

Willem Alexanderhaven

Analyse trillingen en zettingen heiwerkzaamheden

**PORT OF
ROERMOND**
COÖPERATIEF U.A.

Port of Roermond Cooperatief U.A.

A Mijnheerkensweg 33
6031 TA Roermond
T -

SBE

SBE Rotterdam

A Weena 335, 3013 AL Rotterdam (NL)
T +31 10 745 74 70
E info@sbe-engineering.nl
W www.sbe-engineering.com

REV	DATUM	OMSCHRIJVING	IR	CONTR	GOED
1.0	09/05/2025	Eerste uitgave	LVA	CVM	GRO
A					
B					
C					
D					
E					

PROJECT	DOC. TYPE	DISCIPLINE	FASE	DOC. NR	REVISIE
15298	ALG	G	DO	010	1.0

INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding	4
1.1	Achtergrond	4
1.2	Doel van dit document	4
1.3	Toetsingskader en toetsingsprocedure.....	4
1.3.1	Directe schade.....	4
1.3.2	Indirecte schade.....	5
1.3.3	Hinder.....	5
1.4	Mechanisme trillingen.....	5
2	Uitgangspunten	7
2.1	Trajectbeschrijving.....	7
2.2	Beschikbare grondonderzoeken.....	8
2.3	Grondprofielen.....	10
2.4	Grondwaterstanden	10
2.5	Overzicht secties damwand	10
2.6	Toegepaste damwandprofielen.....	12
2.7	Eigenschappen heimaterieel	12
3	Schade	13
3.1	Aanpak	13
3.2	Directe schade – trillingen	13
3.2.1	Procedure	13
3.2.2	Grenswaarde trillingen volgens SBR-richtlijn A.....	13
3.2.3	Trillingsintensiteit.....	17
3.2.4	Conclusies op basis van de resultaten.....	18
3.3	Indirecte schade – zettingen.....	20
3.3.1	Procedure	20
3.3.2	Zettingsgevoeligheid en grenswaarden.....	20
3.3.3	Analyse zettingen Hergarden en Meijers	22
3.4	Trillingsvrije installatie	23
3.4.1	Verlagen spanning in de ondergrond.....	23
3.4.2	Voorboren	23
3.4.3	Fluidatie	23
4	Hinder.....	25
4.1.1	Berekeningsprocedure en veronderstellingen.....	25
4.1.2	Bepaling $V_{eff,max}$	25
4.1.3	Bepaling V_{per}	26
4.1.4	Berekeningsresultaten	26
5	Conclusies	28
5.1	Schade.....	28
5.1.1	Directe schade – trillingen.....	28
5.1.2	Indirecte schade – zettingen.....	28
5.1.3	Trillingsvrije installatie	28
5.2	Hinder	29
6	Referenties	30

Bijlagen		32
Bijlage 1	Trillingspredictie	32
Bijlage 2	Zettingspredictie Hergarden	33
Bijlage 3	Zettingspredictie Meijers	37
Bijlage 4	Iteraties hinder	40

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Port of Roermond, een collectief van 4 bedrijven aan de Willem-Alexander haven te Roermond (BESIX, Kalle en Bakker, Sif en Smurfit Westrock), heeft de ambitie om de haven te voorzien van een hoogwaterkering welke tevens (deels) functioneert als logistieke kade. Door deze kades kan de haven verder werken aan zijn ambitie als circulaire haven waarbij de Modal Shift (transport over water in plaats van over de weg) optimaal wordt gefaciliteerd. Port of Roermond heeft hiervoor een integraal plan ontwikkeld.

Binnen dit integraalplan zal een deel van de hoogwaterkeringen functioneren als primaire kering en onderdeel worden van het dijktraject Roermond Alexanderhaven (onderdeel van normtraject 76-2). Overige hoogwaterkeringen binnen het integraal plan zijn geen onderdeel van de primaire kering en worden verder aangeduid als maatwerkkering.

Het plan is getoond in Figuur 2.1 en bestaat uit een combinatie van logistieke kaden, in het bestaande talud aan te brengen damwandconstructies (kerende wanden talud) en in het terrein te realiseren kerende wanden.

1.2 Doel van dit document

De nieuwe keringen bestaan uit verankerde damwandconstructies. Er is reeds een studie uitgevoerd naar de haalbaarheid van het installeren van damplanken [13]. In deze studie wordt het materieel voorgesteld voor de installatie van de damwanden. Dit heimmaterieel veroorzaakt trillingen, waardoor rekening moet worden gehouden met de invloed op de omgeving.

Dit document heeft als doel een inschatting te maken van trillingen en zettingen als gevolg van het inbrengen van de damwanden en de kans op hinder. De keringlijn is ingedeeld in verschillende secties. Daarom is besloten om per sectie een analyse uit te voeren. De verschillende secties worden weergegeven in Figuur 2.1, waarbij de nummering wordt overgenomen in deze nota.

1.3 Toetsingskader en toetsingsprocedure

1.3.1 Directe schade

Trillingsintensiteit wordt getoetst aan de waarden uit de SBR-richtlijnen uit september 2006 en december 2017, uitgegeven door de Stichting Bouw Research. In totaal zijn er 3 SBR richtlijnen:

- SBR-richtlijn A (2017) Schade aan bouwwerken [5];
- SBR-richtlijn B (2006) Hinder voor personen in gebouwen [6];
- SBR-richtlijn C (2006) Storing aan trillingsgevoelige apparatuur [7].

Voor de toetsing van schade aan bouwwerken dient de trillingsintensiteit aan de draagconstructie bepaald te zijn. Volgens de bestaande praktijkervaring is de kans op schade aan gebouwen (of onderdelen ervan) aanvaardbaar klein, indien de topsnelheid aan de draagconstructie (v_{top}) onder de opgelegde grenswaarde blijft (v_r). De waarde aan de draagconstructie volgt uit de prognose in dit rapport.

De toetsprocedure op schade luidt:

- $V_r \leq V_{top}$ Ja $\rightarrow$ risico op schade;
- Nee $\rightarrow$ risico op schade is aanvaardbaar klein (<1%).

1.3.2 Indirecte schade

Trillingsintensiteit en trillingsversnelling worden getoetst aan de waarden uit de SBR-richtlijn A [5] volgens eenzelfde procedure als omschreven in paragraaf 1.3.1. De optredende versnellingen worden hier ook bepaald conform een betrouwbaarheidsinterval van 99% om een conservatieve benadering aan te houden.

Verder worden de zettingen t.g.v. de installatie werkzaamheden ingeschat. Indien een constructie zich in de invloedzone bevindt, wordt er aangegeven welke zettingen er ter plaatse van deze constructie verwacht kunnen worden.

1.3.3 Hinder

De maximale gewogen voortschrijdende effectieve waarde ($V_{eff,max}$) en het gemiddelde trillingsniveau (V_{per}) worden getoetst aan voorgeschreven waarden (A_1 , A_2 , A_3) van SBR-richtlijn B [6]. De toetsingsprocedure gaat als volgt:

- $V_{eff,max} < A_1 \rightarrow$ OK, anders:
- $V_{eff,max} < A_2$ én $V_{per} < A_3 \rightarrow$ OK

1.4 Mechanisme trillingen

Bij het inbrengen van damwanden worden er trillingen via de grond doorgegeven aan de omgeving en nabijgelegen bouwwerken. De trillingen worden opgewekt door het trilblok of de hydraulische hamer, waarmee de damwand geleidelijk in de bodem wordt gebracht. De damwand fungeert hierbij als een stijve plaat die de trillingsenergie in de ondergrond verspreidt.

Voor de voortplanting van deze trillingen zijn voornamelijk elastische golven van belang. Tijdens het intrillen ontstaan verschillende typen golven die zich in alle richtingen kunnen verplaatsen. Wanneer deze golven het maaiveld, een bodemovergang of een bouwwerk bereiken, kunnen reflectie en omzetting plaatsvinden, wat leidt tot een complex interferentiepatroon van bodembewegingen.

De afname van de golfamplitude wordt veroorzaakt door geometrische demping en materiaaldemping. Bij geometrische demping neemt de trillingssterkte af met de afstand tot de bron. Materiaaldemping ontstaat door interne wrijving in de bodem, wat leidt tot energieverlies.

De trillingsintensiteit bij een gebouw wordt beïnvloed door:

- Eigenschappen van de ondergrond (zoals bodemtype en bodemlagen).
- Funderingstype (palenfundering of fundering op staal).
- Afstand tot de trillingsbron.
- Energie en frequentie van het trilblok of de hydraulische hamer.

De trillingen die door de ondergrond worden overgedragen, bereiken mogelijk de fundering van nabijgelegen gebouwen. Dit kan op verschillende manieren gebeuren:

- Via de stijve damwand, die trillingen diep in de bodem brengt.

- Via het omringende zand- en, klei- en grindpakket.
- Via oppervlaktegolven die direct onder het maaiveld de funderingsconstructie bereiken.

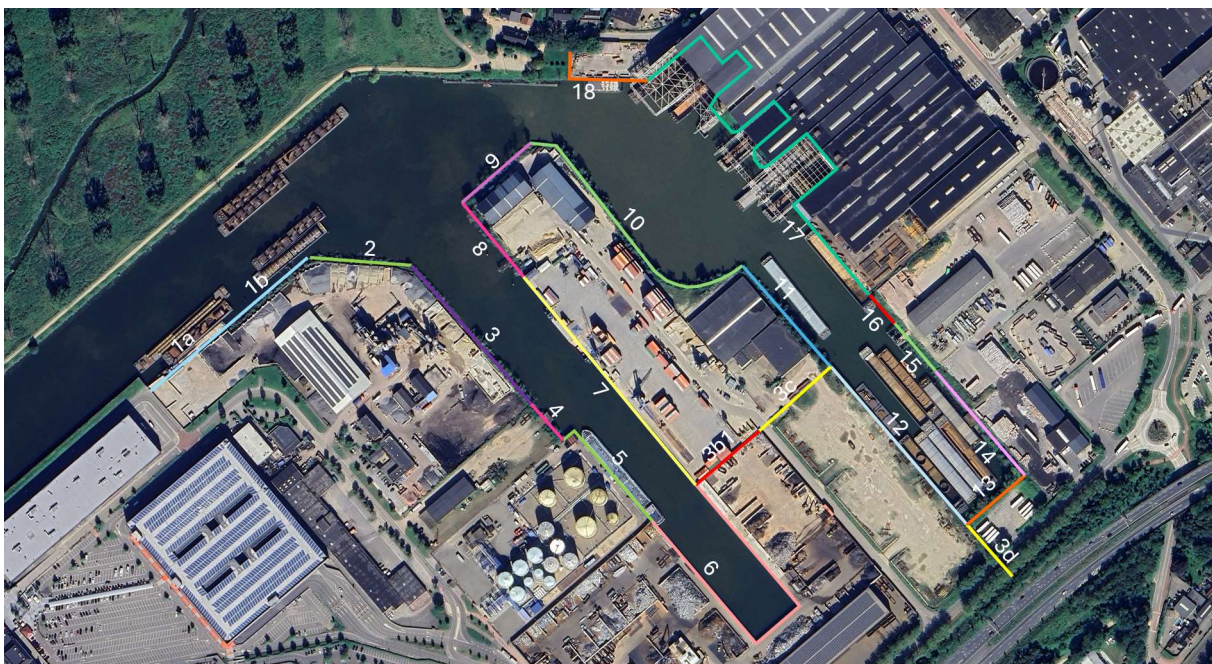
Bij de overdracht van trillingen van de bodem naar de funderingselementen en de draagconstructie treedt een zekere mate van demping op. Voor de beoordeling van hinderbeleving zijn de trillingsintensiteiten op de vloeren van belang. Bij de overdracht van trillingsintensiteit van de draagconstructie naar de vloeren en ondersteunende onderdelen kan bovendien een opslingereffect optreden, waarbij trillingen versterkt kunnen worden.

2 Uitgangspunten

2.1 Trajectbeschrijving

Het traject van het integraalplan Willem-Alexanderhaven wordt weergegeven in Figuur 2.1. Het ontwerp van de keringen bestaat uit een verankerde damwandconstructie met een ontwerphoogte variërend over de lengte van het traject van NAP +22,40 m tot NAP +22,50 m. Het totale traject heeft een totale lengte van ca. 3.090 m en omvat 21 secties, bestaande uit:

- Logistieke kaden (verticale constructie voor een horizontale waterbodem)
- Kerende wanden talud (verticale constructie met een voorliggend talud).
- Kerende wanden (met aan beide zijden maaiveld).



