



Inhoud presentatie

Deel 1 (door Joris Bruens/ Alfred Roubos):

- Introductie/ aanleiding

Deel 2 (door Maarten Proffittlich, vz):

- Huidige Nederlandse ontwerppraktijk
 - Standaard (NEN) methode
 - Methode ‘open stalen buispalen’ (CUR 2001-8)
- Internationale ontwerppraktijk (ISO)
- Maasvlakte proeven
- Nieuwe ontwerpmethode:
 - Heien/ trillen in zand
 - Heien/ trillen in klei
- Overige (ontwerp)aspecten
- Samenvatting en dankwoord!



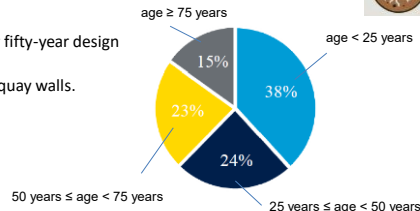
Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

2



Situation in Rotterdam

- Many quay walls approach the end of their fifty-year design lifetime.
 - Focus will shift towards assessing existing quay walls.
 - Most quay walls are in good condition.
- ⇒ Not yet the end of their service life!



Motivation Port of Rotterdam

- Since update Eurocode 7 (NEN9997-1)
- Longer foundation piles (5 to 6m in Pleistocene sand)
 - More piles (>25%)
- ⇒ Increase of costs for foundation piles (25% to 50%); significant installation risks; negative CO2 footprint.
- No foundation pile failure are known in Rotterdam
 - Much higher risk of damage during installation



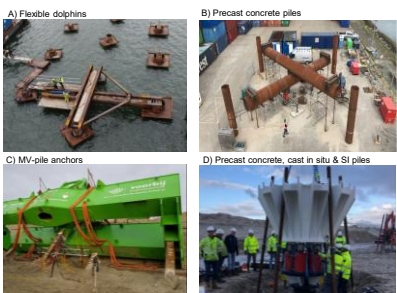
Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

Full scale field tests & stress testing



Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

Added value full scale field tests



Project	n	Costs			Annual future savings	
		[-]	[m€]	[m€]	[m€]	[m€]
A) Dolphins 2014	8	0.75	6.10	0.25	6.00	0.30
B) Precast concrete 2017	4	0.45	0.55	0.75	n/a	n/a
C) Anchors 2017-2022	6	0.75	4.50	1.00	3.00	1.50
D) Cast in situ 2020	11	2.50	15.50	11.00	12.50	10.00
Total	29	4.45	26.65	13.00	21.50	11.80

Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

Added value full scale field tests



Project	n	Costs	Direct savings		Annual future savings	
	[-]	[m€]	[m€]	[kton CO ₂]	[m€]	[kton CO ₂]
A) Dolphins 2014	8	0.75	6.10	0.25	6.00	0.30
B) Precast concrete 2017	4	0.45	0.55	0.75	n/a	n/a
C) Anchors 2017-2022	6	0.75	4.50	1.00	3.00	1.50
D) Cast in situ 2020	11	2.50	15.50	11.00	12.50	10.00
Total	29	4.45	26.65	13.00	21.50	11.80

Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

9

Deel 2: herziening richtlijn



- Huidige NLse ontwerppraktijk
 - Standaard (NEN) methode
 - Methode 'open stalen buispalen' (CUR 2001-8)
- Internationale ontwerppraktijk (ISO)
- Maasvlakte proeven
- Nieuwe ontwerpmethode:
 - bij heien/ trillen in zand
 - bij heien/ trillen in klei
- Overige (ontwerp)aspecten
- Samenvatting en dankwoord!



Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

10

Huidige NLse ontwerppraktijk



Bepaling paal draagvermogen open stalen buispalen volgens **NEN9997-1:2025**:

- Standaard (NEN) methode
- Methode open stalen buispalen (volgens CUR2001-8)

Standaard (NEN) methode:

- Vergelijkbaar met andere paalsystemen, gebaseerd op **lineaire relatie** tussen gemeten qc en wrijving, alfa-factoren en middeling van de conuspuntweerstand o.b.v. 4D/8D
- Totale draagkracht:** 1) buiten-/binnenschachtwrijving + rand of 2) buiten- + puntweerstand
- limietwaarden** bij schacht- als puntweerstand (12/15 MPa)
- Conservatieve benadering** bij m.n. vast gepakte zandlagen (maar soms te optimistisch)
- Methode is **niet verbonden** aan enige randvoorwaarden, zoals minimale penetratiediepte, paalslankheid, paaldiameters, wanddikte, etc.
- Toepassing van **reductiefactoren** op conusweerstand (voor afsnuiten) bij niet-heien

Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

11

Methode 'open stalen buispalen'



- Empirische methode uit **CUR-richtlijn 2001-8** 'Bearing capacity of steel pile piles' (2001) voor **0,25<D<3m** en relatieve paallengte **5-80 L/D**
- Gebaseerd op m.n. **offshore paaltesten** (database, Euripides etc.) met als aanvulling centrifuge testen en statistische analyses
- Methode 'open stalen buispalen' alleen toepasbaar indien:
 - Heiend op diepte gebracht**, in de draagkrachtige zandlaag
 - verhouding wanddikte/ buitendiameter: **t/D > 1/60**
 - gefundeerd in **zand** (silica zand), tenminste **8D**
 - paalschachtwrijving** ook volgens methode 'open stalen buispalen'(in alle andere gevallen: toepassing **standaard (NEN) methode**)
- 2 berekeningen**, uitgaande van volledige plugvorming en combinatie interne wrijving (gedeeltelijke plugvorming – m.n. afhankelijk van relatieve dichtheid) en puntrandwrijving
- Gem. puntconusweerstand afgeleid uit traject **1,5D boven/ onder ppn**
- Geen afsnuiting** bij zowel bepaling punt- als schachtwrijving



Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

12

Internationale ontwerppraktijk



- Tot voor kort: **2 methoden** voor bepalen draagvermogen van geheide (offshore) open stalen buispalen:
 - bèta-methode** voor zand, o.b.v. op relatieve dichtheid
 - alfa-methode** voor klei, o.b.v. op ongedraineerde afschuifsterkte
- Opgenomen in **ISO 19901-4**, met in de bijlagen aanvullende methoden, waaronder op sonderingen gebaseerde methoden voor zand
- O.b.v. **dezelfde database** met paalbelastingproeven, echter verschillen in draagvermogen
- Veroorzaakt door verschillen in **interpretatie** van de proefbelastingen



Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

13

Aanleiding herziening richtlijn



- 2013: **start JIP** (door NGI) over betrouwbaarheid verschillende (offshore) ontwerpmethoden door team van experts uit o.a. Australië, UK, Noorwegen en NL
- Uit 100+ int. paalbelastingproeven is een database samengesteld van 71 betrouwbare statische proeven in **zand** (incl. de proefbelasting in het Nederlandse Hoogzand (jaren 70) en Euripides project (jaren 90) en 49 betrouwbare statische proeven in **klei**
- Ontwikkeling een nieuwe '**geharmoniseerde**' (**unified**) op sonderingen gebaseerde ontwerpmethod voor geheide palen in zand en klei
- Resultaten paalbelastingproeven op de **2de Maasvlakte** sluiten beter aan op de 'Unified method' t.o.v. huidige methoden zoals beschreven in CUR2001-8/ NEN 9997-1
- Bepalking eis $D/t < 60$ onnodig conservatief



→ **Aanleiding herziening** huidige (CUR) richtlijn, in Engels, gestart in 2023, publicatie verwacht in **Q1-2026**

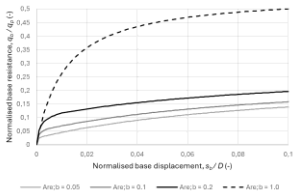
Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

