerd, namelijk:

- 1 trillingsniveau snelheid op (onderdelen van) de draagconstructie op de begane grond;
- 2 trillingsniveau snelheid op fundering in het geval van een trillingsgevoelige fundering;

3 trillingsniveau versnelling op fundering in het geval van een trillingsgevoelige fundering.

De toetsingen en bijbehorende grenswaardes zijn volgens de SBR Trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken (ref. 7), wat wordt toegelicht in paragraaf 4.3. Gebaseerd op de grenswaardes en de trillingspredictie wordt per locatie de kritische afstand van de trillingsbron tot de woning bepaald waarbinnen er sprake is van een reëel risico op schade als gevolg van deze trillingsbron.

4 REKENMETHODE TRILLINGSPREDICTIE EN RISICOCONTOUREN

In dit hoofdstuk wordt de berekeningsaanpak zoals beschreven in hoofdstuk 3 in meer detail uitgewerkt. In paragraaf 4.1 en 4.2 wordt beschreven hoe respectievelijk de bronsterkte en de overdracht naar de woning zijn bepaald. Vervolgens worden het beoordelingskader voor toetsing en de grenswaardes van de panden toegelicht in paragraaf 4.3.

4.1 Brontrillingen

De CUR166 (ref. 3) en CUR2175 (ref. 8) beschrijven een relatie om het trillingsniveau nabij de trillingsbron te bepalen, gebaseerd op een empirisch model. Hierbij wordt het trillingsniveau op een referentieafstand $V_{0,corr}$ op basis van de slagkracht bepaald. Deze referentieafstand is doorgaans vijf meter. De relatie luidt als volgt:

$$V_{0,corr} = \eta[v_0 + c_{vel}(F - 350)],$$

Waarbij F de benodigde slachtkracht is voor het inbrengen van de damwand. De slagkracht is vastgesteld op een waarde van 1600 kN, zoals beschreven in paragraaf 2.3. De referentiewaarde trillingssnelheid v_0 en de correctiefactor c_{vel} volgen uit empirische relaties. tabel 4.1 geeft de waardes van deze parameters voor de 50%- en 99%-betrouwbaarheidsindices voor de typische grondprofielen van Eindhoven en Tiel. Er is in dit geval gekozen voor het grondprofiel van Tiel, omdat deze de meest conservatieve uitkomst geeft. Ten slotte is η de efficiëntie van de overbrenging van de slagkracht, met een typische waarde van 0.9.

Tabel 4.1 Referentiewaarden op een afstand van 5 meter

Bodemprofiel	50 %	c_{vel} [mm/s/kN]	99 %	c_{vel} [mm/s/kN]
	v_0 [mm/s]		v_0 [mm/s]	
Eindhoven	1,9	0,002	8,1	0,008
Tiel	1,6	0,002	9,3	0,012

4.1.1 Massarch approach

De voorspellingen voor het trillingsniveau volgens de CUR166 (ref. 3) en CUR2175 (ref. 8) zijn empirisch vastgesteld. In het geval bij schadepredictie wordt het 99 %-betrouwbaarheidsinterval gehanteerd, wat zeer conservatieve predicties geeft. Een methode gebaseerd op een artikel van Massarch (ref. 4) geeft een fysieke predictie van de bovengrens van de trillingssnelheden die behaald kunnen worden. Hierbij wordt gekeken wat de benodigde bodemversnelling voor verdichting is en dit wordt aangenomen als bronsterkte. Het blijkt dat bij waardes van de bodemversnelling hoger dan 0,3 g (valversnelling) er sterke vervorming van de bodem plaatsvindt, wat zorgt voor een sterke damping van de trillingen. Deze verdichtingszone heeft een lengte van ongeveer 1 meter. Fysisch gezien is de trillingsversnelling op een referentieafstand van 1 meter van de bron dus maximaal 0,3 g, wat correspondeert met een bronsterkte van $V_{0,corr} = 15,6$ mm/s (ref. 5).

4.2 Overdracht door ondergrond

De trillingen die ontstaan bij de bron verspreiden zich via de bodem, waarbij de trillingsamplitude afneemt door zowel geometrische demping en materiaal demping. De CUR166 (ref. 3) geeft de volgende overdrachtsrelatie waarin deze twee dempingen zijn gecombineerd:

$$A(r) = \sqrt{\frac{R_0}{R}} \exp(-\alpha(R - R_0)).$$

Hierbij is $V_{0,corr}$ de trillingssterkte op een referentieafstand R_0 en α is de frequentieafhankelijke materiaaldemping. Bij een bronfrequentie van 30 Hz en voortplantingssnelheid van 250 m/s (uitgaande van vastgepakt zand) is deze waarde gelijk aan 0,0075. De bovenstaande relatie geldt voor oppervlakte golven die worden veroorzaakt door een puntbron. Dicht bij de trillingsbron (typisch binnen een afstand van 45 meter) zullen ook andere type golven invloed hebben op het totale trillingsniveau. Om rekening te houden met deze onzekerheid is een correctiefactor γ_v toegepast in het beoordelingskader (zie paragraaf 9).

De trillingen worden vanaf de bodem overgedragen naar de fundatie. Dit leidt tot een trillingsamplitude in de fundatie v_{top} die wordt gegeven door:

$$v_{top} = v_{bron} \cdot A(r) \cdot H_{gebouw},$$

Waarbij de overdracht coëfficiënt H_{gebouw} een standaard waarde van 0,7 heeft.

In eerdere projecten is gebleken dat bovengenoemde overdrachtsrelatie in het dijklichaam soms niet representatief kan blijken. Daarom is extra voorzichtigheid nodig op locaties waar sprake is van panden in of direct tegen het dijklichaam.

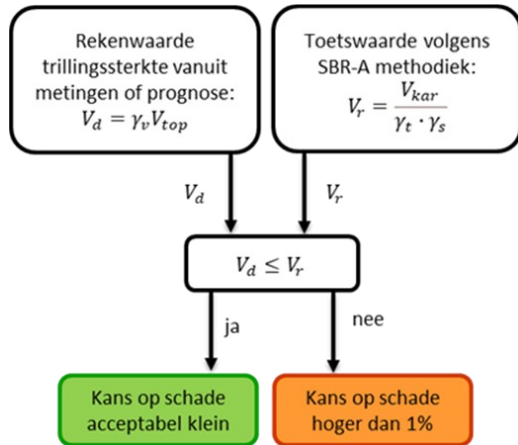
4.3 Beoordelingskader en grenswaarden

Het risico op schade aan panden als gevolg van de berekende trillingen uit paragraaf 4.1 en 4.2 wordt getoetst volgens de SBR-richtlijn deel A (ref. 7). In paragraaf 4.3.1 wordt het beoordelingskader voor de toetsing gegeven. Vervolgens geeft paragraaf 4.3.2 aan welke grenswaarden zijn gebruikt.

4.3.1 Beoordelingskader

In afbeelding 4.1 is schematisch weergegeven wat de procedure is voor beoordeling van de kans op schade. De trillingssterkte v_{top} op het te toetsen onderdeel volgt uit de predictie als beschreven in de vorige paragrafen en wordt vermenigvuldigd met een partiële veiligheidsfactor γ_v . Deze bedraagt 1,6 in het geval van een indicatieve meting. In het geval dat de trillingssterkte v_d lager is dan de grenswaarde v_r , is de kans op schade acceptabel klein (in de orde grootte 1 % of minder). Hierbij wordt een betrouwbaarheidsinterval van 99 % gehanteerd.

