



Aziz Cherkaoui
Gemeente
Amsterdam



Erik Hutcheson
Gemeente
Amsterdam



Erwin de Jong
Gemeente
Amsterdam



Rodriaan Spruit
Gemeente
Rotterdam



Dirk de Lange
Deltares

GROOTSCHALIG ONDERZOEK NAAR DE GEOTECHNISCHE DRAAGKRACHT VAN HOUTEN PAALFUNDERINGEN IN AMSTERDAM

Inleiding

Het Programma Bruggen en Kademuuren (PBK) staat voor de uitdaging om de constructieve veiligheid van bruggen en kademuuren op houten palen te beoordelen. Om deze taak te kunnen uitvoeren is er behoefte aan duidelijke regelgeving en nieuwe inzichten. Er heeft grootschalig onderzoek plaatsgevonden naar houten palen om meer zekerheid te krijgen over de werkelijke paal- en materiaaleigenschappen, de invloed van de bacteriële aantasting op de sterkte van de funderingspalen en de draagkracht van de ondergrond. Het is vrijwel onmogelijk om bestaande palen volledig te instrumenteren. Daarom is ervoor gekozen om naast bestaande palen ook nieuwe geïnstrumenteerde palen te beproeven. Voorliggend artikel behandelt een serie proeven die zijn uitgevoerd op nieuwe houten palen die volledig zijn geïnstrumenteerd.

In de voorgaande editie van het Feuilleton [2] is het Semi-Probabilistische Toetsmodel houten palen Amsterdam toegelicht. Belangrijke invoerparameters voor het Toetsmodel zijn de paalklassefactoren α_p en α_s van de (tapse) houten palen en de hoogte waarover de palen positieve schachtwrijving onttelen aan de ondergrond. Het Toetsingskader Amsterdamse Bruggen TAB 2.0

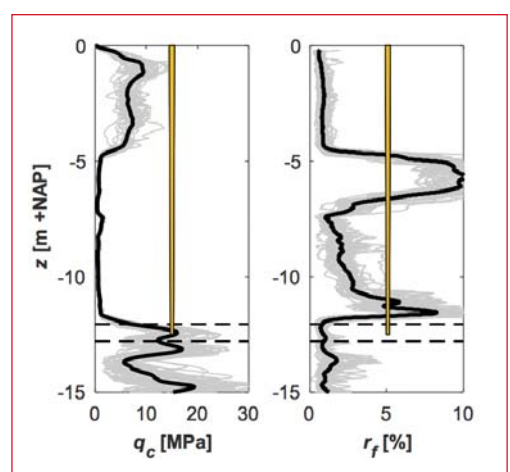
[3] wordt momenteel herzien met behulp van bevindingen uit proeftuinen, waarin zowel nieuwe als bestaande houten palen zijn onderworpen aan proefbelastingen. Proefbelastingen op houten palen zijn uitgevoerd om de draagkracht van de houten palen te onderzoeken en de aannames in het Toetsingskader aan te scherpen.

In Amsterdam is een terrein in de wijk OverAmstel ingericht voor het uitvoeren van proeven op nieuwe, geïnstrumenteerde, houten palen. Dit artikel geeft een samenvatting van de resultaten van axiaal op druk belaste palen, uitgevoerd door Gemeente Rotterdam en vervolgens geanalyseerd door Deltares. Hiermee wordt gedeeltelijk invulling gegeven op Thema 4 van het Feuilleton [1]. Gedetailleerdere analyses van de resultaten met betrekking tot de andere proeven die zijn uitgevoerd in deze proeftuin, alsmede de proeven op bestaande palen onder bruggen in de Vijzelstraat worden mogelijk in vervolgedities behandeld.

