



HET AMSTERDAMSE HOUTEN PALENONDERZOEK

Amsterdam kent 1800 bruggen en 600 kilometer kades. De afgelopen decennia heeft er vooral reactief beheer plaatsgevonden waardoor er onvoldoende inzicht is in de huidige staat, en of de veelal oude bruggen en kademuren nog veilig zijn. Aanleiding voor Amsterdam om in 2018 te starten met het 'Programma Bruggen en Kademuren' (PBK) waarin onder andere 850 verkeersbruggen en 200 kilometer kademuur getoetst worden op constructieve veiligheid. 270 van deze bruggen en 125 kilometer kademuur is gefundeerd op houten palen, vaak wel honderden jaren oud. Het rekenkundig aantonen of deze palen nog veilig zijn is niet eenvoudig. De palen staan namelijk onder water en in de bodem waardoor inspectie en onderzoek lastig is. Daarnaast geven de huidige normen en richtlijnen onvoldoende houvast om eenduidig te kunnen toetsen. Reden genoeg voor Amsterdam om, als onderdeel van PBK, te starten met een grootschalig wetenschappelijk onderzoeksprogramma met kennisinstellingen als Deltares en de Technische Universiteit Delft (TU Delft).

Het onderzoek richt zich op het ontwikkelen van meer betrouwbare onderzoek- en beoordelingsmethoden om houten palen onder een specifieke Amsterdamse brug of kademuur rekenkundig te kunnen toetsen op constructieve veiligheid. Doel om de marge tussen wat de palen in werkelijkheid aankunnen, en wat rekenkundig aangetoond kan worden, zo klein mogelijk te maken. Het onderzoek omvat een viertal onderzoekthema's die uniek zijn in Nederland en aanleiding zijn om als feuilleton in dit vakblad te behandelen. Het betreft hier de volgende vier thema's:

- Thema 1 Alternatieve meetinstrumenten voor funderingsonderzoek
- Thema 2 Het semi-probabilistische toetsmodel houten palen
- Thema 3 De (resterende) constructieve draagkracht en bijbehorend bezwijkgedrag
- Thema 4 De geotechnische draagkracht

In deze editie van Geotechniek wordt de huidige Amsterdamse situatie beschreven en de globale opzet van het onderzoeksprogramma en de benodigde input.

In de volgende en laatste editie van 2022 wordt thema 2 het semi-probabilistische toetsmodel houten palen toegelicht: de eerste versie van een ontwikkelde softwaretool waarmee de gebruiker op basis van beperkte inspectie-gegevens een uitspraak kan doen over de resterende draagkracht van de totale paalpopulatie onder een specifieke Amsterdamse brug. In de eerste editie van 2023 wordt het resultaat van thema 1 toegelicht: een doorontwikkeld meet-instrument waarmee inzicht verkregen kan worden in de kwaliteit van houten palen onder water. De tweede editie van 2023 lichten de resultaten van thema 4 toe: het proefbelasten van nieuwe houten palen voorzien van glasvezelrekstroken en de proefbelastingen op bestaande houten palen van honderden jaren oud. Tussentijdse resultaten van thema 3 moeten uitwijzen of deze aanleiding zijn om volgend jaar in dit vakblad te publiceren.

