





Document : **Trillingspredictie in-/uittrillen stalen damwand**

Projectomschrijving : Kanaal De Haandrik
Projectlocatie : Almelo

Opdrachtgever : Vermeer expertise

Documentnummer : TP 21.0185-1.1
Datum : 15 april 2021

Documentbeheer				
rev.	datum	status	Auteur	verificatie/ autorisatie
0	05-02-2021		N.B. Scheide	T.J.H. Hoffer
1	15-04-2021		 15-04-2021	 15-04-2021



Documentnummer : TP 21.0185-1.1
Pagina : 1/10

Inhoudsopgave

1	Inleiding	2
2	Normen, richtlijnen en referenties.....	2
3	Trillingspredictie.....	3
4	Toelaatbare trillingssnelheid SBR A 2017 (zie bijlage D).....	3
5	Trillingssnelheid.....	4
5.1	Trillingssnelheid trillen damwand.....	4
6	Conclusie	5
6.1	5% overschrijdingskans	5
6.2	1% Overschrijdingskans	6

Bijlagen

Sondering standaard bodemprofiel	A
Projectgegevens	B
Gegevens trilblok.....	C
Samenvatting SBR-A 2017 Schade aan gebouwen	D

1 Inleiding

Op het traject van Kanaal De Haandrik te Almelo wordt de oeverconstructie vervangen. Voor de aanleg van de oever wordt stalen damwand ingebracht. Men heeft voornemens om deze damwanden, indien mogelijk, hoogfrequent trillend te installeren.

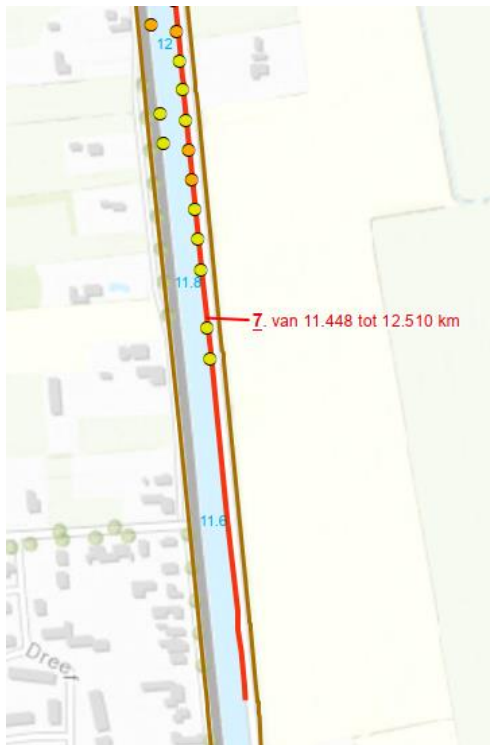
Bij het intrillen van de damwanden en staalprofielen komen trillingen vrij, die mogelijk van invloed zijn op omgeving. Om het invloedsgebied van het trillen te bepalen is deze trillingspredictie opgesteld.

Deze trillingspredictie heeft betrekking op:

- Intrillen van damwandplanken met behulp van een trilblok ICE 8RF

De predictie is gericht op de trillingen in relatie tot:

- Bestaande belendingen langs traject 7



Overzicht traject oeverconstructie.



2 Normen, richtlijnen en referenties

De volgende normen en richtlijnen zijn gebruikt:

- SBR-A 2017, Schade aan gebouwen.
- CUR 166, Damwandconstructies 6^e druk deel 2.
- Vakblad Geotechniek april 2012 (dr. Ir. P. Hölscher / ing. P. Kraaijenbrink)
- Vakblad Geotechniek oktober 2014 (Ir. B. Rijnveld / Ir. A.J. Snethlage)

De volgende overige documenten zijn gebruikt:

- Traject 7 KADH
- Geotechnisch bodemonderzoek KADH traject 7 & 8, 21936/R01
- Materieelblad trilblok ICE 8RF.



Documentnummer : TP 21.0185-1.1
Pagina : 3/10

3 Trillingspredictie

De trillingspredictie is opgesteld aan de hand van een eenvoudig empirisch model dat wordt gegeven in CUR 166 6e druk deel 2. Hierbij zijn rekenwaarde voor bronsnelheden en dempingcoëfficiënten gegeven voor een zevental voor Nederland karakteristieke bodemprofielen. Uit onderzoeken is gebleken dat deze waarden conservatief zijn, daarom wordt gerekend met de gecorrigeerde waarden die beschreven staan in het vakblad "Geotechniek oktober 2014". De geprognoseerde trillingswaarden worden getoetst aan de grenswaarden gesteld in de SBR meet- en beoordelingsrichtlijn deel A 2017, schade aan gebouwen.

4 Toelaatbare trillingsnelheid SBR A 2017 (zie bijlage D)

In de SBR meet- en beoordelingsrichtlijn deel A 2017 worden grenswaarden genoemd voor maximaal toelaatbare trillingen teneinde schade aan bouwwerken te voorkomen. Volgens de bestaande praktijkervaring bestaat er een aanvaardbare kleine kans (kleiner dan 1%) dat schade aan bouwwerken en funderingen zal optreden indien de rekenwaarde van de topwaarde van de trillingsnelheid V_d kleiner is dan de rekenwaarde van de grenswaarde V_r . In de richtlijn wordt onderscheid gemaakt in de volgende variabelen, waarmee de rekenwaarde van de grenswaarde V_r wordt bepaald;

- **Type trilling**

Er wordt van uitgegaan dat de trillingen veroorzaakt bij het intrillen van damwand een continu karakter hebben (SBR A, tabel 10.6)

Type trilling	Veiligheidsfactor γ_t
	Draagconstructie en onderdelen
Kortdurend	1,0
Herhaald kortdurend	1,5
Continue	2,5

- **Type trillingsbron**

Voor de bepaling van de grenswaarde bij damwand trillen is uitgegaan van de maatgevende frequentie van het trilblok. Bij hoogfrequente trilblokken is een frequentie tussen de 35 en 40 Hz gebruikelijk. Bij de bepaling van de grenswaarde in situ is van **38 Hz** (2300 Rpm) uitgegaan. (SBR A, tabel 10.8).

Voor de bepaling van de grenswaarde voor de fundering is uitgegaan $V_{kar} = 12$ mm/s (38 Hz, geb. cat. 2, trillingsnelheid) en $a_{kar} = 1,0$ m/s² (trillingsversnelling, SBR A hfst. 10.3.5)

- **Type gebouwcategorie**

De belendingen langs traject 7 bestaat worden ingedeeld in gebouwcategorie 2 (De bouwkundige staat is onbekend) (SBR-A tabel 10.7). => goede staat $\gamma_s = 1,0$ en gevoelige staat $\gamma_s = 1,7$

Type trilling	Veiligheidsfactor γ_s
Bouwkundige staat: normaal Monumentale status: geen	1,0
Bouwkundige staat: gevoelig En/of Monumentale status: monument	1,7

- **Type meting γ_v :**

Type meting	Veiligheidsfactor γ_v
Indicatief	1,6
Beperkt	1,4
Uitgebreid	1,0

- Maximale grenswaarden V_r :

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



Documentnummer : TP 21.0185-1.1
Pagina : 4/10

Grenswaarde uitgebreid	Uitgebreid	Beperkt	Indicatief
	Continu (trillen) bij 38 Hz $V_r / \gamma_v(1,0)$	Continu (trillen) bij 38 Hz $V_r / \gamma_v(1,4)$	Continu (trillen) bij 38 Hz $V_r / \gamma_v(1,6)$
Bebouwing (cat. 2 + goede staat)	4,80 mm/s	3,42 mm/s	3,00 mm/s
Bebouwing (cat. 2 + gevoelige staat)	2,82 mm/s	2,01 mm/s	1,76 mm/s
Fundering (trillingssnelheid)	4,20 mm/s	4,20 mm/s	4,20 mm/s

5 Trillingssnelheid

De optredende trillingssnelheid wordt bepaald op basis van de gecorrigeerde trillingssnelheden van tabel 2 uit het vakblad "Geotechniek oktober 2014", waaruit de referentietrillingssnelheid op $r_0 = 5 \text{ m}^1$ afstand in mm/s is af te leiden bij een gekozen grondprofiel bij een overschrijdingskans van 5%. Uit het vakblad "Geotechniek april 2012" volgt dat 5% overschrijdingskans het meest overeenkomt met de in de praktijk optredende trillingssnelheden.

Van de standaard bodemprofielen komt profiel 2 "Eindhoven", het best overeen met het bodemprofiel ter plaatse van de projectlocatie. In bijlage A is de sondering behorende bij standaard bodemprofiel 2 opgenomen, in bijlage B is een sondering van de projectlocatie opgenomen.

5.1 Trillingssnelheid trillen damwand

Referentietrillingssnelheid v_0 5% kans op overschrijding, $V_0 = 5,3 \text{ mm/s}$

De referentietrillingssnelheid wordt nog gereduceerd op basis van de slagkracht van het trilblok (indien groter dan 350kN) en door de optredende materiaaldemping.

Gecorrigeerde trillingssnelheid bij gegeven slagkracht $v_{0,cor}(x = 5m) = v_0 + c_v(F - 350)$

$$c_v, 5\% = 0,006$$

De optredende trillingssnelheid V_r wordt als volgt bepaald:

Optredende trillingssnelheid op afstand r tot de bron

$$V_r = v_{0,cor} C_{0,f}$$

Reductiecoëfficiënt behorende bij bron afstand r

$$C_{0,f} = 0,7 \sqrt{\frac{5}{r}} \exp[-\alpha(r - 5)]$$

Dempingsfactor

$$\alpha = 0\%$$

Slagkracht trilblok ICE 8RF

$$435 \text{ kN}$$

Belangrijk: Uit de gegeven formules volgt de optredende trillingssnelheid op verschillende afstanden. Gezien de beperkingen van het toegepaste model is het op een kortere afstand dan 5 m^1 niet mogelijk de trillingssnelheid nader te kwantificeren. Hektec heeft d.m.v. terugrekenen afstanden dichterbij berekend (deze zijn minder nauwkeurig).



Documentnummer : TP 21.0185-1.1

Pagina : 5/10

6 Conclusie

Bij 5% overschrijdingskans worden bij de bebouwing de volgende waarden voorspeld bij toepassing van een trilblok ICE 8RF:

6.1 5% overschrijdingskans

Afstand r (m ¹)	Trilblok ICE 8RF 100% vermogen 5% overschrijdingskans	Gebouwc. 2 normaal Uitgebreide meting [< 4,80 mm/s; 38 Hz]	Gebouwc. 2 normaal Beperkte meting [< 3,42 mm/s; 38 Hz]	Gebouwc. 2 normaal Indicatieve meting [< 3,00 mm/s; 38 Hz]	Fundering Ter voorkoming van zetting [< 4,20 mm/s]
1	9,09	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
2	6,43	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
3	5,25	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
4	4,55	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
5	4,07	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
6	3,71	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
7	3,44	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
8	3,22	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
9	3,03	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
10	2,88	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
15	2,35	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
20	2,03	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
25	1,82	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
30	1,66	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
35	1,54	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
40	1,44	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
45	1,36	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
50	1,29	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
55	1,23	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
60	1,17	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet

Afstand r (m ¹)	Trilblok ICE 8RF 100% vermogen 5% overschrijdingskans	Gebouwc. 2 gevoelig Uitgebreide meting [< 2,82mm/s; 38 Hz]	Gebouwc. 2 gevoelig Beperkte meting [< 2,01 mm/s; 38 Hz]	Gebouwc. 2 gevoelig Indicatieve meting [< 1,76 mm/s; 38 Hz]	Fundering Ter voorkoming van zetting [< 4,20 mm/s]
3	5,25	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
4	4,55	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
5	4,07	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
6	3,71	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
7	3,44	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
8	3,22	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
9	3,03	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
10	2,88	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
11	2,74	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
12	2,63	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
13	2,52	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
14	2,43	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
15	2,35	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
20	2,03	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
21	1,98	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
22	1,94	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
23	1,90	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
24	1,86	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
25	1,82	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
26	1,78	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
27	1,75	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
28	1,72	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet



Documentnummer : TP 21.0185-1.1

Pagina : 6/10

6.2 1% Overschrijdingskans

Afstand r (m ¹)	Trilblok ICE 8RF 100% vermogen 1% overschrijdingskans	Gebouwc. 2 normaal Uitgebreide meting [< 4,80 mm/s; 38 Hz]	Gebouwc. 2 normaal Beperkte meting [< 3,42 mm/s; 38 Hz]	Gebouwc. 2 normaal Indicatieve meting [< 3,00 mm/s; 38 Hz]	Fundering Ter voorkoming van zetting [< 4,20 mm/s]
1	13,74	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
2	9,72	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
3	7,93	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
4	6,87	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
5	6,15	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
6	5,61	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
7	5,19	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
8	4,86	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
9	4,58	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
10	4,35	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
15	3,55	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
16	3,44	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
17	3,33	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
18	3,24	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
19	3,15	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
20	3,07	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
21	3,00	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
22	2,93	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
23	2,87	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
24	2,81	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet

Afstand r (m ¹)	Trilblok ICE 8RF 100% vermogen 1% overschrijdingskans	Gebouwc. 2 gevoelig Uitgebreide meting [< 2,82mm/s; 38 Hz]	Gebouwc. 2 gevoelig Beperkte meting [< 2,01 mm/s; 38 Hz]	Gebouwc. 2 gevoelig Indicatieve meting [< 1,76 mm/s; 38 Hz]	Fundering Ter voorkoming van zetting [< 4,20 mm/s]
4	6,87	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
5	6,15	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
10	4,35	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet
15	3,55	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
20	3,07	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
21	3,00	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
22	2,93	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
23	2,87	voldoet niet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
24	2,81	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
25	2,75	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
30	2,51	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
35	2,32	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
40	2,17	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
45	2,05	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
46	2,03	voldoet	voldoet niet	voldoet niet	voldoet
47	2,00	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
48	1,98	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
49	1,96	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
50	1,94	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
55	1,85	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
60	1,77	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
61	1,76	voldoet	voldoet	voldoet niet	voldoet
62	1,75	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
63	1,73	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
64	1,72	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet
65	1,70	voldoet	voldoet	voldoet	voldoet



Documentnummer : TP 21.0185-1.1
Pagina : 6/9

BIJLAGE A

Sondering standaard bodemprofiel

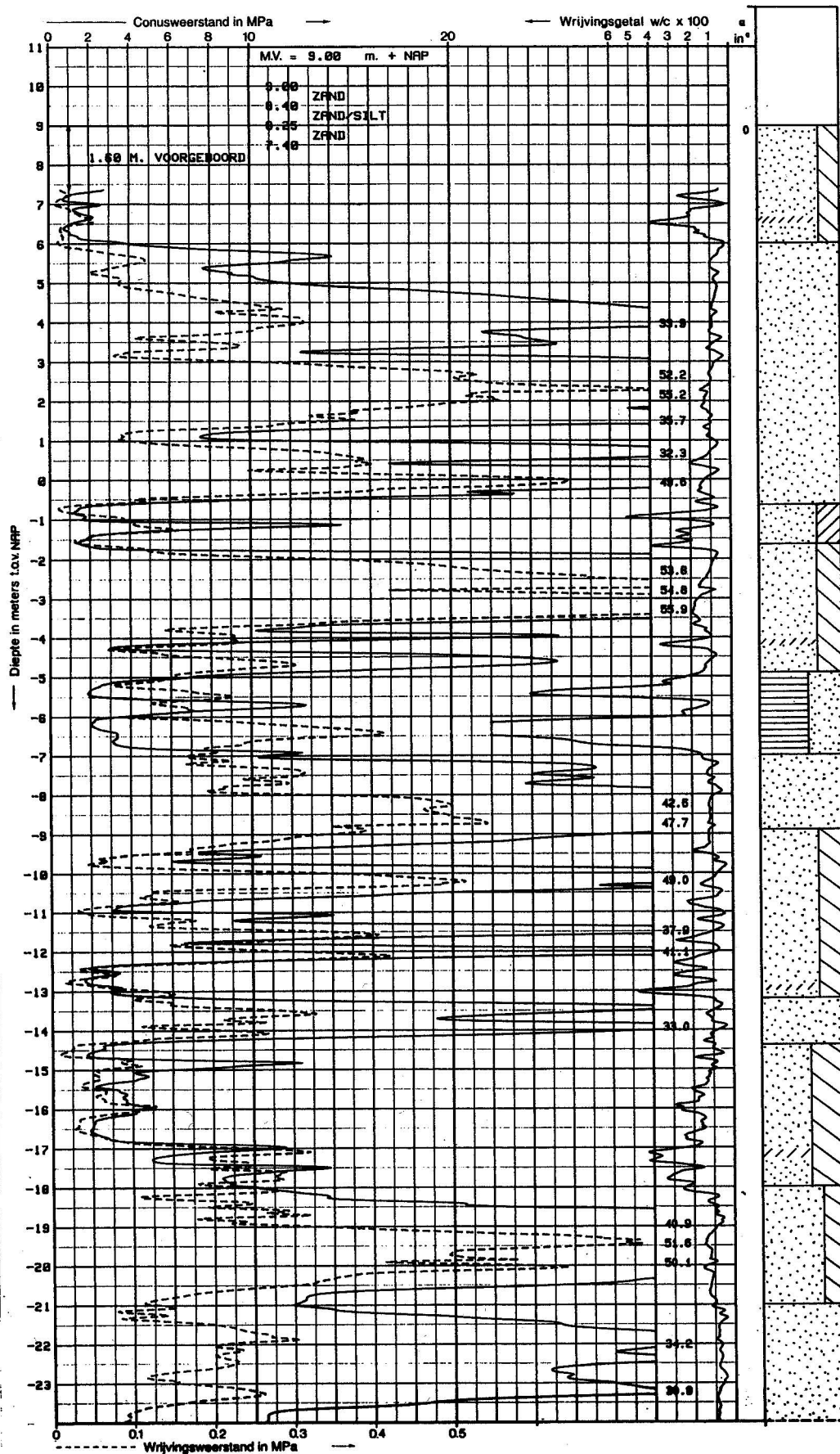


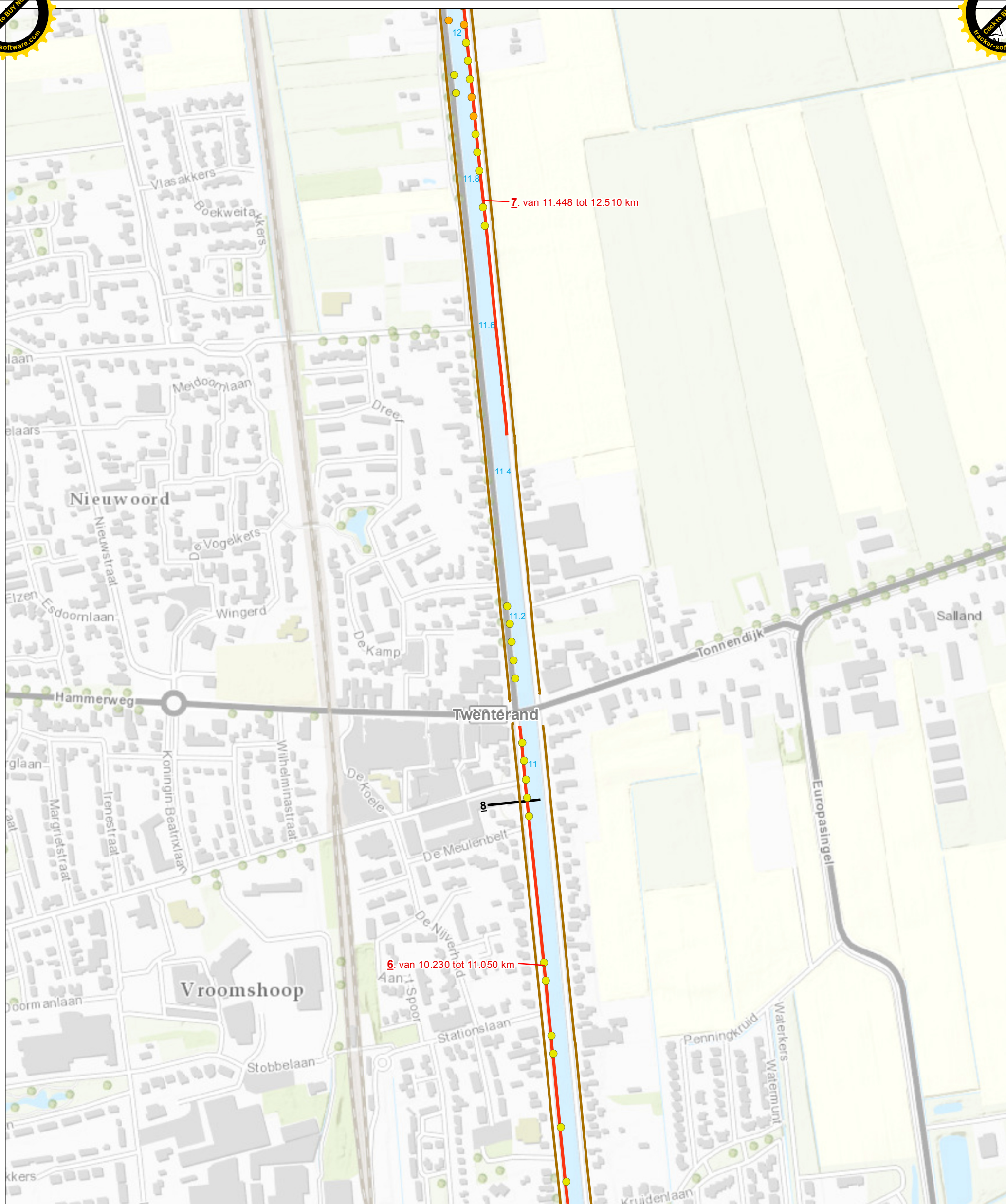
Fig. C2 Sondring Eindhoven.



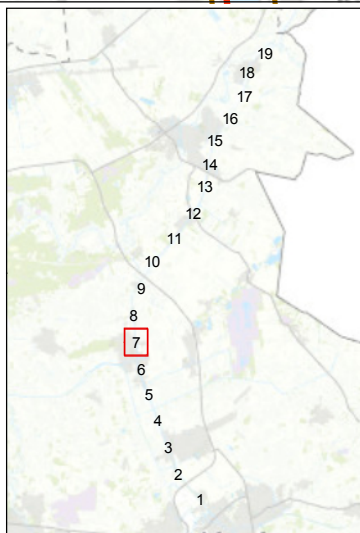
Documentnummer : TP 21.0185-1.1
Pagina : 7/9

BIJLAGE B

Projectgegevens



- | | | | |
|-----------|--------------------------|--|--------------------------|
| | Aan te pakken trajecten* | | Achterland |
| | snedes | | kade constructie |
| UC | | | weg op 3 meter of minder |
| | 0 - 1.1 | | weg op 6 meter of verder |
| | 1.1 - 1.3 | | weiland |
| | 1.3 - 1.6 | | Gemeentegrens |
| | > 1.6 | | |



Boordvoorzieningen Kanaal Almelo - De Haandrik

Aan te pakken trajecten Blad 7 van 19

getekend: S.M.J. Arts MSc	versie: definitief 1
gecontroleerd: ir. A.K. de Jong	datum: 27-03-2018
goedgekeurd: ing. J.A.W. Timmer	tekeningnr: 6

opdrachtgever: Provincie Overijssel
 projectnaam: Inspectie kanaal Almelo de Haandrik
 projectcode: ZL505-79