Afbeelding 4.1 Beoordelingskader voor kans op schade



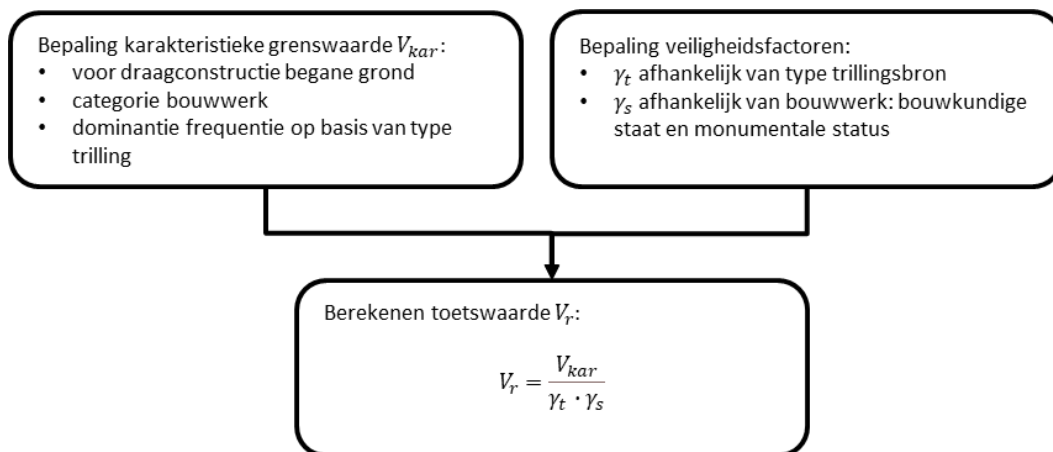
4.3.2 Grenswaarden

De grenswaarde v_r hangt af van de staat en gevoeligheid van het bouwwerk en het type trillingsbron:

$$v_r = \frac{v_{kar}}{\gamma_s \cdot \gamma_t}$$

Waarbij v_{kar} de karakteristieke grenswaarde aan, γ_s de partiële veiligheidsfactor voor het type trillingsbron en γ_t de partiële veiligheidsfactor voor de bouwkundige staat en de monumentale status aangeeft. Een schematische weergave van hoe de grenswaarde wordt bepaald is gegeven in afbeelding 4.2.

Afbeelding 4.2 Schematische weergave voor de bepaling van de grenswaarde v_r .



Het SBR-A schrijft in totaal vier toetsen voor, zijnde:

- 1 toets voor schade bij de hoofdconstructie;
- 2 toets voor schade bij bovenste verdieping en onderdelen;
- 3 toets op schade bij de fundering op basis van trillingssnelheid van de grond;
- 4 toets op schade bij de fundering op basis van grondversnelling.

In deze analyse is de tweede toets voor schade van trillingen op de bovenste verdieping en onderdelen die niet tot de draagconstructie behoren niet uitgevoerd, voornamelijk omdat hiervoor gedetailleerde kennis over de panden benodigd is. Voor de panden in deze analyse zijn de grenswaarden van deze toets hoger

dan andere grenswaarden, wat een gebruikelijke aanname is in dit stadium van het project. Het is echter niet volledig uit te sluiten dat schade bij bovenste verdieping en onderdelen een rol zou kunnen spelen vanwege mogelijke opslingeringeffecten, waarbij de trillingen worden versterkt bij de overdracht van de hoofdconstructie naar de vloeren en andere onderdelen die niet tot de draagconstructie behoren.

In het geval dat de fundering van een bouwwerk trillingsgevoelig is bestaat er kans op zettingen en moeten toets 3 en 4 worden uitgevoerd. Er wordt hiervan gesproken in het geval panden op staal gefundeerd zijn of fundering op palen hebben die (1) niet-grondverdringend zijn, (2) kleefpalen zijn of (3) drukkend zijn ingebracht en op een niet zeer vaste zandlaag staan. In dit geval wordt de trillingssnelheid van de grond ($= v_{top}$ zonder overdrachtscoëfficiënt naar het pand) en de corresponderende grondversnelling getoetst. Zoals genoemd in paragraaf 2.4 zou bij de panden op de locaties in deze analyses sprake kunnen zijn van trillingsgevoelige funderingen.

De SBR-richtlijn deel A (ref. 7) maakt onderscheid in twee verschillende categorieën bouwwerken, zoals weergegeven in tabel 4.2. Verder wordt een eventuele monumentale status en de bouwkundige staat meegenomen in de veiligheidsfactor γ_s . In het geval dat er sprake is van een monumentaal pand en/of een gevoelige bouwkundige staat is geldt er een waarde van $\gamma_s = 1,7$. In alle andere gevallen geldt een veiligheidsfactor van $\gamma_s = 1$. Een pand wordt beschouwd als 'gevoelig' wanneer:

- bouwwerken of onderdelen een verminderde sterkte hebben;
- bouwwerken of onderdelen extra initiële spanning hebben. Dit betekent dat ze voorafgaand aan de trilling al onder spanning staan, bijvoorbeeld in het geval van lange metselwerken in combinatie met verschildozetting.

Tabel 4.2 Overzicht indeling van categorieën bouwwerken zoals beschreven in de SBR deel A (ref. 7)

Categorie	Omschrijving
1	- onderdelen van de draagconstructie, indien deze bestaan uit gewapend beton of hout - onderdelen van een bouwwerk die geen deel uitmaken van de draagconstructie, indien deze bestaan uit gewapend beton of hout - draagconstructies van bouwwerken die geen gebouw zijn en bestaan uit metselwerk
2	- onderdelen van de draagconstructie van een gebouw, indien deze bestaan uit metselwerk - onderdelen van een gebouw die niet tot de draagconstructie behoren, die bestaan uit niet-gewapend beton, metselwerk of uit brosse steenachtige materialen

Het type trilling kan kortdurend, herhaald kortdurend of continu zijn. Dit is meegenomen in de veiligheidsfactor γ_t bij de beoordeling van risico op schade. Hierbij wordt onderscheid gemaakt of het gaat om een toetsing van draagconstructie begane grond of toetsing van een trillingsgevoelige fundering, zie hiervoor tabel 4.3. Voor intrillen van damwanden is sprake van een 'continue' trilling.

Tabel 4.3 Veiligheidsfactoren voor het type trillingsbron zoals beschreven in de SBR deel A (ref. 7)

Type trilling	Omschrijving	Waarde γ_t Draagconstructie begane grond	Waarde γ_t Trillingsgevoelige fundering
kortdurend	explosie, vallende constructie	1,0	1,0
herhaald kortdurend	heien, sloophamers, weg- en railverkeer	1,5	1,6
continu	intrillen palen/damwanden, verdichten door middel van trilwalsen	2,5	2,0

Voor de toetsing van draagconstructie begane grond worden de karakteristieke grenswaarden v_{kar} bepaald met behulp van de gebouwcategorie en de dominante trillingsfrequentie. Voor een frequentie van 30 Hz (zie paragraaf 2.3) en gebouwcategorie 2 (zie paragraaf 2.4) geldt een grenswaarde $v_{kar} = 10$ mm/s.

In het geval dat er een toetsing van een trillingsgevoelige fundering kunnen karakteristieke grenswaarden v_{kar} als volgt worden bepaald:

$$v_{kar} = 10 \cdot C_D,$$

Waarbij C_D wordt bepaald door de dikte van de zettingsgevoelige laag H (met een maximum van 8 meter):

$$C_D = 1 + \frac{8 - H}{7}.$$

Als zettingsgevoelige laag is uitgegaan van de dikte van losgepakte zandlagen in de bodemsamenstelling van de sondering het dichtst bij de woningen op de locaties die zijn beschouwd in deze analyse. Hieruit is vastgesteld dat het gaat om een dikte van ongeveer $H = 2$ meter.

De karakteristieke grenswaarde voor de trillingsversnelling voor een toetsing van een trillingsgevoelige fundering is typisch $1,0 \text{ m/s}^2$, volgens de SBR-A richtlijn.

