



René Terpstra
Ingenieur/Specialist
Civiele Constructies
Ingenieursbureau Amsterdam



Dr. ir. Timo Schweckendiek
Senior Onderzoeker / Adviseur Geotechnische
Betrouwbaarheid en Risicos, Deltares

2

SEMI-PROBABILISTISCH TOETSMODEL HOUTEN PALEN AMSTERDAM

Het semi-probabilistisch Toetsmodel houten palen is de eerste versie van een nieuwe meer realistische beoordelingsmethode voor de toetsing van de draagkracht van houten funderingspalen onder Amsterdamse bruggen. De ontwikkelde methode en bijbehorende softwaretool is een van de eerste resultaten van het onderzoeksprogramma dat in opdracht van het Programma Bruggen en Kademuuren (PBK) en in samenwerking met kennisinstellingen als Deltares en de Technische Universiteit Delft is opgezet. Het Toetsmodel kent, ten opzichte van de huidige Amsterdamse beoordelingsmethode (zie [1]), een aantal kwalitatieve en kwantitatieve verbeteringen. Het Toetsmodel biedt verder een raamwerk voor het opnemen van inzichten uit lopend en toekomstig onderzoek, zoals bijvoorbeeld lange-termijn houtsterkte of paal-grondinteractie

van bacterieel aangetaste palen. Door de modulaire opbouw kunnen componenten van het Toetsmodel aangepast of vervangen worden, of eraan toegevoegd. In dit tweede artikel van het feuilleton gaan we nader in op de globale werking van en verbeteringen in dit innovatieve Toetsmodel en het onderliggende rekenhart (de methode).

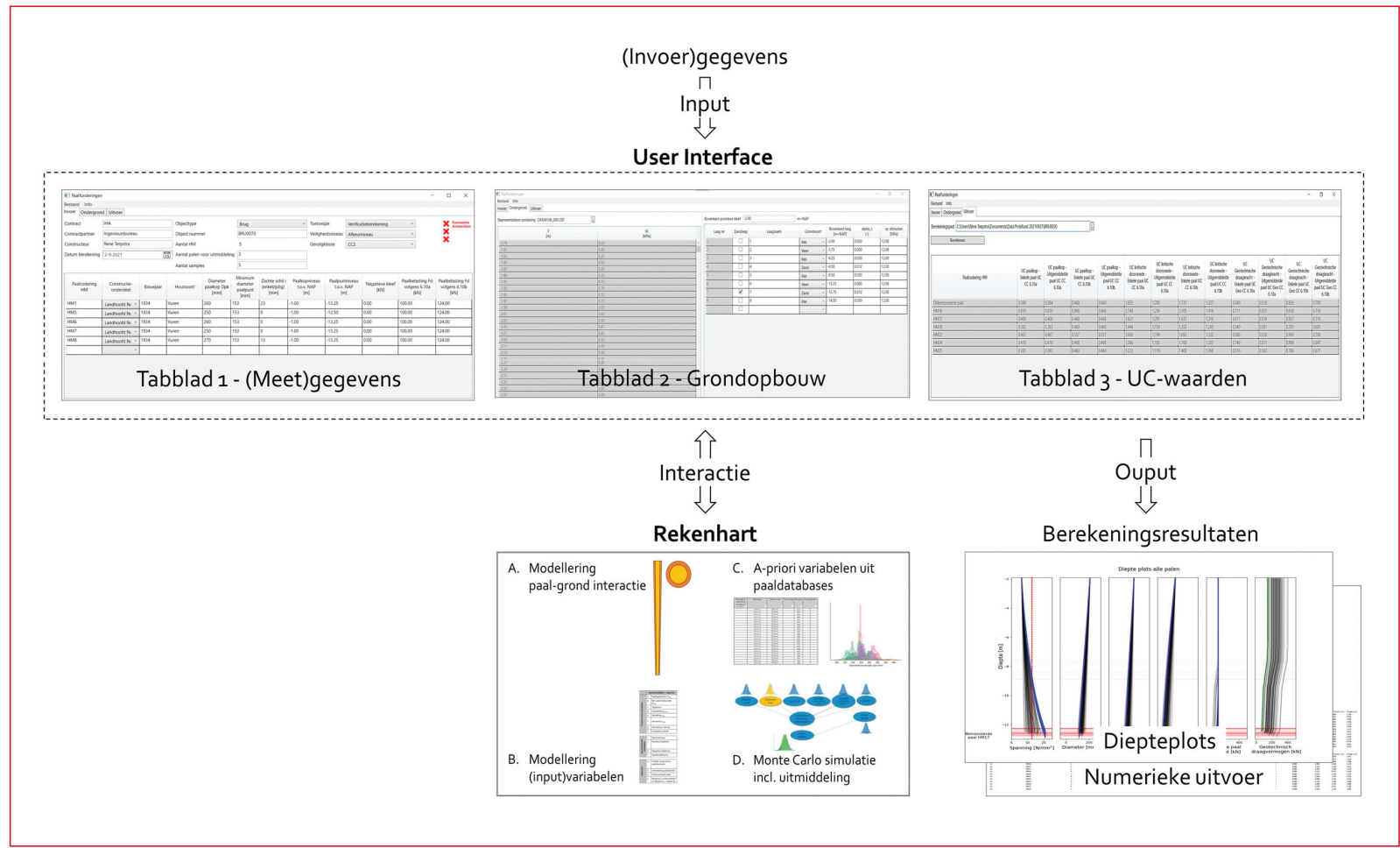
Waarom is ook weer een nieuwe beoordelingsmethode nodig?