De houten funderingspalen, de feiten en omstandigheden

Amsterdam, die grote stad, Die staat op honderd

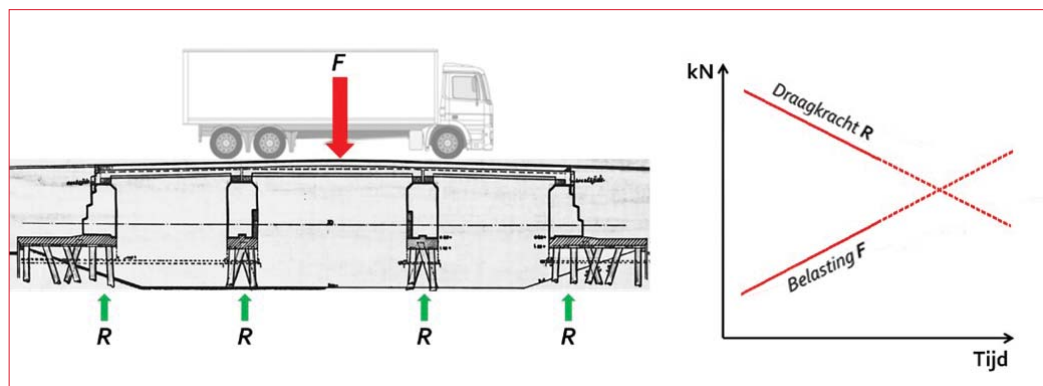
palen, En als die stad eens ommevalt, Wie zal dat betalen?

Amsterdam staat, anders dan in het versje van Van Vloten, niet op honderd palen. Onder de bruggen en kademuren zelf bevinden zich al circa een miljoen houten palen. Veel van deze palen staan in de eerste zandlaag, op een diepte van ongeveer 12 meter. Veel palen zijn oud en stammen nog uit de tijd dat Amsterdammers zich met paard en wagen door de stad bewogen. In de loop der tijd is de intensiteit en het type verkeer in de stad toegenomen, waardoor ook de belasting van het verkeer (F) op de bruggen (en kades) is toegenomen. Anderzijds neemt de draagkracht (R) van de houten palen af naarmate de brug verouderd. Bacteriële aantasting is een factor die leidt tot een afname van de draagkracht van het hout. In figuur 1 is de combinatie van belastingtoename en draagkrachtafname als functie van de tijd schematisch weergegeven. Zolang de draagkracht (R) groter is dan de belasting (F) kan de brug veilig worden gebruikt.

Moet Amsterdam zich nu zorgen maken? Het antwoord hierop is volmondig 'JA'. Er is namelijk onvoldoende inzicht in de ontwikkeling van de toename van de belasting en de afname van de draagkracht van de houten palen in de loop der tijd. Hierdoor worden bij de toetsing conservatieve waarden aangehouden als inputvariabelen voor de belasting en draagkracht met als gevolg dat bruggen en kademuren mogelijk onterecht worden afgekeurd en vervangen moeten worden.

Heldere regelgeving ontbreekt

Waarom is er onvoldoende inzicht? De landelijke normen en richtlijnen bestaande uit de NEN 8700-reeks, de CROW-CUR aanbeveling 124:2019, de SBRCURnet publicatie Binnenstedelijke kademuren en de F₃O/SBRCURnet Richtlijn houten paalfunderingen onder gebouwen geven onvoldoende handreikingen/regels mee om houten palen onder een bestaande Amsterdamse brug of kademuur te beoordelen, zie figuur 2. De beoordelingsmethoden zijn vrij te interpreteren, berusten op veel aannames en dekken niet de gehele Amsterdamse situatie. Amsterdam heeft daarom een eigen Amsterdamse richtlijn opgesteld, zie figuur 2. Echter is de gehanteerde beoordelingsmethode in deze richtlijn momenteel nog te onbetrouwbaar en gebaseerd op te veel aannames.



Figuur 1 - Weergave krachtwerving bestaande brug in de loop der tijd. Bron - Gemeente Amsterdam

SAMENVATTING

Amsterdam toetst momenteel zijn bruggen en kademuuren op constructieve veiligheid. 270 van deze bruggen en 125 kilometer kademuur is gefundeerd op houten palen. Vanwege het ontbreken van heldere regelgeving heeft Amsterdam een grootschalig wetenschappelijk onderzoeksprogramma opgezet met kennisinstellingen als Deltares en de Technische Universiteit Delft. Opgave is de ontwikkeling van een betrouwbare en meer realistische beoordelingsmethode waarmee op basis van beperkte inspectiegegevens de resterende

draagkracht van de 'totale' paalpopulatie onder een specifieke Amsterdamse brug of kademuur getoetst kan worden.