Figuur 2.1 Overzichtskaat traject

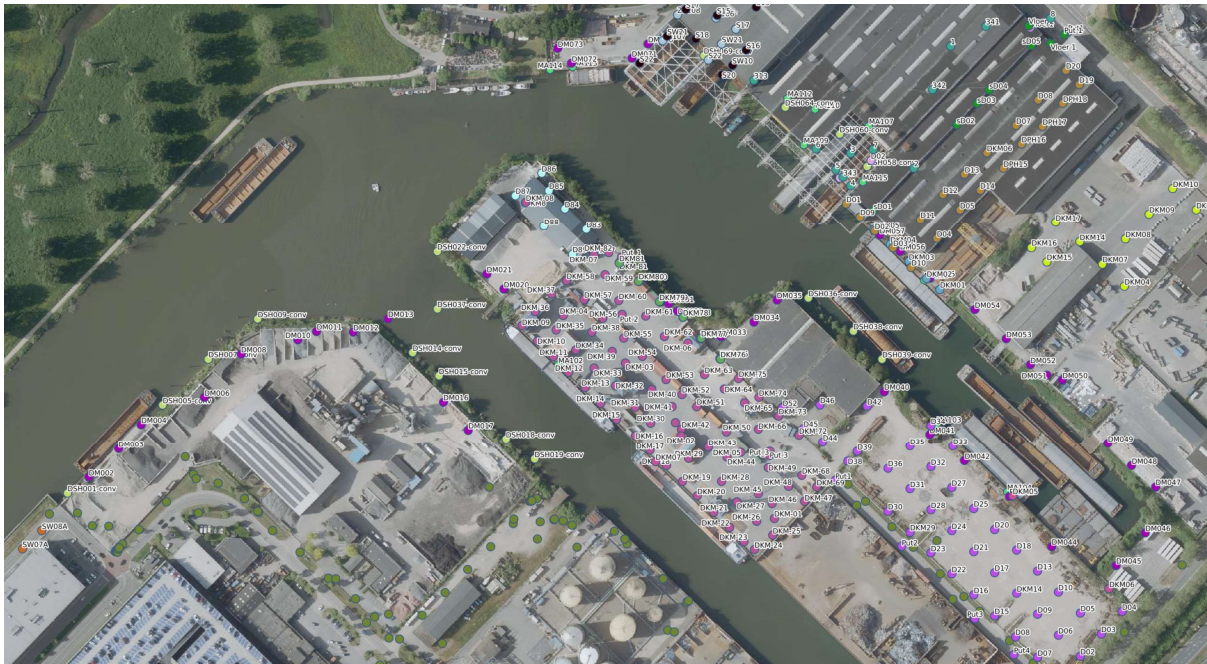
Op bepaalde delen van het traject wordt de basis van de bestaande kadeconstructie hergebruikt (secties 7, 12, 17 en 18) en geen nieuwe damwand geïnstalleerd. In de overige secties wordt een nieuwe constructie gerealiseerd. Sectie 3b1 wordt trillingvrij ingebracht (drukken) vanwege de vloeistofdichte betonvloer van Menten waar geen trillingen mogen optreden.

2.2 Beschikbare grondonderzoeken

Een overzicht van de beschikbare boringen en sonderingen is gegeven in de Tabel 2.1 en in de overzichtskaart in Figuur 2.2.

Tabel 2.1 beschikbaar historisch grondonderzoek

Uitvoerder	Opdrachtnummer	Jaar	Referentie
<u>Conex</u>	<u>CXA071.10</u>	<u>2010</u>	<u>[20]</u>
<u>Conex</u>	<u>CXA235.09</u>	<u>2009</u>	<u>[21]</u>
De Waal	5259	1976	[22]
Fugro	9019-158966	2020	[23]
Geoconsult	GB-300999	2007	[24]
Geoconsult	GG-5070	2002	[25]
IGF	84071	1984	[26]
Inpijn-Blokpoel	02P000399-01	2011	[27]
Inpijn-Blokpoel	02P000399-02	2011	[28]
Inpijn-Blokpoel	02P000399-04	2012	[29]
Inpijn-Blokpoel	02P000399-05	2012	[30]
Inpijn-Blokpoel	02P000399-06	2013	[31]
Inpijn-Blokpoel	02P003261	2013	[32]
Inpijn-Blokpoel	02P004116-01	2014	[33]
Inpijn-Blokpoel	02P004149-01	2014	[34]
Inpijn-Blokpoel	02P005243	2014	[35]
Inpijn-Blokpoel	02P005413	2014	[36]
Inpijn-Blokpoel	02P006543	2015	[37]
Inpijn-Blokpoel	VG4027	2001	[38]
Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	2023	[39]



Figuur 2.2 Overzicht sonderingen

Tabel 2.2 geeft een overzicht van de gebruikte sonderingen per zone.

Tabel 2.2 Geselecteerde sondering per zone voor trillingsanalyse

Sectie	Naam sectie	Uitvoerder	Opdracht-nummer	Sondering
1a	Nieuwe logistieke kade [BESIX]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM006
1b	Nieuwe logistieke kade [BESIX]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM006
2	Kerende wand talud [1] [BESIX]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM011
3	Nieuwe logistieke kade [BESIX, talud 2]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM016
4	Nieuwe logistieke Kade [Koopmans]	(DINO loket)	-	CPT 161026
8	Nieuwe logistieke kade [Kalle en Bakker]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM020
9	Kerende wand talud [3] [Kalle en Bakker]	Inpijn-Blokpoel	02P000399-04	2012
10	Kerende wand talud [4] [KB / Sif]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM032
11	Kerende wand talud [5] [Sif]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM040
13	Kerende wand talud [6] [Smurfit Westrock]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM044
14	Nieuwe logistieke kade [Smurfit Westrock]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM050
15	Nieuwe logistieke kade [Smurfit Westrock]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM055
16	Nieuwe logistieke kade [Smurfit Westrock]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM055
17	Voorzetwand [Sif]	<u>Conex</u>	<u>CXA235.09</u>	D01
3b1	Kerende wand [KB / Menten]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM0@@
3c	Kerende wand [Sif]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM040
3d	Kerende wand [Mijnheerkensweg]	Inpijn-Blokpoel	22ZP1423-RG-01	DM045

CONFIDENTIALITY: Public (unrestricted)

2.3 Grondprofielen

Op basis van het beschikbare grondonderzoek is per sectie een grondprofiel opgesteld om de haalbaarheid van het installeren van de damwandplanken te bepalen. Hiervoor zijn de hoogste conusweerstand vastgesteld aan de hand van verschillende sonderingen langs het traject. Op basis van de beschikbare sondeerresultaten wordt voor elke locatie een typerend grondprofiel opgesteld.

2.4 Grondwaterstanden

De kenmerkende waterstanden worden weergegeven in Tabel 2.3. Voor het bepalen van de zettingen wordt telkens gebruik gemaakt van de buitenwaterstand: 16.7 mNAP.

Tabel 2.3 waterstanden

Waterstand	Symbool	Niveau [m+NAP]
Buitenwaterstand	BWS	+16,70
Maatgevend laagwater	MLW	+13,30
Waterstand bij norm 2125	WBN2125	+22,10
Waterstand bij norm 2075	WBN2075	+21,70

2.5 Overzicht secties damwand

In Tabel 2.4 is een overzicht gegeven van de logistieke kades, kerende wanden taluds en kerende wanden. Een deel van de secties bestaat uit bestaande kades of wordt gerealiseerd met een andere techniek. Hier worden geen nieuwe damwanden geïnstalleerd.

Tabel 2.4 Overzicht secties

Sec tie	Naam sectie	Type plank	Top [m NAP]	Teen [m NAP]	Plank-lengte [m]
1a	Nieuwe logistieke kade [BESIX]	AZ26-700	+22,50	+6,00	16,5
1b	Nieuwe logistieke kade [BESIX]	AZ26-700	+22,50	+6,00	16,5
2	Kerende wand talud [1] [BESIX]	AZ18-700	+22,50	+8,00	14,5
3	Nieuwe logistieke kade [BESIX, talud 2]	AZ26-700	+22,40	+5,50	16,9
4	Nieuwe logistieke Kade [Koopmans]	AZ26-700	+22,40	+7,00	15,4
5	Bestaand				
6	Bestaand				
7	Bestaand				
8	Nieuwe logistieke kade [Kalle en Bakker]	AZ26-700	+22,50	+6,00	16,5
9	Kerende wand talud [3] [KB]	AZ20-700	+22,50	+7,00	15,5
10	Kerende wand talud [4] [KB/Sif]	AZ20-700	+22,50	+8,00	14,5
11	Kerende wand talud [5] [Sif]	AZ26-700	+22,40	+5,50	16,9
12	Bestaand				
13	Kerende wand talud [6] [Smurfit Westrock]	AZ18-700	+22,40	+9,50	12,9
14	Nieuwe logistieke kade [Smurfit Westrock]	AZ26-700	+22,40	+6,00	16,4
15	Nieuwe logistieke kade [Smurfit Westrock]	AZ26-700	+22,40	+6,00	16,4
16	Nieuwe logistieke kade [Smurfit Westrock]	AZ26-700	+22,40	+5,00	17,4
17	Voorzetwand [Sif]	AZ20-700	+19,00	+7,40	11,6
18	Bestaand				
3b1	Kerende wand [Kalle en Bakker]	AZ18-700	+22,40	+16,00	6,4
3c	Kerende wand [Sif]	AZ18-700	+22,40	+14,00	8,4
3d	Kerende wand [Mijnheerkensweg]	AZ18-700	+22,30	+12,50	9,8
3d*	Kerende wand [Mijnheerkensweg]	AZ26-700	+22,30	+10,50	11,8

Er dient opgemerkt te worden dat de damplanken in sommige secties aangebracht worden in een talud. Dit is belangrijk voor het bepalen van de zettingen afkomstig door het trillen of heien van de damplank. Hoe lager de damplank ingebracht wordt, hoe geringer de zettingen aan het maaiveld zijn.

2.6 Toegepaste damwandprofielen

Op basis van het DO zijn de damplanken uit Tabel 2.5 geselecteerd.

Tabel 2.5 Damwandprofielen

type	A [cm ² /D]	G [kg/m/D]	I _y [cm ⁴ /D]	W _{el,y} [cm ³ /D]	r _g [cm/D]	O [m ² /m/D]
AZ18-700	194,9	153,0	52.920	2.520	16,50	1,86
AZ20-700	212,8	167,0	57.340	2.725	16,40	1,86
AZ26-700	262,1	205,7	83.610	3.635	17,86	1,93

OPMERKING 1:

Voor de staalkwaliteit van de damwandplanken wordt uitgegaan van S355.

OPMERKING 2:

Met ../D wordt bedoeld per dubbele plank. Een dubbele plank heeft een breedte van 1.400 mm.

2.7 Eigenschappen heimaterieel

Het uitgangspunt voor dit rapport is dat de damplanken van de nieuwe kadeconstructies trillend ingebracht worden. Er wordt hierbij uitgegaan van een hoogfrequent hydraulisch trilblok met variabel moment en met een slagkracht van 0 tot 1600 kN bij een toerental van 2300 toeren/min, bijvoorbeeld een "Dieseko PVE 2330 VM". Tabel 2.6 geeft een overzicht van de eigenschappen van het trilblok.

Tabel 2.6 Eigenschappen trilblok

Type trilblok	Dieseko PVE 2330 VM o.g.
Slagkracht F [kN]	1600
Frequentie [Hz]	38

3 Schade

3.1 Aanpak

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen directe en indirecte schade. Onder directe schade verstaat men de schade afkomstig door de trillingen afkomstig van het heien/trillen. Met de indirecte schade bedoelt men de schade afkomstig van de zettingen die ontstaan door het verdichten van de grond, afkomstig van het heien/trillen.

3.2 Directe schade – trillingen

3.2.1 Procedure

Voor de omliggende constructies worden de grenswaardes, conform SBR-richtlijn A [5], bepaald voor de maximaal toelaatbare trillingsintensiteit. De geïdentificeerde grenswaarde wordt vervolgens getoetst aan de optredende trillingsintensiteit.

De trillingsprognose als gevolg van bouwwerkzaamheden is opgesteld aan de hand van een empirisch model dat wordt gegeven in CUR 166 deel 2 [3]. Hierbij zijn rekenwaarde voor bronsnelheden en dampingcoëfficiënten gegeven voor een zevental voor Nederland karakteristieke bodemprofielen.

3.2.2 Grenswaarde trillingen volgens SBR-richtlijn A

In de SBR-richtlijn A [5] worden grenswaarden vastgesteld voor de maximaal toelaatbare trillingen, met als doel schade aan bouwwerken te voorkomen. Op basis van praktijkervaring wordt aangenomen dat er een acceptabel kleine kans (minder dan 1%) bestaat op schade aan bouwwerken en funderingen, indien de rekenwaarde van de topwaarde van de trillingssnelheid (V_d) lager is dan de rekenwaarde van de grenswaarde (V_r). De rekenwaarde van de grenswaarde V_r wordt bepaald aan de hand van de volgende variabelen:

- a. de dominante frequentie;
- b. de constructie van een bouwwerk (twee categorieën);
- c. de bouwkundige staat van het bouwwerk (normaal of gevoelig);
- d. de monumentale status van het bouwwerk;
- e. het type trilling;
- f. het type meting.

a. Dominante frequentie

Voor de bepaling van de grenswaarde bij damwandtrillingen is uitgegaan van de maatgevende frequentie van het trilblok. Hoogfrequente trilblokken hebben doorgaans een frequentie tussen 35 en 40 Hz. Voor de berekeningen is een waarde van 38 Hz (2300 rpm) aangehouden (SBR-richtlijn A, tabel 10.8).

b. Constructie categorie

De bebouwing langs het traject wordt in gedeeld in gebouwcategorie 1 of 2 volgens onderstaande tabel:

Tabel 3.1 Constructie categorie

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 (bijvoorbeeld scheidingsconstructies), indien deze bestaan uit gewapend beton of hout. - Draagconstructies van bouwwerken, geen gebouw zijnde, die bestaan uit metselwerk zoals pijlers van viaducten, kademuren en dergelijke.
2	- Onderdelen van de draagconstructie van een gebouw, indien deze bestaan uit metselwerk. - Onderdelen van een gebouw die niet tot de draagconstructie behoren, zoals scheidingsconstructies die bestaan uit niet-gewapend beton, metselwerk of uit brosse steenachtige materialen.