Amsterdam kent 270 bruggen en 125 kilometer kademuur op houten palen. Veel van de palen onder deze constructies zijn oud en bacterieel aangetast. Vanwege het ontbreken van heldere regelgeving weten we niet of deze oude aangetaste palen nog sterk genoeg zijn. Reden voor Amsterdam om in 2018 een eigen beoordelings-

methode te ontwikkelen [1]. Echter is deze Amsterdamse beoordelingsmethode zeer conservatief, gebaseerd op veel veilige aannames. Gevolg is dat bruggen en kademuuren mogelijk onterecht rekenkundig afgekeurd en vervangen worden. Het nieuwe Toetsmodel is een eerste verantwoorde stap in het verkleinen van het conservatisme. Daardoor kunnen eventuele beheersmaatregelen doelmatiger geprioriteerd worden. Het Toetsmodel is de kapstok voor alle parameters die volgen uit de overige onderzoekthema's.

Wat is het Toetsmodel?

Het Toetsmodel is een rekenmodel met een standalone softwaretool dat Deltares in opdracht en in samenwerking met PBK heeft ontwikkeld. Het Toetsmodel kan op basis van een beperkt



Figuur 1 – Schematische weergave werking Toetsmodel. 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 en toegepast 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 de editie van september 2022 van Geotechniek is in het eerste artikel van het feuilleton 'Het Amsterdamse Houten Palenonderzoek' de aanleiding van het onderzoek en de huidige beoordelingsmethode toegelicht. In deze editie wordt de eerste versie van de 'nieuwe' beoordelingsmethode gepresenteerd; het semi-probabilistische Toetsmodel houten palen.

aantal paalkopmetingen (paalkopdiameter en de dikte van de aangetaste schil) de draagkracht van de palen onder een specifieke Amsterdamse brug berekenen en deze toetsen aan de optredende belasting. De paalfundering voldoet rekenkundig als de Unity Check's (UC-waarden) van alle palen kleiner is dan 1,0. In figuur 1 is de werking van het Toetsmodel schematisch weergegeven.

De User Interface

In de User Interface van de software tool kan de gebruiker (meet)gegevens van een specifieke Amsterdamse brug invoeren en de resultaten van de door het rekenhart uitgevoerde berekeningen: de UC-waarden presenteren. De User Interface bestaat uit de volgende drie tabbladen:

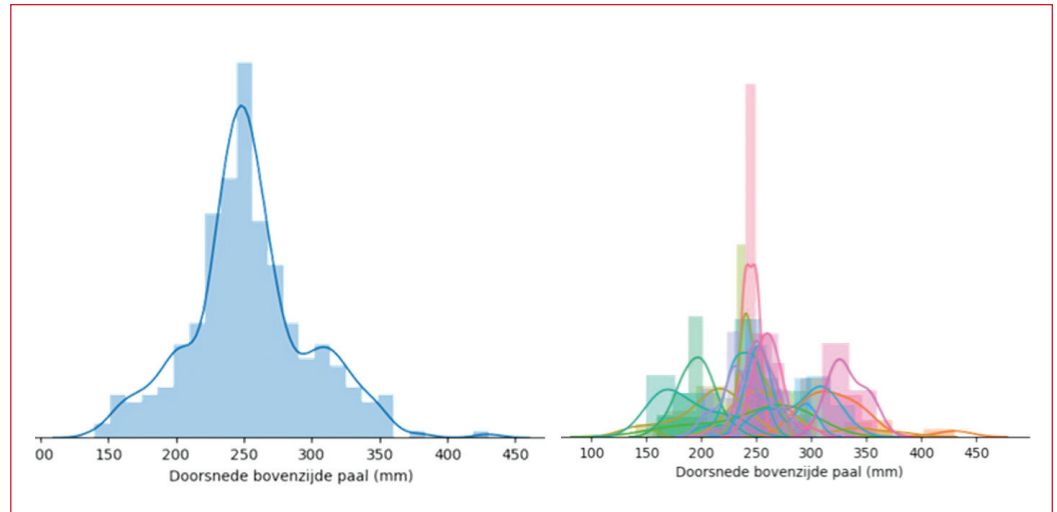
Tabblad 1 - Het eerste invoertabblad biedt de mogelijkheid (meet)gegevens van een specifieke Amsterdamse brug in te voeren die volgen uit het archiefonderzoek, de duikinspectie, het materiaalonderzoek, de constructieberekening en het bodemonderzoek.

Tabblad 2 - Met het tweede invoertabblad kan een representatieve sondering ter plaatse van de specifieke Amsterdamse brug als GEF- of CSV-bestand ingelezen worden en kan de bodemopbouw met bijbehorende grondparameters ingevoerd worden. Op basis van alle invoergegevens wordt in tabblad 3 het achterliggende rekenhart (met Monte Carlo sampling) gestart. Het aantal in te voeren samples bepaalt mede de betrouwbaarheid van de resultaten. 100 samples geeft een eerste indicatie van de UC-waarden; 10000 samples geven een robuust resultaat, echter met de nodige rekentijd.

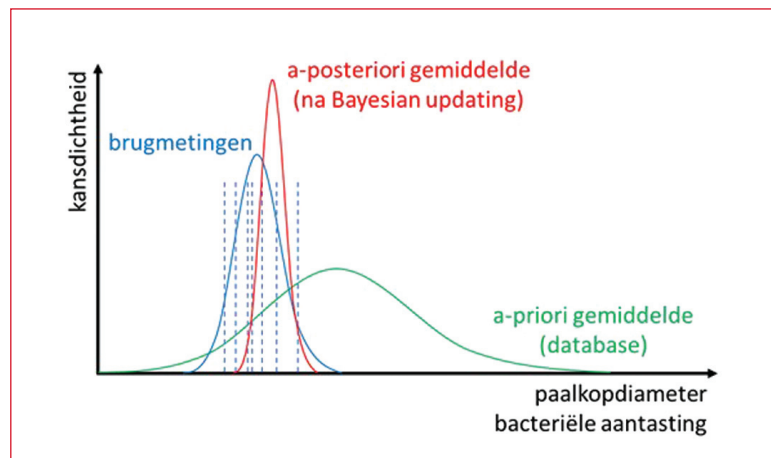
Tabblad 3 - Met het uitvoertabblad wordt het resultaat van de toetsing gepresenteerd. De paalfundering voldoet als de UC-waarden van alle bemonsterde 'uitgemiddelde' palen en de onbemonsterde 'uitgemiddelde' paal ter plaatse van de paalkop, de kritische doorsnede en de grond kleiner is dan 1,0. Ter ondersteuning zijn de berekeningsresultaten als numerieke weergave op te nemen in de berekeningsrapportage van de gebruiker.

Het rekenhart

De methode die het rekenhart van het Toetsmodel vormt kent op hoofdlijnen drie stappen of elemen-



Figuur 2 - Histogrammen kopdiameters in database Amsterdam. Links: gehele database. Rechts: per brug. Bron: Deltares.



Figuur 3 - Principe schatting bruggemiddelde parameters als combinatie van database Amsterdamse palen en lokale metingen met behulp van Bayesian updating. Bron: Deltares.

ten in de analyse: (1) het bepalen van brug-specifieke schattingen (inclusief onzekerheid) van paalkopdiameters en bacteriële aantasting met een combinatie van Amsterdam-brede data en brug-specifieke metingen; (2) een Monte-Carlo analyse van de in de individuele palen optredende krachten en de geotechnische draagkracht; en (3) het bepalen van de UC-waarden voor zowel bemonsterde als onbemonsterde palen van de beschouwde constructie met en zonder uitmiddeling van paalkrachten door herverdelingscapaciteit. Hieronder worden deze stappen en de onderliggende componenten nader beschreven; voor specifieke technische details verwijzen we naar de achtergrondrapportage [2].