In deze editie van *Geotechniek* wordt de huidige beoordelingsmethode toegelicht. Aan de hand van onderzoekthema's wordt de ontwikkeling van de beoordelingsmethode uitgevoerd. Deze onderzoekthema's leveren inzichten op die in een feuilleton zullen worden gepresenteerd.

De huidige Amsterdamse beoordelingsmethode: de aannames

De huidige Amsterdamse beoordelingsmethode om houten palen onder een Amsterdamse brug of kademuur te toetsen is gebaseerd op veel aannames en onzekerheden. Hieronder wordt de beoordelingsmethode globaal omschreven.

FUNDERINGSONDERZOEK

Duikers meten van 10% van de palen onder een brug of kademuur de paalkopdiameter en nemen van de paalkop houtboormonsters ($\Phi 9$ mm). De houtboormonsters worden in het laboratorium in submonsters verdeeld en geanalyseerd op de mate van de bacteriële aantasting. Daarnaast wordt het verloop van de hout eigenschappen (vochtgehalte en dichtheid) over de doorsnede bepaald. Er bestaat een sterke relatie tussen het gemeten vochtgehalte en de druksterkte in door bacteriën aangetast hout. Op basis van de formule $f_c = 38,543 e^{-0,6965w}$ uit bijlage D van de NEN 8707:2018 [1] kan bij vochtmetingen aan houtboormonsters een 'indicatie' worden verkregen van de druksterkte over de paaldoorsnede.

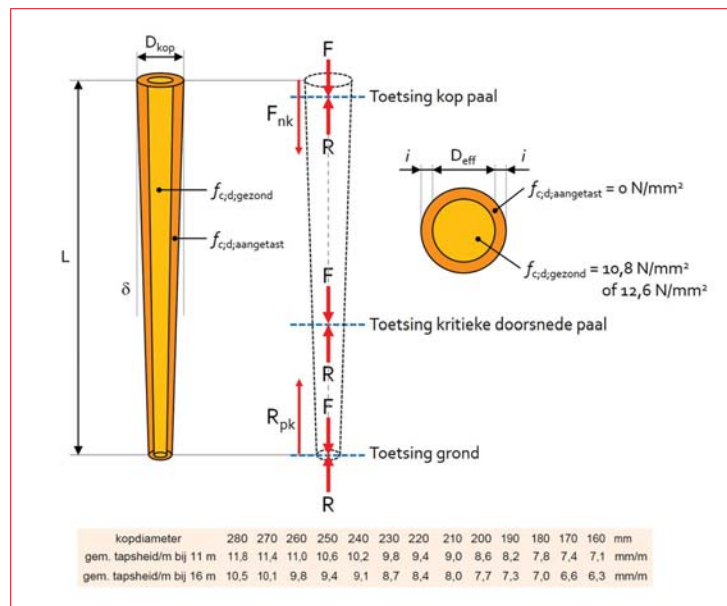
DE CONSTRUCTIEVE DRAAGKRACHT

De resultaten van het funderingsonderzoek vormen de basis voor de bepaling van de constructieve draagkracht. Aangenomen wordt dat de dikte van de aangetaste schil i volgt uit de aangetaste houtfracties met een druksterkte $f_c < 8$ N/mm². Van deze zogenaamde 'zachte schil' wordt aangenomen dat $f_{c,d;aangetast}$ niet bijdraagt aan de constructieve draagkracht. De constructieve draagkracht ter plaatse van de kritieke doorsnede wordt bepaald op basis van de volgende uitgangspunten/aannames, zie figuur 3:

- De locatie van de kritieke doorsnede bevindt zich ter plaatse van het omslagpunt.
- De dikte van de zachte schil i aan de paalvoet is de helft van de dikte van de zachte schil i aan de paalkop en verloopt lineair over de paallengte L .
- De diameter ter plaatse van de kritieke doorsnede D_{krit} volgt uit de tapsheid δ van de paal. Voor δ wordt de tabel van Frans Sas [3] aangehouden.
- De constructieve draagkracht van de paal R wordt berekend door het resterende paaloppervlak



Figuur 2 – De vier landelijke normen en richtlijnen (links) en de Amsterdamse richtlijn (rechts). Bron - Gemeente Amsterdam.