Er wordt aangenomen dat de constructies vervaardigd zijn uit (gewapend)beton en/of staal en daarom worden de gebouwen geclassificeerd als categorie 1 [5].

c. Bouwkundige staat

Tabel 3.2 Bouwkundige staat

Staat	Omschrijving
Gevoelig	- Bouwwerken of onderdelen waarvan de sterkte is verminderd. - Bouwwerken of onderdelen waarin sprake is van extra initiële spanningen.
Normaal	Bouwwerken of onderdelen waarvan de bouwkundige staat niet gevoelig is.

d. Monumentale status

Tabel 3.3 Monumentale status

Status	Omschrijving
Monument	Bouwwerken die van overheidswege een monumentale status zijn toegekend, zoals: - Rijksmonument; - Provinciaal monument; - Gemeentelijk monument.
Geen	Bouwwerken die geen monumentale status hebben.

Het is de verwachting dat de bouwwerken niet gevoelig zijn en geen monumentale status hebben. ($\gamma_s = 1,7$).

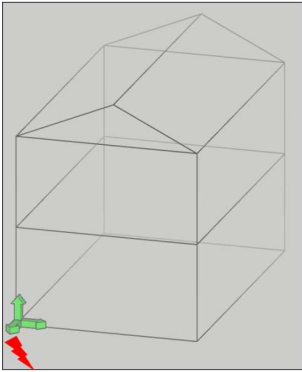
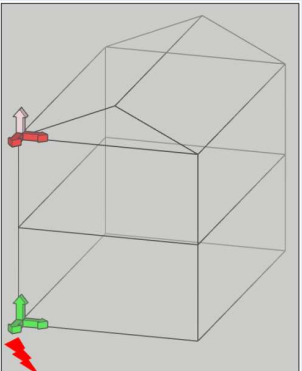
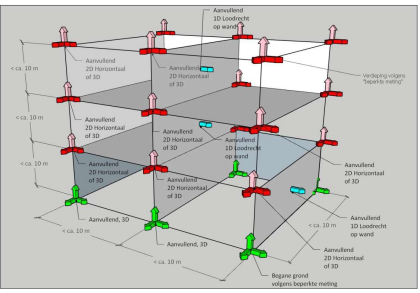
Uitzondering is de vloestofdichte vloer op het terrein van Menten Metaalrecycling. Deze betonvloer wordt geclassificeerd als een gevoelige constructie.

e. Type trilling

Bij het intrillen van damwanden wordt uitgegaan van trillingen met een continu karakter (SBR-richtlijn A, tabel 10.6), ($\gamma_t = 2,5$).

f. Het type meting

Tabel 3.4 Toelichting type meting

Type meting	Omschrijving	Toelichting
Indicatief $\gamma_v = 1,6$	Bij een indicatieve meting wordt slechts in één meetpunt gemeten. Dit meetpunt komt overeen met het meetpunt op het begane grondniveau in een stijf punt van de draagconstructie en/of op de fundering. Het meetpunt wordt bovendien op de kortste afstand tot de bron gekozen. In het meetpunt wordt in verticale en in twee onderling loodrechte horizontale richtingen gemeten. De gekozen horizontale richtingen stemmen zoveel mogelijk overeen met de hoofdassen van het gebouw.	
Beperkt $\gamma_v = 1,4$	Bij een beperkte meting wordt ten minste in één meetpunt op het begane grondniveau en ten minste in één meetpunt op de hoogste verdieping van het gebouw gemeten, beide in een stijf punt van de draagconstructie. De meetpunten worden bovendien op de kortste afstand tot de bron gekozen. In het meetpunt op de begane grond wordt in verticale en in twee onderling loodrechte horizontale richtingen gemeten. In het meetpunt op de hoogste verdieping wordt in twee onderling loodrechte horizontale richtingen gemeten (het meetpunt op begane grondniveau komt overeen met het meetpunt voor de indicatieve meting). De gekozen horizontale richtingen stemmen zoveel mogelijk overeen met de hoofdassen van het gebouw. Voor de fundering geldt dat er twee meetpunten op de fundering worden aangebracht.	
Uitgebreid $\gamma_v = 1,2$	Bij een uitgebreide meting dient in een groter aantal meetpunten te worden gemeten, dit in aanvulling op de meetpunten volgens de beperkte meting. Op welke plaatsen gemeten wordt, hangt af van het doel van de meting en van de situatie ter plaatse. Voor zettingen geldt dat minimaal 4 trillingsmeters op funderingsniveau moeten zijn aangebracht.	

De karakteristieke trilsnelheid wordt bepaald op basis van het type gebouw en de frequentie van de trillingen. Op basis van bovenstaande uitgangspunten zijn de grenswaarden vastgesteld op basis van de formule:

$$V_r = \frac{V_{kar}}{\gamma_t \cdot \gamma_s}$$

Tabel 3.5 grenswaarde trillingen

Bouwkundige staat	V _{grens} [mm/s]	
	Niet gevoelig	Gevoelig
Indicatieve meting	8,5	5,0
Beperkte meting	9,7	5,7
Uitgebreide meting	13,6	8,0

Tabel 3.6 geeft per sectie een overzicht van de verschillende constructies in de omgeving en de afstand tot de in te brengen damwanden. Op basis van de eigenschappen is het mogelijk om de grenswaarden van ieder gebouw te bepalen als draagconstructie begane grond.

Tabel 3.6 Overzicht van constructies

Sectie	Constructie	Afstand [m]
1a/1b	Loods Besix	35
2	Lab Besix	25
3	Lab Besix	25
4	Loods Koopmans	85
5	Opslagtank Varo Energy	25
8	Loods Kalle en Bakker	10
9	Loods Kalle en Bakker	10
10	Loods Kalle en Bakker	10
	Sleufsilos	10
	Gebouw – busremise	10
11	Gebouw Sif	10
13	Geen bebouwing	-
14	Gebouw Smurfit Westrock	35
15 en 16	Hal 7 Smurfit Westrock	15
17 (*)	Hal 6, hal 7, hal 8	<5 m
3b1 (*)	Vloestofdichte vloer Menten	<5 m
3c	Loods Sif	25
3d	Geen bebouwing	-

(*) De afstand van de in te brengen damwanden tot de hallen boven de insteekhavens van Sif en de vloestofdichte vloer van Menten is zeer klein (<5 m). De berekeningsmethode is voor deze gevallen niet goed bruikbaar.

3.2.3 Trillingsintensiteit

Om de optredende trillingsintensiteit te bepalen voor een bepaald gebouw, wordt er rekening gehouden met geometrische damping, materiaal damping en overdracht van de grond naar de constructie. De parameters die deze effecten beschrijven worden bepaald op basis het grondprofiel. Het type profiel wordt geselecteerd op basis van gelijkenissen tussen de geselecteerde sonderingen en de typen grondprofielen uit bijlage C van CUR 166 (6e herziene druk, deel 1 [2]). Hieruit lijkt het geoorloofd om het grondprofiel van Groningen [2] aan te nemen, wat tevens ook een conservatieve benadering is. De eigenschappen bijhorend bij dit profiel worden weergegeven in Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Eigenschap grondprofiel (trillen-99% betrouwbaarheidsinterval)

Eigenschappen grondprofiel	
v_0	12 mm/s
c_{vel}	0,014 mm/s/kg
α (dempingsfactor)	0

De optredende trillingen zijn berekend met de volgende formule:

$$v_{max} = v_{0,cor} * C_{0f}$$

C_{0f} is de 'trillingsoverdacht' coëfficiënt. Deze coëfficiënt neemt geometrische en materiaal damping in rekening alsook de damping door de overdracht van de grond naar een constructie. De formule wordt hieronder weergegeven.

$$C_{0f} = 0.7 * \sqrt{\frac{5}{r}} * \exp(-\alpha(r - 5))$$

Met:

- r afstand van de bron tot het gebouw [m]

$v_{0,cor}$ betreft de verwachtingswaarde van de bronsterkte en wordt bepaald met onderstaande formule (indien de slagkracht groter is dan 350 kN). Indien de slagkracht kleiner is, wordt de verwachtingswaarde van de bronsterkte gelijk genomen aan v_0 .

$$v_{0,cor} = v_0 + c_{vel} * (R - 350 \text{ kN})$$

De parameters v_0 , c_{vel} & α zijn afhankelijk van de grondgelaagdheid op de locatie van de werken. De grondprofielen worden weergegeven in CUR166. Voor de trillingen wordt een grondprofiel geselecteerd op basis van de sondering met de hoogste conusweerstand. De waarden van de parameters worden besproken in volgende paragrafen en zijn gebaseerd op vakblad "Geotechniek, oktober 2014" [42].

De optredende trillingsintensiteit voor een specifieke constructie zijn per sectie berekend. Gezamenlijk met de kans op schade zijn de resultaten weergegeven in 0.

Tabel 3.8 Overzicht resultaten trillingsanalyse

Sectie	Constructie	V _{optredend} [mm/s]	Kans op schade		
			Indicatieve meting	Beperkte meting	Uitgebreide meting
1a/1b	Loods Besix	7,8	<1%	<1%	<1%
2	Lab Besix	9,23	<2%	<1%	<1%
3	Lab Besix	9,23	<2%	<1%	<1%
4	Loods Koopmans	5,01	<1%	<1%	<1%
5	Opslagtank Varo Energy	9,23	<2%	<1%	<1%
8	Loods Kalle en Bakker	14,6	<10%	<10%	<2%
9	Loods Kalle en Bakker	14,6	<10%	<10%	<2%
10	Loods Kalle en Bakker	14,6	<10%	<10%	<2%
	Sleufsilos	14,6	<10%	<10%	<2%
	Gebouw – busremise	14,6	<10%	<10%	<2%
11	Gebouw Sif	14,6	<10%	<10%	<2%
13	Geen bebouwing	-	-	-	-
14	Gebouw Smurfit Westrock	7,8	<1%	<1%	<1%
15 en 16	Hal 7 Smurfit Westrock	11,92	<5%	<5%	<1%
17 (*)	Hal 6, hal 7, hal 8	-	-	-	-
3b1 (*)	Vloeiستofdichte vloer Menten	-	-	-	-
3c	Loods Sif	9,23	<2%	<1%	<1%
3d	Geen bebouwing	-	-	-	-

(*) De afstand van de in te brengen damwanden tot de hallen boven de insteekhavens van Sif is zeer klein. De theorie is voor deze gevallen niet bruikbaar.

De resultaten zijn toegelicht in Bijlage 1.

3.2.4 Conclusies op basis van de resultaten

- Gebouwen Besix en Koopmans:**

De gebouwen op de terreinen van Besix en Koopmans (sectie 1 t/m 4) bevinden zich over het algemeen op aanzienlijke afstand van de te installeren damwand, de loodsen van Besix en Koopmans meer dan tweemaal de lengte van het installatie traject. De prognose voldoet aan de criteria van de SBR-richtlijn A (toetsing schadekans belendingen), waarmee de kans op trillingsschade aan belendende panden klein wordt geacht (conform SBR-richtlijn A kleiner dan 2%).

De stijve onderdelen van de constructies hebben minder kans op schade dan de minder stijve onderdelen. Bij schade wordt eerder gedacht aan cosmetische schade (haarscheurtjes e.d.) en steenachtige afwerking zoals stucwerk en tegelwerk. Constructieve schade afkomstig van de trillingen wordt niet aannemelijk geacht.

Geadviseerd wordt om indicatieve metingen uit te voeren bij de gebouwen van Besix en Koopmans in de nabijheid van secties 1 t/m 4.

Opslagtank Varo Energy

De opslagtanks van Varo Energy bevinden zich op aanzienlijke afstand van de te installeren damwand, circa 25 meter. De prognose voldoet aan de criteria van SBR-richtlijn A (toetsing op schadekans aan belendingen), waarmee de kans op trillingsschade aan omliggende panden als klein wordt ingeschat (volgens SBR-richtlijn A minder dan 2%). Geadviseerd wordt om indicatieve metingen uit te voeren bij de opslagtanks aan de noordzijde van het terrein.