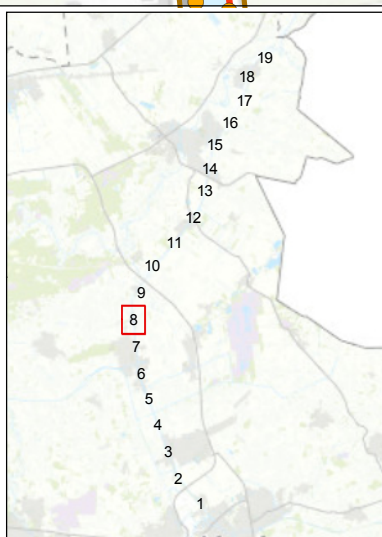
formaat: A3 staand 0 40 80 120 160 200 m
 schaal: 1:5000



*Trajecten zijn indicatief ingetekend, de weergegeven waarden zijn bepalend.
 Zie tabel 'overzicht aan te pakken trajecten' (definitieve versie 6 februari) voor verdere informatie over trajecten



- | | | | |
|-----------|--------------------------|-------------------|--------------------------|
| | Aan te pakken trajecten* | Achterland | |
| | snedes | | kade constructie |
| UC | | | wag op 3 meter of minder |
| 0 - 1.1 | | | wag op 6 meter of verder |
| | 1.1 - 1.3 | | weiland |
| | 1.3 - 1.6 | | Gemeentegrens |
| | > 1.6 | | |





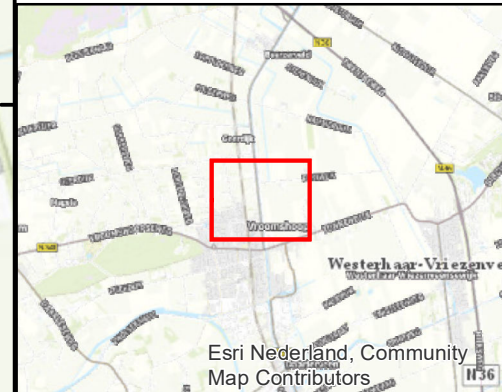
Boordvoorzieningen Kanaal Almelo - De Haandrik	
Aan te pakken trajecten Blad 8 van 19	
getekend: S.M.J. Arts MSc	versie: definitief 1
gecontroleerd: ir. A.K. de Jong	datum: 27-03-2018
goedgekeurd: ing. J.A.W. Timmer	tekeningnr: 6
opdrachtgever: Provincie Overijssel	
projectnaam: Inspectie kanaal Almelo de Haandrik	
projectcode: ZL505-79	
formaat: A3 staand	0 40 80 120 160 200 m
schaal: 1:5000	

*Trajecten zijn indicatief ingetekend, de weergegeven waarden zijn bepalend. Zie tabel 'overzicht aan te pakken trajecten' (definitieve versie 6 februari) voor verdere informatie over trajecten

234700 235000 235300 235600 235900 236200

Legenda

-  Sondering (CPT)
-  Hart van weg



0 45 90 180
Meters

Titel:
Geotechnisch bodemonderzoek
Kanaal Almelo - de Haandrik Traject 07 en 08

Oprichtgever:
Beens Groep

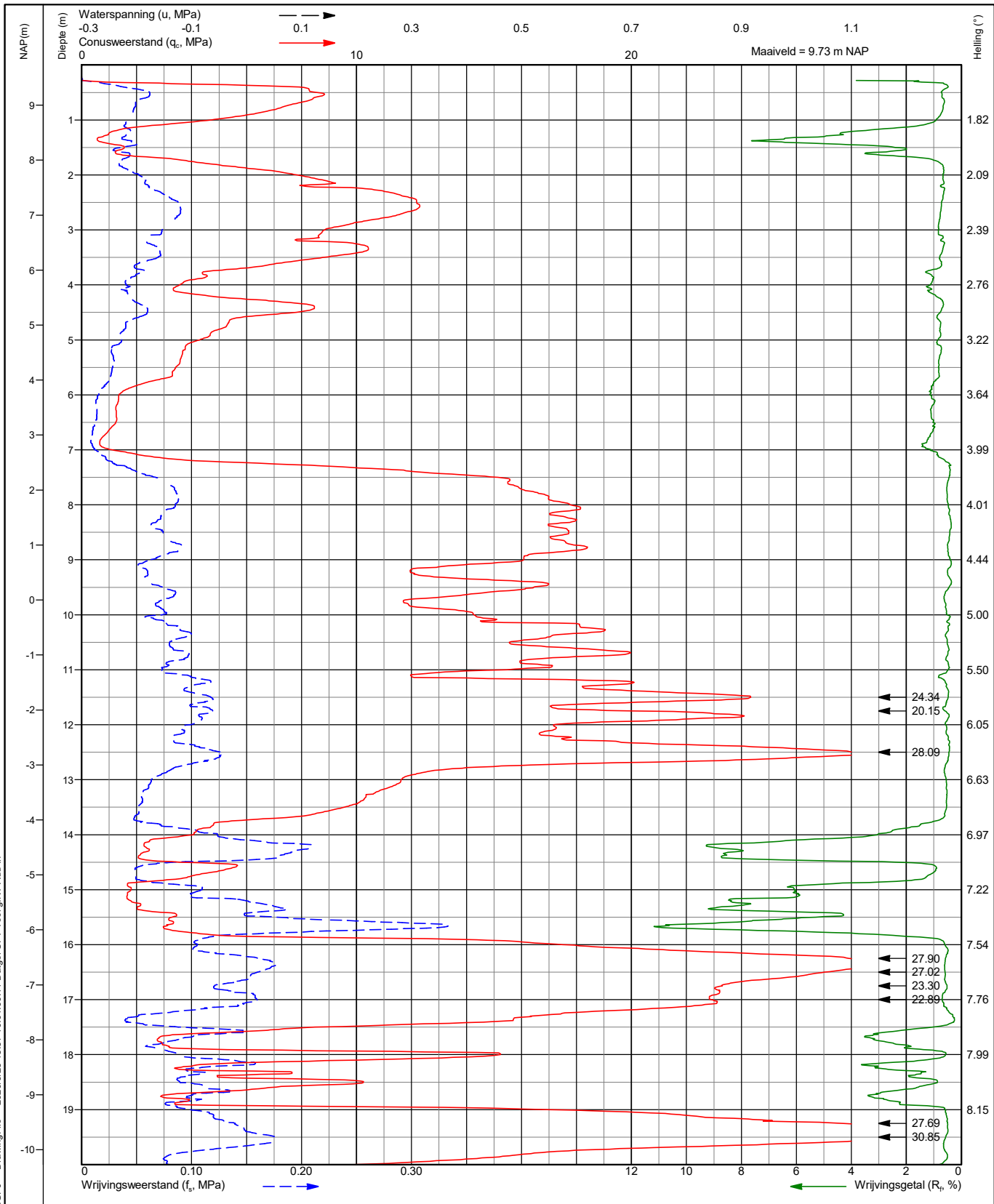
Schaal: 1/5.000	Getekend: OKA	Datum: 28-9-2020	Versie: V1.0
Projectnummer: 212936	Bijlage: 1	Formaat: A3	



ORTAGEO
INGENIEURS RUIMTELIJKE LEEFOMGEVING

234700 235000 235300 235600 235900 236200

499200
499000
498800
498600
498400
498200
498000



Projectnummer : 212936

Opdrachtgever : Beens Groep B.V.

Sondering : 1

Projectomschrijving : Kanaal de Haandrik

Conusnr : DP15-CFPTxy.70142

Projectplaats : Beerzeveld en Vroomshoop

Status :

Punt : 1500

Datum : 2020/9/23

Kleefmantel : 22500



INGENIEURS RUIMTELIJKE LEEFOMGEVING

Coord. : E 235584.7 m N 498060.2 m RD2008

Norm : ISO 22476-1:2012; Klasse 3 Blad : 1 van 2

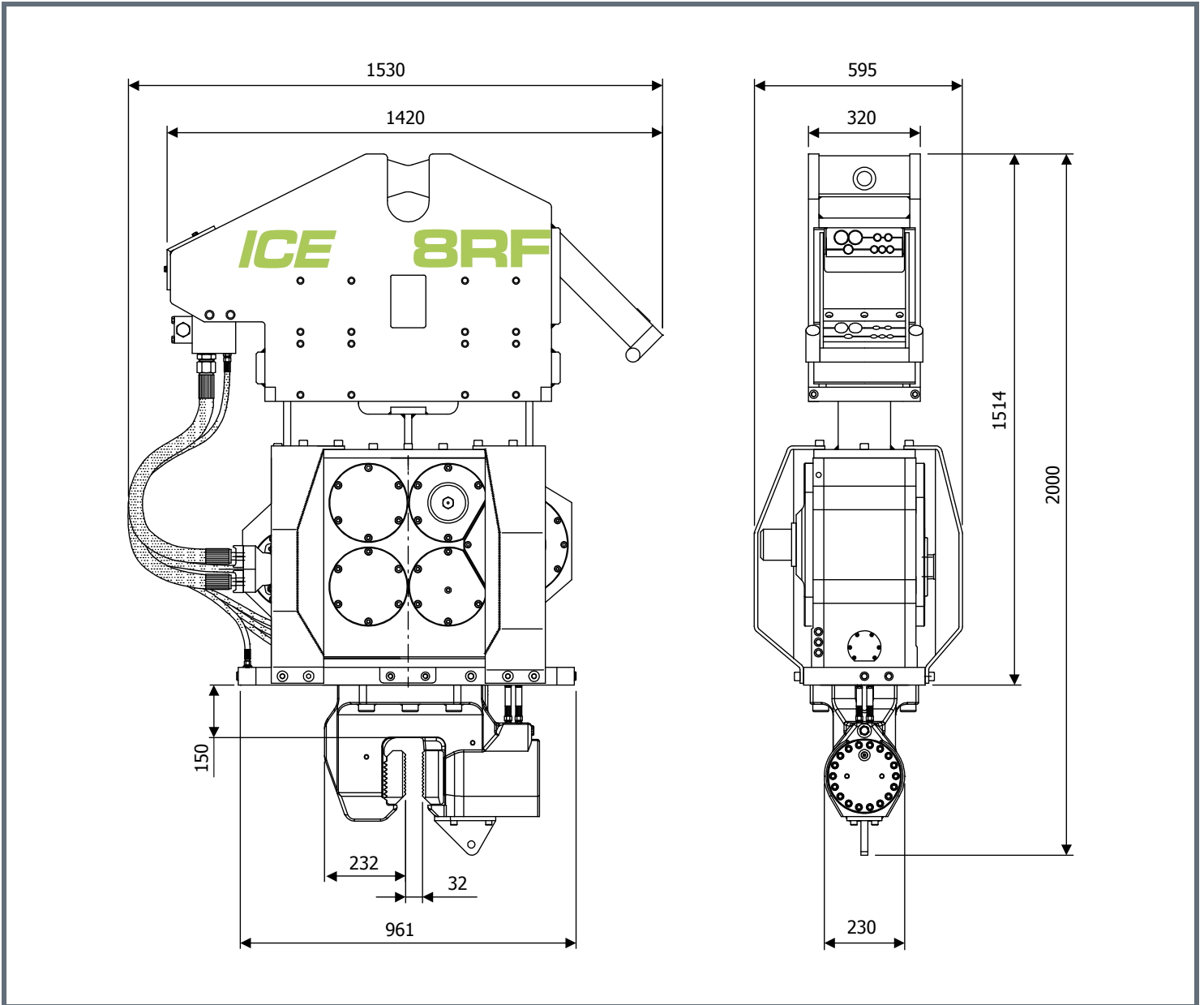
ORTAGEO_LUB_4.02.0.GLB Log CPTIU NL ORTAGEO 212936.GPJ <<DrawingFile>> 2020/9/25 15:37 10.01.00.11 Datgeel CPT Tool gINT Add-in



Documentnummer : TP 21.0185-1.1
Pagina : 8/9

BIJLAGE C

Gegevens trilblok



Specifications	8RF			
Eccentric moment	0-7.5	kgm	Clamps:	
Max. centrifugal force	0-435	kN	Sheet pile clamp	60TU
Max. frequency	2300	rpm	Transport weight per piece	250 kg
Max. amplitude excluding 60TU	15.2	mm		
Max. amplitude including 60TU	12.1	mm		
Max. static line-pull	120	kN	Powerpack:	
Max. operating pressure	350	bar	Model	200 series
Max. oil flow	185	l/min		
Forced lubrication	yes		Hose set:	
Dynamic weight excluding 60TU	985	kg	Length	30 m
Dynamic weight including 60TU	1235	kg	Transport weight (±)	325 kg
Total weight excluding 60TU & hoses	1515	kg		



Documentnummer : TP 21.0185-1.1
Pagina : 9/9

BIJLAGE D

Samenvatting SBR-A 2017
Schade aan gebouwen



Samenvatting SBR A 2017 schade aan gebouwen (meet- en beoordelingsrichtlijn)

De SBR *meet- en beoordelingsrichtlijn* deel A 2017 geeft een procedure voor het meten van trillingen en voor de beoordeling van de invloed van trillingen met het oog op mogelijke schade aan het bouwwerk of aan onderdelen daarvan.