Figuur 3 – Overzicht huidige Amsterdamse beoordelingsmethode voor bepaling van de draagkracht op basis van houtmonsteranalyse. Bron - Gemeente Amsterdam.

A_{eff} te vermenigvuldigen met de sterkte waarde $f_{c,d;gezond}$ behorende bij gezond rondhout.

GEOTECHNISCHE DRAAGKRACHT

De geotechnische draagkracht van de grond door de afdracht van de belastingen via de paal wordt bepaald door de som te nemen van de draagkracht van de grond aan de paalpunt en de draagkracht van grondwrijving langs de paalschacht, rekening houdend met de paaldimensies. De geotechnische draagkracht wordt bepaald op basis van de volgende uitgangspunten/aannames, zie figuur 3:

- Bacteriële aantasting van de paal heeft géén effect op de rekenkundige bepaling van de geotechnische draagkracht.

- De positieve grondwrijving langs de paalschacht dient in rekening te worden gebracht vanaf aanzet eerste zandlaag tot paalpuntniveau. Het is toegestaan deze zone op te rekken tot bovenzijde van de zogenaamde wadzandformatie, waarbij voor deze zone een paalklassefactor geldt behorende bij zandig leem.
- Negatieve kleef wordt niet in rekening gebracht, mits er géén maaiveldophoging plaatsvindt. Hierbij is de aanname dat de negatieve kleef die zich ooit ontwikkeld heeft, is weggevloeid in de loop van de tijd.
- De diameter van de paalpunt $D_{paalvoet}$ volgt uit de tapsheid δ van de paal. Voor δ wordt de tabel van Frans Sas [3] aangehouden.

Waarom snijdt de huidige Amsterdamse beoordelingsmethode geen hout?

De huidige Amsterdamse beoordelingsmethode is de vertaling van funderingsonderzoek aan de paalkop naar een lager deel in de paal op basis van een groot aantal aannames voor de paal-, materiaal- en grondeigenschappen. Daarbij wordt de toetsing van de constructieve draagkracht en geotechnische draagkracht los van elkaar beschouwd terwijl in werkelijkheid interactie tussen paal en grond plaatsvindt. Daarnaast lijkt afkeur van enkel individuele palen onterecht aangezien er in de bovenliggende constructie vaak géén scheurvorming is waar te nemen. Een integrale beschouwing is daardoor noodzakelijk om meer inzicht te krijgen in de werkelijke krachtswerking.

Wat houdt het wetenschappelijke onderzoeksprogramma in?

Het Amsterdamse houten palenonderzoek richt

zich op het ontwikkelen van een meer realistische en betrouwbare beoordelingsmethode voor de toetsing van de 'totale' houten paalpopulatie onder een specifieke Amsterdamse brug of kademuur. Het onderzoeksprogramma omvat de volgende vier onderzoekthema's, zie ook figuur 4:

- Thema 1 Alternatieve meetinstrumenten voor funderingsonderzoek
- Thema 2 Het semi-probabilistische toetsmodel
- Thema 3 De (resterende) constructieve draagkracht en bijbehorend bezwijkgedrag
- Thema 4 De geotechnische draagkracht

De onderzoekthema's zijn hieronder kort toegelicht.

THEMA 1 ALTERNATIEVE MEETINSTRUMENTEN VOOR FUNDERINGSONDERZOEK

De huidige methode van funderingsonderzoek op basis van de houtmonsterboor geeft slechts een

lokaal beeld van de mate van aantasting. De aanvullende laboratoriumanalyse is arbeidsintensief en foutgevoelig. Om deze redenen heeft PBK verschillende alternatieve hout penetrerende instrumenten onderzocht die inzicht kunnen geven in de mate van aantasting en geschikt zijn voor onder water. De ontwikkelde onderwater variant van de IML-RESI PowerDrill, die in Amsterdam de 'Palenproever' heet, heeft de voorkeur gekregen om ingezet te worden tijdens funderingsonderzoek naar de houten palen onder de kademuuren in Amsterdam. De bruggen met houten palen zijn ondertussen al onderzocht met de houtmonsterboor. De palenproever zal in de eerste editie van 2023 worden toegelicht.