Op het terrein van Varo Energy bevinden zich installaties waarvan de trillingsspecificaties onbekend zijn. Aangezien het een industriële omgeving betreft, wordt verwacht dat de grenswaarden voor trillingen relatief hoog liggen. Het is belangrijk dat vóór aanvang van de werkzaamheden een inventarisatie wordt gemaakt van de aanwezige installaties op het terrein van Varo Energy. Daarbij moeten de trillingscriteria van deze installaties worden vastgesteld, zodat hiermee rekening kan worden gehouden in de monitoring.

Loodsen Kalle en Bakker, Sif en Smurfit Westrock

De loodsen van Kalle en Bakker en Sif op de Landtong, evenals de loods van Smurfit Westrock bevinden zich op relatief korte afstand van de damwanden van secties 8, 9, 10, 11, 15 en 16, namelijk op circa 10 à 15 meter. Vanwege deze beperkte afstand is de kans op schade als gevolg van trillingen ter plaatse van deze gebouwen groter dan bij verder afgelegen structuren.

Om het risico op mogelijke schade te monitoren en tijdig mitigerende maatregelen te kunnen treffen, wordt geadviseerd om bij deze specifieke gebouwen uitgebreide trillingsmetingen uit te voeren. Deze metingen dienen voorafgaand aan en tijdens de uitvoering van de werkzaamheden plaats te vinden, waarbij continu wordt gemonitord of de trillingswaarden binnen de grenswaarden van de SBR-richtlijn A blijven.

Indien deze metingen correct en tijdig worden uitgevoerd, kan het risico op trillingsschade aan deze loodsen aanzienlijk worden gereduceerd. Conform de uitgangspunten van de SBR-richtlijn A wordt in dat geval de kans op schade kleiner dan 2% geacht.

Vloeistofdichte vloer Menten

Menten heeft zijn zorgen geuit over de mogelijke aantasting van de integriteit van de vloeistofdichte verharding als gevolg van het aanbrengen van de damwand en de daarmee gepaard gaande zettingen. Naar aanleiding van eerdere adviezen is besloten om een aanbrengmethode voor de damwand te hanteren die specifiek gericht is op het minimaliseren of geheel voorkomen van trillingen, om het risico op schade aan de verharding zoveel mogelijk te beperken.

Hallen Sif

De geplande voorzetwanden in de insteekhavens van Sif, gelegen in sectie 17, bevinden zich direct naast — en deels zelfs binnen — de productiehallen. Door deze uiterst korte afstand biedt de gangbare rekenmethode geen betrouwbaar kader om een nauwkeurige inschatting te maken van de te verwachten trillingen tijdens het inbrengen van de damwanden, noch van de bijbehorende kans op schade aan de aangrenzende bebouwing.

Hoewel het hier een industriële omgeving betreft, waarin doorgaans hogere trillingsgrenswaarden gelden, blijft er een aanzienlijke onzekerheid bestaan over de werkelijke impact. Deze onzekerheid maakt het niet mogelijk om op basis van de rekenmethode een kwantitatieve uitspraak te doen over het risico op schade.

Indien wordt gekozen voor het aanbrengen van de damwanden door middel van trillen, wordt sterk geadviseerd om uitgebreide trillingsmetingen uit te voeren. Deze metingen zijn noodzakelijk om de werkelijke belasting op de productiehallen te monitoren en zo nodig tijdig bij te kunnen sturen om schade te voorkomen. Ook kan worden overwogen om aanbrengmethodes voor de damwand te kiezen die gericht zijn op het minimaliseren of geheel voorkomen van trillingen.

3.3 Indirecte schade – zettingen

3.3.1 Procedure

- Onderstaande stappen worden gevolgd om de kans op indirecte schade te bepalen:
 - 1) Oordelen of de fundering zettingsgevoelig is of niet
 - 2) Indien deze zettingsgevoelig is, bepalen grenswaarde (trillingssnelheid en trillingsversnelling)
 - 3) Toetsing optredende trillingssnelheid en trillingsversnelling met hun respectievelijke grenswaarden
 - 4) Indien één van de grenswaarden overschreden is, is de kans op schade groter dan 1 procent

De methodes Hergarden en Meijers worden toegepast om de zettingen afkomstig van het intrillen van damplanken in te schatten.

- Onderstaande stappen worden gevolgd voor het bepalen van de zettingen volgens de methode Hergarden:
 - 1) Bepalen van de grenswaarde van de versnelling waarvoor verdichting optreedt
 - 2) De relatieve dichtheid bepalen (conform Lunne of Baldi)
 - 3) De verdichting bepalen van de grond in de verdichtingssectie
 - 4) Zettingen bepalen van een specifiek grondlaag
 - 5) Invloedbreedte bepalen van de zetting van grondlaag
 - 6) Sommatie zettingen van laagjes grond waarvan het punt in de invloedbreedte ligt
- Onderstaande stappen worden gevolgd voor het bepalen van de volumerek volgens de methode van Meijers. Voor de methode van Meijers wordt een module in D-sheet piling gebruikt.
 - 1) Het oplossen van de consolidatievergelijking om de wateroverspanningen te bepalen
 - 2) De wateroverspanningen worden gelinkt aan een plastische volumerek (ε_{vol}^{pl})
 - 3) Het plastisch volumerek dient als input om de percentuele verdichting te bepalen
 - 4) De percentuele verdichting wordt gebruikt om de zettingen te bepalen zoals beschreven in de methode van Hergarden

3.3.2 Zettingsgevoeligheid en grenswaarden

Tabel 3.9 geeft een overzicht indien er al dan niet een zettingsgevoelige fundering aanwezig is in de onmiddellijke omgeving van iedere sectie en bijhorende dikte van de zettingsgevoelige laag.

Tabel 3.10 geeft een overzicht van de resultaten van de grenswaarden. Indien het niet bekend is als het een zettingsgevoelige fundering betreft, wordt veiligheidshalve de analyse uitgevoerd.

Tabel 3.9 Zettingsgevoelige fundering

Sectie [-]	Zettingsgevoelige fundering [-]	Dikte zettingsgevoelige laag [m]
Sectie 1a/b	Onbekend	1.1
Sectie 2	Onbekend	2.5
Sectie 3	Onbekend	4.4
Sectie 4	Onbekend	2.5
Sectie 5	Onbekend	2.5
Sectie 8	Onbekend	3.26
Sectie 9	Onbekend	2.58
Sectie 10	Onbekend	2.08
Sectie 11	Onbekend	2.44
Sectie 15 & 16	Onbekend & nee	6.6
Sectie 17	Onbekend & nee	4.4
Sectie 3C	Onbekend & nee	2.5

Tabel 3.10 geeft een overzicht van de resultaten van de grenswaarden. Indien het niet bekend is als het een zettingsgevoelige fundering betreft, wordt veiligheidshalve de analyse uitgevoerd.

Tabel 3.10 Grenswaarde trillingsnelheid zettingsgevoelige fundering

Sectie [-]	C_D	V_{kar} [mm/s]	γ_s & γ_t	V_d [mm/s]
Sectie 1a/b	1.985	19.85	1 & 2	9.928
Sectie 2	1.786	17.86	1 & 2	8.928
Sectie 3	1.514	15.14	1 & 2	7.571
Sectie 4	1.785	17.85	1 & 2	8.928
Sectie 5	1.785	17.85	1 & 2	8.928
Sectie 8	1.677	16.77	1 & 2	8.385
Sectie 9	1.774	17.74	1 & 2	8.871
Sectie 10	1.847	18.47	1 & 2	9.228
Sectie 11	1.794	17.94	1 & 2	8.971
Sectie 15 & 16	1.2	12	1 & 2	6
Sectie 17	1.514	15.14	1 & 2	7.571
Sectie 3C	1.785	17.85	1.7 & 2	5.25

De grenswaarden worden vergeleken met de optredende trillingsintensiteit voor iedere constructie.

De grenswaarde voor de optredende versnelling moet niet meer uitgevoerd worden. De eis van de trillingsintensiteit is niet behaald voor alle secties.

3.3.3 Analyse zettingen Hergarden en Meijers

De zettingen als gevolg van het inbrengen van de damplanken worden geschat volgens de procedure beschreven in paragraaf 3.3.1. Om de resultaten overzichtelijk weer te geven, worden de maximale zetting en de invloedszone vermeld in Tabel 3.11. De invloedszone verwijst naar de afstand waarop geen meetbare invloed optreedt door het aanbrengen van de damplanken. Hierdoor kan snel worden beoordeeld of een constructie indirecte gevolgen ondervindt van het plaatsen van een damplank.

Uit de resultaten blijkt dat er bij een beperkt aantal constructies kans is op indirecte schade door zettingen. De volledige zettingscurve in functie van de afstand tot de damplank is opgenomen in bijlage 2. Bij de berekening van de zettingen is geen rekening gehouden met eventuele bestaande grondkerende constructies.

Tabel 3.11 Overzicht resultaten zettingen Hergarden en Meijers

sectie	sondering	Hergarden		Meijers	
		Maximale zetting [mm]	Invloedszone [m]	Maximale zetting [mm]	Invloedszone [m]
Sectie 1a/b	DM006	97.43	4	80.5	8
Sectie 2	DM011	80.62	5	62.5	5
Sectie 3	DM013	36.87	6	40	7
Sectie 4	CPT161026	56	5.5	85	6
Sectie 5	CPT161026	56	5.5	85	6
Sectie 8	DM020	44.36	6	22	6
Sectie 9	D-87	46.36	6	20	6
Sectie 10	D-84	23.56	4.5	18	5.5
Sectie 11	D-42	48.17	7.5	40	9.5
Sectie 15 en 16	DM054	125.37	6.5	150	7
Sectie 17	DM057	67.43	6.5	/	/

Op basis van de resultaten wordt één zone geïdentificeerd waar potentiële schade kan optreden: de hallen bij sectie 17. In de overige secties bevinden zich geen constructies binnen de invloedsectie.

In sectie 17 worden de nieuwe damplanken direct vóór de reeds bestaande damplanken geplaatst. De bestaande damplanken kunnen de optredende trillingen deels reflecteren en dempen. Afhankelijk van de eigenfrequentie is echter ook een versterking van de trillingen mogelijk, al lijkt dit onwaarschijnlijk. De bestaande damplank is reeds geplaatst in de grindlaag, en de nieuwe damplanken zullen dieper in dezelfde grindlaag worden aangebracht.

Voor secties 15 en 16 zijn geen gegevens beschikbaar over de aanzetdiepte van de palen voor de betonplaat. Daarnaast bevindt zich een bestaande damplank tussen de betonplaat en de nieuwe damplank. Door deze bestaande damplank is het niet mogelijk een nauwkeurige inschatting te maken van de effectieve zettingen. Indien de damplanken trillend worden geïnstalleerd, wordt aanbevolen de trillingen te meten.

3.4 Trillingsvrije installatie

Indien trillingshinder gemitigeerd dan wel weggenomen moet worden, zijn aanvullende maatregelen dan wel alternatieve uitvoeringswijzen vereist. Ten aanzien van alternatief materieel wordt gedacht aan het drukken van damwanden. Ten aanzien van aanvullende maatregelen wordt gedacht aan het wegnemen van grondweerstand. Het wegnemen van grondweerstand tijdens installatie staat op gespannen voet met de functie van de funderingselementen in de gebruiksfase (draagvermogen en stabiliteit). Om deze reden worden beheersmaatregelen gezocht in:

- verlagen spanning in de ondergrond
- vervangen grond door langzaam uithardend medium
- tijdelijk opheffen weerstand middels fluïdatie.

Drukkend installeren van damwanden zonder verdere beheersmaatregelen wordt overigens niet haalbaar geacht, gegeven het installatie traject door grindlagen en de waargenomen conusweerstand. Ook het wisselen van trillen naar drukken tijdens uitvoering is niet voor de hand liggend, daar getrilde planken normaliter geklonken worden aangeleverd i.v.m. heikbaarheid. Een wisseling naar drukken betekent ook het opnieuw bestellen van losse, niet in het fabrieksslot geklonken damplankprofielen.

3.4.1 Verlagen spanning in de ondergrond

Het verlagen van de spanning in de ondergrond is ten aanzien van draagvermogen en uitbuiging zeer lastig. De ontwerpcondities worden feitelijk verstoord, waarmee men na installatie wederom normatief zal moeten aantonen wat de te verantwoorden draagkracht en vervorming is. Als vuistregel wordt veelal gehanteerd dat het uitgenomen grondvolume niet groter mag zijn dan het ingebrachte volume. Op deze wijze blijft de grondspanning na installatie van de elementen enigszins behouden. Het betreft een maatregel die afhankelijk is van de kwaliteit van de uitvoering. Wanneer te veel materiaal wordt uitgenomen (avegaar koud trekken i.p.v. woelen) bestaat een probleem ten aanzien van aantoonbaarheid van draagvermogen en vervorming. Over de hoogte welke ontgraven wordt speelt dit aspect echter niet, maar zal in dit project wellicht weinig soelaas bieden, omdat de hogere weerstand nu juist in de funderingslaag wordt aangetroffen. Het voorwoelen werkt kostprijs verhogend, maar kan onafhankelijk van het intrillen worden uitgevoerd, mits voorafgaand uiteraard. Bijkomend aspect is dat de heilijn onder water aanvangt, waarmee sturing en controle bemoeilijkt wordt. Met name de controle op uitgekomen grond zal tijdens het voorboren niet eenvoudig zijn.