5 BEREKENINGSMETHODEN

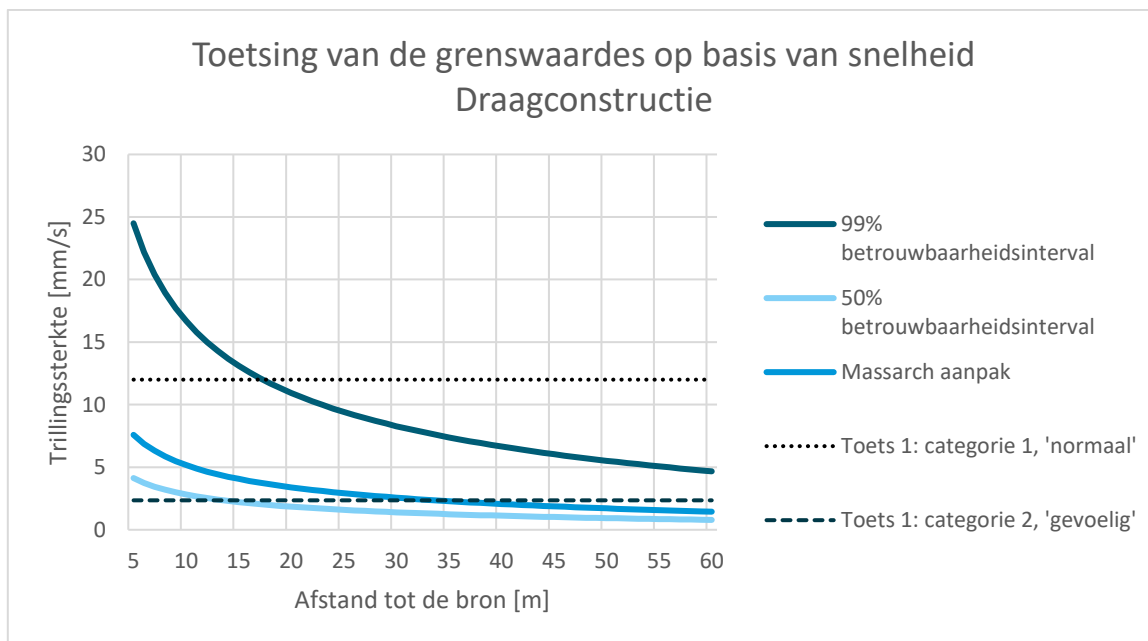
De predicties van de trillingssterkte als functie van de afstand worden getoetst aan de grenswaarden zoals beschreven in hoofdstuk 4. Dit is gedaan voor de drie toetsen genoemd in hoofdstuk 3: (1) trillingsniveau snelheid draagconstructie, (2) trillingsniveau snelheid trillingsgevoelige fundering en (3) trillingsniveau versnelling trillingsgevoelige fundering. De trillingssterkte op de fundering voor het 99 %- en 50 %-betrouwbaarheidsinterval en volgens de Massarch aanpak samen met de grenswaarden van toets 1 (zoals benoemd in hoofdstuk 3) staan weergegeven in afbeelding 5.1. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de grenswaarde voor een pand van categorie 1 met een bouwkundige status 'normaal' (locatie 1a) en de grenswaarde voor een pand van categorie 2 met een bouwkundige status 'gevoelig' (locatie 1b, 2 en 3). De trillingssnelheid en trillingsversnelling in de grond voor het 99 %- en 50 %-betrouwbaarheidsinterval en volgens de Massarch aanpak samen met de grenswaarde van toets 3 staan weergegeven in respectievelijk afbeelding 5.2 en afbeelding 5.3. Hiervoor zijn de grenswaarden op alle locaties gelijk.

Op basis van afbeelding 5.1 en afbeelding 5.3 kan de kritische afstand worden bepaald. Deze is gedefinieerd als de afstand waarbij het trillingsniveau als gevolg van het intrillen van de damwand gelijk is aan de grenswaarde. Deze staan weergegeven in tabel 5.1. Uit de resultaten blijkt dat toets 3 de maatgevende toets is voor het bepalen van de risicocontouren op locatie 1a (categorie 1, 'normaal'). Voor het panden op locatie 1b, 2 en 3 (categorie 2, 'gevoelig') is toets 1 de maatgevende toets.

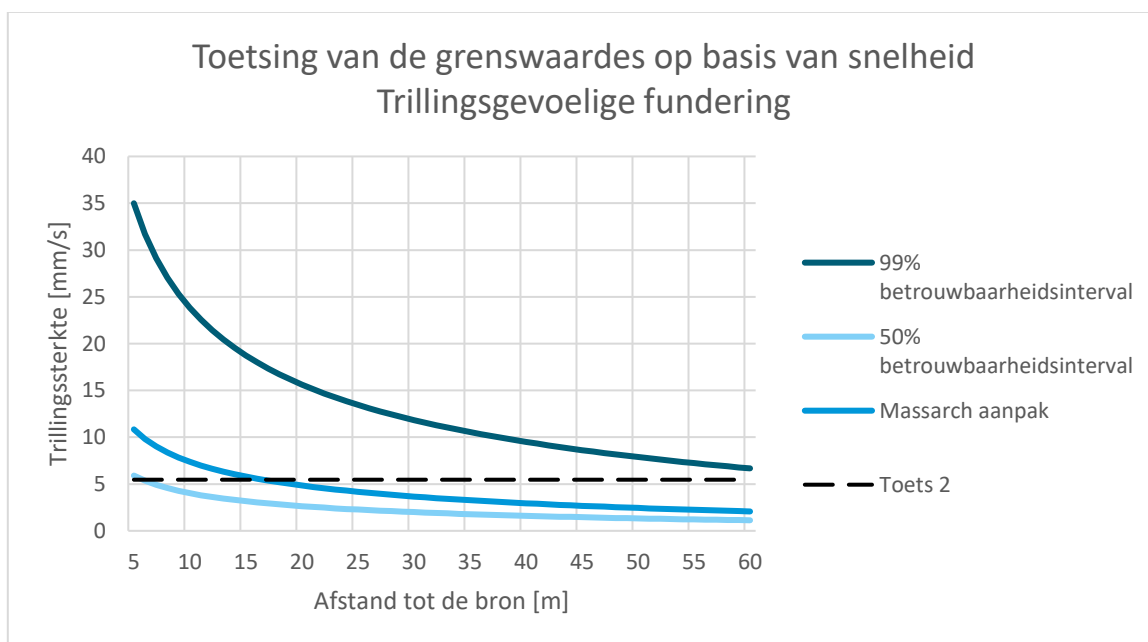
Tabel 5.1 Kritische afstanden die volgen uit de trillingsanalyse voor de 3 toetsen (zoals benoemd in hoofdstuk 3)

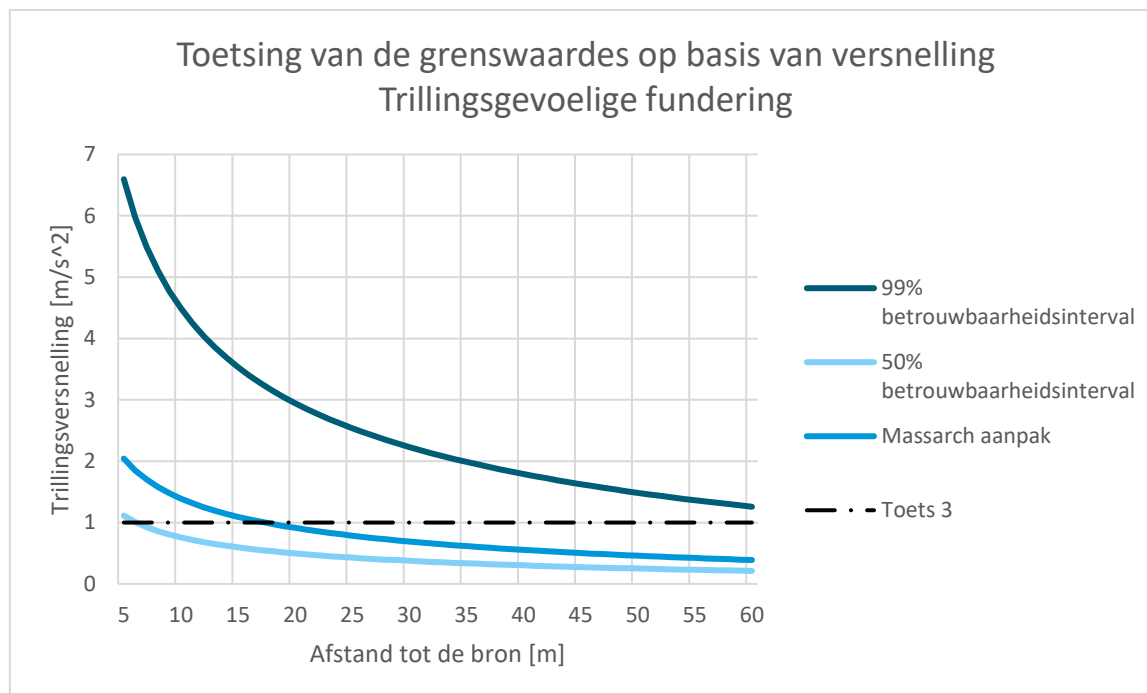
Omschrijving	Kritische afstand [m]			
	Toetsing 1 Categorie 1 'normaal'	Toetsing 1 Categorie 2 'gevoelig'	Toetsing 2	Toetsing 3
99 %-betrouwbaarheidsinterval	18	> 50	> 50	> 50
50 %-betrouwbaarheidsinterval	< 5	14	6	7
Massarch aanpak	< 5	34	17	18

Afbeelding 5.1 Trillingsniveau op fundering van het pand bij intrillen van damwandplanken



Afbeelding 5.2 Trillingsniveau in de grond bij intrillen van damwandplanken





6 CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

6.1 Conclusies

In deze notitie zijn de berekeningsaanpak, uitgangspunten en berekende risicocontouren gepresenteerd voor het intrillen van dubbele damwanden van type AZ24-700 op drie verschillende locaties (zie paragraaf 2.1) langs de Grebbedijk. Een belangrijk uitgangspunten hierbij was dat op alle drie de locaties het grondprofiel vergelijkbaar is. Op locatie 1a is er sprake van een normaal pand van gebouwcategorie 1 en op locatie 1b, 2 en 3 van monumentale en/of trillingsgevoelige panden van gebouwcategorie 2. Daarnaast is de aanname gedaan dat bij het intrillen van kunststof damwandplanken dezelfde uitgangspunten kunnen worden gebruikt als bij stalen damwandplanken.