BAYESIAN UPDATING

Niet alle palen onder een brug kunnen worden bemonsterd vanwege toegankelijkheid maar ook vanwege beperking in tijd en kosten. Desalniettemin moet ook voor onbemonsterde palen een uitspraak worden gedaan voor de beoordeling van de constructieve veiligheid van de gehele constructie. Voor schattingen van de paalkopdiameters en bacteriële aantasting (c.q. dikte zachte schil) van onbemonsterde palen, inclusief onzekerheid en variabiliteit, wordt gebruik gemaakt van de Amsterdamse database. Hierin is data opgenomen van alle tot op heden bemonsterde palen. Deze wordt gecombineerd met de verzamelde data zoals paalkopmetingen aan de specifieke te toetsen brug.

Het histogram in figuur 2 links laat zien dat de paalkopdiameters in Amsterdam variëren tussen grofweg 150 en 350 mm. Tegelijkertijd wordt in de rechter histogrammen met inkleuring per brug duidelijk, dat de variatie in paaldiameter binnen een brugpopulatie veel kleiner is dan in de hele populatie in Amsterdam. Dat is plausibel omdat grotere, of zwaarder belaste bruggen met grotere paaldiameters zijn gebouwd dan kleine. Bij bouw van de bruggen is immers een minimale diameter (meestal bij het paalpunt) in het bestek voorgeschreven; de variatie in diameters aan de kop is dan het resultaat van de natuurlijke variatie in de beschikbare bomen die als palen zijn gebruikt.

In het Toetsmodel maken we van deze kennis en data gebruik door middel van Bayesian updating, vergelijkbaar met de aanpak voor het schatten van grondparameters als combinatie van regionale proevenverzamelingen en lokale data zoals beschreven in [3] en [4]. In dit geval is de aanpak als volgt. Er wordt uitgegaan van een bekende (en vergelijkbare) variatie tussen palen binnen een brugpopulatie, gebaseerd op de database, en een variabel gemiddelde waarde tussen bruggen. De schatting van de gemiddelde waarde van de te toetsen brug voor zowel paalkopdiameter als bacteriële aantasting is dan een combinatie van de a-priori schatting vanuit de database, en de lokale meetgegevens. De uitkomsten van de procedure zijn de kansverdeling van de onzekerheid in het bruggemiddelde (zie figuur 3), en de variabiliteit

binnen de brug, die vervolgens in de Monte Carlo analyse worden gebruikt zoals hieronder beschreven.

MONTE CARLO ANALYSE

Naast de hierboven besproken kansverdelingen voor paalkopdiameter en bacteriële aantasting wordt ook de onzekerheid in andere variabelen probabilistisch met kansverdelingen gemodelleerd, zoals bijvoorbeeld de tapsheid of de inbrengdiepte (c.q. lengte) van de palen (voor details zie [2]). Deze kansverdelingen worden vervolgens in een Monte Carlo analyse gebruikt om zowel bemonsterde als onbemonsterde palen te simuleren. Sommige variabelen bij bemonsterde palen zijn bekend en daarmee deterministisch. Elke gesimuleerde paal wordt vervolgens doorgerekend, waarbij voor de constructieve toets op houtsterkte (STR) de normaalspanning over de lengte van de paal bepaald wordt. Voor de geotechnische draagkracht (GEO) wordt analoog per gesimuleerde paal de som van puntdraagkracht en schachtdraagkracht bepaald. De realisaties (uitkomsten van de simulatie) van berekende spanning (STR) en draagkracht (GEO) worden vervolgens gebruikt om UC-waarden met en zonder uitmiding te bepalen.