3.4.2 Voorboren

Om het in paragraaf 3.4.1 genoemde probleem te ondervangen wordt ook wel uitgeweken naar voorboren met een langzaam uithardende mortel. De elementen worden dan in een bodemslag bestaande uit zand met mortel ingebracht. In geval van het middels drukken installeren van de damplanken zal dit naar verwachting een vereiste zijn, woelen zal niet voldoende zijn. Het toepassen van een dergelijke mortel veroorzaakt wel een afhankelijkheid in de uitvoering, de planken moeten binnen 5 dagen na aanbrengen mortel worden ingebracht.

3.4.3 Fluïdatie

Het toepassen van fluïdatie kan succesvol zijn in het beheersen van benodigde slagkracht dan wel het mogelijk maken van drukken, echter dit concept is niet in combinatie met heien mogelijk. Zowel

drukkend als trillend installeren kan met toepassing van waterinjectie uitgevoerd worden, waarbij wordt uitgegaan van een hoge druk, laag debiet, om permanente verstoring te voorkomen. De kwaliteit van uitvoering is zeer bepalend voor het resultaat (verstopte nozzles door te beginnen voordat druk is opgebouwd, aanvoer slang i.p.v. aanvoerbuis, te lage injectie druk etc.). De voorzieningen moeten tevens vooraf zijn aangebracht, omdat installatie op het werk te tijdrovend is, het besluit moet daarmee voor uitvoering genomen worden. De water toevoer naar de plank is op zich relatief snel aan te koppelen. Het aanbrengen van de injectievoorziening alsmede de pomp werken uiteraard kostprijs verhogend.

4 Hinder

4.1.1 Berekeningsprocedure en veronderstellingen

Door de SBR is een meet- en beoordelingsrichtlijn opgesteld voor het toetsen van hinder door trillingen in gebouwen SBR-richtlijn B [6]. Deze richtlijn beschrijft hoe, op basis van een gemeten trillingssignaal in een pand, de maximale gewogen voortschrijdende effectieve waarde ($V_{\text{eff,max}}$) kan worden berekend. Daarnaast wordt een gemiddeld trillingsniveau (V_{per}) bepaald als tweede toetsingsparameter. Dit gemiddelde trillingsniveau hangt af van de duur van de optredende trillingen tijdens de beoordelingsperiode: een langere blootstelling aan trillingen resulteert in een hogere V_{per} .

De SBR-richtlijn B beschrijft een toetsingsprocedure waarin zowel $V_{\text{eff,max}}$ als V_{per} worden beoordeeld. Eerst wordt de maximale effectieve snelheid $V_{\text{eff,max}}$ getoetst aan de onderste streefwaarde A1. Als $V_{\text{eff,max}}$ lager is dan A1, voldoet de situatie aan de richtlijn. Indien deze waarde hoger is, volgt een toetsing aan de bovenste streefwaarde A2. Daarnaast wordt V_{per} bepaald, het gemiddelde trillingsniveau. Alleen wanneer $V_{\text{eff,max}}$ lager is dan A2 én V_{per} lager is dan A3, wordt voldaan aan de SBR-richtlijn B.

Er is gekozen om hinder te toetsen aan de streefwaarden voor "continu of herhaald voorkomende trillingen gedurende uitsluitend de dagperiode (07:00-19:00) en over korte perioden (≤ 78 dagen)". Omdat er zich geen woningen in de directe omgeving bevinden en de werkzaamheden naar verwachting niet 's avonds of 's nachts plaatsvinden, is toetsing van hinder buiten de dagperiode niet relevant.

De bijbehorende streefwaarden volgens SBR-richtlijn deel B zijn weergegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Streefwaarde hinder

Duur D van de activiteiten gedurende korte periode (<78 dagen)								
1 dag $\leq D$			6dagen < D ≤ 26 dagen			26 dagen < D ≤ 78 dagen		
A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
0.8	6	0.4	0.4	6.0	0.3	0.3	6.0	0.2

Als uitgangspunt voor de analyse wordt de reeds uitgevoerde trillingsprognose als gevolg van het heien en het intrillen van palen en damwanden gebruikt. Hieruit volgen de topniveaus (V_{top}). Om te kunnen toetsen aan hinder volgens de SBR-richtlijn deel B zijn deze V_{top} niveaus omgerekend naar $V_{\text{eff,max}}$ en V_{per} .

4.1.2 Bepaling $V_{\text{eff,max}}$

Voor het berekenen van de $V_{\text{eff,max}}$ moet er rekening gehouden worden met de opslingering van de vloeren. Dit houdt in dat het trillingssignaal aan de fundering wordt versterkt in het pand door opslingering van een vloer. Hierbij dient de optredende trillingssnelheid (bepaald in de prognose) vermenigvuldigd te worden met de opslingeringsfactoren geadviseerd door de CUR-publicatie 166 [2] zie Tabel 4.2. De formule om $V_{\text{eff,max}}$ te bepalen wordt hieronder weergegeven (voor trillen). In de deze omrekening zit inbegrepen dat $V_{\text{eff,max}}$ een voortschrijdende effectieve waarde betreft, waarbij een frequentieweging is toegepast. De trillingen worden begroot conform een prognose. Hier zal gebruik gemaakt worden van een betrouwbaarheidsinterval van 50% voor de trillingen.

$$v_{\text{eff,max}} = 0.64 * v_{\text{top}} * C_{fc}$$

Tabel 4.2 Opslengeringsfactoren

Oorzaak	Materiaal	C _{fc}
heien	beton	1,4
	hout	1,4
trillen	beton	1,8
	hout	2,7

4.1.3 Bepaling V_{per}

De tweede toetsingsparameter betreft het gemiddeld trillingsniveau (V_{per}). De duur en de frequentie van de optredende trilling over een beoordelingsperiode wordt hierin verwerkt. Indien $V_{eff,max}$ vaak voorkomt, zal V_{per} toenemen en vice versa. Er wordt in eerste instantie aangenomen dat bij het intrillen van een damplank slechts 50% van de duur effectief trillingen worden gegenereerd. In een dag met een bouwactiviteit van 12 uur, betekent dit dat er 6 uur effectief getrild wordt.

De bepaling van V_{per} :

$$v_{per} = v_{per,meet} * \sqrt{\frac{T_b}{T_0}}$$

$$v_{per,meet} = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n v_{eff,max,30}^2}$$

Met:

- T_b totale tijdsduur trillingsbron
- T_0 Tijdsduur beoordelingsperiode
- $v_{per,meet}$ kwadratisch gemiddelde effectieve waarde van maxima over meetperiode
- $v_{eff,max,30}$ $v_{eff,max}$ over een periode van 30 seconden (hier gelijk aan $v_{eff,max}$)
- n aantal 30 seconden in meetperiode (hier aantal 30 sec binnen de dag periode)

4.1.4 Berekeningsresultaten

De resultaten voor de constructies die zich bevinden op een afstand van 5 en 10 meter worden in deze paragraaf weergegeven. Tabel 4.3 geeft een overzicht van de resultaten. De resultaten zijn groter dan A1 maar niet groter dan A2, waardoor V_{per} nog moet worden gecontroleerd.

Tabel 4.3 Berekening $V_{eff,max}$

	Afstand 5 meter	Afstand 10meter
v_{top} [mm/s]	4.4	3.11
$V_{eff,max}$ [mm/s]	5.068	3.58
UC t.o.v. A ₂ [%]	84.48	59.73

De maximaal toelaatbare duur van de trillingen wordt iteratief bepaald conform de maximale waarde van A₃. Tabel 4.4 en Tabel 4.5 geven respectievelijk de maximale duur per dag van de trillingen voor een afstand van 5 en 10 meter.

Tabel 4.4 Maximale duur trillingen – 5 meter

	D ≤ 1 dag			6 dagen <D ≤ 26 dagen		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Streefwaarden	0,8	6	0,4	0,4	6	0,3
Toelaatbare duur bouwactiviteit betonnen vloer	56 min			42 min		

Tabel 4.5 Maximale duur trillingen – 10 meter

	D ≤ 1 dag			6 dagen <D ≤ 26 dagen		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Streefwaarden	0,8	6	0,4	0,4	6	0,3
Toelaatbare duur bouwactiviteit betonnen vloer	80.4 min			60 min		

5 Conclusies

5.1 Schade

5.1.1 Directe schade – trillingen

- **Gebouwen Besix en Koopmans**
Bevinden zich op ruime afstand van de damwanden (meer dan twee keer de installatielengte). Kans op trillingsschade is klein (<2%, conform SBR-richtlijn A). Alleen lichte cosmetische schade mogelijk. Indicatieve metingen aanbevolen bij de gebouwen nabij secties 1 t/m 4.
- **Opslagtanks Varo Energy**
Circa 25 meter van de werkzaamheden; kans op schade is klein. Wel is aanvullende inventarisatie van installaties noodzakelijk vanwege onbekende trillingsgevoeligheid. Trillingscriteria moeten vooraf worden vastgesteld en gemonitord.
- **Loodsen Kalle en Bakker, Sif, Smurfit Westrock**
Bevinden zich op korte afstand (ca. 10–15 m); kans op schade is groter. Advies: uitgebreide voor- en tijdens metingen om risico te beheersen en schade (<2%) te voorkomen.
- **Vloeistofdichte vloer Menten**
Zorg over mogelijke schade door zettingen en trillingen. Daarom is gekozen voor een trillingsarme aanbrengmethode om risico's te beperken.
- **Productiehallen Sif (sectie 17)**
Damwanden komen direct naast of in de hallen. Vanwege de zeer korte afstand biedt de rekenmethode geen betrouwbare schade-inschatting. Er is sprake van aanzienlijke onzekerheid. Uitgebreide trillingsmetingen en mogelijk een trillingvrije aanbrengtechniek zijn sterk aanbevolen.

5.1.2 Indirecte schade – zettingen

De relevante constructies in de meeste secties bevinden zich buiten de invloedsectie van de zettingen. Enkel in sectie 17 zijn constructies aanwezig in de invloedsectie. Gezien er telkens een reeds bestaande damplank aanwezig tussen de constructies en de nieuwe damplank, is het niet mogelijk om de effectieve zettingen nauwkeurig te bepalen. Ondanks het vermoeden dat de zettingen geen significante impact zullen hebben op de bestaande constructies, wordt aangeraden om een trillingsvrije uitvoeringsmethode te hanteren voor sectie 17.

5.1.3 Trillingsvrije installatie

De uitvoering kan met beheersmaatregelen aangepast worden waarmee trillingshinder weggenomen dan wel gereduceerd kan worden. Qua beheersmaatregelen gaan de gedachten uit naar voorboren, voorboren onder groutinjectie en fluïderen. Voor alle beheersmaatregelen geldt dat deze sterk kostprijsverhogend werken en de uitvoering complexer, gespecialiseerder maken alsook vertragen. Het afroepen van dergelijke maatregelen wordt op voorhand niet onmogelijk geacht, doch ook niet als proportioneel gezien, gegeven de geprognosticeerde schade kans en trillingshinder.

5.2 Hinder

De geprognosticeerde trillingen die kunnen ontstaan bij de voorgenomen bouwactiviteiten voldoen aan de maximale $V_{\max}$ (A2) eis uit de SBR-richtlijn deel B, welke de hinder voor personen evalueert. V_{per} is afhankelijk van hoelang en hoe frequent de trillingen oplopen. Hier werd aangenomen dat tijdens het trillen $V_{\text{eff,max}}$ voortdurend aanwezig is bij het trillen. De maximale duur is bijgevolg itererend bepaald en een samenvattend overzicht wordt weergegeven in Tabel 5.1.

Tabel 5.1 samenvattend overzicht trillingshinder

	D ≤ 1 dag		6 dagen < D ≤ 26 dagen	
Afstand	5 meter	10 meter	5 meter	10 meter
Max duur [min]	56	80.4	42	60

Hieruit kan men besluiten dat dit moeilijk werkbaar is om de secties uit te voeren en te voldoen aan de eisen voor hinder. Hier kan worden gekozen om de uitvoeringen trillingsvrij uit te voeren of de eis voor trillingen versoepelen. Gezien het een havengebied betreft en geen bewoonde omgeving, wordt er voorgesteld om de eis te versoepelen. Daarnaast dient opgemerkt te worden dat er geen wooneenheden zijn in de onmiddellijke omgeving van de haven waardoor men kan opteren om de plaatsing uit te voeren buiten de werkuren. Hierdoor zijn er geen mensen aanwezig die hinder kunnen ondervinden van de uitvoering.