Uit de resultaten volgt dat voor locatie 1a toets 3 (= trillingsniveau versnelling trillingsgevoelige fundering zoals benoemd in hoofdstuk 3) de maatgevende toets is voor het bepalen van de risicocontouren. Op locatie 1b, 2 en 3 is toets 1 (= trillingsniveau snelheid op de draagconstructie, zoals benoemd in hoofdstuk 3) de maatgevende toets. De kritische afstanden voor deze toetsen voor het 99 %- en 50 %-betrouwbaarheidsinterval en volgens de Massarch aanpak staan weergegeven in tabel 6.1.

Tabel 6.1 Kritische afstanden die volgen uit de trillingsanalyse

Omschrijving	Kritische afstand [m] Categorie 1, 'normaal'	Kritische afstand [m] Categorie 2, 'gevoelig'
99 %-betrouwbaarheidsinterval	> 50	> 50
50 %-betrouwbaarheidsinterval	7	14
Massarch aanpak	18	34

6.2 Aanbevelingen

Wanneer de richtlijnen van de CUR166 (ref. 3) en SBR deel A (ref. 7) worden gevolgd met een 99 %-betrouwbaarheidsinterval en de uitgangspunten zoals benoemd in deze notitie is het niet mogelijk om de damwandconstructies met behulp van intrillen te installeren binnen de vastgestelde normen. Echter, de predictie van de bronsterkte op basis van de CUR166 met een 99 %-betrouwbaarheidsinterval is conservatief. De predictie met 50 %-betrouwbaarheidsinterval op basis van de CUR166 geeft een verwachtingswaarde gebaseerd op empirische waarnemingen. Hier zit echter een onzekerheid in, mede door locatie-afhankelijke factoren, waardoor in realiteit de trillingswaardes hoger uit kunnen vallen. In beide predicties op basis van de CUR166 wordt geen rekening gehouden met een fysische beschouwing door onder andere bodemdemping door verdichting dicht bij de trillingsbron. De predicties die volgen uit de aanpak van Massarch geven een realistischer beeld van de fysieke verwachting van de trillingssnelheden vlak bij de bron. Deze uitkomsten gaan richting de uitkomsten van de predicties van de bronsterkte op basis van de CUR166 bij een 50 %-betrouwbaarheidsinterval, maar hanteren een conservatiever uitgangspunt. Om deze redenen is de predictie volgens de aanpak van Massarch als maatgevend voor de trillingscontouren gekozen.

Onzekerheden in de predicties zouden kunnen worden verkleind door:

- uitwerken van verdere details van de ontwerpplannen en het beoogde materieel;
- een (bouwkundige) inspectie van de panden op de locaties wat betreft gevoeligheid voor trillingen;
- praktijkproef voor de trillingen in dit type bodemsamenstelling en aanvullend voor het intrillen van kunststofdamwanden.

Op locatie 1a is het advies om binnen een straal van 18 meter over te gaan op een trillingsarme techniek voor het installeren van de damwanden. Indien kan worden vastgesteld dat het pand een fundering op palen heeft, zijn de trillingscontouren uit toetsing 1 van toepassing en is er geen directe aanleiding om aan te nemen dat er grote kans op schade is.

Op locaties 1b, 2 en 3 is het advies is om binnen een straal van 34 meter over te gaan op een trillingsarme techniek. Op alle drie de locaties bevinden de panden zich op ongeveer 20 meter van de trillingsbron. Extra voorzichtigheid is geadviseerd bij panden in of direct tegen het dijklichaam (onder andere het dijkmagazijn op locatie 3). Op basis van metingen in eerdere projecten is gebleken dat de overdrachtsrelatie voor trillingen in het dijklichaam soms niet representatief is en er hogere trillingswaardes kunnen worden gedetecteerd.

Een uitvoeringstechniek voor het intrillen van damwanden die trillingen zou kunnen reduceren is fluïderen. Op basis van expert oordeel en ervaring zou dit bij juiste uitvoering kunnen leiden tot 30 procent reductie van het trillingsniveau. Ondanks dat aanscherping van de onzekerheden en aanpassingen in uitvoering zouden kunnen leiden tot een lagere kritische afstand, is het goed mogelijk dat de panden op de geanalyseerde locaties naderhand nog steeds binnen de risicocontouren vallen. In dat geval wordt opnieuw geadviseerd over te gaan op een trillingsarme techniek voor de dijkversterking.

7 REFERENTIES

- Ref. 1 ABT. (2020). *Risico-analyse Dijkversterking Grebbedijk*. Referentiecode: 17700.
- Ref. 2 ArcelorMittal. (n.d.). AZ 24-700. Opgehaald van <https://sheetpiling.arcelormittal.com/products/az-24-700/>
- Ref. 3 CUR Bouw & Infra. (2012). *166 Damwandconstructies* (6 ed.). Gouda: CURNET.
- Ref. 4 Massarsch, K. R. (1993). Man-Made Vibrations and Solutions. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, (p. 6). Opgehaald van <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/3icchge/3icchge-session15/6>
- Ref. 5 Nijs, R. d. (2003). Het trillen van damwanden in granulaire bodem. *Geotechniek*, 56-64.
- Ref. 6 Rijnveld, B., & Snethlage, A. (2014). Aanscherping trillingsprognoses met nauwkeuriger bepaalde veiligheidsfactoren. *Geotechniek, Oktober*, 37-40
- Ref. 7 SBRCURnet. (2017). SBR Trillingsrichtlijn A: Schade aan bouwwerken: 2017. Delft: SBRCURnet
- Ref. 8 SBRCURnet commissie. (2017). *2175 Omgevingsbeïnvloeding inbrengen en trekken van damwanden, Praktijkrichtlijn*. Delft: SBRCURnet.

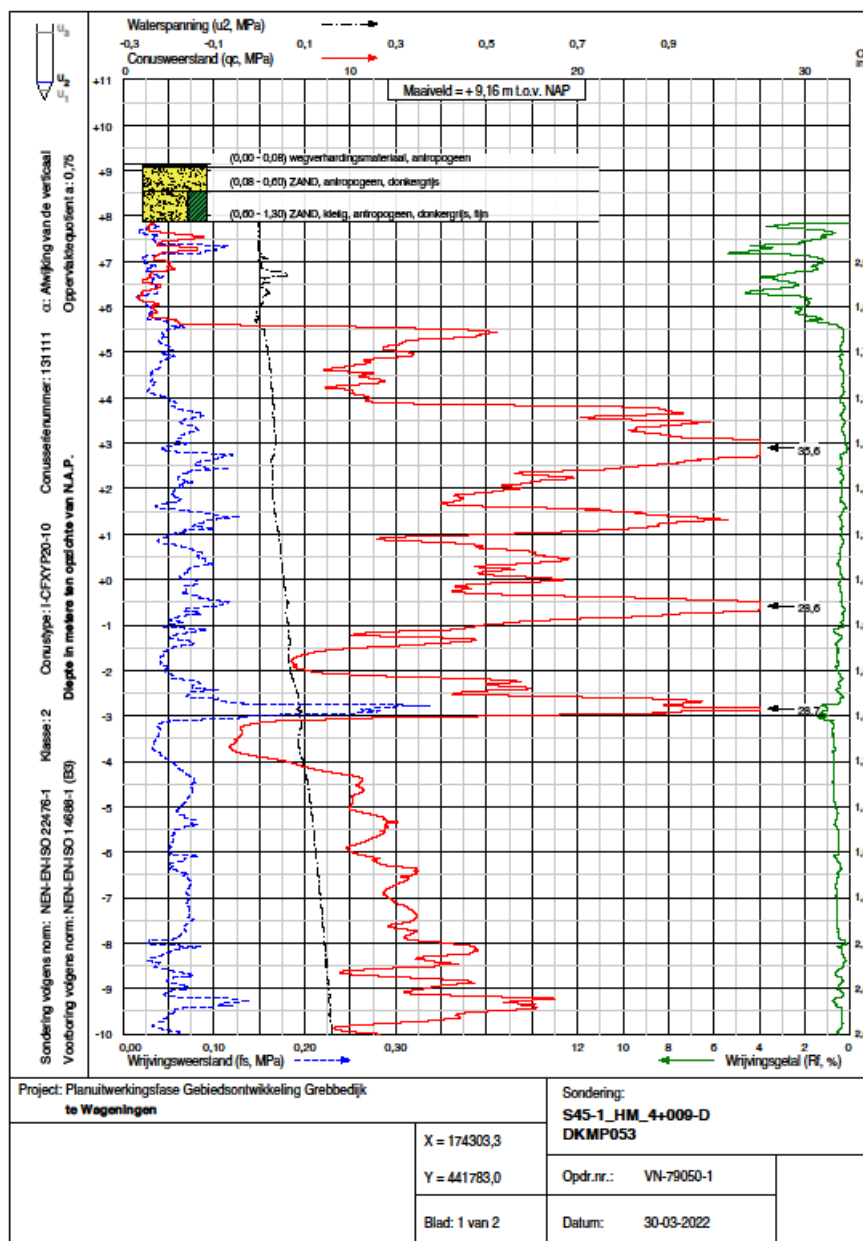


BIJLAGE: SONDERINGEN

Deze bijlage bevat onderstaand de volgende sonderingen:

- 1 **DKMP053** - bodemprofiel binnenteen op locatie 1a;
- 2 **HTP_3.0_KR** - bodemprofiel dijkkruijn op locatie 1b;
- 3 **DKMP056** - bodemprofiel binnenteen op locatie 1b;
- 4 **DKMP112** - bodemprofiel dijkkruijn op locatie 2;
- 5 **DKMP114** - bodemprofiel binnenteen op locatie 2;
- 6 **DKMP145** - bodemprofiel dijkkruijn op locatie 3;
- 7 **DKMP147** - bodemprofiel binnenteen op locatie 3.

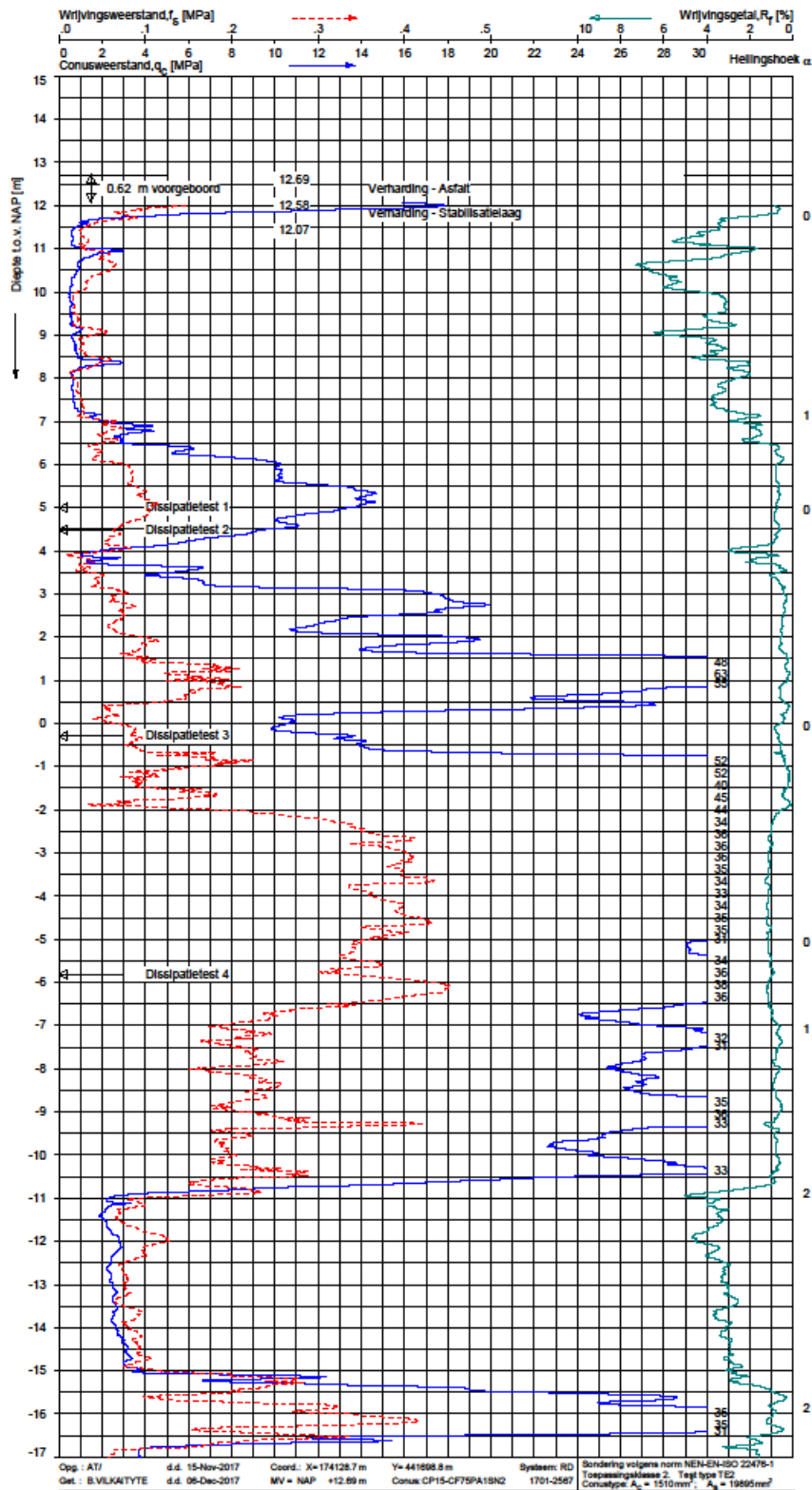
Deze sonderingen bevinden zich het dichtst bij de woningen op de locaties en zijn daarom als maatgevende gehanteerde sonderingen meegenomen in de analyse.



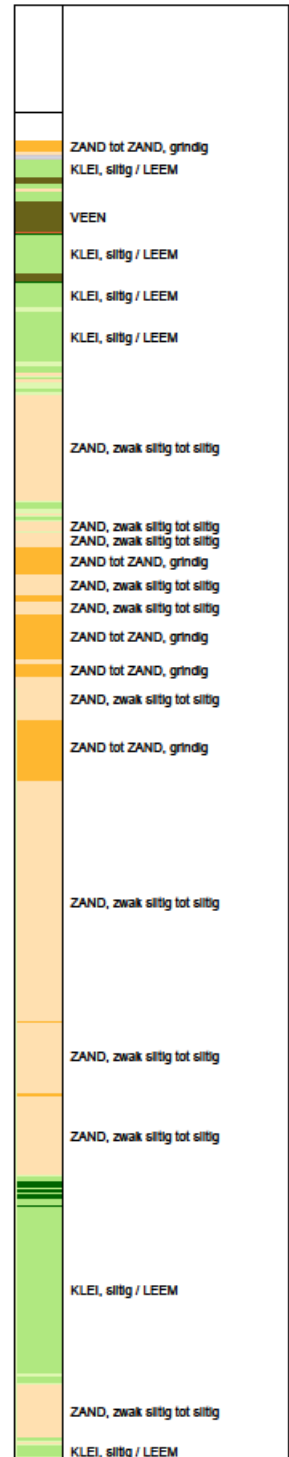
U:\PROJECTS\1217-0035-231\1217-0035-231-01-00-01-01