Onder schade aan een bouwwerk wordt een verandering van de eigenschappen of van de positie van (een onderdeel van) een bouwwerk verstaan, met één of meer van de volgende gevolgen:

- Een verlies van functie, zoals het bezwijken van dragende onderdelen;
- Een vermindering van de integriteit van het onderdeel of van het bouwwerk als geheel met betrekking tot zijn dragende functie, waarbij sprake is van een significante vermindering van de veiligheid op de korte of langere termijn (vermindering van de verwachte levensduur);
- Een vermindering van de economische waarde of van de gebruikswaarde, zoals bij scheurvorming in afwerklagen of betegeling.

Met behulp van de richtlijn kunnen grenswaarden bepaald worden voor maximaal toelaatbare trillingen teneinde schade aan (onderdelen van) bouwwerken te voorkomen. In de richtlijn wordt onderscheid gemaakt in een tweetal categorieën bouwwerken, type trillingsbronnen en soorten metingen.

Gebouwcategorie 1

- In goede staat verkerende onderdelen van de draagconstructie, indien deze bestaan uit gewapend beton of hout.
- Onderdelen van een bouwwerk, die geen deel uitmaken van de draagconstructie (bijv. scheidingsconstructies), indien deze bestaan uit gewapend beton of hout.
- Draagconstructies van bouwwerken, geen gebouw zijnde, welke bestaan uit metselwerk, zoals pijlers van viaducten, kademuren en dergelijke.

Gebouwcategorie 2

- In goede staat verkerende onderdelen van de draagconstructie van een gebouw, indien deze bestaan uit metselwerk.
- In goede staat verkerende onderdelen van een gebouw, die niet tot de draagconstructie behoren, zoals scheidingsconstructies, welke bestaan uit niet-gewapend beton, metselwerk of uit brossen steenachtige materialen.

Monumentaal / slechte staat

- Onderdelen van monumentale gebouwen met grote cultuurhistorische waarde.
- In slechte staat verkerende gebouwen uit metselwerk of in slechte staat verkerende onderdelen van gebouwen.

Er is sprake van een slechte bouwkundige staat als:

- De sterkte van de draagconstructie in belangrijke mate is verminderd door de reeds aanwezige schade.
- De onderlinge samenhang van onderdelen of de sterkte van verbindingen tussen onderdelen zodanig is, dat deze door trillingen kan bezwijken of in belangrijke mate kan verzwakken.

Omstandigheden die duiden op een slechte bouwkundige staat zijn bijvoorbeeld: reeds aanwezige scheurvorming, kieren, sterke vervormingen, verzwakkingen en scheefstand van een gebouw.

Bovenstaande wordt beoordeeld op basis van de SBR-A 2017 checklist.

Fundering

Voor de beoordeling van mogelijke schadelijke invloed van trillingen op de fundering en de daarop rustende constructie, kunnen trillingsgevoelige funderingen en niet-trillingsgevoelige funderingen worden onderscheiden. De fundering wordt voor wat betreft hun trillingsgevoeligheid samen met het bouwwerk geïnclassificeerd. Funderingen op staal worden over het algemeen als trillingsgevoelige funderingen aangemerkt waarbij rekening dient te worden gehouden met schade door (ongelijkmatige) zettingen.

Trillingsbron type 1

Bronnen die *incidenteel voorkomende kortdurende trillingen* veroorzaken door een stootvormige excitatie. Het aantal malen dat het trillingsverschijnsel voorkomt is zo gering dat vermoeiing van constructiematerialen niet kan optreden. Bijvoorbeeld; *explosies*, botsingen.

Trillingsbron type 2

Bronnen die *herhaalde kortdurende trillingen* veroorzaken bij een stootvormige excitatie. Hieronder worden verstaan bronnen die zo vaak voorkomen dat vermoeiingseffecten in bouwmaterialen kunnen optreden. Bijvoorbeeld; *heiwerkzaamheden*, weg- en railverkeer, *sloopwerkzaamheden*.

Trillingsbron type 3

Bronnen die *continue trillingen* veroorzaken. Hieronder worden verstaan alle bronnen die niet onder de voorgaande twee categorieën kunnen worden ingedeeld of bronnen waarbij resonanties en/of vermoeiingseffecten in de onderdelen van een bouwwerk kunnen optreden. Bijvoorbeeld; machines met roterende onderdelen, vibratoren, verdichtingswerk d.m.v. trilwalsen, het *inbrengen van fundatiepalen en damwanden met behulp van trilblokken*.



Indicatieve meting

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 hoofdasen van het gebouw.

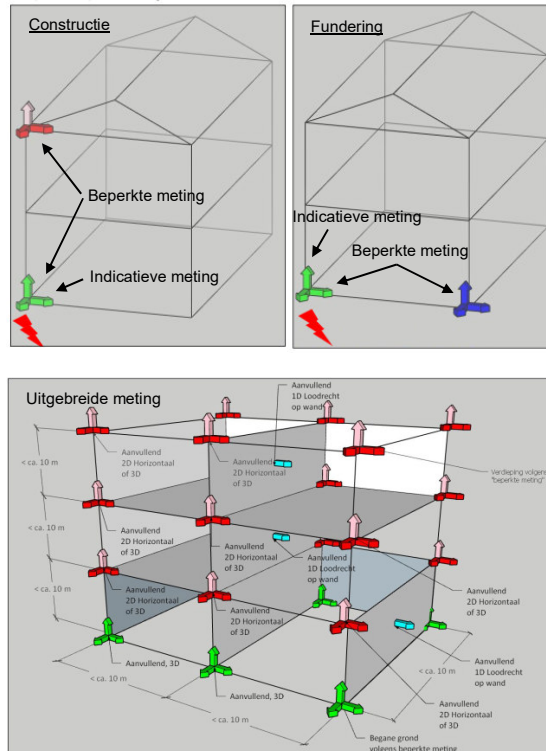
Beperkte meting

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 hoofdasen van het gebouw.

Voor de fundering geldt dat er twee meetpunten op de fundering worden aangebracht.

Uitgebreide meting

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.



Figuur 1, meetposities en richtingen

Rekenwaarde van de trillingssnelheid

De rekenwaarde van de opwaarde van de trillingssnelheid dient te worden bepaald volgens:

$$V_d = V_{top} \cdot \gamma_v$$

Hierbij is:

V_d de rekenwaarde van de trillingssnelheid;

V_{top} de gemeten of statistisch bepaalde topwaarde van de trillingssnelheid in het meetpunt;

γ_v de partiële veiligheidsfactor die het type meting in rekening brengt, volgens tabel 1.

Tabel 1: veiligheidsfactoren type meting

type meting	γ_v
indicatief	1,6
beperkt	1,4
uitgebreid	1,0

Rekenwaarde van de grenswaarde

De rekenwaarde van de grenswaarde wordt bepaald volgens:

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

Hierbij is:

V_r de rekenwaarde van de grenswaarde;

V_{kar} de karakteristieke waarde van de grenswaarde volgens tabel 3 en 4;

γ_t de partiële veiligheidsfactor die het type trilling in rekening brengt, volgens tabel 2.



Tabel 2: veiligheidsfactoren type trillingsbron beganegrondniveau

	constructie	fundering
type trillingsbron	γ_t	γ_t
kortdurend	1,0	1,0
herhaald kortdurend	1,5	1,6
continue	2,5	2,0

Tabel 3: karakteristieke waarde van de grenswaarde op de hoogste verdieping

gebouwcategorie	V_{kar} [mm/s]
1	40
2	15

Tabel 4: karakteristieke waarde van de grenswaarde op Beganegrondniveau

f [Hz]	cat. 1 [mm/s]	cat. 2 [mm/s]	Zetting fundatie a.g.v. versnelling [mm/s]
0	20,00	5,00	-
5	20,00	5,00	31,83
10	20,00	5,00	15,92
15	22,50	6,25	10,61
20	25,00	7,50	7,96
25	27,50	8,75	6,37
26	28,00	9,00	6,16
27	28,50	9,25	5,95
28	29,00	9,50	5,73
29	29,50	9,75	5,52
30	30,00	10,00	5,31
31	30,50	10,25	5,16
32	31,00	10,50	5,01
33	31,50	10,75	4,85
34	32,00	11,00	4,70
35	32,50	11,25	4,55
36	33,00	11,50	4,44
37	33,50	11,75	4,32
38	34,00	12,00	4,21
39	34,50	12,25	4,09
40	35,00	12,50	3,98
41	36,50	12,75	3,89
42	36,00	13,00	3,80
43	36,50	13,25	3,72
44	37,00	13,50	3,63
45	37,50	13,75	3,54
50	40,00	15,00	3,18

Op al onze werkzaamheden is de DNR 2011 van toepassing

Tabel 5: karakteristieke waarde van de grenswaarde voor buisleidingen

Type buisleiding	V_{kar} [mm/s]
Staal (gelast)	100
Beton, gewapend beton, voorgespannen beton, staal	80
Metselwerk, kunststof	50

Tabel 6: karakteristieke waarde van de grenswaarde voor zetting van de funderingsconstructie a.g.v. trillingssnelheid

Zettingsgevoelige laag onder bouwwerk [m]	V_{kar} [mm/s]
1	20,0
2	18,6
3	17,1
4	15,7
5	14,3
6	12,9
7	11,4
8	10,0

Tabel 7: veiligheidsfactoren bouwkundige staat en monumentale status

situatie	γ_s
Bouwkundige staat: normaal Monumentale status: geen	1,0
Bouwkundige staat: gevoelig en/of Monumentale status: monument	1,7

Bepaling grenswaarde

- bepaal de karakteristieke waarde van de grenswaarde V_{kar} volgens tabel 3, 4 en/of 5;
- bepaal de partiële veiligheidsfactor voor het type trillingsbron γ_t volgens tabel 2;
- bepaal de partiële veiligheidsfactor voor het type meting γ_v volgens tabel 1;
- bepaal de partiële veiligheidsfactor voor de bouwkundige staat en/of monumentale status γ_s volgens tabel 6;

- deel de karakteristieke waarde van de grenswaarde V_{kar} door de veiligheidsfactoren voor het type trilling γ_t , type meting γ_v , en de bouwkundige staat en/of monumentale status γ_s om de grenswaarde te bepalen;
- V_{kar} voor zetting wordt niet gedeeld door veiligheidsfactoren;
- De bovenstaande bepaalde grenswaarde kan direct getoetst worden aan de geregistreeerde topwaarde van de trillingssnelheid.

Voorbeelden bepaling grenswaarde trilwerkzaamheden

Trillingen veroorzaakt door *trilblokken* zijn van trillingsbron type 3 (continue trillingen). Voor het bepalen van de grenswaarde wordt uitgegaan van de frequentie van het trilblok. Bij hoogfrequente trilblokken is een frequentie tussen 30 en 40 Hz gebruikelijk. Bij de bepaling van de grenswaarde wordt van 38 Hz uitgegaan.

Voor gebouwcategorie 2 geldt een grenswaarde van 3,00 mm/s. (12,00 mm/s. / 2,5 / 1,6) indien gemeten wordt volgens een indicatieve meting.