Ontwerpmethode in zand (1)



Punt (rand + interne schachtwrijving):

- ontwerpmethode gaat uit van plugvorming tijdens statisch belasten bij minimale penetratie van 5D in het zand - zelfs als dit niet optrad tijdens paalinstallatie
- puntweerstand hangt af van D/t en mate grondverdringing/ pluggen tijdens installatie (A_{re})
- Mate van pluggen kan vooraf worden ingeschat (als functie van de D)
- Bepaling puntconusweerstand m.b.v. Koppejan, filter of +/-1,5D methode (o.b.v. Deq)
- Geen sprake van limietwaarden (zoals bij NEN)
- Sprake van specifieke mobilisatiecurve voor open stalen buispalen



Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

15

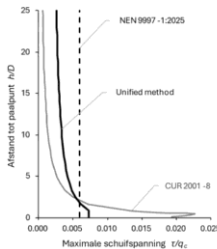
Ontwerpmethode in zand (2)



Schachtweerstand (buitenzijde):

- schachtdraagvermogen functie van de (lokale) conusweerstand en de mate van grondverdringing tijdens installatie
- mate van grondverdringing afhankelijk van de D/t - en mate van plugvorming tijdens het installeren (via A_{re})
- geen limitering van conusweerstand
- schachtdraagvermogen wordt bepaald door afstand tot de paalpunt en schaal - het beschikbare schachtdraagvermogen neemt af als de afstand tot de paalpunt groter wordt.
- fenomeen was eerder al meegenomen in CUR 2001-8, maar verloop is wat minder extreem bij de 'Unified method' (zie grafiek)

Vergelijking tussen methoden voor maximaal schachtdraagvermogen (uitgangspunt $D = 1,22$ m en $t = 16$ mm):



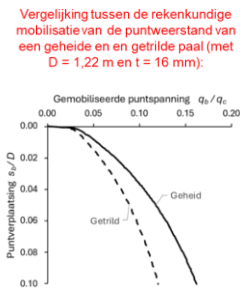
Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

16

Ontwerpmethode bij trillen



- Aanneمة bij intrillen: ook **plugvorming** tijdens statisch belasten
- Verschil tussen getrilde en geheide palen in zand: bij geheide palen nog **rest-spanningen** van het installatieproces tussen grond en buiswand aanwezig, voor getrilde palen **verwaarloosbaar**
- Hierdoor bij getrilde paal **meer verplaatsing** nodig om dezelfde mate van plugvorming te bereiken
- **Puntdraagvermogen ingetilde paal** lager dan bij geheide paal, uitgaande van verplaatsingscriterium van 0,1D
- Bepaling **schachtdraagvermogen** volgens NEN9997-1



Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

Ontwerpmethode bij combinatie



- In de **praktijk** worden veel open stalen buispalen eerst ingetild (voorgepoot) en daarna (af)geheid
- Afhankelijk van het diepte-interval waarover geheid wordt dient de paal of te worden getoetst op basis van één van de beschreven methoden of door deze te **combineren**
- **Grenswaarden** voor deze benadering zijn afgeleid uit de proeven op de 2^{de} Maasvlakte, waarbij de palen door middel van een combinatie van trillen en heien zijn geïnstalleerd
- Daarnaast is onderzocht of er geen onbedoelde effecten ontstaan in het **overgangsgebied** van de rekenmethoden voor de verschillende installatiemethoden
- Voorbeeld: wijzigen van de installatiemethode van heien naar trillen zou **rekenkundig** nooit tot een hoger draagvermogen mogen leiden, tenzij aangetoond met proefbelastingen.