Algemene beschrijving van de proefcampagne

De grondopbouw van de proeftuin in OverAmstel is representatief voor grote delen van Amsterdam, zie figuur 1. Alleen de bijna 5 m dikke antropogene toplaag (zand) is echter wel circa 3 m dikker dan wat over het algemeen in de binnenstad wordt aangetroffen. Om de invloed daarvan te beperken en de heikbaarheid te verbeteren is deze toplaag voorgeboord/voorgewoeld. Tussen de toplaag en de eerste zandlaag komen we achtereenvolgens veen, klei (siltig/zandig) en basisveen tegen. De testpalen zijn in de eerste zandlaag gezet.

Omdat onder bruggen en kademuuren voornamelijk grenen en vuren palen worden aangetroffen, zijn voor het onderzoek zowel grenen als vuren palen geselecteerd, respectievelijk 9 en 18 stuks. De meeste (13) van de vuren palen zijn handmatig geschild, de rest is mechanisch geschild. De puntdiameter varieerde tussen 0,13 en 0,16 m, de kopdiameter tussen 0,21 en 0,31 m en de



Figuur 1 – Gemiddelde (zwart) en afzonderlijke sondeerweerstand (grijs). Variatie in paalpuntniveau is aangegeven met stippellijnen.



Figuur 2 – Aanbrengen van de glasvezelrekstroken in de palen.

SAMENVATTING

Voor het beoordelen van de constructieve veiligheid van bruggen en kademuuren op houten palen, heeft gemeente Amsterdam behoefte aan meer kennis over het gedrag van bestaande palen. Één van de problemen hierbij is dat bestaande palen niet zijn geïnstrumenteerd. Daarom is ervoor gekozen om naast het proefbelasten van bestaande palen, ook geïnstrumenteerde nieuwe houten

palen te beproeven. Zestien houten palen, met enige variatie in diameter, tapsheid en inheidiepte zijn op druk beproefd conform NPR 7102, klasse A1. De focus van dit artikel ligt op de analyse van zes palen die in detail zijn uitgewerkt. De gevonden paalklassefactoren zijn hoger dan de waarden volgens de vigerende norm.

lengte tussen ca. 13,53 en 14,45 m. De overall tapsheid van de testpalen varieerde daarmee tussen ca. 5 en 12 mm/m. De palen zijn geïnstrumenteerd met glasvezels om het axiale rekverloop te bepalen, zie figuur 2.

Het heien van de palen is zo authentiek mogelijk uitgevoerd door gebruik te maken van een stelling met een valgewicht van 800 kgf. Voorafgaand aan het heien is de topzandlaag met een avegaar voorgeboord, om de weerstand die deze laag kan leveren te reduceren. Het was aanvankelijk de bedoeling om de palen 1 à 2 'tochten' in de eerste zandlaag te heien, maar de gerealiseerde puntniveaus varieerden tussen ca. NAP -12,1 en -12,8 m, wat overeenkomt met 1,7 tot 4,3 tochten in de eerste zandlaag.

De volgende proeven zijn uitgevoerd:

- 16 palen zijn belast op druk conform NPR 7201, klasse A1;
- 4 palen zijn belast op trek (3 van deze palen waren eerder op druk belast);
- 4 palen zijn belast op druk, relatief snel en zonder ontlaststappen tot bezwijken getest, en daarna 2 maanden belast met 80% van het gemeten bezwijkdraagvermogen (bij 10% D_{eq} paalpuntverplaatsing);
- 5 palen zijn belast door het aanbrengen van een extra belasting op het maaiveld (ontwikkelen negatieve kleeft).

De focus in dit artikel ligt op de palen die zijn belast op druk conform NPR 7201 [7]. In figuur 3 is de proefopstelling weergegeven. Bij deze proefbelastingen is stapsgewijs de belasting verhoogd, inclusief het aflaten van de belasting alvorens de belasting weer verder te verhogen. Na het proefbelasten zijn alle houten palen getrokken en naar de TU Delft gebracht voor laboratoriumonderzoek [8]. Bij 6 palen zijn de glasvezelmetingen gevalideerd onder laboratoriumomstandigheden en de mechanische eigenschappen van paalsecties bepaald. De proefresultaten van deze 6 palen zijn in meer detail uitgewerkt.