Voor gebouwcategorie 2 als monument en/of in slechte staat geldt een grenswaarde van 1,76 mm/s. (12,00 mm/s. / 2,5 / 1,6 / 1,7) indien gemeten wordt volgens een indicatieve meting.

Voorbeelden bepaling grenswaarde heiwerkzaamheden

Trillingen veroorzaakt ten gevolge van *heiwerkzaamheden* zijn van trillingsbron type 2 (herhaald kortdurende trillingen). Voor het bepalen van de grenswaarde wordt uitgegaan van de maatgevende frequentie tijdens heiwerkzaamheden. Bij heiwerkzaamheden is een maatgevende frequentie tussen 5 en 20 Hz gebruikelijk. Bij de bepaling van de grenswaarde wordt van 10 Hz uitgegaan.

Voor gebouwcategorie 2 geldt een grenswaarde van 2,10 mm/s. (5,00 mm/s. / 1,5 / 1,6) indien gemeten wordt volgens een indicatieve meting.



Voor gebouwcategorie 2 als monument en/of in slechte staat geldt een grenswaarde van 1,23 mm/s. (5,00 mm/s. / 1,5 / 1,6 / 1,7) indien gemeten wordt volgens een indicatieve meting.

Schadekans

Volgens de bestaande praktijkervaringen en de SBR *meet- en beoordelingsrichtlijn* deel A 2017 bestaat er een aanvaardbaar kleine kans (kleiner dan 1%) dat schade aan bouwwerken en funderingen zal optreden indien de rekenwaarde van de trillingssnelheid kleiner is dan de rekenwaarde van de grenswaarde.

Indien voor de werkzaamheden al spanningen in de constructie zaten (bijv. door zetting, sloop of aanbouw) is het mogelijk dat deze spanningen door het trillen scheurvorming veroorzaken in de constructie. Deze spanningen zijn van tevoren niet in te schatten. Het is derhalve mogelijk dat wanneer geen overschrijdingen van de grenswaarde gemeten zijn, er toch schade optreedt. Gesteld kan worden dat de schadekans kleiner is dan 1% indien de gemeten waarden onder de gestelde grenswaarde blijft. In het algemeen is het zo dat deze schade in de loop der tijd ook zichtbaar was geworden (door zetting, verkeerstrillingen of door het gebruik). Het intrillen en/ of uittrillen van de damwanden heeft dit proces alleen versneld.

De beleving van trillingen verschilt per persoon. De trillingen worden door de mens al snel als een storende factor gezien en als ontoelaatbaar beschouwd, indien de trillingen voelbaar en hoorbaar worden in het gebouw waarin men aanwezig is. Dit is zeker het geval indien het iemands persoonlijk bezit betreft en de trillingen een lange periode aanhouden. In veel gevallen is de vrees voor schade ongegrond. De trillingen worden meestal hinderlijker ervaren wanneer het om een privé bezit gaat. Door een goede en tijdige inlichting van omwonenden worden veel klachten al voorkomen.

Opgemerkt wordt dat in Nederland geen normen zijn met betrekking tot trillingshinder voor personen en voor het bepalen van een schadekans door trillingen voor bouwwerken. De SBR richtlijn moet worden gezien als een hulpmiddel die bij het beoordelen van trillingen gebruikt kan worden en een globale indicatie geeft omtrent de ernst van de hinder. De beleving van de trillingshinder zal in de praktijk per persoon kunnen verschillen, terwijl de schadekans per bouwwerk ook kan afwijken door materiaal- en opbouwverschillen.

Beoordeling voorspelde trillingen bij intrillen damwanden

dr. ir. Paul Hölcher
Deltares



ing. Peter Kraaijenbrink
Deltares



Inleiding

Bij het installeren van funderingselementen wordt vaak geheid of getrild. Dit is een efficiënte en betrouwbare installatiemethode, maar veroorzaakt wel trillingen in de omgeving, die schade kunnen veroorzaken aan de belendingen. Dat is onwenselijk.

Om de risico's van dergelijke trillingen in te schatten wordt voorafgaand aan de uitvoering een prognose voor het verwachte trillingsniveau gemaakt en worden tijdens de uitvoering continu de trillingen gemeten. Bouwkundige opnames voorafgaand aan en na de werkzaamheden zijn noodzakelijk om na te gaan of de schade werkelijk door trillingen veroorzaakt is.

Hoe goed zijn de prognoses voorafgaand aan de werkzaamheden eigenlijk? Hoe worden de uitkomsten van een prognose beoordeeld in relatie tot de SBR-richtlijn 'Trillingen' [SBR, 2003]? Wat is de relatie tussen trillingen en het ontstaan van

schade? Wanneer zijn (meestal duurdere) trillingsarme inbrengsystemen noodzakelijk? Dit artikel geeft een nieuwe strategie voor deze problematiek.

Verskil tussen meten en rekenen

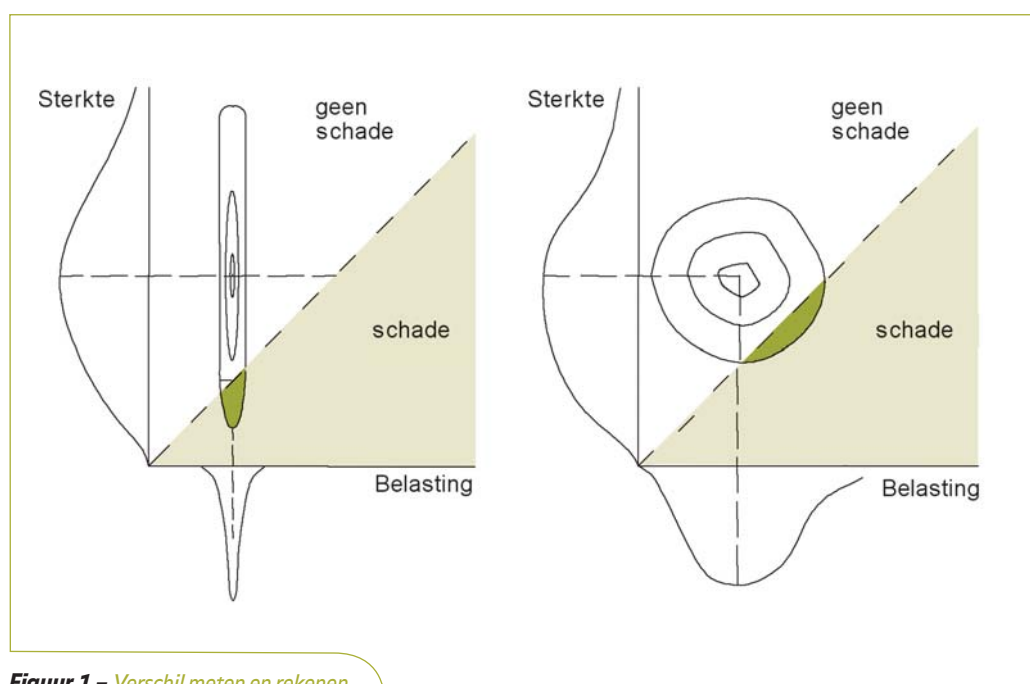
Het verschil in onzekerheid tussen een meting en een berekening kan aanzienlijk zijn. Een continue meting aan een gebouw bevat met zekerheid de hoogste trilling, waarbij de enige onzekerheid is of de opnemer wel op de locatie met de hoogste trilling gezeten heeft. Bij een berekende trillingssterkte is de onzekerheid groter. Onderzoek in het kader van Delft Cluster [Hölcher, Waarts, 2003] geeft aan dat de betrouwbaarheid van de beschikbare modellen beperkt is en dat daar terdege rekening mee gehouden moet worden.

De SBR-richtlijn is een meet- en beoordelingsrichtlijn. Deze geeft aan hoe een meting beoordeeld moet worden. Er worden toelaatbare trillingsniveaus geven, waarbij de kans op schade 1 %

bedraagt. Wat daarbij onder 'schade' verstaan wordt geeft de richtlijn niet aan. De richtlijn kan niet zondermeer toegepast worden op een berekende waarde. Om het verschil tussen de situatie bij een meting en een berekening te begrijpen, wordt nu een probabilistische beschouwing gegeven.

Schade treedt op als de spanningen in de constructie door de trilling groter zijn dan de sterkte van de constructie.

- Bij een meting is de sterkte van het gebouw op te vatten als een stochast; het is immers niet goed bekend hoe sterk het betreffende gebouw precies is, wat de relatie tussen de trillingsbelasting en de door de trilling veroorzaakte spanning in het materiaal is, terwijl mogelijk aanwezige spanningen (door bv. zettingen, temperatuur en belastingsafdracht) ook een rol spelen. De maximale trillingsbelasting is echter goed bekend, deze wordt immers door een meting nauwkeurig vastgesteld. Dan is de 1% ondergrens van de sterkte de waarde waarbij de kans op schade 1% is.
- Bij een berekening zijn zowel de sterkte (van het gebouw) als de belasting (trillingssterkte) een stochast: het gemiddelde is bekend, maar er is een relatief grote spreiding. Dit heeft tot gevolg dat de 1% kans op schade bij een veel hogere trillingsbelasting optreedt dan de 1% ondergrens van de bouwsterkte.



Figuur 1 – Verskil meten en rekenen.

Figuur 1 geeft voor beide situaties een prinsipschets van de kansverdelingen.

Voor twee realistische kansverdelingen voor de sterkte van een gebouw en de prognose van de trillingsbelasting kan uitgerekend worden dat indien, zoals in het meest recente vijfde druk CUR Handboek, CUR [2008] gesuggereerd wordt, de 1% bovengrens van de trillingsprognose voldoet aan de 1% ondergrens van de sterkte, de werkelijke faalkans ongeveer 0.1% is. Dat is tien keer zo klein als de aanvaardbaar geachte 1%. Het is duidelijk dat de grenswaarde uit de SBR-richtlijn niet zomaar toegepast kan worden op een dergelijke

Samenvatting

In het handboek damwanden CUR 166 is een model uitgewerkt, waarmee het trillingsniveau in de omgeving bij het installeren van damwanden berekend kan worden. Ook wordt aangegeven hoe dit trillingsniveau, conform de SBR-richtlijn 'Trillingen', beoordeeld kan worden uit het oogpunt van mogelijke schade in

de omgeving. Het resultaat wordt door velen als conservatief ervaren. Dit artikel geeft aan waarom dat gevoel terecht is en doet een voorstel voor een toekomstige, mogelijk realistischere aanpak op basis van het 'DeltaBrain Bouwtrillingen'. Dit model bevindt zich nog in de ontwikkelingsfase.

prognose conform de vijfde druk CUR Handboek [2008]. Met andere woorden, om een prognose te beoordelen conform de SBR-richtlijn is een grenswaarde nodig die past bij de betrouwbaarheid van het gebruikte prognosemodel. Overigens, in de oudere derde druk van het CUR Handboek [1997] is het wel mogelijk een andere betrouwbaarheidsindex te kiezen, maar daarbij wordt niet aangegeven welke grens dan gebruikt moet worden.

Betrouwbaarheid van de prognoses

Algemeen

De betrouwbaarheid van de prognoses is bij trillingsproblemen niet zo groot. In het Delft Cluster project 'Betrouwbare trillingsprognoses' is de betrouwbaarheid van verschillende prognosemodellen bekeken [Hölscher, Waarts, 2003].

De betrouwbaarheid van een model is op te splitsen in twee componenten:

1. de zuiverheid van een model: het antwoord van het model geeft een correct gemiddelde (Engels: de bias)
2. de spreiding in het model: de karakteristieke bovengrens van de modeluitkomsten ligt dicht bij het gemiddelde of juist ver weg.

[Hölscher, Waarts, 2003] hebben drie modellen geëvalueerd:

- experts, een aantal deskundigen die een schatting van het trillingsniveau maken, op basis van een beperkte hoeveelheid informatie;
- empirische model D11, een semi-empirisch model dat in het kader van COB- onderzoek ontwikkeld is;
- eindige elementen methode.

Het model van het CUR Handboek derde druk [1997] is in deze studie niet meegenomen.