UITMIDDELING

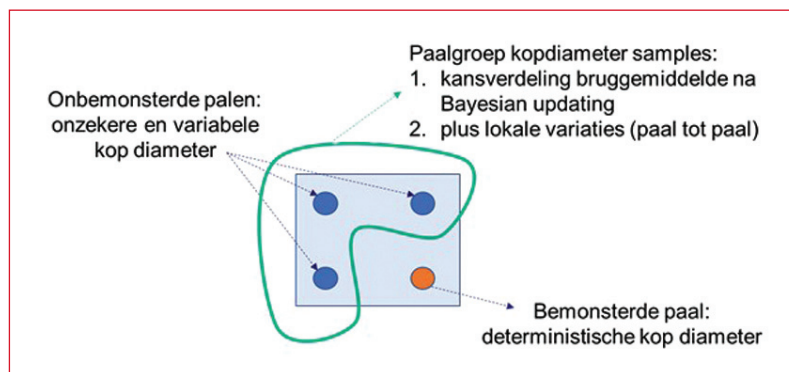
Met de uitkomsten van de Monte Carlo analyse per paal zouden de palen al individueel kunnen worden getoetst. Dit leidt tot een conservatieve beoordeling van de constructie als geheel. In de praktijk zal er echter herverdeling van krachten

plaatsvinden door de bovenliggende constructieonderdelen (brugdek, metselwerk en kespen) op het moment dat een enkele paal wordt overbelast. Om dit in rekening te brengen bij de beoordeling van de gehele constructie kan in het Toetsmodel het aantal palen worden aangegeven waarover (minimaal) uitgemiddeld mag worden, gebaseerd op bepaling door de constructeur. De Monte Carlo simulatie combineert dan bemonsterde en onbemonsterde palen binnen de groep van palen waarover krachten worden uitgemiddeld (zie schematische weergave in figuur 4 en voor details [2]). Zo kunnen de normaalspanning op de kritische doorsnede (STR) en de geotechnische draagkracht (GEO) inclusief herverdeling van krachten worden bepaald voor de UC-waarden inclusief uitmiding.

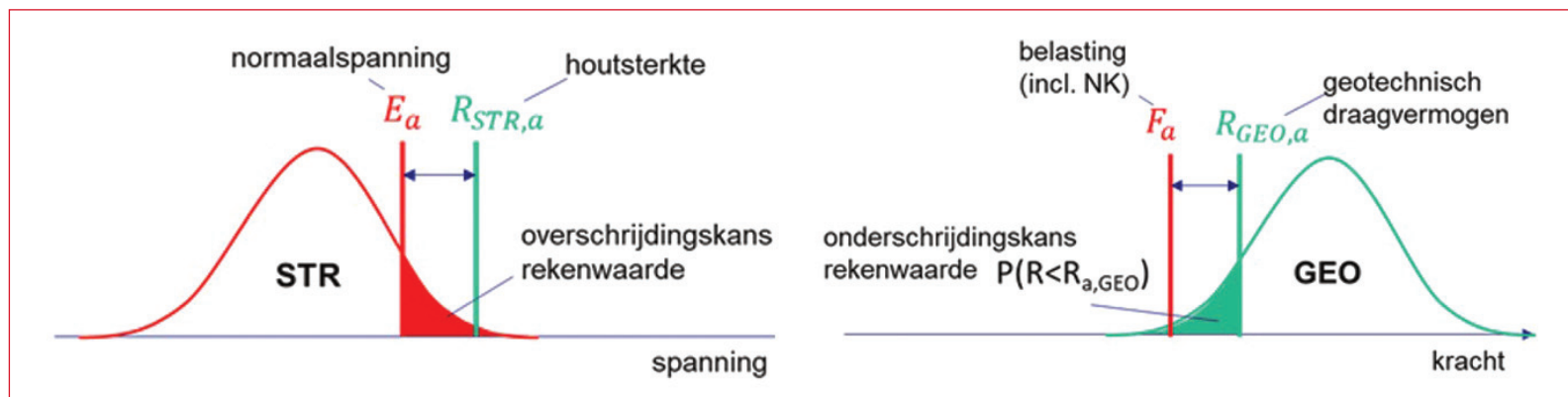
UNITY CHECKS (UC-WAARDEN)

Voor de verificatie van de constructieve draagkracht wordt de rekenwaarde van de (maximale) normaalspanning in de paal ($\sigma_{n,a}$) vergeleken met de rekenwaarde van de houtsterkte ($f_{c,0,a}$), waarbij subscript a staat voor assessment in plaats van d voor design. De Unity Check is dan de verhouding van belastingeffect en sterkte: $UC_{STR} = \frac{\sigma_{n,a}}{f_{c,0,a}}$ waarbij de rekenwaarde van de normaalspanning zowel met als zonder uitmiding kan worden bepaald (zie hierboven).