Uitdagingen en oplossingen

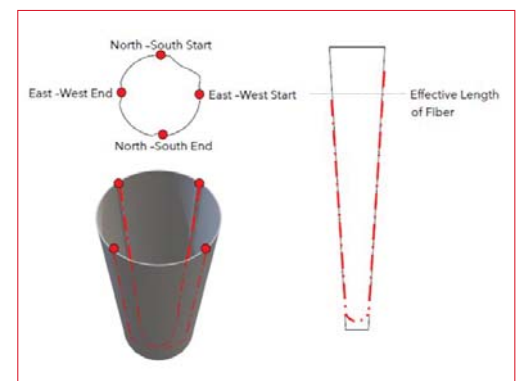
HOUT IS EEN NATUURPRODUCT

Om een goede indruk te krijgen van het verloop van de normaalkrachten in de paal, moet er rekening worden gehouden met de natuurlijke variatie van houten palen. Dit geeft de nodige



Figuur 3 – Proefopstelling op druk belaste palen conform NPR 7201 klasse A1.

uitdagingen. De diameter is geen constante en ook zijn er lokale oneffenheden, zoals noesten en kwasten. Daarnaast is de elasticiteitsmodulus geen constante, omdat deze onder andere afhankelijk is van vochtgehalte en verhouding kern en spinthout in de doorsnede. Aangezien de gemeten rek wordt vertaald naar een axiale kracht, is het belangrijk oppervlakte en elasticiteitsmodulus nauwkeurig te kennen ($F = \epsilon EA$). De paalgeometrie is benaderd door met tussenafstanden van 1 m steeds de omtrek te meten. Deze omtrek is vervolgens vertaald naar een diameter. Een schatting van het initiële vochtgehalte is verkregen door het gewicht van de palen te bepalen. Achteraf zijn de testpalen getrokken en is de elasticiteitsmodulus bepaald over lengten van 0,9 m (onderste gedeelte) of 1,35 m (rest). Het vochtgehalte is op dat moment ook opnieuw bepaald. De elasticiteitsmodulus vertoont een sterke correlatie met de diameter.



Figuur 4 – Paalinstrumentatie [5].

Het is bekend dat bij oudere bomen de jaarringen dichter op elkaar zitten dan bij jonge bomen. De dichtheid in het hout neemt toe naarmate de jaarringen dichter op elkaar zitten. De gevonden correlatie is gebruikt bij de analyse van de rekmetingen.

BUIGING

Houten palen zijn niet perfect recht, zodat belasting op de paalkop altijd tot enige excentriciteit zal leiden. Dit effect kan worden versterkt als een paal verder wordt gekromd tijdens het installeren. Om deze reden is ervoor gekozen om

vier groeven te frezen waar twee glasvezels in zijn gelijmd: een noord-zuid- en een oost-west-vezel, zie figuur 4. Door op doorsnedeniveau de rekken van de vier meetpunten te middelen wordt er gecorrigeerd voor optredende buiging. De vezels maken een bocht door de paal nabij de paalpunt. Omdat de penetratie in de eerste zandlaag beperkt is en de spatiële resolutie van de rekmeting 0,25 m bedraagt, is het gewenst om deze bocht zo laag mogelijk te plaatsen. Met het oog op mogelijke beschadiging van de paalpunt (pruijk) is er gekozen voor een minimale dekking van 2 cm. Uiteindelijk is slechts bij één paal de punt zodanig gespletten waardoor de meetlus een onderbreking had.

RESIDUELE REKKEN

Het is bekend dat na het wegdrukken of heien van een paal, een deel van de paal op druk belast kan blijven. Wrijving tussen grond en paalschacht kan ervoor zorgen dat de paal niet volledig kan terugveren naar de neutrale stand. Dit fenomeen wordt veelal aangeduid met termen als ‘residuele rekken’ of ‘restspanningen’. Deze rekken dienen te worden meegenomen voor een correcte afleiding van de normaalkrachten in de paal. Wanneer deze niet worden meegenomen leidt dit over het algemeen tot een onderschatting van de puntweerstand en daarmee tot een overschatting van de schachtweerstand.