Voor elk model zijn een aantal situaties beoordeeld. Deze situaties zijn geselecteerd uit beschikbare metingen die voor deze beoordeling voldoende gedocumenteerd waren. Van elke situatie waren dus meetresultaten beschikbaar, maar deze waren niet bekend bij de persoon die de prognose uitvoerde. Door voor verschillende situaties de be-

rekenende waarde te vergelijken met de gemeten waarde, kan de betrouwbaarheid van elk model bepaald worden.

De resultaten van de evaluatie zijn weergegeven in tabel 1. Het getal in de kolom zuiverheid geeft aan met welk getal de prognose vermenigvuldigd moet worden zodat het gemiddelde van de prognoses gelijk is aan het gemiddelde van de metingen. Het getal in de kolom spreiding geeft aan met welk getal de prognose vermenigvuldigd moet worden om de 95% bovengrens van de metingen te vinden (de waarde die in 5 % van de gevallen overschreden wordt).

Tabel 1 Betrouwbaarheid van verschillende modellen [de Wit, Galanti, 2003]

Model	Zuiverheid van het model	Spreiding in het model
Expert	0.6 (model overschat)	18
D11	0.25 (model overschat)	20
Eindige elementen	1.3 (model onderschat)	10

Hoe het model met metingen te verbeteren?

Er zijn in beginsel twee methoden om het model te verbeteren.

- De eerste methode is een heel uitgebreide meting van de trillingsbelasting tijdens een proefproject. Deze aanpak eist een groot aantal opnemers en een behoorlijke investering. Deze aanpak is met name geschikt om de invloed van variabelen in een prognosemodel te toetsen: bijvoorbeeld de invloed van de afstand op het trillingsniveau in de omgeving.
- De tweede methode is het verwerken van trillingsmetingen, die vrijwel standaard bij dit type werkzaamheden in de praktijk uitgevoerd worden. Hier is de investering beperkter, alleen de resultaten moeten systematisch in de database gevoerd worden, samen met de benodigde meta-informatie. Meta-informatie is de parameter-informatie die de case beschrijft: bijvoorbeeld het type trillblok, de planklengte, de sondering, de afstand tot het pand. Naast de meta-informatie is natuurlijk ook het resultaat opgenomen: bijvoorbeeld het trillingsniveau en

de opgetreden schade. Voor deze aanpak is in het COB/Delft Cluster project 'de betrouwbare trillingsmaatregel' een interactieve database ontwikkeld: DeltaBrain (zie www.Deltabrain.nl/bouwen/bouwtrilling).

In deze paragraaf worden de mogelijkheden van beide methoden kort besproken.

In de literatuur wordt meestal het type metingen volgens de eerste aanpak besproken. Voorbeelden zijn onder andere [Meijers, 2007; Dekker, Heijmans et al, 1999]. Deze aanpak is geschikt om de afhankelijkheid van de trillingsbelasting met een variabele (bv. de afstand) te beoordelen. Het opvallende in deze metingen is dat vaak de afname van de trillingsbelasting met de afstand aanzienlijk sterker is dan in het CUR handboek aangenomen wordt. Voor de afname van de trillingsbelasting met de afstand bleek voor een aantal praktijkcases de functie 1/afstand beter dan de 1/wortel(afstand), die in het handboek zonder materiaaldemping gebruikt wordt. Mogelijk geeft echter ook een aanpak met een sterkere afname op korte afstand en een 1/afstand met het in rekening brengen van gronddeemping op grotere afstand een hogere betrouwbaarheid. Dit zal nader onderzocht moeten worden. Verder valt op in dergelijke metingen dat op één locatie al een behoorlijke spreiding (orde $\pm 30\%$) optreedt tussen de maximale trillingsbelasting bij verschillende elementen op gelijke afstand.

De tweede aanpak waarbij veel metingen in een database geplaatst worden is minder vaak gevonden. [Fugro, 1996] en [Muller, 2007] zijn hiervan twee voorbeelden. Deze aanpak is bij uitstek geschikt om de invloed van de parameters te bepalen (bloktype, lengte element, verschillen tussen heien en trillen etc.). Bij deze aanpak is de informatie per case in het algemeen beperkt. In een database is bijvoorbeeld alleen het hoogste waargenomen trillingsniveau en de kortste afstand tussen het meetpunt en de betreffende groep van elementen bekend, terwijl onbekend is of bij dat element ook daadwerkelijk de hoogste trillingsbelasting opgetreden is. Ook kan in een database worden opgenomen of er schade is opgetreden en waaruit die bestaan heeft. Zoals

gemeld is de DeltaBrain Bouwtrillingen gebaseerd op deze aanpak.

De aanpak via een database is noodzakelijk om de betrouwbaarheid van een prognose model te beoordelen. Deze volgt immers uit het vergelijken van een aantal prognoses met de werkelijk gemeten trillingsbelasting en opgetreden schades.

Wat is schade?

De SBR-richtlijn stelt dat de kans op schade bij overschrijden ongeveer 1% is. Het is helaas niet goed gedocumenteerd, waarop dit gebaseerd is. Bovendien geeft de SBR-richtlijn niet aan wat onder schade verstaan wordt. In het algemeen is de draagconstructie sterker dan de overige onderdelen van een gebouw, en is het redelijk te verwachten dat bij toenemende trillingsbelasting niet alleen de kans op schade, maar ook de ernst van de schade toeneemt. Anderzijds, het is billijk om te eisen dat de kans op een grote schade kleiner is dan de kans op een kleine schade. De kans op een architectonische schade mag dus groter zijn dan de kans op een constructieve schade.

Probabilistische analyse voor het intrillen van damwanden bij de dijkversterking Nederlek (Krimpenerwaard, circa 300 belendingen) heeft geleid tot een tabel, met schattingen van kansen en typen schade voor belendingen. Zie tabel 2. De onderliggende kansverdelingen zijn globaal geschat op basis van beschikbare literatuurgegevens en engineering judgment. De aangegeven kansen zijn voorzichtige schattingen, bedoeld voor toepassing in het adviesproject.

Een dergelijke tabel biedt de mogelijkheid om de werkzaamheden meer risico gestuurd uit te voeren.

Het is wenselijk dergelijke tabellen in de toekomst uit te breiden en te verbeteren, de vraag daarbij is hoe deze benodigde verbetering het beste is te realiseren. Uitsluitend theoretisch onderzoek lijkt daarbij niet de aangewezen weg: het optreden van schade is afhankelijk van veel factoren, waaronder de staat van de bebouwing en de aanwezige spanningen in de bebouwing. Om een schade-classificatiesysteem voor trillingsschade verder te ontwikkelen dient empirisch en theoretisch onderzoek te worden gecombineerd.

Het opbouwen van een database, Deltabrain Bouwtrillingen, waarin naast de gemeten trillingen ook de geconstateerde schades opgenomen zijn, vormt een basis om in ieder geval de empirische data over trillingsschades te structureren. In combinatie met de verbetering van schadeprognosemodellen voor belendende panden kan een breed toepasbaar schade-classificatiesysteem voor trillingsschade verder ontwikkeld worden.

Specifieke uitwerking voor damwanden

Model keuze

In het kader van de dijkversterking Nederlek zijn over circa 4 km lengte damwanden vlakbij bestaande bebouwing geplaatst. Gezien het aantal woningen (circa 300) was het zinvol het probleem nauwkeurig te beoordelen en, mede vanuit het oogpunt van schade, vooraf te bepalen of heien of trillen mogelijk zou zijn.

Op basis van de ervaringen in het Delft Cluster project is gekozen voor het empirische model uit de derde druk van het CUR-handboek damwanden [1997]. Dit type model heeft een redelijke betrouwbaarheid in relatie tot de complexiteit van de uitwerking. Daarbij is, voor zover mogelijk, de nauwkeurigheid van de prognose verbeterd door

het model, op basis van beschikbare metingen, te kalibreren voor de specifieke situatie van een trillingsbron in een dijk op slappe bodem.

In dit artikel wordt gebruik gemaakt van de berekening op basis van CUR derde druk. In de vierde druk is een praktische aanpassing doorgevoerd die niet correct is. De vijfde druk is in dit aspect identiek aan de vierde druk. In de derde druk wordt eerst de gemiddelde waarde en vervolgens met een coëfficiënt de bovengrens bepaald. In de vierde druk zijn deze twee stappen samengevoegd: er wordt direct een bovengrens berekend, die vergeleken mag worden met de grenswaarde van de SBR. Zoals in dit artikel al getoond is, is deze aanpassing onjuist.

Daarbij is in de uitwerking in de vierde druk een fout gemaakt bij de omrekening van de referentiesnelheid (= de trillingssnelheid op 5 m vanaf de paal). Deze wordt berekend met de volgende formule:

$$v_{ref} = v_o + 0.002 * (F_{slag} - 350)$$

waarin:

v_o referentie trillingssnelheid op 5 m afstand
 F_{slag} slagkracht van het gebruikte trilblok.

Bij de overgang van de derde naar de vierde druk is de waarde voor v_o wel naar de bovengrens gecorrigeerd, maar de coëfficiënt voor slagkracht niet. In de derde druk is de invloed van de slagkracht aanzienlijk, in de vierde druk is deze daarentegen vrijwel verwaarloosbaar. De prognoses met de vierde druk komen daardoor onbedoeld (aanzienlijk) lager uit. De derde druk lijkt in dit opzicht consistentere dan de vierde en vijfde druk.

Bepaling betrouwbaarheid

Figuur 2 geeft de resultaten van 152 metingen bij de dijkversterking Nederlek, die zijn opgenomen in de database DeltaBrain Bouwtrillingen. Verder is in de figuur weergegeven:

- het gemiddelde van het model uit de CUR 166 (enigszins vereenvoudigd);
- de 95% bovengrens op basis van het CUR 166 model;
- het gemiddelde van het aangepaste model met een 1/afstand benadering;
- de 95% bovengrens van het aangepaste model.

De gemiddelde lijnen hebben open symbolen en de 95% bovengrenslijnen hebben gevulde symbolen.

De figuur leidt tot de volgende conclusies:

- Het CUR model is onzuiver, het gemiddelde van model overschat het gemiddelde van de meting met ruim een factor 2.
- De geschatte spreiding in het CUR model is bruikbaar. De 95% bovengrens is een factor 6 boven het gemiddelde, wat redelijk aansluit bij de spreiding in de metingen.

Tabel 2 – Schadeklassen

Schade-klasse	Omschrijving	Grenswaarde trillingssnelheid bouwwerk categorie 2 (SBR) [mm/s]	Grenswaarde trillingssnelheid bouwwerk categorie 3 (SBR) [mm/s]	Globale schadekans (afhankelijk van trilfrequentie) [%]
A	voldoet ruim aan SBR	< 4,8	< 2,6	< 1
B	voldoet net niet aan SBR	4,8 - 6,0	2,6 - 3,3	ca. 1 à 2
C	kans op architectonische schade (zeer lichte schade)	6,0 - 7,6	3,3 - 4,2	2 - 6
D	grote kans op architectonische schade (lichte tot matige schade, begin constructieve schade)	7,6 - 10,0	4,2 - 5,5	6 - 10
E	grote kans op constructieve schade	≥ 10,0	≥ 5,5	≥ 10

- In het gebied tussen 5 en 10 m loopt de curve van het CUR 166 model erg vlak. Dit suggereert dat de invloed van de afstand niet correct in het model verdisconteerd is.
- Het prognosemodel dat gebruikt maakt van de $1/\text{afstand}$ curve past beter bij deze data.

De resultaten geven aan dat er verbetering mogelijk lijkt. Om het gemiddelde te verbeteren lijkt de afstandinvloed een kansrijke optie. Gedacht kan worden aan het gebruiken van een $1/\text{afstand}$ functie of het toepassen van materiaal-demping in de modelcurve van CUR 166.