THEMA 2 HET SEMI-PROBABILISTISCHE TOETSMODEL

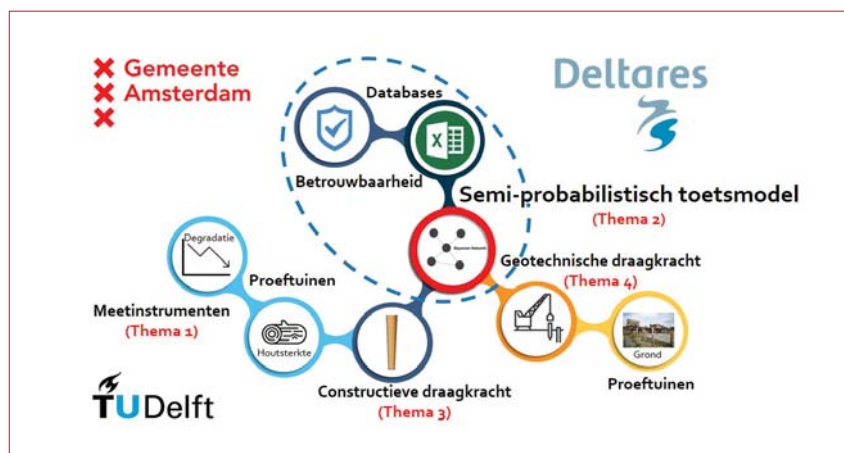
PBK heeft, in samenwerking met Deltares, onderzoek verricht naar een rekenmodel waarmee op basis van beperkte inspectiegegevens (paalkopdiameter en aantasting) een uitspraak gedaan kan worden naar de draagkracht van de 'totale' paalpopulatie onder een specifieke Amsterdamse brug of kademuur. Dit onderzoek heeft inmiddels geleid tot het semi-probabilistische toetsmodel houten palen dat momenteel wordt ingezet bij de toetsing van Amsterdamse bruggen. Het toetsmodel is een standalone softwaretool dat de gebruiker lokaal op zijn computer kan zetten en laten runnen. Het toetsmodel kent, ten opzichte van de huidige Amsterdamse beoordelingsmethode, een groot aantal kwalitatieve en kwantitatieve verbeteringen. Het toetsmodel zal in de volgende editie van dit vakblad uitgebreid toegelicht worden.

THEMA 3 DE (RESTERENDE) CONSTRUCTIEVE DRAAGKRACHT EN BIJBEHOREND BEZWIJKGEDRAG

PBK verricht, in samenwerking met de Technische Universiteit Delft - afdeling Biobased Structures and Materials, onderzoek naar de werkelijke paalen materiaaleigenschappen als input voor een levensduurmodel houten palen. Met dit model kan de 'resterende' constructieve draagkracht van een bestaande axiaal belaste houten paal realistischer berekend worden en kan een toekomstpredictie worden gegeven. Voor dit onderzoek zijn bestaande houten palen uit de grond getrokken en nieuwe houten palen geselecteerd en op locatie en in het laboratorium onderzocht. Tussentijdse resultaten moeten uitwijzen of deze aanleiding zijn om in 2023 gepubliceerd te worden.