6 Referenties

Normen en richtlijnen

- [1] NEN-EN 12063 Uitvoering van bijzonder geotechnisch werk – Damwanden.
- [2] CURNET, juli 2012, Damwandconstructies, CUR-publicatie 166, 6e herziene druk, deel 1.
- [3] CURNET, juli 2012, Damwandconstructies, CUR-publicatie 166, 6e herziene druk, deel 2.
- [4] SBRCURnet, 2014, QuayWalls, Second Edition, CUR-publicatie 211.
- [5] SBRCURnet, 2017 SBR richtlijn A Schade aan bouwwerken
- [6] SBRCURnet, 2006 SBR trillingsrichtlijn B Hinder voor personen in gebouwen
- [7] SBRCURnet, 2006 SBR trillingsrichtlijn C Storing aan trillingsgevoelige apparatuur

Projectdocumenten

- [8] SBE, 2024, Uitgangspuntennotitie Willem Alexanderhaven Roermond 15298-ALG-G-DO-001
- [9] SBE, 2025, DO Logistieke kade en kerende wand Besix 15298-ALG-G-DO-002
- [10] SBE, 2025, DO Logistieke kade Koopmans 15298-ALG-G-DO-003
- [11] SBE, 2025, DO Logistieke kade en kerende wanden Smurfit Westrock 15298-ALG-G-DO-005
- [12] SBE, 2025, DO Logistieke kade Sif 15298-ALG-G-DO-006
- [13] SBE, 2025, DO Logistieke kade en kerende wanden Kalle en Bakker 15298-ALG-G-DO-007
- [14] SBE, 2025, DO Insteekhavens Sif en kade Mijnheerkens 15298-ALG-G-DO-008
- [15] SBE, 2025, DO Kerende wanden 15298-ALG-G-DO-009
- [16] SBE, 2025, Haalbaarheid installeren damwanden 15298-MEM-G-DO-002

Onderzoeken en metingen

- [17] IGL, november 2021, Schippershaven Roermond; Bodemhoogten multibeam, GER007B_SCHIPPERSHAVEN- BODEMHOOGTEN_20211109.
- [18] IGL, november 2021, Lisbonnehaven Roermond; Bodemhoogten multibeam, GER007B_LISBONNEHAVEN- BODEM_20211109.
- [19] IGL, november 2021, Mijnheerkenshaven Roermond; Bodemhoogten multibeam, GER007B_MIJNHEERKENSHAVEN-BODEM_20211109.
- [20] Conex, maart 2010, Controlesonderingen thv bouwplan a/d Mijnheerkensweg [K-1260] te Roermond, CXA071.10.
- [21] Conex, september 2009, Sonderingen bouwplan a/d Mijnheerkensweg te Roermond, CX23509.
- [22] De Waal, mei 1976, Bodemonderzoek Mijnheerkensweg, 5259.
- [23] Fugro, februari 2020, Nieuwbouw rollenopslag aan de Mijnheerkensweg 18 te Roermond, 9019-158966.
- [24] Geoconsult, juni 2007, Nieuwbouw hal 10 en 11 op het Sif-terrein aan de Mijnheerkensweg 33 te Roermond, GB- 30099.
- [25] Geoconsult, september 2002, Nieuwbouw hal 9 met kraanbaan op Sif-terrein aan de Mijnheerkensweg in de Alexanderhaven gemeente Roermond, GG-5070.
- [26] IGF, maart 1984, Uitbreiding Sif B.V. aan de Mijnheerkensweg te Roermond, 84071.
- [27] Inpijn-Blokpoel, augustus 2011, Nieuwbouw kunstmestopslag, kantoren en betonmixer te Roermond, 02P000399- 01.
- [28] Inpijn-Blokpoel, november 2011, Nieuwbouw opslagloods voor zout op terrein Kalle Bakker aan de Lisbonnehaven te Roermond, 02P000399-02.
- [29] Inpijn-Blokpoel, februari 2012, Nieuwbouw opslagloods op terrein Kalle Bakker aan de Lisbonnehaven te Roermond, 02P000399-04.

- [30] Inpijn-Blokpoel, juli 2012, Nieuwbouw opslagloods op terrein Kalle Bakker aan de Lisbonnehaven te Roermond, 02P000399-05.
- [31] Inpijn-Blokpoel, juli 2013, Nieuwbouw opslagloods (fase II) op terrein Kalle Bakker aan de Lisbonnehaven te Roermond, 02P000399-06.
- [32] Inpijn-Blokpoel, maart 2013, Nieuwbouw Blok Jazz City aan de Schipperswal in BP Alexanderhaven te Roermond, 02P003261.
- [33] Inpijn-Blokpoel, februari 2014, Verzwaring hal 6 (5735) van Sif aan de Mijnheerkensweg te Roermond, 02P004116- 01.
- [34] Inpijn-Blokpoel, januari 2014, Verzwaring voorzijde hal 9 en 10 (5609) aan de Mijnheerkensweg te Roermond, 02P004149-01.
- [35] Inpijn-Blokpoel, oktober 2014, Nieuwbouw bedrijfspand Sif op landtong aan de Mijnheerkensweg te Roermond, 02P005243.
- [36] Inpijn-Blokpoel, november 2014, Kadeverbetering Alexanderhaven te Roermond, 02P005413.
- [37] Inpijn-Blokpoel, september 2015, Nieuwbouw kantoor Sif op locatie Kasdorp aan de Mijnheerkensweg te Roermond, 02P006543.
- [38] Inpijn-Blokpoel, juni 2001, Bebouwing aan de Mijnheerkensweg te Roermond, VG4027.
- [39] Inpijn-Blokpoel, april 2023, BIZ-kaden en HWK Roermond - Willem Alexanderhaven te Roermond, 22ZP1423-RG-01.

Overige documenten en referenties

- [40] Rijkswaterstaat, <https://waterinfo.rws.nl/>.
- [41] Meijers, P., 2017, Settlement during vibratory sheet piling, Proefschrift TU Delft.
- [42] Rijnveld, B., Snethlage, A.J., 2014: Aanscherpen trillingsprognoses met nauwkeuriger bepaalde veiligheidsfactoren. Geotechniek 2014, nr. 4, p37

Bijlagen

Bijlage 1 Trillingspredictie

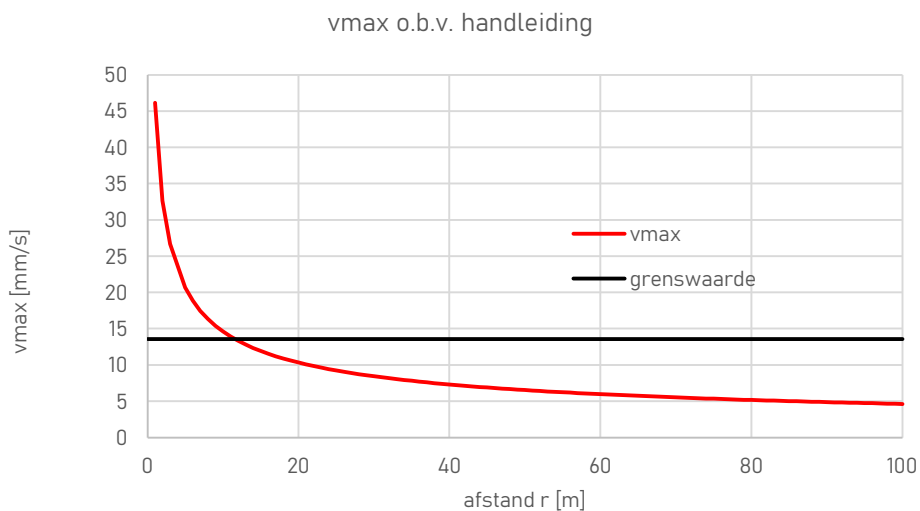
De trillingspredictie wordt uitgevoerd met onderstaande gegevens:

1.1.2 trillen			
slagkracht R	1600	kN	bepaal $V_{0,cor}$ met onderstaande formule
$V_{0,cor} = v_0 + c_{vel} * (R - 350)$			
v_0	12	(tabel 5 - handleiding)	
c_{vel}	0,014	(tabel 5 - handleiding)	
$V_{0,cor}$	29,5		

De rode lijn in onderstaande grafiek stelt de trillingsintensiteit voor in functie van de afstand van de damplank. De zwarte lijn stelt de grenswaarde voor: indien de rode lijn zich boven de zwarte bevindt, is de kans op schade kleiner dan 1%.

OPM: de grenswaarde is afhankelijk van de aannames voor het betreffende gebouw en de manier van meten.

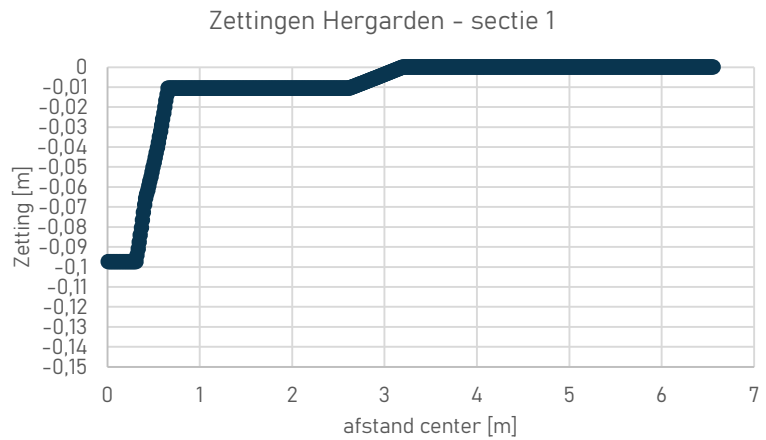
$V_{0,cor}$ wordt nog vermenigvuldigd met C_{0f} , deze factor neemt de geometrische- en materiaal demping in rekeningen alsook de demping door overgang van de grond naar de fundering.