1217-0035-231

HPT_3.0_KR-1

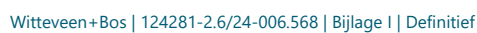


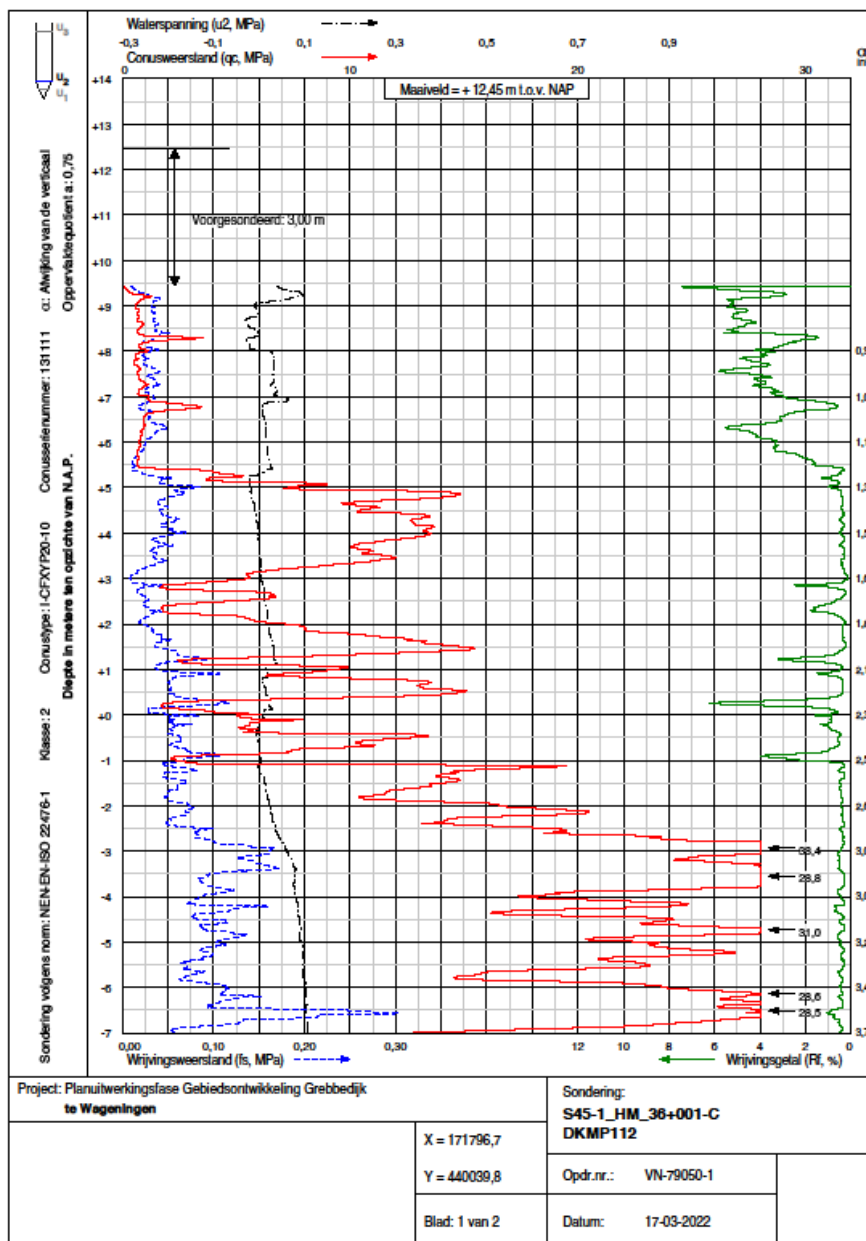
Indicatieve bodembeschrijving
 Automatisch gegenereerd uit data van de sondering, geldig onder grondwaterpeil (Robertson 1990, NL corr.)