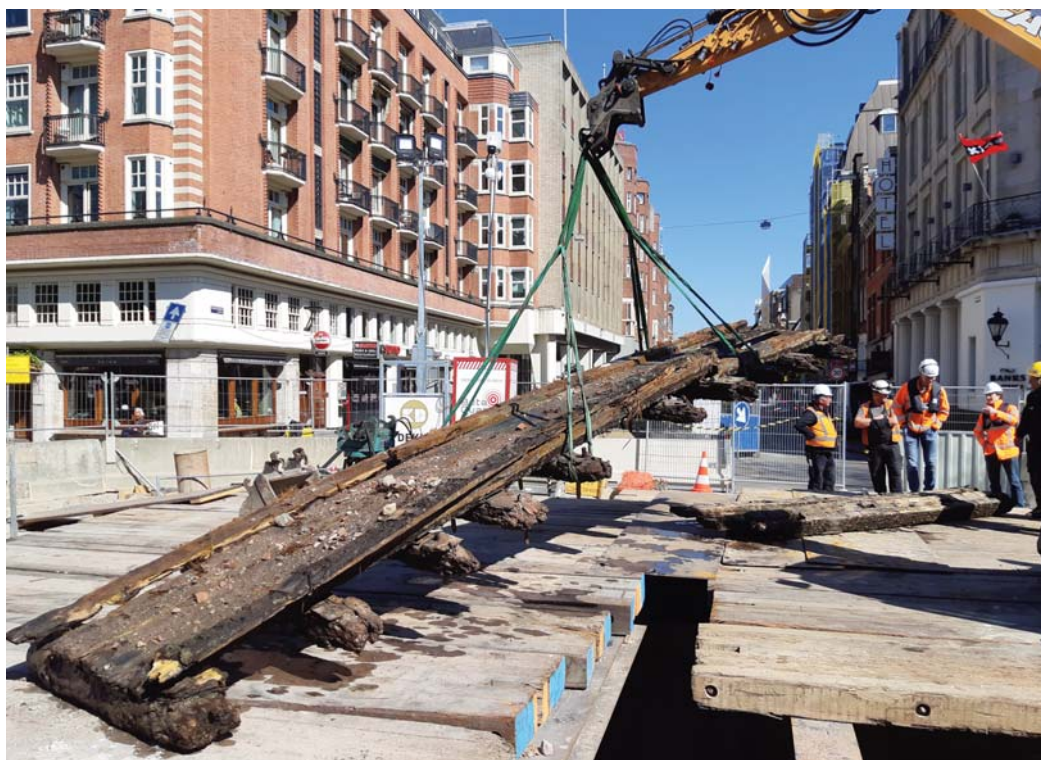
THEMA 4 DE GEOTECHNISCHE DRAAGKRACHT

PBK heeft, in samenwerking met Deltares, onderzoek verricht naar de werkelijke paalklassefactoren voor de puntweerstand (α_p) en schachtweerstand (α_s) voor bestaande houten palen die onder invloed zijn van biologische degradatie en gefundeerd in een grondopbouw (eerste zandlaag) specifiek voor



Figuur 4 –
Weergave relatie onderzoekthema's.
Bron - Deltares en Gemeente Amsterdam.

Foto 1 –
Horizontaal funderingshout van brug 30 uit 1727.
Bron - Gemeente Amsterdam.