Om deze residuele rekken te bepalen zijn voorafgaand aan het heien de glasvezels doorgemeten. Daarbij hing de paal in een kraan. Door deze metingen als referentie te gebruiken, kunnen de residuele rekken bij aanvang van de proef worden bepaald. Deze rekken zijn in figuur 5 weergegeven voor de 6 in detail uitgewerkte palen. Voor de meeste palen is een correctie toegepast om de residuele rek nul te maken aan de paalkop. Deze correctie bedroeg maximaal 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ en is

toegepast over de gehele lengte. Mogelijke verklaringen voor de noodzaak van deze correctie zijn verschillen in temperatuur en vochtgehalte tijdens de referentiemeting en de proefbelasting. Aangezien deze correctie niet volledig wordt begrepen, brengt dit onzekerheid met zich mee. De 6 palen vertonen na deze correctie allen wel hetzelfde verloop: weinig wrijving vanuit de (voorgeboorde) toplaag, negatieve wrijving uit de slappe lagen en de grootste drukspanning onderin de paal.

Analyse van de rekmetingen

VERLOOP NORMAALKRACHT

De normaalkrachten in de paal zijn bepaald bij een paalpuntverplaatsing van 10% van de paalpunt diameter. Om deze te bepalen moesten allereerst de rekmetingen worden gekoppeld aan een positie op de paal. Er is gekozen om één meting te laten samenvallen met het laagste punt in de bocht van de glasvezel [5][6]. Daarna kunnen de metingen per niveau worden gemiddeld. Aangezien de spatiële resolutie van de meting gelijk is aan 0,25 m, zal deze aanpak in sommige gevallen voor wat ruis zorgen.

Bij de vertaling van gemeten rekken naar normaalkrachten is gebruik gemaakt van een rekafhankelijke stijfheid in de vorm $E(\epsilon)=a-b\cdot\epsilon$, aangezien dit gedrag zowel in het veld en in het lab van de TU Delft is waargenomen. Voor één van de palen (P594) werd een groot verschil gevonden tussen het stijfheidsgedrag tijdens de proefbelasting en de laboratoriumproeven. Bij deze paal is ervoor gekozen om de correlatie tussen diameter en elasticiteitsmodulus uit het lab te corrigeren met het gemeten stijfheidsgedrag tijdens de proefbelasting. Figuur 6 toont het verloop van de normaalkracht van de P164. In deze figuur is tevens inzichtelijk gemaakt wat

het meenemen van de residuele rekken betekent. Bij de meeste palen vertonen de normaalkrachtverdelingen de nodige schommelingen, die fysisch gezien niet juist kunnen zijn, maar naast andere bronnen van onzekerheid wel te verklaren zijn vanuit lokale natuurlijke variatie in de houten palen.

AFGELEIDE PAALKLASSEFACTOREN

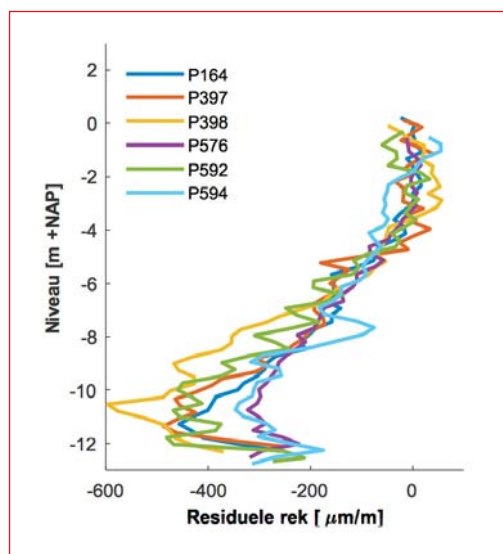
Voor de slappe lagen en de eerste zandlaag zijn paalklassefactoren afgeleid. Per paal waren drie sonderingen beschikbaar in een straal van 1,3 m en per sondering zijn de factoren bepaald volgens NPR 7201 [7] (dus ook zonder afsnuiten van de conusweerstand). Voor de eerste zandlaag is voor een alternatieve aanpak gekozen, vanwege:

- De onzekerheid in de locatie van de rekmetingen in combinatie met de beperkte penetratie in de zandlaag;
- Het feit dat de rekmeting een gemiddelde is over een interval van 0,25 m en ook abrupte verschillen in rekniveaus kunnen worden uitgemiddeld, wat de meting nabij de paalpunt kan beïnvloeden.