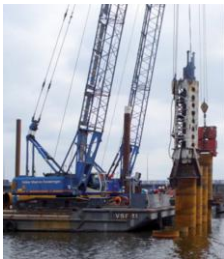


Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

Ontwerpmethode in klei (1)



- Ook bij **klei** grote verscheidenheid aan ontwerpmethoden voor bepaling paal draagvermogen, gebaseerd op:
 - ongedraineerde schuifsterkte
 - effectieve spanningen
- Tijdens **JIP** is ook een breed breed gedragen gemeenschappelijke **database** voor paal draagvermogen proeven in klei opgezet
- Installatie van open stalen buispalen in klei d.m.v. heien gaat gepaard met **verkneding** en het **genereren van wateroverspanningen**
- Uit onderzoek blijkt dat ook sprake is van een zogenaamd **'lengte effect'**, afname schachtwrijving met installatiediepte
- Internationaal zijn er verschillende methoden die daar rekening mee houden (i.t.t. NEN, CUR)

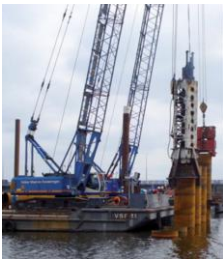


Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

Ontwerpmethode in klei (2)



- JIP heeft geleid tot nieuwe methode voor het berekenen van het draagvermogen in klei: de **'Unified method'**, gebaseerd op **sondeerresultaten**
- I.t.t. tot de 'Unified method' voor zand is deze methode **nog niet** opgenomen in de ISO 19901-4:2025
- Methode staat wel op de **nominatie** om opgenomen te worden in een volgende versie van de ISO 19901-4, zodra er **meer ervaring** beschikbaar is (bij m.n. grotere diameters)
- Vooralsnog ons advies: gebruik **NEN9997-1:2025 methode** voor klei tot nader bericht
- Wellicht aan de **conservatieve** kant – de axiale capaciteit van in klei geheide palen neemt toe na installatie, voornamelijk door de dissipatie van wateroverspanningen en herstel na verkneding door de installatie



Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

Overige aspecten



- **Veiligheidsfilosofie** volgens NEN9997-1:2025
- Invloed op het draagvermogen in zand van **kleilagen** nabij de paalvoet (in/ onder paal)
- Effecten van een **afwijkende paalgeometrie**
- Invloed van **cyclische belastingen**
- Beschouwing paal draagvermogen in andere grondsoorten, zoals **silt**



Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

21

Samenvatting



- Nieuwe ontwerp methode: **belangrijke stap vooruit** in de ontwerp praktijk voor het bepalen van het (geotechnisch) draagvermogen van open stalen buispalen in zand en/of klei
- Ook toepasbaar voor palen met **grotere** diameters en **dunnere** wanddiktes
- Sluit enerzijds aan op de **internationale (ISO) ontwerp praktijk** en anderzijds bij het waargenomen gedrag tijdens de (NLse) proefbelastingen, zoals bij de **2^{de} Maasvlakte**
- **Economisch en duurzaam** alternatief voor traditionele paalfunderingen, m.n. bij de fundering van kademuren, (offshore) windturbines en andere grote kunstwerken
- Eenduidige, goed onderbouwde en breed geaccepteerde ontwerp methode is **essentieel**
- Publicatie CROW-richtlijn in **Q1 van 2026** verwacht, incl. voorbeeld berekeningen



Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

22

Dankwoord! Vragen?



Herziening CUR/ CROW richtlijn is teamwork!

Roel Brouwer (GeoBest), Jan van Dalen (Daed ingenieurs), **Bas van Dijk** (Arcadis), Ken Gavin (TU Delft), **Dirk-Jan Jaspers Focks** (Witteveen+Bos), Gijs Kaptein (*Rijkswaterstaat*), **Dirk de Lange** (Deltares), Johan van der Molen, Jessica Oudhof (Arup), Bram Pieneman (CROW), Maarten Profitlich (Fugro), Jan Putteman (SBE Engineering), Alfred Roubos (*Port of Rotterdam*), Hans Tanis (De Klerk), Wesley Yu (CROW) en Johan Zwaan (CRUX)

Geotechniekdag 11 november 2025 Amersfoort

23