In vergelijking met de andere modellen die in het Delft Cluster onderzoek [Hölscher, Waarts, 2003] getest zijn, is de spreiding in het model niet slecht. Om minder spreiding te krijgen moet nagegaan worden welke parameters nog significante invloed hebben. De eerste evaluatie waarbij gezocht is naar een maatgevende extra parameter (bv damwandlengte, trilblok, ondergrond), gaf aan dat de eigenschappen van de bodem de meest waarschijnlijke kandidaat is. Het probleem is echter dat de bodem gekarakteriseerd wordt door de sondering of gelaagdheid en juist deze informatie is niet eenvoudig met een enkel getal te beschrijven. De oplossing van dit probleem vraagt relatief veel empirische gegevens.

Conclusie

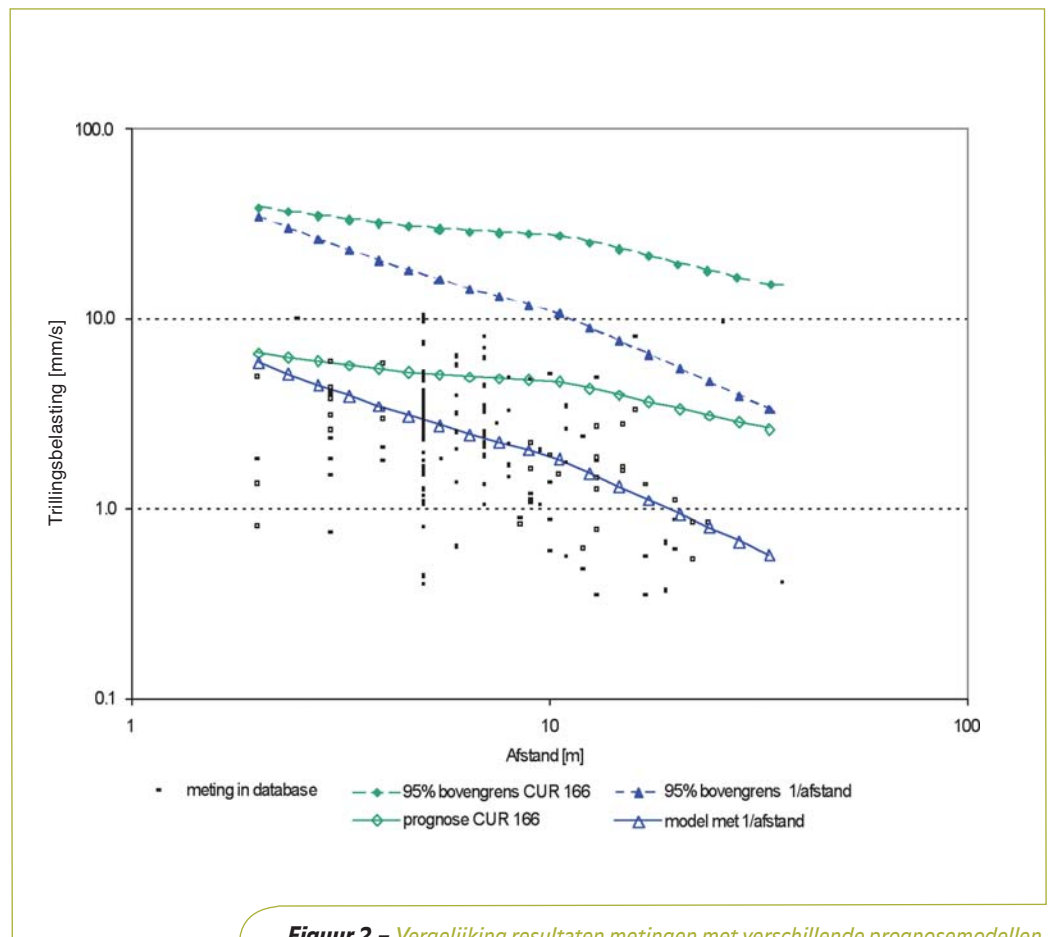
Om berekende trillingen te beoordelen aan de hand van de grenswaarden uit de SBR-richtlijn trillingen moet een aangepaste grenswaarde gebruikt worden of een juiste keuze van de overschrijdingskans. De mate van aanpassing hangt af van de betrouwbaarheid van het model.

Bij een volgende herziening van de SBR-richtlijn moet meer aandacht besteed worden aan de achtergrond van de grenswaarden en de verschillende typen schade.

Als de DeltaBrain Bouwtrillingen voldoende gevuld is, bevat het waardevolle data, die essentieel zijn om een prognosemodel te valideren, de grenswaarden in de richtlijn te actualiseren en een risicogestuurde aanpak voor de beheersing van trillingen tijdens het installeren van funderingselementen te ontwikkelen. Deze ontwikkeling loopt, maar de voortgang is sterk afhankelijk van de snelheid van vullen.

Door aanvulling van deze database met meer praktijkmetingen en ervaringsgegevens, is aanscherping van het voorspellingsmodel en een meer realistische schadeverwachting vooraf in de toekomst mogelijk.

Voor de prognose van de trillingen kan beter



Figuur 2 - Vergelijking resultaten metingen met verschillende prognosemodellen.

de derde druk van het CUR Handboek [1997] gebruikt worden en niet de vierde of de vijfde druk [2008].

Dankwoord

De werkzaamheden voor de dijkversterking Nederlek zijn uitgevoerd in opdracht van het Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard. Tevens willen de auteurs Dr. Holger Netzel van CRUX Engineering B.V. bedanken voor de waardevolle discussie n.a.v. een concept versie van dit artikel.

Referenties

- CUR, 1997, *Handboek damwandconstructies*, derde druk, CUR, Gouda, 1997.
- CUR, 2008, *Handboek damwandconstructies*, vijfde druk, CUR, Gouda, 2008.
- de Wit, MS, Galanti, F.M.B., *Reliability of vibration predictions; Synthesis of predictions and measurements*, Research report Delft Cluster project 01.05.02, download: www.library.tudelft.nl/ (bezocht februari 2012).
- Dekker, H.R., Heijmans, H.W., Hoefsloot, F.J., *Geslaagde damwandproef in Limburg*, *Geotechniek*, nr. 3, april 1999, pp.12-19.
- Fugro, 1996, *Het heiproces als trillingsbron*,

deelrapport II uitbreiding bronmodel, Fugro rapport voor CUR/COB/L400, nummer M-0419B, 1996.

– Hölscher, P., Waarts, P.H., 2003, *Reliability of vibration predictions and reducing measures*.

Final report on the project. Delft Cluster project 01.05.02, download: <http://www.library.tudelft.nl/> (bezocht september 2011).

– Meijers, P., *Settlement during vibratory sheet pile driving*, Proefschrift TUDelft, 2007, download: www.library.tudelft.nl/collecties/delftse-publicaties/tu-delft-repository.

– Muller, T.K., *Meten, beoordelen en voorspellen van trillingen in de bouw*, *Geotechniek* nr. 4, september 2007, download: www.vakbladgeotechniek.nl.

– Meet- en beoordelingsrichtlijn voor trillingen deel A, SBR, Rotterdam, 2003. ●

Figuur 1 - Trilwerkzaamheden op korte afstand tot belending



Foto: A.J. Sneethlaga

Inleiding

Voor veel bouwprojecten waar hei- of trilwerkzaamheden nabij kritische objecten moeten worden uitgevoerd, is het van belang om vooraf een realistische inschatting van de verwachte trillingen te maken. Met het empirische trillingsprognosemodel uit CUR-publicatie 166 [1] [2] kunnen de trillingsrisico's ten aanzien van

de geplande werkzaamheden worden ingeschat. De gegeven bronwaarden uit de 6e druk van CUR 166 [2] zijn echter gebaseerd op een versimpelde bepaling van de benodigde veiligheidsfactor. In dit artikel wordt een nauwkeurigere bepaling van de benodigde veiligheidsfactor beschreven, waardoor de berekende trillingsintensiteiten kunnen worden aangescherpt.

Empirisch trillingsprognosemodel CUR 166

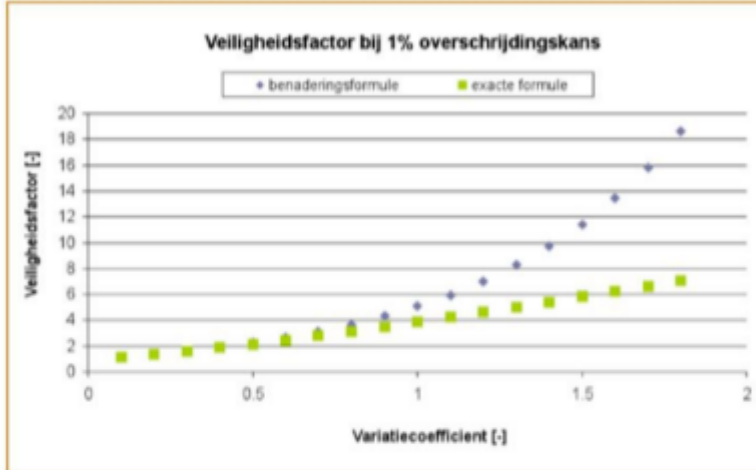
De berekening van de trillingsintensiteiten met de empirische methode uit CUR 166 [2] vindt plaats op basis van de karakteristieken van het bodemprofiel en de trillingsbron. Voor 7 karakteristieke Nederlandse bodemprofielen is een bronwaarde voor de trillingsintensiteit v_0 gegeven op een referentieafstand van 5 m. Op basis

Samenvatting

Een in Nederland veelvuldig toegepast model voor het berekenen van trillingen is het empirische model dat beschreven is in de CUR-publicatie 166 [1] [2]. De gegeven bronwaarden voor de beoordeling op schade en hinderbeleving in de omgeving van de trilwerkzaamheden zijn gebaseerd op een versimpelde bepaling van de benodigde veiligheidsfactor. Door de

veiligheidsfactor nauwkeuriger te bepalen kunnen, met name voor het trillen van damwanden, de berekende trillingsintensiteiten aangescherpt worden. Hierdoor kan de inzet van relatief dure trillingsarme installatiemethoden in bepaalde gevallen voorkomen worden.

Figuur 2 - Vergelijking berekende veiligheidsfactor volgens de benaderingsformule [6] en de exacte formule [5]



van de slagkracht van het trilblok F of de energie van het heiblok E kan de gecorrigeerde bronwaarde van de trillingsintensiteit $v_{0,CUR}$ worden bepaald. Vervolgens wordt de trillingsoverdracht in de bodem berekend, zodat de intensiteit ter plaatse van bijvoorbeeld belendingen kan worden ingeschat.

Het feit dat de berekening is gebaseerd op een eenvoudig empirisch model, waarvan de parameters zo goed mogelijk aan waarnemingen in de praktijk zijn aangepast, betekent dat er ook enige spreiding ten opzichte van de berekende resultaten te verwachten is. Dit is in het model in de 2^e druk van CUR 166 [1] verdisconteerd door de gecorrigeerde bronwaarde te karakteriseren met een gemiddelde, variatiecoëfficiënt en kansverdelingsfunctie.

Voor het bepalen van de ontwerpwaarde van de trillingsintensiteit wordt in de 2^e druk van CUR 166 [1] een veiligheidsfactor op de gemiddelde waarden toegepast, waarbij wordt uitgegaan van een lognormale verdeling. Voor het beoordelen van de hinderbeleving wordt over het algemeen uitgegaan van een toelaatbare kans op hinder van 5% (of overschrijdingskans van 95%). Voor beoordeling van schade wordt uitgegaan van

een strenger criterium, namelijk een toelaatbare kans op schade van 1% (of overschrijdingskans van 99%). In de 6^e druk van CUR 166 [2] zijn daarom de gecorrigeerde bronwaarden behorende bij de toelaatbaar geachte kansen van 5% en 1% gegeven. Deze ontwerpwaarden zijn afgeleid uit de gemiddelde waarden en variatiecoëfficiënten uit de 2^e druk van CUR 166 [1].