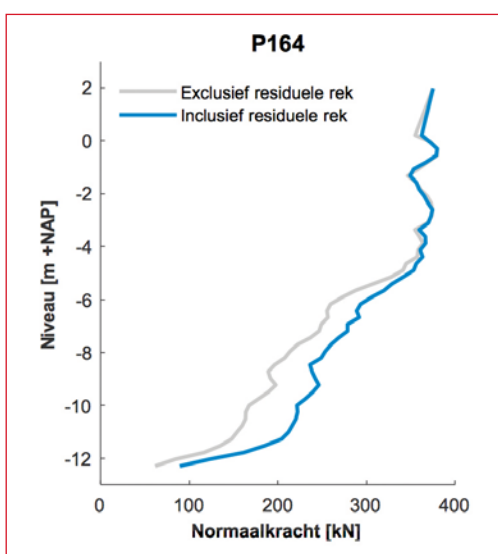
Door middel van optimalisatie is berekend welke set van α_p en α_s het minste spreiding vertoont voor de eerste zandlaag. Hierbij is dus alleen de normaalkracht aan de bovenkant van de laag gebruikt. De gevonden factoren zijn weergegeven in Tabel 1.

Grondlaag	Paalklassefactor	Gemiddeld	CoV
1e zandlaag	α_p	1,07	0,05
	α_s	0,014	0,05
Slappe lagen	α_s	0,057	0,20
Toplaag	α_s	0,003*	0,72

Tabel 1 – Afgeleide paalklassefactoren (* toplaag is verstoord door voorboren).



Figuur 5 – Residuele rekken bij aanvang van de proefbelastingen (negatieve rek = druk).



Figuur 6 – Afgeleide normaalkrachten in paal.

Figuur 7 toont de normaalkracht ten opzichte van de kopkracht bij geotechnisch bezwijken. De palen P164, P398 en P592 vertonen een bijna identiek beeld: nauwelijks afdracht in de (voorgeboorde) toplaag en ca. 150 kN afdracht in de slappe lagen. De andere drie palen wijken hier vanaf, met name P397 en P594. Dit illustreert de grote spreiding bij de paalklassefactoren in de slappe lagen en de toplaag. Het is onduidelijk wat de precieze redenen zijn voor deze spreiding en daarom zijn alle resultaten meegenomen bij de bepaling van de paalklassefactoren. De gevonden α_s -waarden in de slappe lagen en de eerste zandlaag liggen in de buurt van het wrijvingsgetal uit de sonderingen. Voor de toplaag geldt dat de relatie tussen conusweerstand en wrijving sterk is verstoord door het voorboren van deze laag. De gevonden α_p zonder het meenemen van residuele rekken is gelijk aan 0,76. Dit komt in de buurt van de huidige waarde in NEN 9997-1 [4].

MOBILISATIECURVEN

Op basis van de rekmetingen en kopverplaatsingen is de mobilisatie van de grondweerstand als functie van de lokale verplaatsingen bepaald. Deze zijn vergeleken met de curven uit de norm. Het valt op dat de mobilisatie van de puntweerstand over het algemeen stijver is dan wat de norm geeft. Dit kan worden verklaard door het meenemen van de residuele rekken. De mobilisatie van de schachtweerstand in de eerste zandlaag vertoont in het algemeen een goede gelijkens met de curve uit de norm.