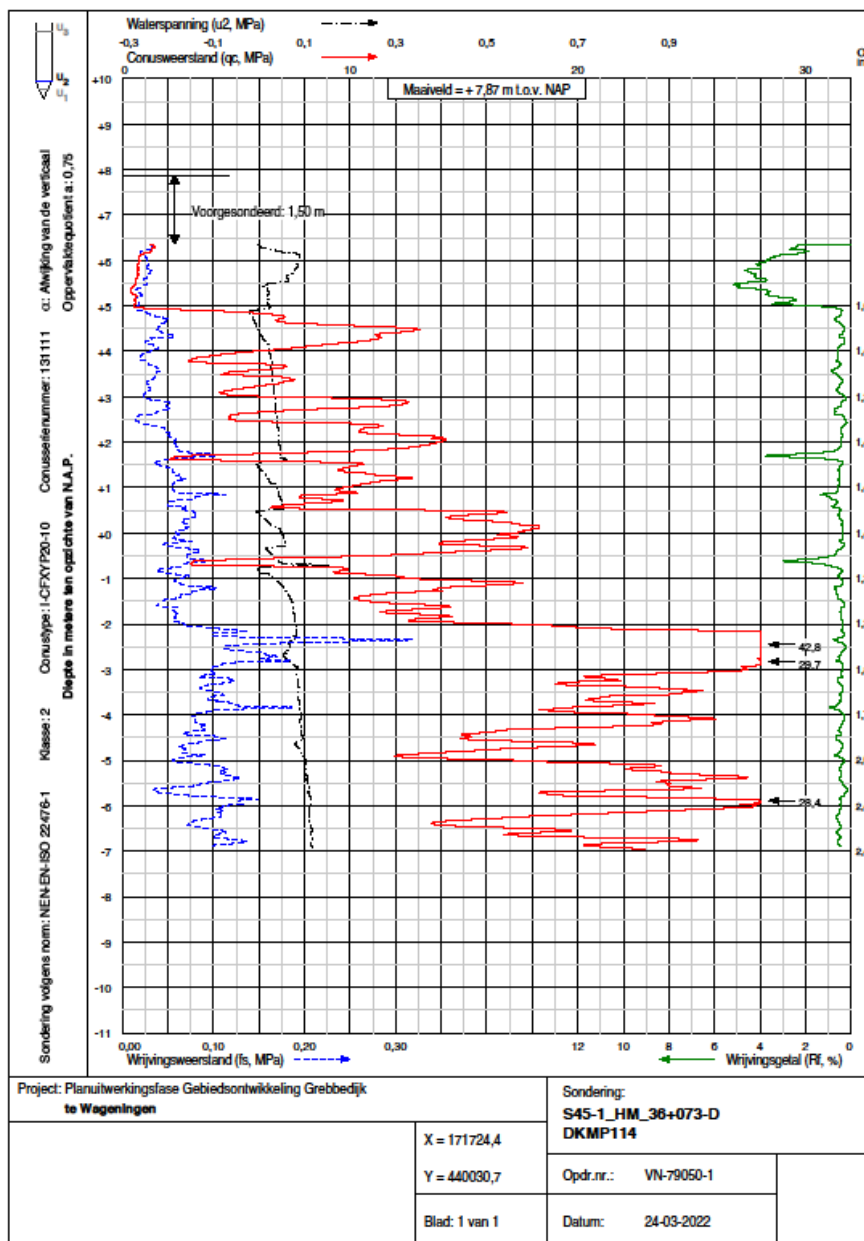


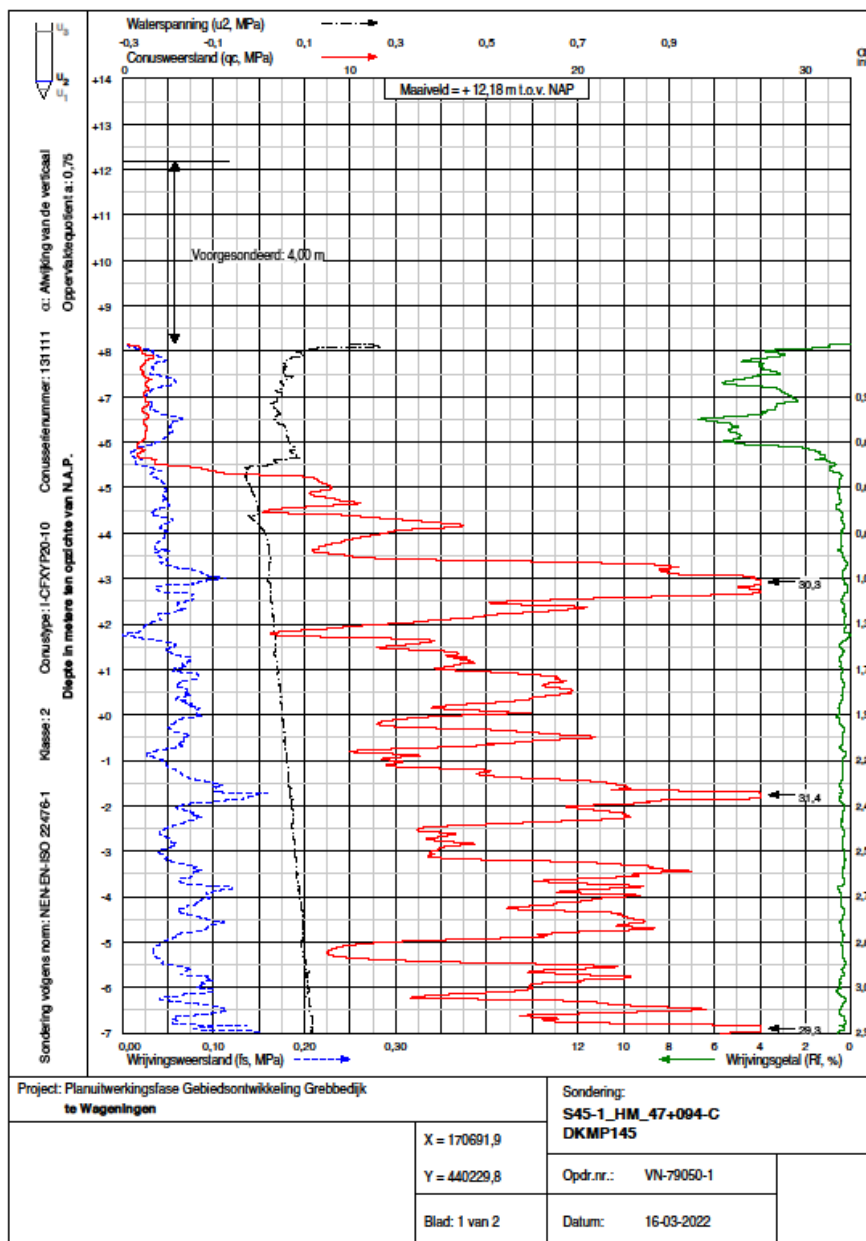
SONDERING MET PLAATSELIJKE KLEEFMETING
 VERKENNING GREBBEDIJK

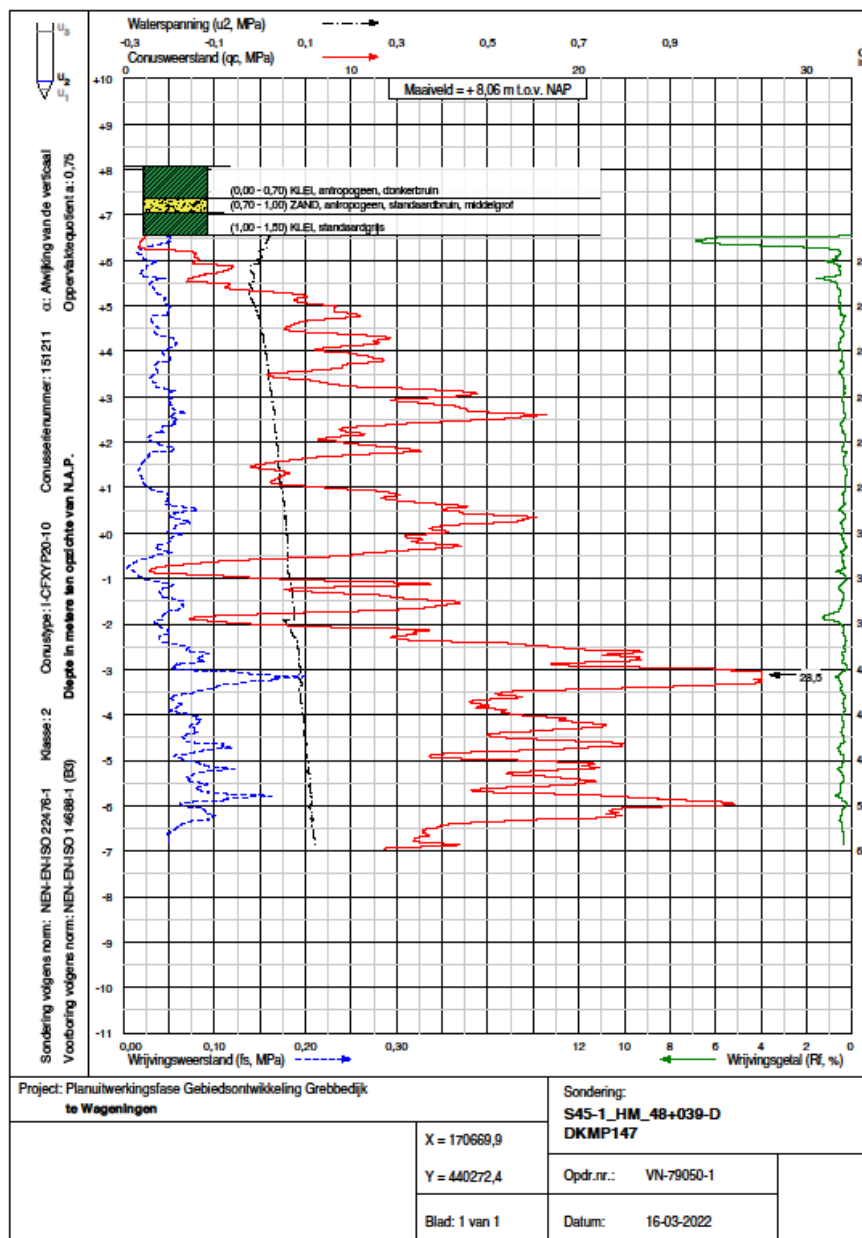
Opdr. 1217-0035-231
 Sond. HPT_3.0_KR











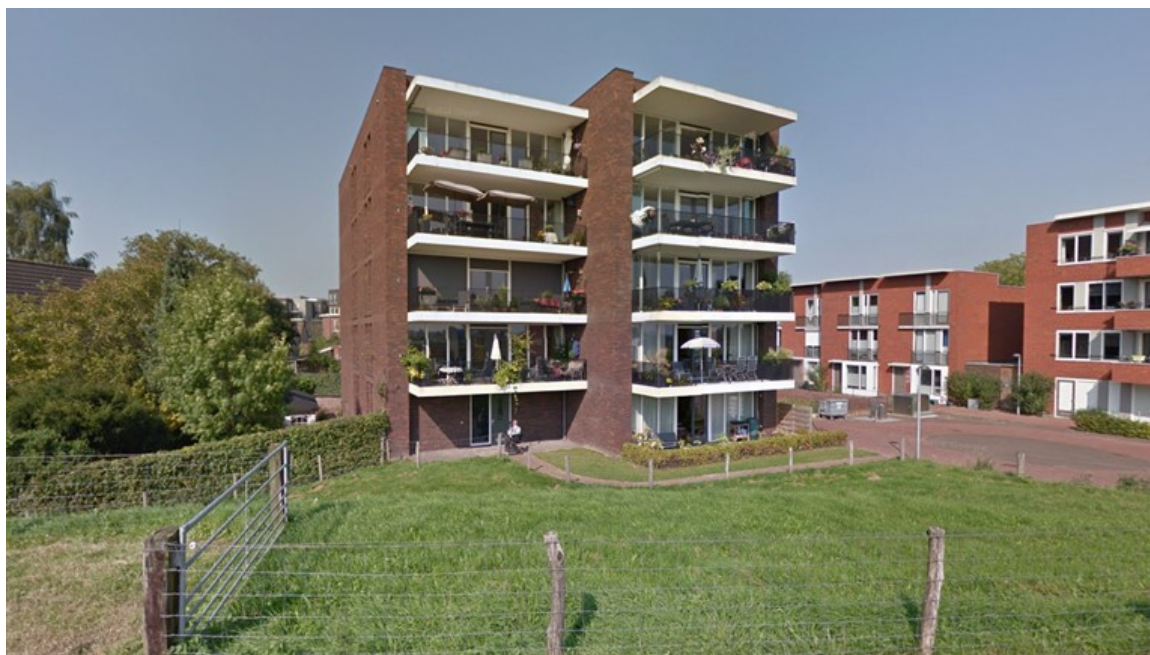


BIJLAGE: PANDEN

Afbeelding II.1 Luchtfoto van locatie 1a, omcirkeld is het pand waarvoor een trillingspredictie wordt gedaan



Afbeelding II.2 Foto van het pand op locatie 1a waarvoor een trillingspredictie wordt gedaan



Afbeelding II.3 Luchtfoto van locatie 1b, omcirkeld is het pand waarvoor een trillingspredictie wordt gedaan



Afbeelding II.4 Foto van het pand op locatie 1b waarvoor een trillingspredictie wordt gedaan



Afbeelding II.5 Luchtfoto van locatie 2, omcirkeld zijn de panden waarvoor een trillingspredictie wordt gedaan



Afbeelding II.6 Foto van de panden op locatie 2 waarvoor een trillingspredictie wordt gedaan



Afbeelding II.7 Luchtfoto van locatie 3, omcirkeld zijn de panden waarvoor een trillingspredictie wordt gedaan



Afbeelding II.8 Foto van de panden op locatie 3 (grote cirkel afbeelding) waarvoor een trillingspredictie wordt gedaan