Terwijl voor de rekenwaarde van de houtsterkte de waarden uit NEN 8707 worden gebruikt, afhankelijk van de belastingcombinatie 6.10a of 6.10b, wordt de rekenwaarde van de normaalspanning bepaald op basis van de resultaten van de hierboven beschreven probabilistische Monte Carlo analyse. De rekenwaarde wordt dan bepaald bij een zekere overschrijdingskans van de normaal-



Figuur 4 – Principe uitmiding paalkopdiameters voor herverdeling van krachten geïllustreerd aan een voorbeeld met 4 palen, waarvan 1 bemonsterd. Hetzelfde principe wordt toegepast voor bacteriële aantasting. Bron: Deltares.



Figuur 5 – Bepaling rekenwaarden belastingeffect voor de toets op constructieve draagkracht (STR, links) en de geotechnische draagkracht (GEO, rechts) bij bepaalde, aan de norm gerelateerde over-/overschrijdingskansen. Bron: Deltares.

spanning (belastingeffect). Dit is afhankelijk van de doelbetrouwbaarheid, en vergelijkbaar met de procedure voor het bepalen van rekenwaarden (of partiele factoren) op maat in [4], of de 'design value method' zoals beschreven in EN 1990 Annex C. Figuur 5 geeft schematisch de combinatie van probabilistisch bepaalde en op de norm gebaseerde rekenwaarden weer voor GEO en STR. Tabel 1 toont de overschrijdingskansen voor verschillende gevolklassen voor belastingeffect en sterkte, conform NEN 8700 en ISO 2394:2015.

Gevolgklasse	β_T	α_E	α_R	$P(E > E_a)^1$	$P(R < R_a)^2$
CC1	1.8			0.104	0.075
CC2	2.5	-0.7	0.8	0.040	0.023
CC3	3.3			0.010	0.004

Tabel 1 – Onder-/overschrijdingskansen ter bepaling van de rekenwaarden van belastingeffect en geotechnische draagkracht als combinatie van doelbetrouwbaarheidsindices volgens NEN 8700 en invloed coëfficiënten volgens ISO 2394:2015.

Een gevoeligheidsanalyse in [2] suggereert overigens dat de default waarden van $\alpha_E = -0.7$ uit ISO 2395:2015 (oorspronkelijk bedoeld voor belastingen) voor de beoogde toepassing mogelijk (zeer) conservatief is. Door middel van kalibratie met probabilistische analyses zou deze verlaagd kunnen worden.

Wat zijn de kwalitatieve verbeteringen?

Het Toetsmodel kent ten opzichte van de huidige Amsterdamse beoordelingsmethode [1] in elk geval de volgende kwalitatieve verbeteringen:

- Het Toetsmodel is voorzien van een paal-grond interactie modellering die rekening houdt met krachtafdracht via positieve kleef naar de omliggende grondlagen. De huidige versie betreft een bovengrensbenadering voor de axiale krachten in de paal en is voor verbetering vatbaar. In de huidige systematiek was de axiale paalkracht overigens constant over de hele paallengte.
- Het Toetsmodel berekent en toetst naast de bemonsterde palen ook de representatieve onbemonsterde paal die ergens onder de brug kan staan. In de huidige systematiek werd alleen met de bemonsterde palen gerekend.
- Het Toetsmodel toets niet enkel individuele palen maar biedt ook de mogelijkheid over een x-aantal palen uit te middelen vanwege herverdeling van krachten door de bovenliggende constructieonderdelen (brugdek, metselwerk, paalkespen). Het aantal uit te middelen palen is afhankelijk van onder andere de opbouw van de brug, de geometrie van de constructieonderdelen en de toestand waarin de brug zich bevindt. Beoordeling hiervan vindt plaats door de constructeur en is daarmee mogelijk subjectief.
- De probabilistische bepaling van rekenwaarden voor het belastingeffect (axiale houtspanning) en de weerstand (geotechnisch draagvermogen) doet meer recht aan de onzekerheden dan de generieke partiële factoren in de NEN 8707. De overschrijdingskans is hierbij gerelateerd aan het vereiste betrouwbaarheidsniveau.
- Er kan voor twee veiligheidsniveaus getoetst worden, te weten: afkeurniveau en gebruiksniveau voor de gevolklassen CC1b en CC2. Noot: Omdat de vereiste betrouwbaarheid van het gebruiksniveau niet is vastgelegd in de norm heeft PBK de betrouwbaarheidsindex β voor

gebruiksniveau in het Toetsmodel vooralsnog gedefinieerd volgens de richtlijn van Rijkswaterstaat [5].