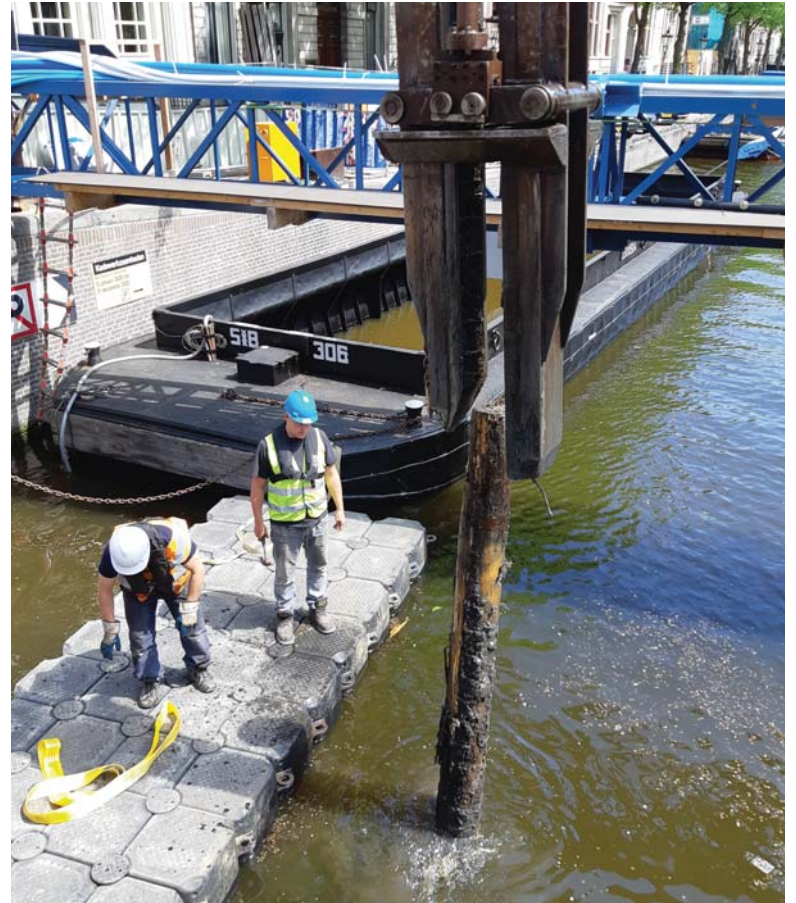


Foto 2 en 3 – Uitvoering van de klem-methode bij brug 30 en 41 in de Vijzelstraat. Bron - Gemeente Amsterdam.

de Amsterdamse binnenstad. Hiervoor zijn twee proeftuinen ontwikkeld waar (belasting)proeven zijn uitgevoerd op zowel bestaande houten palen als nieuwe houten palen. De resultaten van dit onderzoek zullen mogelijk in een volgende editie van dit vakblad verder toegelicht worden.

Het bestaande 'Goud' van Amsterdam

Om inzicht te krijgen in de werkelijke paal-, materiaal- en grondeigenschappen is voor het onderzoeksprogramma een grote hoeveelheid onderzoeksmateriaal verzameld. Er zijn bestaande houten palen uit de grond getrokken en nieuwe houten palen ingekocht die representatief zijn voor de Amsterdamse bruggen en kademuuren. Daarnaast zijn bestaande kessen en horizontaal funderingshout, soms in segmenten van wel tien meter, van de houten palen gedemonteerd, zie foto 1. Deze zijn opgeslagen en zullen mogelijk in de toekomst nader onderzocht worden.

De afgelopen twee jaar zijn 177 bestaande houten palen uit de grond getrokken bij verschillende brug- en kademuurvervangingen in Amsterdam. Voor het trekken van de palen zijn voornamelijk de volgende twee methoden gebruikt:

1. De verbuisde-methode en
2. De klem-methode.

1. DE VERBUISDE-METHODE

Amsterdam heeft in de jaren 90 voor de Amster-

damse binnenstad het verbuisd trekken van bestaande palen ontwikkeld [4] om daarmee de negatieve invloed op de grondwaterhuishouding en de draagkracht van aangrenzende paalfunderingen te beperken. Een stalen buispaal met specifieke afmetingen wordt met een hoogfrequent trilblok over de houten paal getrild tot de eerste zandlaag. Door de trilling van de stalen buispaal wordt de kleef rondom de houten paal opgeheven zodat de houten paal naderhand in een éénparige beweging, zonder trillen, getrokken kan worden. Het ontstane gat wordt gevuld met een cement-bentoniet mengsel tot circa 1 meter onder de waterbodem. Tot slot wordt de stalen buispaal vervolgens trillend weer verwijderd. Deze methode is toegepast bij het trekken van de palen van de kademuur aan de Oudezijds Achterburgwal en van de basculekelder van brug 149.

2. DE KLEM-METHODE

Bij de klem-methode wordt de paalkop over een lengte van minimaal 1,5 meter vastgeklemd met een bek van halfronde schaaldelen en al trillend uit de grond getrokken zonder dat daarbij de bovenste grondlagen door trilling worden gedicht, zie foto's 2 en 3. Direct na het verwijderen van de paal wordt een spuitlans in het achtergebleven gat ingebracht tot de eerste zandlaag en wordt het gat gevuld met een cement-bentoniet mengsel tot circa 1 meter onder de waterbodem. Deze methode is toegepast bij het trekken van de palen van brug



Foto 4 – Variatie in getrokken palen. Bron - Gemeente Amsterdam.