Bijlage 2 Zettingspredictie Hergarden

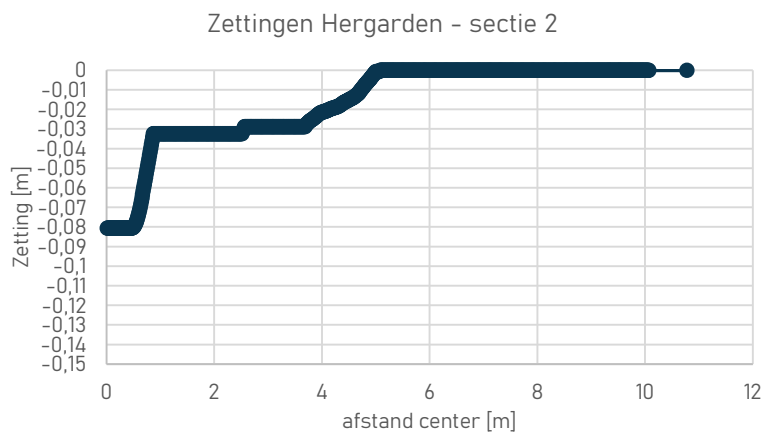
- Sectie 1

frequentie	38,8	Hz
α	4	-
n_{max}	0,45	-
n_{min}	0,25	-
V_{max}	78,84	mm/s
θ	30	°



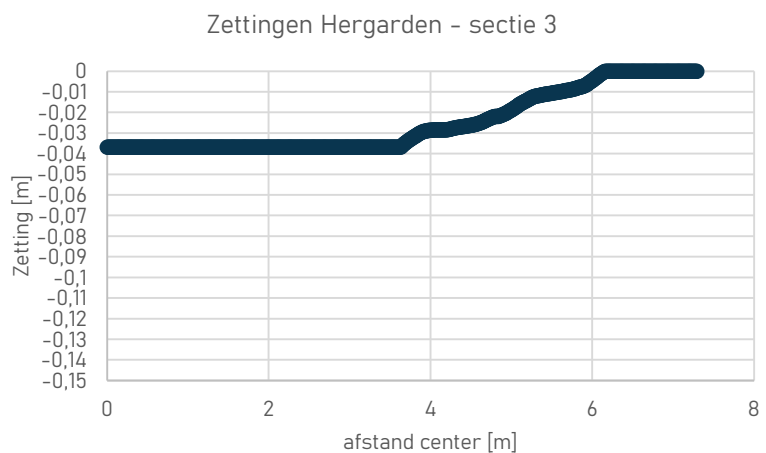
- Sectie 2

frequentie	38,8	Hz
α	4	-
n_{max}	0,45	-
n_{min}	0,25	-
V_{max}	78,84	mm/s
θ	30	°



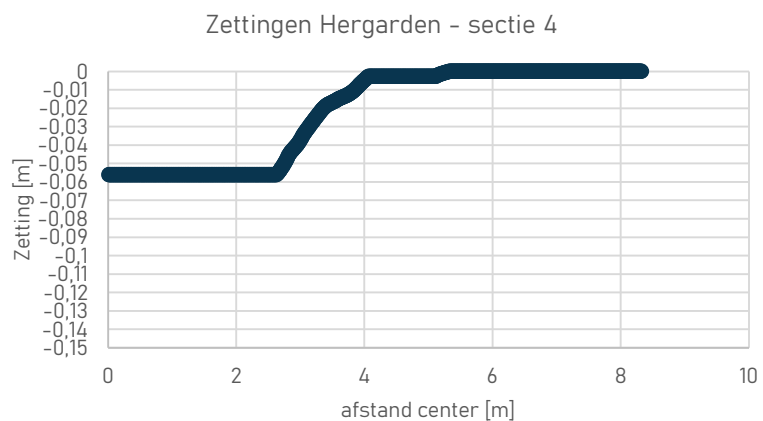
- Sectie 3

frequentie	38,8	Hz
α	4	-
n_{max}	0,45	-
n_{min}	0,25	-
V_{max}	78,84	mm/s
θ	30	°



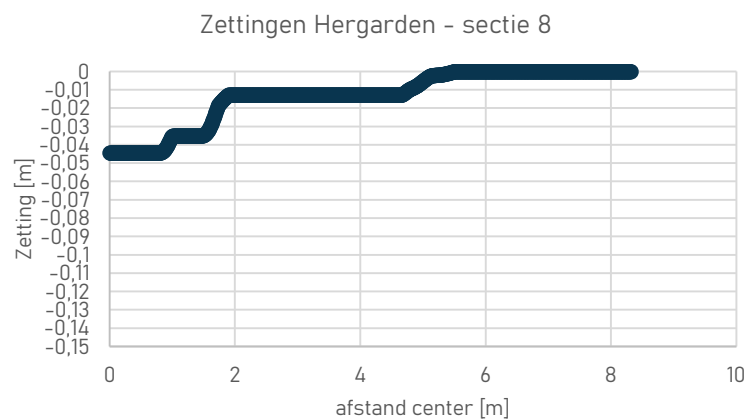
- Sectie 4 & 5

frequentie	38,8	Hz
α	4	-
n_{max}	0,45	-
n_{min}	0,25	-
V_{max}	78,84	mm/s
θ	30	°



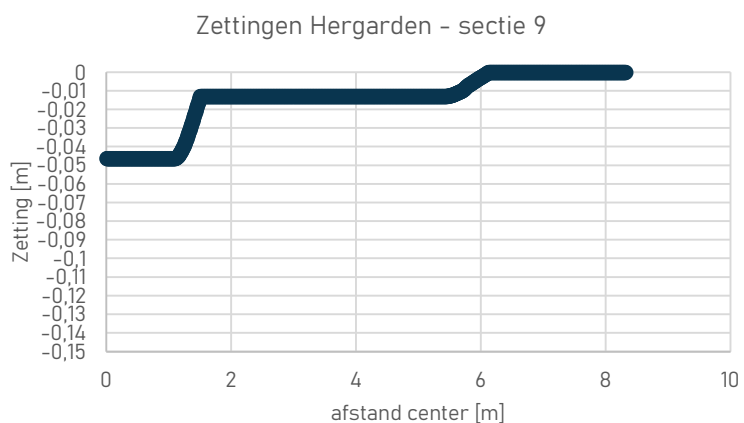
- Sectie 8

frequentie	38,8	Hz
α	4	-
n_{max}	0,45	-
n_{min}	0,25	-
V_{max}	78,84	mm/s
θ	30	°



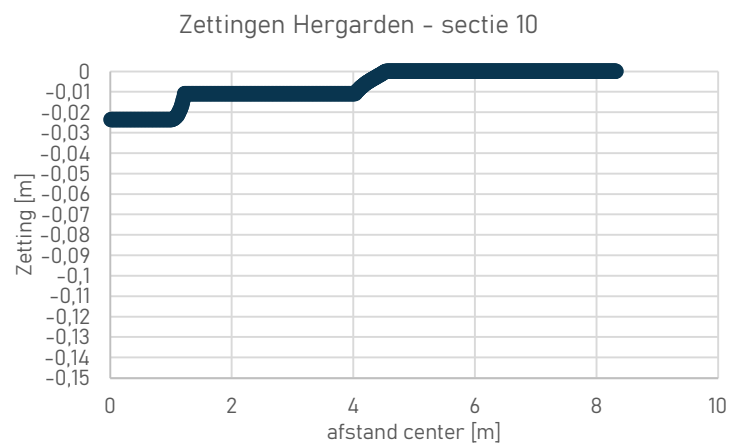
- Sectie 9

frequentie	38,8	Hz
α	4	-
n_{max}	0,45	-
n_{min}	0,25	-
V_{max}	78,84	mm/s
θ	30	°



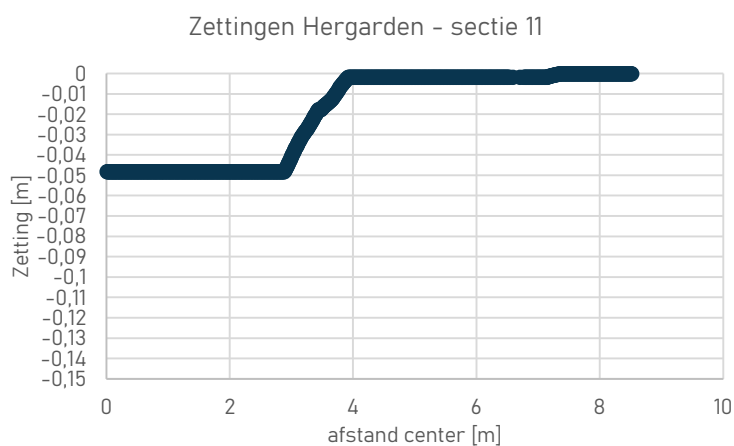
- Sectie 10

frequentie	38,8	Hz
α	4	-
n_{max}	0,45	-
n_{min}	0,25	-
V_{max}	78,84	mm/s
θ	30	°



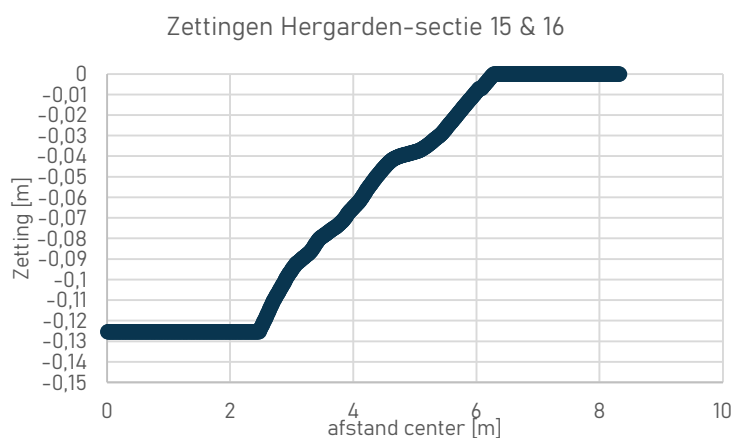
- Sectie 11

frequentie	38,8	Hz
α	4	-
n_{max}	0,45	-
n_{min}	0,25	-
V_{max}	78,84	mm/s
θ	30	°



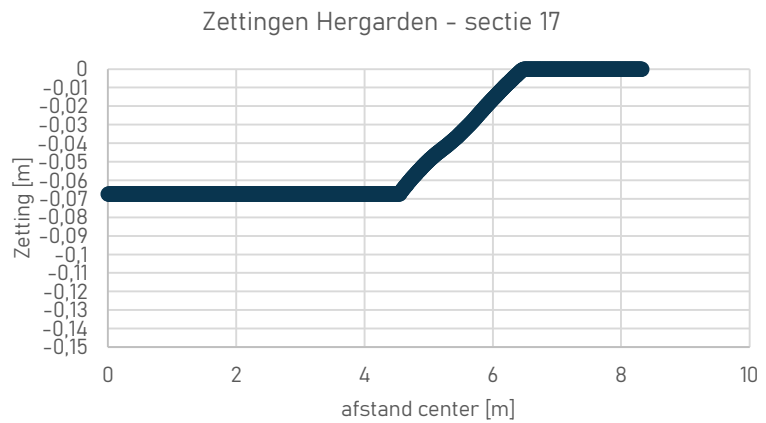
- Sectie 15 & 16

frequentie	38,8	Hz
α	4	-
n_{max}	0,45	-
n_{min}	0,25	-
V_{max}	78,84	mm/s
θ	30	°



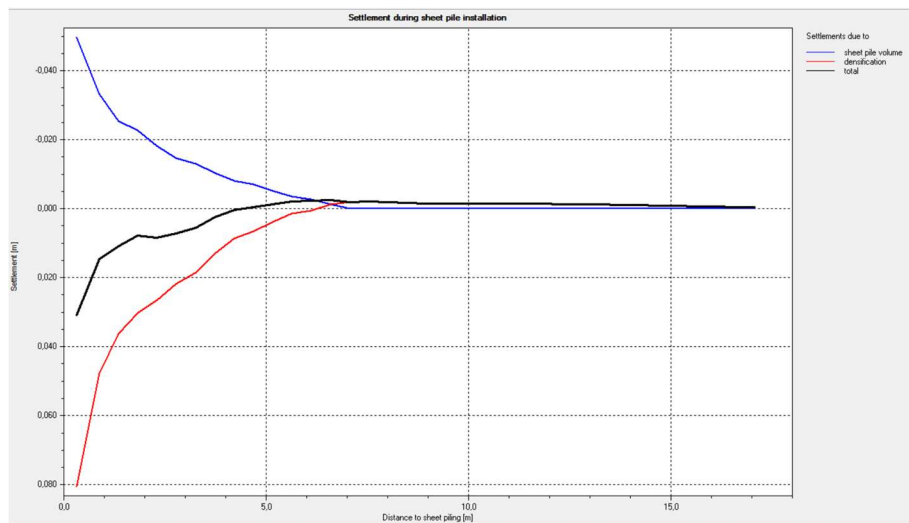
Sectie 17

frequentie	38,8	Hz
α	4	-
n_{max}	0,45	-
n_{min}	0,25	-
V_{max}	78,84	mm/s
θ	30	°

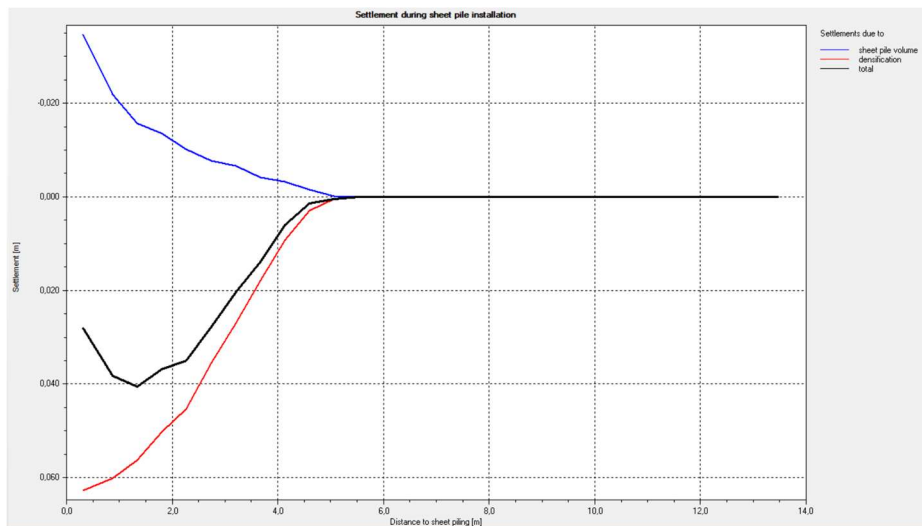


Bijlage 3 Zettingspredictie Meijers

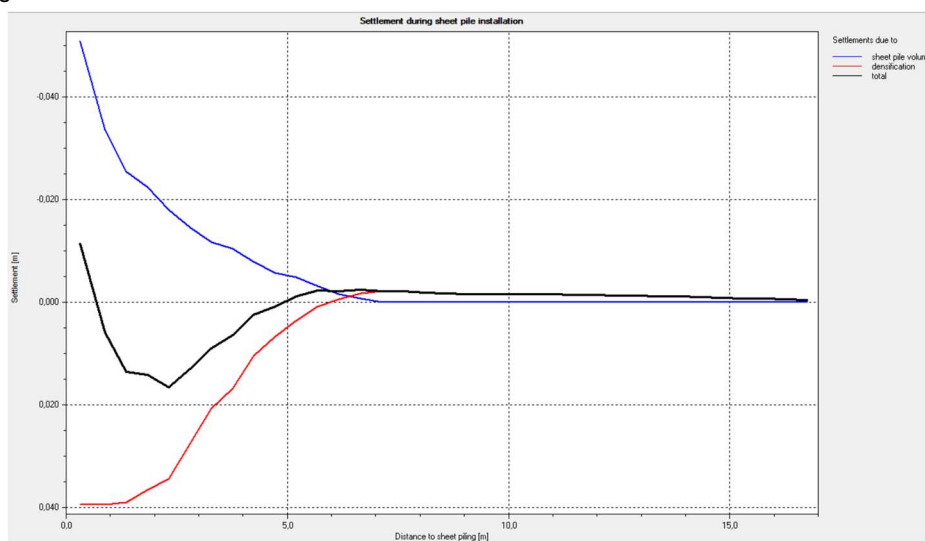
- Sectie 1



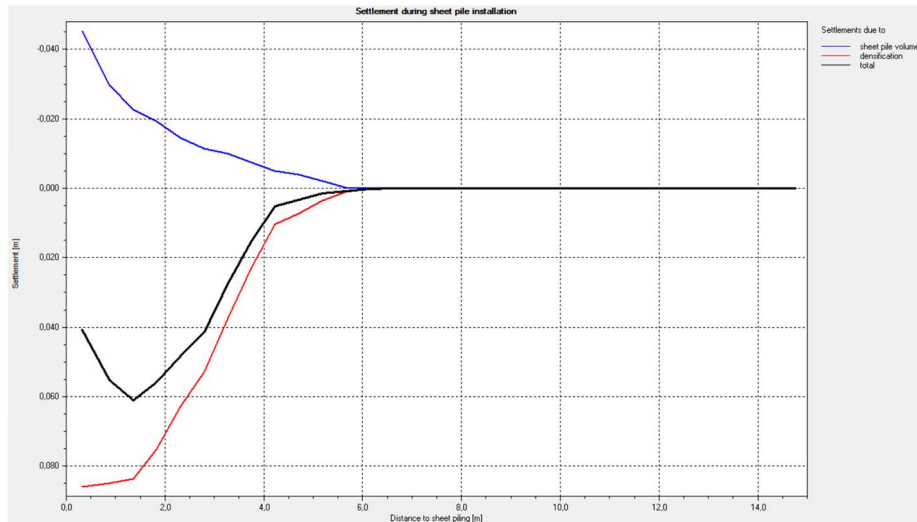
- Sectie 2



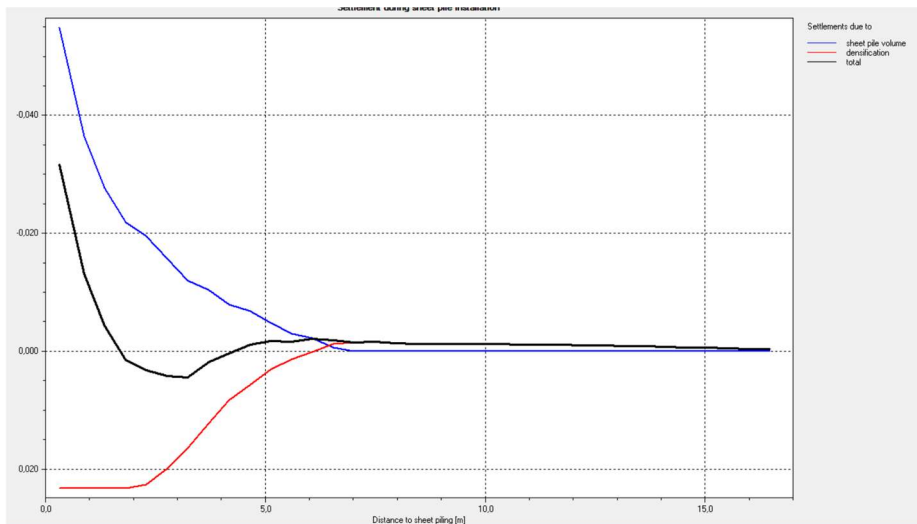
- Sectie 3



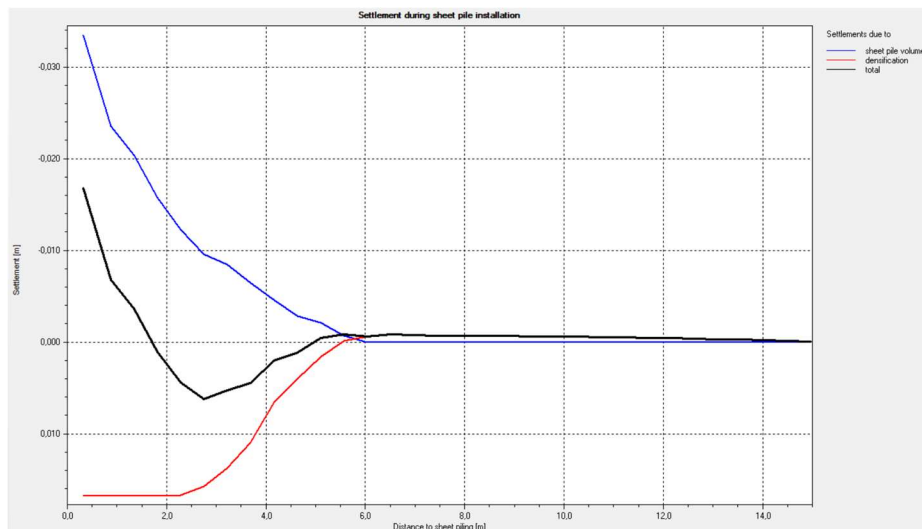
- Sectie 4



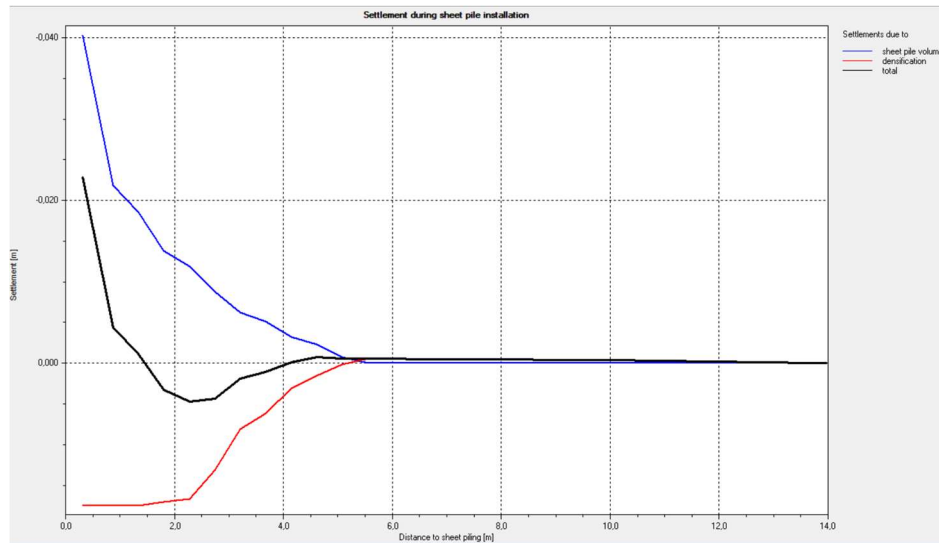
- Sectie 8



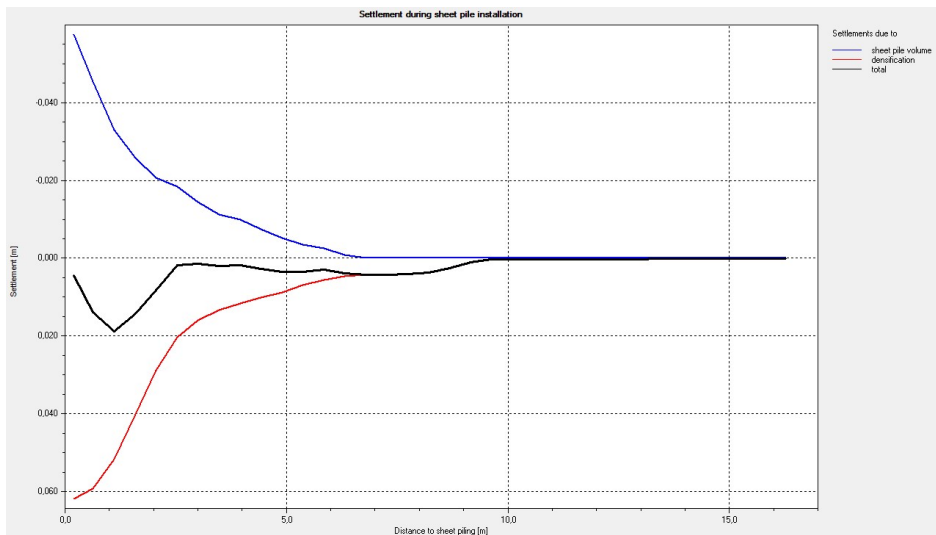
- Sectie 9



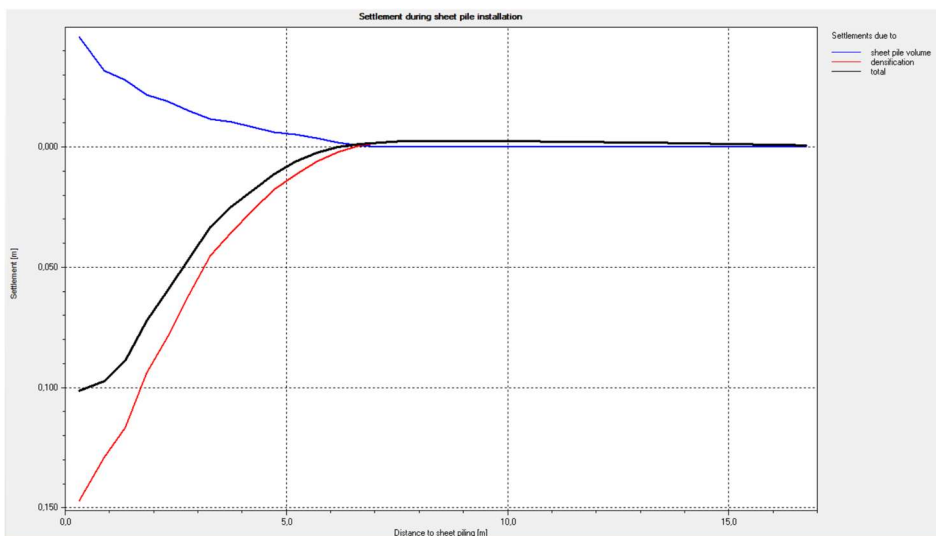
- Sectie 10



- Sectie 11



- Sectie 15&16



Bijlage 4 Iteraties hinder

- 5 meter

iteratie - 5 meter - A3 = 0,4				iteratie - 5 meter - A3 = 0,3			
5 meter afstand				5 meter afstand			
Veff,max	5,068	duur [min]	56,7	Veff,max	5,068	duur [min]	42,6