Wat zijn de kwantitatieve verbeteringen?

PBK heeft bij de start van het onderzoekstraject gekozen voor de benadering van conservatief naar realistisch waarbij aannames met voortschrijdend inzicht vanuit lopende onderzoekthema's aangescherpt zullen worden. Uit de eerste toetsingen is het volgende op te maken:

- Ondanks dat het Toetsmodel realistischer en minder conservatief is dan de huidige Amsterdamse beoordelingsmethode heeft het nog een mate van conservatisme. Dit komt met name door aannames betreffende parameters die onderwerp zijn van het lopende onderzoek (bijvoorbeeld draagkracht bacterieel aangetaste zachte schil).
- Uitmiddeling van paalkrachten levert een significante winst op bij 'slechte' individuele palen binnen een steekproef paalkopmetingen.
- De huidige paal-grond interactie modellering is een bovengrensbenadering en daarmee conservatief. De kritische doorsnede (daar waar de houtspanning het hoogst is) ligt veelal rondom de paalpunt, daar waar de effectieve paaldoorsnede het kleinst is. Een en ander betekent dat de rekenwaarde van de houtsterkte ($f_{c,0,a}$) op dit niveau regelmatig (ruim) wordt overschreden ondanks dat we in de praktijk geen schadebeelden zien.
- Op grond van bovenstaande concluderen we dat deze eerste versie van het Toetsmodel momenteel nog niet geschikt is als 'scherpe' beoordeling om houten paalfunderingen definitief af te keuren. Het Toetsmodel kan echter wel voor screening, goedkeuring en prioritering worden ingezet.

Conclusies en kansen vervolgtraject

Resultaten van de verschillende onderzoekthema's bieden inzichten die kansrijk zijn om in het vervolgtraject scherper te toetsen om zo onnodig afkeuren en vervangen van brugfunderingen te voorkomen. Analyses van belastingproeven op bestaande en nieuwe palen tonen namelijk het volgende aan:

- De werkelijke draagkracht van de paal is hoger

dan nu wordt berekend.

- De werkelijke houtspanning ter plaatse van de kritische doorsnede is lager dan nu wordt berekend (dat komt deels doordat negatieve kleef tijdens een proefbelasting niet optreedt).
- Het bezwijken van het hout in de paal lijkt niet op te treden wat blijkt uit het schadevrij trekken van de houten palen na doorlopen van de proefbelasting; de draagkracht van de ondergrond lijkt hieruit maatgevend ten opzichte van de materiaalsterkte van de paal.

Daarnaast laat inspectie en monitoring van Amsterdamse bruggen van verschillende leeftijd zien dat er in de praktijk géén significante verplaatsingen zijn opgetreden die wijzen op het bezwijken van de fundering van de constructie.

Momenteel screent PBK met de huidige versie van het Toetsmodel de houten palen van bruggen op basis van alle beschikbare kennis. De resultaten van deze screening bepaalt onder andere de verdere aanscherping en doorontwikkeling van het Toetsmodel. Wordt vervolgd!

Referenties

- [1] Artikel 1 in het feuilleton - 'Het Amsterdamse Houten Palenonderzoek', opgesteld door René Terpstra van de Gemeente Amsterdam, gepubliceerd in Geotechniek editie september 2022.
- [2] Achtergrondrapport 'Semi-probabilistisch toetsmodel houten palen', opgesteld door Deltares, versie 1.3, d.d. maart 2022, definitief.
- [3] Calle (2008). Representatieve waarden voor grondparameters in de Geotechniek, Geotechniek, d.d. april 2008.
- [4] CUR 2008-2. Van onzekerheid naar betrouwbaarheid.
- [5] Richtlijnen Beoordeling Kunstwerken RBK 1.2, opgesteld door Rijkswaterstaat.
- [6] Toetsingskader Amsterdamse Bruggen - Aanvullingen op en specificaties van de CROW-CUR Aanbeveling 124:2019 voor de Amsterdamse situatie, betreffende de beoordeling van de constructieve veiligheid van bestaande bruggen en viaducten van decentrale overheden; opgesteld door de Gemeente Amsterdam, versie 2, d.d. 19 december 2019. ●