Foto 5 – De paalpruik.
Bron - Gemeente Amsterdam.

30 en 41 en van de kademuren aan de Singelgracht, Duivendrechtsevaart en Buiksloterham.

De ene methode is succesvoller gebleken dan de ander. De verbuisde-methode werkt niet optimaal bij palen die geschoord en/of gekromd in de grond staan. Gekromde palen zijn vooral een gevolg van vervormde (oude) kademuren die in horizontale richting zijn verplaatst. De palen worden dan door de rechte stalen buis schuin over de lengte doorsneden. De klem-methode is daarentegen zeer effectief gebleken. 152 bestaande palen van verschillende leeftijd, afmeting, houtsoort en vorm zijn volledig uit de grond gekomen, zie foto's 4 en 5. Het 'Goud' van Amsterdam is na getrokken te zijn in ruimschuiten afgevoerd naar de tijdelijke

opslaglocatie van ICL in het Westelijk Havengebied. Hier zijn aan de palen metingen verricht, houtboormonsters van paalkop en paalvoet genomen, verzaagd tot drie gelijke delen, gelabeld, gebundeld en in omgevingswater onder water opgeslagen in waterdichte containers voordat ze afgevoerd worden naar de TU Delft voor het laboratoriumonderzoek.

Naast het bestaande 'Goud' zijn er ook 60 nieuwe grenen en vuren houten palen ingekocht voor de onderzoeksthema's 3 en 4. 27 van deze palen zijn gebruikt voor het uitvoeren van (belasting)proeven in het kader van het onderzoek naar de geotechnische draagkracht (onderzoekthema 4). De overige 33 palen liggen nog opgeslagen bij een houtleverancier in Hierden. Deze zullen afgevoerd worden naar de TU Delft voor het laboratoriumonderzoek ten behoeve van het onderzoek naar de (resterende) constructieve draagkracht (onderzoekthema 3).

Het onderzoek 'hout' niet op

Het Amsterdamse houten palenonderzoek heeft inmiddels mooie resultaten opgeleverd. De 'Palenproever' wordt voornamelijk ingezet tijdens het funderingsonderzoek naar de kademuren in Amsterdam. Daarnaast gebruiken marktpartijen de softwaretool van het semi-probabilistische

toetsmodel houten palen bij de toetsing van Amsterdamse bruggen. Bij het toetsmodel heeft Amsterdam gekozen voor de benadering van conservatief naar realistisch, waarbij aannames met voortschrijdend inzicht vanuit lopende onderzoekthema's verder aangescherpt zullen worden. Met het toetsmodel wordt realistischer en 'minder' conservatief getoetst dan met de 'oude' Amsterdamse beoordelingsmethode. Echter heeft het toetsmodel nog een mate van conservatisme. Tussentijdse analyses van de getrokken palen en het onderzoek naar de (resterende) constructieve draagkracht en geotechnische draagkracht bieden inzichten die hoopvol zijn voor verdere aanscherping van het toetsmodel in de toekomst voor zowel bruggen als kademuren. Wordt vervolgd!

Referenties

- [1] NEN 8707:2018, Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeuren – Geotechnische constructies
- [2] CROW Infradagen 2020; Paper Amsterdams palenonderzoek bruggen en kademuren
- [3] De houten paalfundering doorgezaagd; opgesteld door Frans Sas; versie 2006/2007
- [4] Het trekken van palen bij grondsaneringen in de binnenstad van Amsterdam, opgesteld door G.A. Dorrestijn, d.d. 22-11-1996. ●

U wilt toch geen nummer missen van Geotechniek?



Maak dan uw bijdrage in de verzendkosten € 27,50 over naar NL95 ABNA 0426 4761 31 (BIC: ABNANL2A) t.n.v. Uitgeverij Educom, Rotterdam, Nederland. O.v.v. 'Ontvangst Geotechniek 2023' met vermelding van uw naam en adresgegevens.