		A3	0,4			A3	0,3
duur	Vper,meet	Tb/T0	max duur	duur [uur]	Vper,meet	Tb/T0	max duur
0,3	0,801321	0,249176317	2,990115798	0,3	0,801321159	0,140161678	1,681940137
0,4	0,925286	0,186882237	2,242586849	0,4	0,925285974	0,105121259	1,261455102
0,5	1,034501	0,14950579	1,794069479	0,5	1,034501168	0,084097007	1,009164082
0,6	1,133239	0,124588158	1,495057899	0,6	1,133239251	0,070080839	0,840970068
0,71	1,23275	0,105285768	1,263429211	0,71	1,232750415	0,059223244	0,710678931
0,8	1,308552	0,093441119	1,121293424	0,8	1,308551973	0,052560629	0,630727551
0,9	1,387929	0,083058772	0,996705266	0,9	1,387928961	0,046720559	0,560646712
0,945	1,422204	0,079103593	0,949243111	1	1,463005582	0,042048503	0,504582041
1,1	1,534413	0,067957177	0,815486127	1,1	1,534413199	0,038225912	0,458710946
1,2	1,602642	0,062294079	0,74752895	1,2	1,602642318	0,03504042	0,420485034
1,3	1,668083	0,057502227	0,690026723	1,3	1,668083012	0,032345003	0,388140032
1,4	1,731052	0,053394925	0,6407391	1,4	1,731051549	0,030034645	0,360415744

- 10 meter

iteratie - 10 meter - A3 = 0,4				iteratie - 10 meter - A3 = 0,3			
10 meter afstand				10 meter afstand			
Veff,max	3,58	duur [min]	80,4	Veff,max	3,58	duur [min]	60,3
		A3	0,4			A3	0,3
duur	Vper,meet	Tb/T0	max duur	duur	Vper,meet	Tb/T0	max duur
0,3	0,57	0,499360195	5,992322337	0,3	0,566048	0,28089011	3,370681
0,4	0,653616	0,374520146	4,494241753	0,4	0,653616	0,210667582	2,528011
0,5	0,730764	0,299616117	3,595393402	0,5	0,730764	0,168534066	2,022409
0,6	0,800512	0,249680097	2,996161169	0,6	0,800512	0,140445055	1,685341
0,71	0,870806	0,210997265	2,531967185	0,7	0,864652	0,120381476	1,444578
0,8	0,924352	0,187260073	2,247120876	0,8	0,924352	0,105333791	1,264005
0,9	0,980423	0,166453398	1,997440779	0,9	0,980423	0,093630037	1,12356
0,945	1,004635	0,158527046	1,902324551	1	1,033457	0,084267033	1,011204
1,1	1,083899	0,136189144	1,634269728	1,005	1,036037	0,083847794	1,006174
1,2	1,132095	0,124840049	1,498080584	1,2	1,132095	0,070222527	0,84267
1,3	1,178322	0,115236968	1,382843616	1,3	1,178322	0,064820795	0,77785
1,34	1,196313	0,111797059	1,341564702	1,4	1,222803	0,060190738	0,722289