Overall gedrag

In totaal zijn 16 palen op druk beproefd. De last-zakkingscurven zijn gegeven in figuur 8. Hierbij zijn de ontlast-herbelast takken weggelaten en de zes palen die in detail zijn uitgewerkt zijn weergegeven met dickere lijnen. De 10 palen die (nog) niet in detail zijn uitgewerkt zijn wel gebruikt om de gevonden paalklassefactoren te toetsen. Daartoe zijn drie scenario's opgesteld:

1. paalklasse-factoren afgeleid op basis van rekmetingen inclusief restkracht;
2. paalklasse-factoren afgeleid op basis van rekmetingen exclusief restkracht;
3. paalklasse-factoren volgens NEN 9997-1.

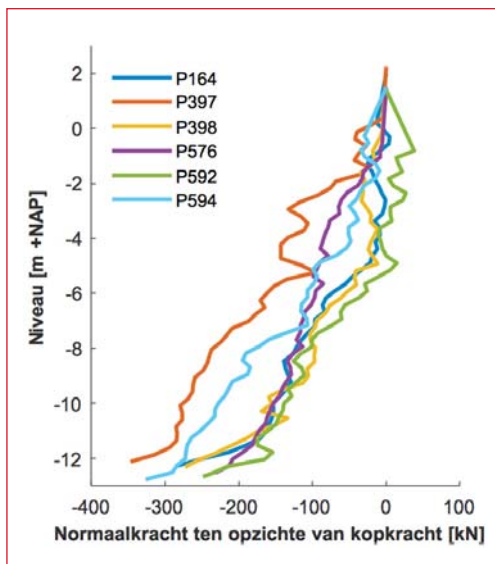
In Tabel 2 is per scenario de gemiddelde ratio tussen de gemeten en de berekende draagkracht opgenomen inclusief bijbehorende variatiecoëfficiënt, CoV. Voor de eerste twee scenario's wordt een kleine onderschatting van de draagkracht gevonden. Voor scenario 3 geldt een overschatting van 5%. Dit laatste is voornamelijk te verklaren vanuit de bijdrage van de 5 m dikke ophooglaag met een relatief hoge conusweerstand. Juist de onzekere bijdrage van deze geroerde toplaag maakt het moeilijk om harde conclusies te trekken. De CoV van de gemeten draagkracht betreft 11%. Door de gemeten waarden te delen door de berekende waarden (steeds met één set paalklassefactoren voor alle palen) daalt deze waarde naar 6 à 7%, onafhankelijk van de set paalklassefactoren. Vermoedelijk zal elke set die het gemiddelde goed weet te benaderen rond deze waarden uitkomen, vanwege de geringe spreiding in inheinniveaus, paaldimensies en grondeigenschappen.

Scenario	Gemiddeld	CoV
1	1,02	0,07
2	1,01	0,06
3	0,95	0,07

Tabel 2 – Gemiddelde ratio van gemeten en berekende draagkracht en bijbehorende variatie CoV

Slotopmerkingen

Zes nieuwe houten palen die op druk zijn beproefd conform NPR7201 [7] zijn in detail uitgewerkt. Hoewel er de nodige aandacht is besteed aan complicerende factoren is er toch



Figuur 7 – Krachtafdracht door wrijving.

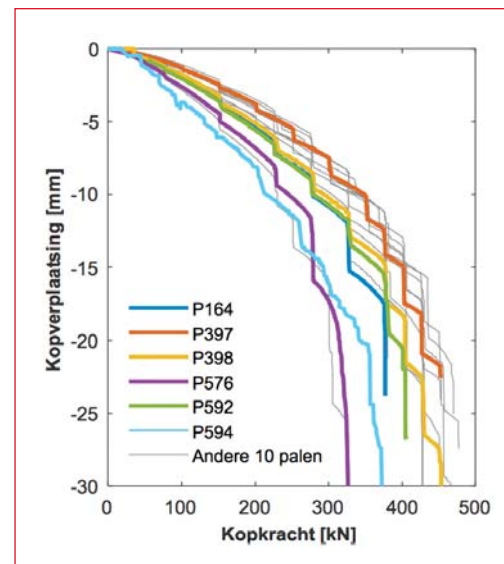
veel variatie gevonden in het afgeleide normaalkrachtenverloop. Dit wordt voornamelijk toegeschreven aan het feit dat hout een natuurproduct is. Het is met name opvallend dat de variatie in het overall gedrag veel kleiner is dan de spreiding in het normaalkrachtenverloop. Toch lijken de gevonden paalklassefactoren niet onrealistisch. Een verklaring hiervoor is dat individuele afwijkingen wegvallen na het middelen van de zes palen.