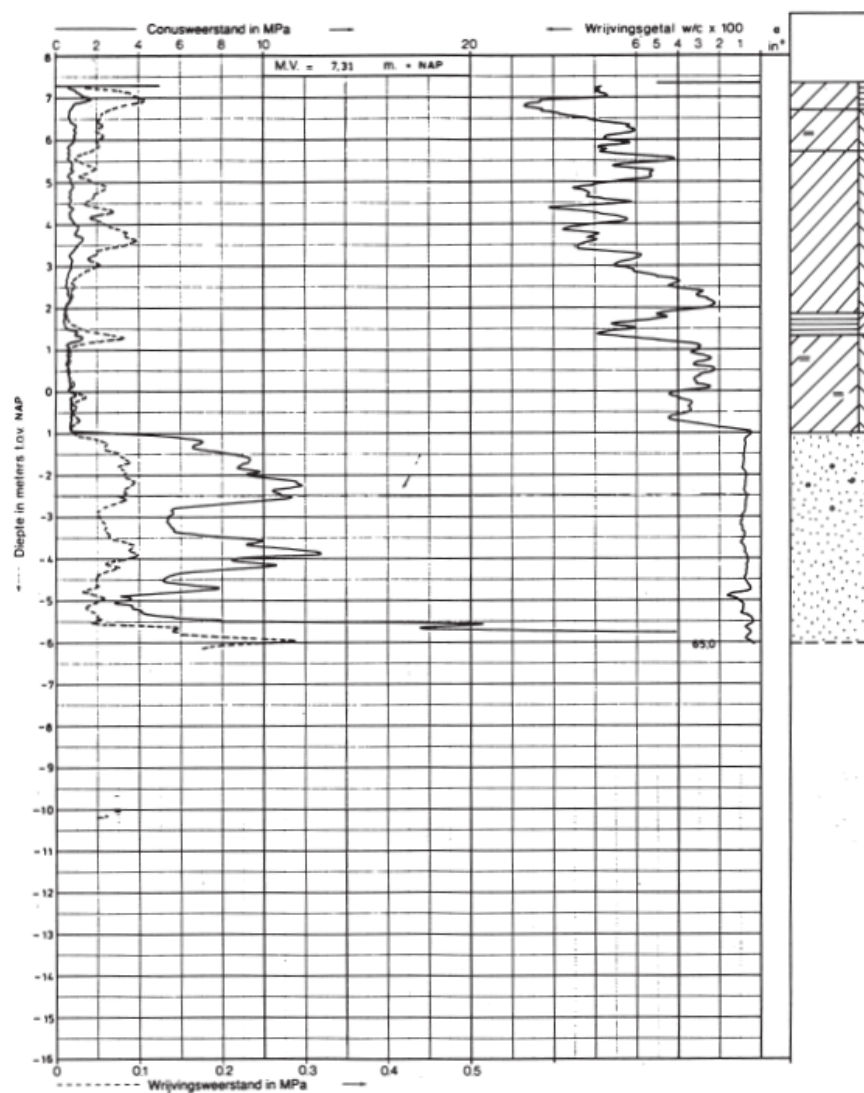
Afbeelding II.9 Foto van het dijkmagazijn op locatie 3 (kleine cirkel afbeelding) waarvoor een trillingspredictie wordt gedaan



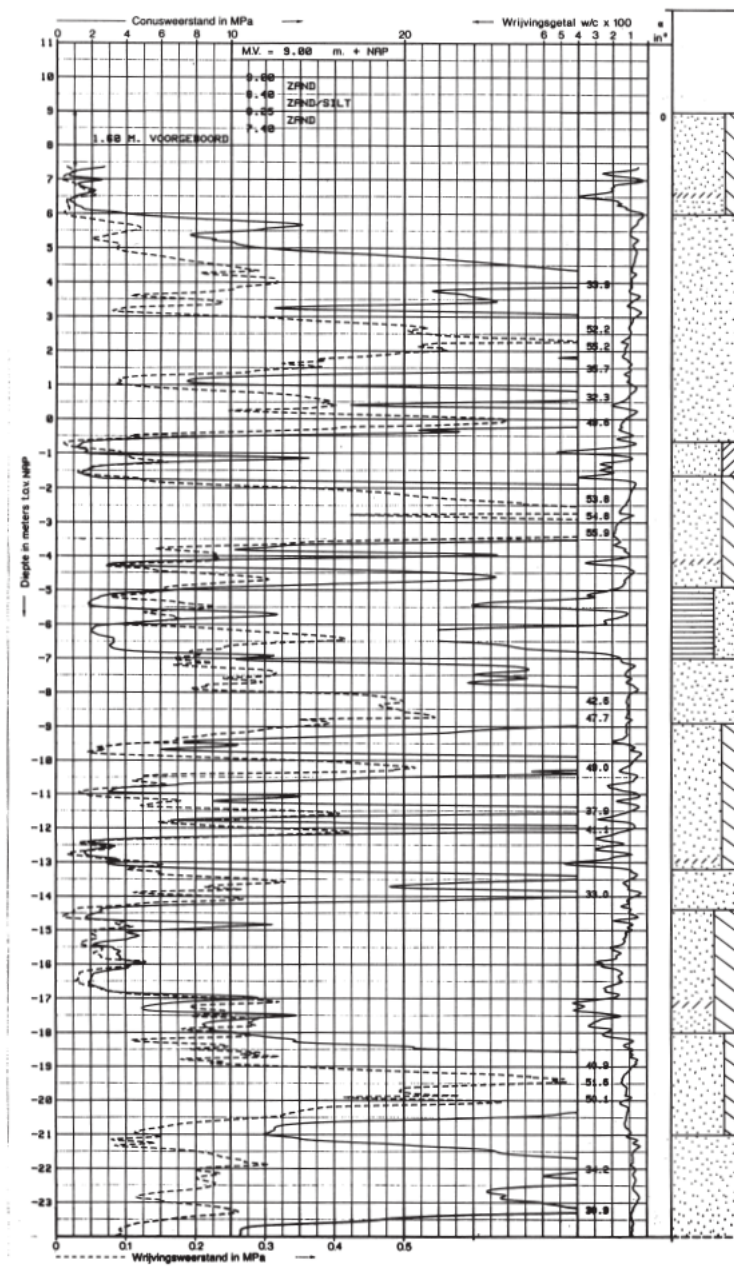


BIJLAGE: BODEMPROFIELEN CUR166

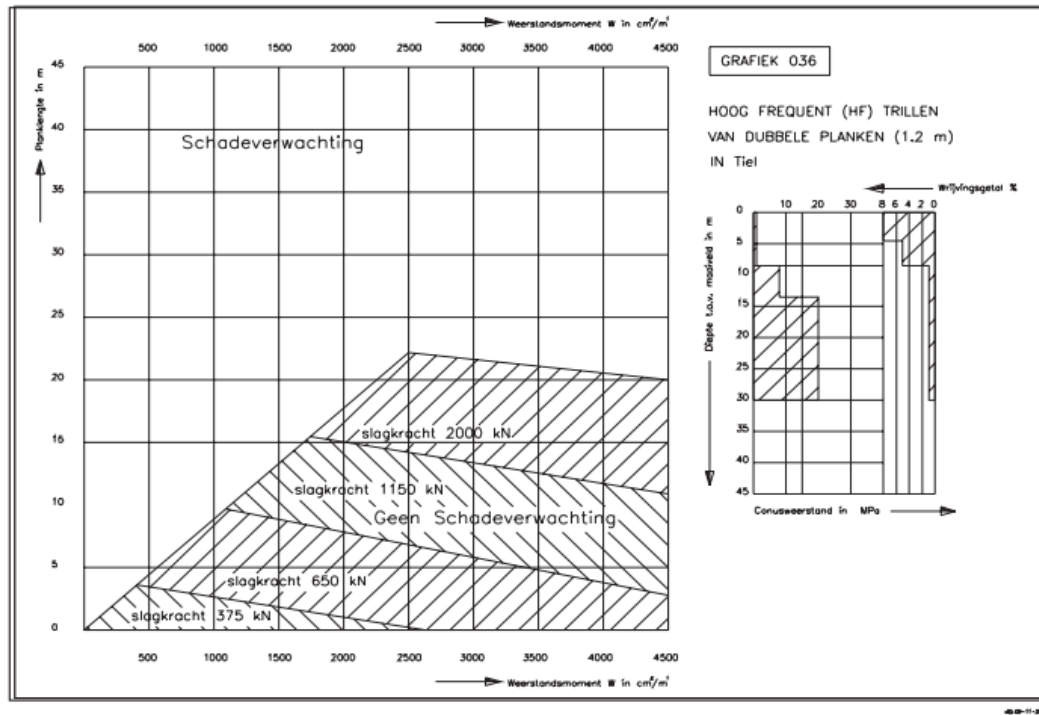
Afbeelding III.1 Sondering Tiel volgens de CUR166 [ref. 3]



Afbeelding III.2 Sondering Eindhoven volgens de CUR166 [ref. 3]



Afbeelding III.3 NVAF/PSD-grafiek voor hoog frequent trillen van dubbele damwandplanken in Tiel volgens de CUR166 [ref. 3]



Afbeelding III.4 NVAF/PSD-grafiek voor hoog frequent trillen van dubbele damwandplanken in Eindhoven volgens de CUR166 [ref. 3]