Benodigde veiligheidsfactor

Om het falen van een constructie met voldoende betrouwbaarheid uit te kunnen sluiten is een bepaalde marge tussen de weerstand tegen falen en de belastingen benodigd. De benodigde marge (of veiligheidsfactor) voor een bepaalde parameter in de berekening is afhankelijk van het vereiste veiligheidsniveau, de mate van de onzekerheid in de betreffende parameter en de invloed van de betreffende parameter in de berekening. Op basis van een normale verdeling wordt de rekenwaarde van de belasting Y_d bepaald volgens [3]:

$$(1) Y_d = \mu_Y (1 + \alpha \beta V_Y)$$

Waarin:

μ_Y = verwachtingswaarde van de verdeling van variabele Y

α = invloedcoëfficiënt voor de belasting,

waarvoor de ISO gestandaardiseerde

waarde van 0,7 kan worden toegepast;

β = betrouwbaarheidsindex, gelijk aan 1,64 voor 5% overschrijdingskans en 2,32 voor 1% overschrijdingskans

V_Y = variatiecoëfficiënt van de verdeling van variabele Y

Indien sprake is van een variabele X die lognormaal verdeeld is, dan geldt dat de variabele $Y = \ln(X)$ een normale verdeling heeft. Er geldt dan voor de rekenwaarde van X:

$$(2) X_d = \exp(Y_d) = \exp(\mu_Y + \alpha \beta \sigma_Y)$$

Daarnaast gelden de volgende relaties tussen de parameters van de verdelingen van X en Y [3]:

$$(3) \sigma_Y = \sqrt{\ln(1 + V_X^2)}$$

$$(4) \mu_Y = \ln(\mu_X) - 1/2 \sigma_Y^2$$

Waarin:

σ_Y = standaardafwijking van variabele Y

V_X = variatiecoëfficiënt van de verdeling van variabele X

μ_X = verwachtingswaarde van de verdeling van variabele X

Na enig omschrijven volgt voor de veiligheidsfactor γ op basis van een lognormale verdeling:

$$(5) \gamma = X_d / X_{gem} = \exp[\alpha \beta \sqrt{\ln(1 + V_X^2)}]$$

Waarin:

X_{gem} = gemiddelde of 50% waarde van variabele X

Deze formule kan, indien de variatiecoëfficiënt niet te groot is, benaderd worden door:

$$(6) \gamma = \exp[\alpha \beta V_X]$$

In de 2^{de} druk van CUR 166 [1] wordt aanbevolen om benaderingsformule (6) toe te passen voor het berekenen van de rekenwaarde van de belasting tengevolge van trillingen. Deze formule is ook toegepast om de 95% en 99% bronwaarden in de 6^{de} druk van CUR 166 [2] te bepalen.

In figuur 2 is een vergelijking tussen de uitkomsten van beide formules (5) en (6) voor verschillende variatiecoëfficiënten weergegeven. De benaderingsformule (6) levert bij een overschrijdingskans van 1% en voor waarden van de variatiecoëfficiënten kleiner dan ca. 0,7

prognosewaarden op die voor praktische doeleinden voldoende nauwkeurig zijn. Het verschil in uitkomst tussen beide formules bedraagt dan minder dan 10%. Bij grotere waarden voor de variatiecoëfficiënt neemt het verschil echter sterk toe.

Omdat bij prognoses voor heiwerkzaamheden de variatiecoëfficiënt voor de bronwaarde voor alle karakteristieke bodemprofielen $V_0 = 0,6$ bedraagt, wordt geconcludeerd dat het verschil tussen de benaderings- en exacte formule voor praktische doeleinden acceptabel is. Omdat bij het in- of uittrillen van damwandplanken echter veel grotere variatiecoëfficiënten voor de bronwaarde van toepassing zijn, neemt het verschil in uitkomst snel toe en kan zelfs oplopen tot

meer dan 150% bij een variatiecoëfficiënt van 1,8 welke voor bodemprofiel 'Groningen' geldt. Dit verschil is dermate groot dat het gebruik van de benaderingsformule tot onrealistisch hoge waarden voor de veiligheidscoëfficiënt leidt.

Aanscherping bronwaarden

Op basis van de uitgebreide formule (5) kunnen de bronwaarden bij verschillende overschrijdingskansen nauwkeuriger worden bepaald. Deze aangepaste waarden zijn weergegeven in tabel 1 en tabel 2.

Uit tabel 1 blijkt dat er voor het inheien van palen een beperkt verschil is tussen de bronwaarden op basis van de benaderingsformule (6) en de exacte formule (5). Uit tabel 2 blijkt echter dat

het verschil voor het intrillen van damwanden aanzienlijk is. Met name voor de bodemprofielen Groningen, Amsterdam, Rotterdam en Tiel zijn de verschillen aanzienlijk.

Voorbeeld invloed aangescherpte veiligheidsfactoren

De invloed van de aangescherpte veiligheidsfactoren wordt geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld. In Amsterdam wordt een damwandplank ingetrild met een hoog frequent trilblok met een slagkracht van 1600 kN (frequentie van 30 Hz, efficiëntie trilblok 90%). De dempingsfactor in de grond bedraagt 0,02 m⁻¹ en de overdacht van de trilling van grond naar draagconstructie bedraagt 0,7.

Het invloedsgebied van de trillingswerkzaamheden voor schade is bepaald voor een categorie 2 gebouw (in goede staat verkerende draagconstructie, bestaande uit metselwerk) conform SBR A [4]. De grenswaarde voor een categorie 2 gebouw bedraagt bij aanname van een "uitgebreide meting" 4,0 mm/s (frequentie 30 Hz). Daarnaast is een partiële veiligheidsfactor van $\gamma_1 = 2,5$ voor het type trilling toegepast.

In figuur 3 is het resultaat van de prognose van het invloedsgebied weergegeven. Voor de vergelijkingen (5) en (6) is in de figuur zowel de 50% prognose waarde als de 99% prognosewaarde (beoordeling op schade) weergegeven.

Bij het gebruik van de benaderingsformule (6) blijkt dat de grootte van het invloedsgebied voor schade ca. 50 m bedraagt. Met het gebruik van de exacte formule (5) wordt een invloedsgebied

Tabel 1 – Parameters voor inheien buispalen

Bodemprofiel	V_0 [-]	v_0 (mm/s) [50%]	v_0 (mm/s) [95%]	v_0 (mm/s) [99%]
Amsterdam (1)	0,6	0,030 (0,030)	0,057 (0,06)	0,074 (0,08)
Eindhoven (2)	-	-	-	-
Groningen (3)	-	-	-	-
Den Haag (4)	-	-	-	-
Maasvlakte (5)	0,6	0,040 (0,040)	0,076 (0,08)	0,099 (0,106)
Rotterdam (6)	0,6	0,026 (0,026)	0,049 (0,052)	0,064 (0,07)
Tiel (7)	-	-	-	-

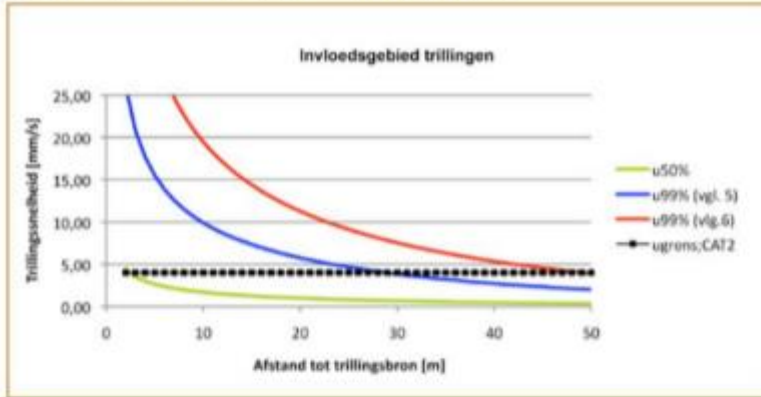
Waarden tussen haakjes zijn de waarden uit CUR 166 6de druk [2]
 V_0 is de variatiecoëfficiënt
 v_0 is de referentietrillingsnelheid op $r_0 = 5$ m afstand

Tabel 2 – Parameters voor het intrillen van stalen planken (tot 14 m)

Bodemprofiel	V_0 [-]	50%		95%		99%	
		v_0 (mm/s)	c_{vel} (mm/s/kN)	v_0 (mm/s)	c_{vel} (mm/s/kN)	v_0 (mm/s)	c_{vel} (mm/s/kN)
Amsterdam (1)	1,5	1,6 (1,6)	0,002 (0,002)	5,6 (9,0)	0,007 (0,011)	9,3 (18,3)	0,012 (0,023)
Eindhoven (2)	1,1	1,9 (1,9)	0,002 (0,002)	5,3 (6,7)	0,006 (0,007)	8,1 (11,3)	0,008 (0,012)
Groningen (3)	1,8	1,7 (1,7)	0,002 (0,002)	6,8 (13,4)	0,008 (0,016)	12,0 (31,6)	0,014 (0,037)
Den Haag (4)	1,1	1,9 (1,9)	0,002 (0,002)	5,3 (6,7)	0,006 (0,007)	8,1 (11,3)	0,008 (0,012)
Maasvlakte (5)	-	-	-	-	-	-	-
Rotterdam (6)	1,5	1,6 (1,6)	0,002 (0,002)	5,6 (9,0)	0,007 (0,011)	9,3 (18,3)	0,012 (0,023)
Tiel (7)	1,5	1,6 (1,6)	0,002 (0,002)	5,6 (9,0)	0,007 (0,011)	9,3 (18,3)	0,012 (0,023)

Waarden tussen haakjes zijn de waarden uit CUR 166 6de druk [2]
 V_0 is de variatiecoëfficiënt
 v_0 is de referentietrillingsnelheid op $r_0 = 5$ m afstand
 c_{vel} is de correctiefactor om de invloed van de slagkracht van het trilblok in rekening te brengen

Figuur 3 - Invloedsgebied trillingen op basis van vergelijking (5) en (6)



Figuur 4 - Trillingsarm installeren van damwanden met een Quattro drukstelling



Foto: A.J. Sneath/lage

van ca. 30 m berekend. Met name in bebouwde omgeving betekent dit dat een veel groter deel van de trilwerkzaamheden uitvoerbaar kunnen zijn. Op basis van een prognose conform de 6e druk van CUR 166 [2], welke is gebaseerd op de benaderingsformule (6), wordt wellicht een relatief dure trillingsarme installatiemethode (bijv. statisch drukken) gekozen.

Conclusies

Het empirische prognosemodel voor trillingen dat beschreven is in CUR 166 [1] [2] wordt in Nederland veelvuldig toegepast voor het beoordelen van schade en hinderbeleving tengevolge van hei- of trilwerkzaamheden. De gegeven bronwaarden voor de trillingsintensiteit in CUR 166 [2] zijn echter gebaseerd op een vereenvoudigde bepaling van de benodigde veiligheidsfactor. Op basis van een nauwkeurigere bepaling van de benodigde veiligheidsfactor kunnen lagere waarden voor de trillingsintensiteit worden bepaald. Met name voor de karakteristieke bodemprofielen Groningen, Amsterdam, Rotterdam en Tiel worden voor het intrillen van damwanden significant lagere trillingsintensiteiten berekend. Voor het inheien van palen zijn de verschillen voor praktische doeleinden verwaarloosbaar. De nauwkeuriger berekende bronwaarden zijn weergegeven in tabel 1 en 2 van dit artikel. Het toepassen van deze waarden leidt tot een aanscherping van de trillingsprognoses, waardoor de inzet van relatief dure trillingsarme installatiemethoden in bepaalde gevallen voorkomen kan worden.

Referenties

- [1] CUR-publicatie 166 damwandconstructies, 2^e druk, CURNET, 1994
- [2] CUR-publicatie 166 damwandconstructies, 6^e druk, CURNET, 2012
- [3] CUR-publicatie 190 Kansen in de civiele techniek - Deel 1: Probabilistisch ontwerpen in theorie, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving, maart 1997
- [4] Trillingen: meet- en beoordelingsrichtlijnen, schade aan gebouwen, deel A, SBR, 2006
- [5] Trillingen: meet- en beoordelingsrichtlijnen, hinder voor personen in gebouwen, deel B, SBR, 2006