De gevonden paalklassefactor α_s (ca. 0,05 à 0,06) in de holocene veen- en kleilagen is veel hoger dan de norm [4] voorschrijft (0,02 à 0,03). De factoren in de norm [4] zijn gebaseerd op proeven op stalen palen in potklei.

Bruggen op houten palen kunnen de belasting over zeer grote aantallen palen verdelen, waarbij het gemiddeld gedrag dat uit de proeven volgt ook wat van een op houten palen gefundeerde constructie mag worden verwacht.

Het bezwijkgedrag van de palen laat zien dat bij geotechnisch bezwijken (conform de norm op $0,1 \cdot D_{eq}$ paalpunt verplaatsing), de grondmechanische weerstand nog oploopt. Ook bij palen die bewust dieper zijn gedrukt bleef de weerstand oplopen. In praktijk betekent dit dat bij overbelasting de constructie deze wat zakkings zal vertonen maar dat daarmee ook de draagkracht marginaal toeneemt.

De bevindingen op basis van de nieuwe palen kunnen niet één-op-één worden toegepast op bestaande palen, omdat deze veelal zijn aangetast door bacteriën en schimmels. In een mogelijke volgende editie zal er dieper worden ingegaan op de proeven op zowel nieuwe als bestaande houten palen (Vijzelstraat Bruggen 30 en 41).



Figuur 8 – Last-zakkingscurven alle 16 palen belast op druk.

Referenties

- [1] Artikel 1 in het feuilleton - 'Het Amsterdamse Houten Palenonderzoek', opgesteld door R. Terpstra van de Gemeente Amsterdam, gepubliceerd in Geotechniek editie september 2022.
- [2] Artikel 2 in het feuilleton - 'Semi-Probabilistisch Toetsmodel Houten Palen, opgesteld door R. Terpstra (Gemeente Amsterdam) en T. Schwecendiek (Deltares), gepubliceerd in Geotechniek editie maart 2023.
- [3] Toetsingskader Amsterdamse Bruggen - Aanvullingen op en specificaties van de CROW-CUR Aanbeveling 124:2019 voor de Amsterdamse situatie, betreffende de beoordeling van deconstructieve veiligheid van bestaande bruggen en viaducten van decentrale overheden; opgesteld door de Gemeente Amsterdam, versie 2, d.d. 19 december 2019.
- [4] NEN 9997-1+C2:2017 nl Geotechnisch ontwerp van constructies - Deel 1: Algemene regels.
- [5] Geotechnical Bearing Capacity of Timber Piles in the City of Amsterdam; Derivation of bearing capacity prediction factors based on static load tests conducted on instrumented timber piles. Master Thesis. S. Honardar, November 2020.
- [6] 11204981-012-GEO-0002_v1.0 Advies geotechnische draagkracht houten palen Amsterdam – Analyse proefbelastingen op druk in proeftuin Overamstel van Deltares d.d. 13-04-2022.
- [7] NPR 7201+A1 augustus 2020 (nl) Geotechniek - Bepaling van het axiaal draagvermogen van funderingspalen door middel van proefbelastingen.
- [8] Determination of geometry and stiffness of 6 wooden foundation piles (container 235) equipped with optic fiber, TUDelft, TUD-M7.1-2021093-GP-v1 d.d. 1 oktober 2021 (draft).
- [9] Proeftuin Overamstel Feitenrapportage proefbelastingen op houten palen, Gemeente Rotterdam IB (R. Spruit), 16-06-2020. ●