



Jan van Dalen
Daed Ingenieurs



Geert Ravenshorst
TU Delft



Erik Kwast
Kwast Consult



Sandra Lobbe
Sandra Lobbe
Inspectie en Advies



Arend van Woerden
Sweco

INCASSERINGSVERMOGEN VERBINDING HOUTEN PAAL EN OPLANGER BIJ HORIZONTALE GRONDBELASTING

Probleemstelling

Grote delen van de gemeente Woerden bestaan uit slappe veen- en kleibodems. Voor de kleine dorpskernen met homogene veenlagen en woningen die veelal gefundeerd zijn op houten palen met betonoplinger speelt in het bijzonder de gecombineerde problematiek van zettende infrastructuur en funderingsproblematiek. Zettende infrastructuur leidt voor de gemeente tot hoge beheer- en onderhoudskosten, omdat de openbare ruimte regelmatig moet worden gereconstrueerd en opgehoogd. De funderingsproblematiek leidt tot

hoge kosten voor inwoners, omdat in sommige situaties de houten fundering moet worden vervangen door een betonnen alternatief. Gezien de potentiële omvang van de funderingsproblematiek in de gemeente, heeft de gemeente een aandachtsgebiedenkaart gemaakt.

Voor het ontwikkelen van de aandachtgebiedenkaart heeft de gemeente voornamelijk gekeken naar situaties waar lage grondwaterstanden in potentie tot paalrot kunnen leiden. Zij had echter nog niet onderzocht wat de potentiële invloed

zou kunnen zijn van de horizontale grondbeweging die het ophogen van de openbare ruimte naast woningen met zich meebrengt. Deze grondbeweging zou kunnen leiden tot schade aan houten paalfunderingen met betonoplangers. Omdat de gemeente zeker wilde weten of dit mechanisme geen onbedoelde negatieve effecten kan hebben voor de bestaande paalfunderingen en niet als aandachtsgebied behoeft te worden aangemerkt, is de gemeente Woerden een onderzoek gestart.

Daarnaast wordt in de huidige richtlijn Houten paalfunderingen onder gebouwen het mechanisme van horizontaal belaste palen door grondvervormingen niet benoemd voor de toetsing van bestaande houten paalfunderingen. En is alleen toetsing van de geotechnische draagkracht met belasting vanuit de constructie in combinatie met negatieve kleefbelasting opgenomen. Dit geeft extra aanleiding om de eventuele negatieve effecten te onderzoeken.

Tabel 1 – Grondparameters (karakteristieke waarden) t.b.v. berekening zettingen en horizontale grondvervormingen.

Grondsoort	γ/γ_{sat} [kN/m ³]	C'_p [-]	C'_s [-]	c_v [m ² /s]	E [kPa]
Veen, zwak kleiig (voorbelast)	13/13	7,5	30	1E-7	1.000
Veen (voorbelast)	10,5/10,5	7,5	30	1E-7	750
Zand (los/matig)	18/20	600	-	-	n.v.t.

Toelichting

- γ volumegewicht boven de gws
- γ_{sat} volumegewicht onder de gws
- C'_p primaire samendrukkingsconstante na de grensspanning
- C'_s secundaire samendrukkingsconstante na de grensspanning
- C_p primaire samendrukkingsconstante voor de grensspanning ($C_p = 4 \cdot C'_p$)
- C_s secundaire samendrukkingsconstante voor de grensspanning ($C_s = 4 \cdot C'_s$)
- c_v consolidatiecoëfficiënt
- E elasticiteitsmodulus

Tabel 2 – Grondparameters (karakteristieke waarden) t.b.v. funderingsberekeningen (alleenstaande paal)

Grondsoort	γ/γ_{sat} [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	K_h [kN/m ³]
Ophoogzand	18/20	32,5	0	30.000
Veen, zwak kleiig (voorbelast)	13/13	15	1	1.000
Veen (voorbelast)	10,5/10,5	15	2,5	1.000
Zand (los/matig)	18/20	30	0	30.000

Toelichting

- γ volumegewicht boven de gws
- γ_{sat} volumegewicht onder de gws
- ϕ' effectieve hoek van inwendige wrijving
- c' effectieve cohesie
- K_h horizontale beddingsconstante volgens Begemann-De Leeuw

Case reconstructie Zegveld

In een deel van deze wijk heeft in 2014 reconstructie van de wegen, riolering en openbare inrichting plaats gevonden. Hierbij is onder de wegen en straten een zettingsarme Bims-ophoging toegepast en ter plaatse van het trottoir met K&L-strook een ophoging met Granulight. De particuliere terreinen, waaronder voortuinen, zijn opgehoogd met zand.

Na realisatie van de reconstructie zijn in korte periode onverwacht forse zettingen van de weg, trottoir en particulier terrein opgetreden van circa 0,25 m na circa 3 jaar. Uit analyse is gebleken dat deze zettingen het gevolg zijn geweest van lekkage van de rioleringsputten, waardoor de grondwaterstand (polderpeil) na realisatie gedurende langere periode (circa 1 jaar) is verlaagd. Vraag was of de met de zettingen gepaard gaande horizontale grondvervormingen ook geleid hebben tot schade aan de houten paalfundering van de nabijgelegen bebouwing.

De bodemopbouw bestaat uit een circa 1,0 m dikke wegconstructie, met daaronder een pakket van 5,5 m veenlagen en vervolgens de Pleistocene zandlaag. De gemiddelde freatische grondwaterstand is op circa 0,5 m minus bovenkant verharding

SAMENVATTING

Maaiveldzetting naast op palen gefundeerde panden komt regelmatig voor en deze kan leiden tot horizontale grondbeweging en daarmee gepaard gaande horizontale belasting van de funderingspalen. Aan de hand van een case in de gemeente Woerden, met een fundering op houten palen met betonoplangers,

is onderzocht of deze horizontale grondbeweging kan leiden tot schade aan de verbinding tussen paal en oplanger. Dit blijkt in het geval van houten palen in slappe grond mee te vallen omdat er voldoende herverdelingscapaciteit in de verbinding oplanger-houten paal aanwezig is.

gelegen. De aangehouden grondparameters voor de berekening van de zettingen en horizontale grondvervormingen zijn in Tabel 1 weergegeven. In Tabel 2 worden de grondparameters voor de funderingsberekeningen (damwandberekening, alleenstaande paal) gepresenteerd.

In de eerste fase zijn op basis van veilige rekenmodellen de grondvervormingen bepaald en heeft analyse van de fundering plaatsgevonden. Voor deze analyse is een inschatting van de horizontale grondvervormingen gemaakt met het rekenprogramma D-Settlement. Hierbij is rekening gehouden met een historische ophoging die rond 1982 heeft plaatsgevonden en de recente ophoging en grondwaterstandsverlaging in 2014. Voor een representatief dwarsprofiel is de berekende maximale horizontale grondvervorming ter plaatse van de gevel van de woning gelijk aan 0,05 m. Met de berekende horizontale grondvervorming als functie van de diepte zijn vervolgens de krachten en verplaatsingen van de paalfundering bepaald met het rekenprogramma D-Sheet Piling (module Single Pile). Dit is gedaan voor zowel een rotatievrije als een rotatievaste inklemming van de verbinding oplanger/funderingsbalk.

Op basis van de berekende krachten (momenten en dwarskrachten) is een constructieve toetsing verricht, met aanvankelijk de volgende conclusies:

- De houten palen ter plaatse van de verbinding met betonopzetters voldoen niet in de UGT op basis van gecombineerde buig- en axiale drukspanning.
- Schade aan de betonopplanger bij de verbinding met de funderingsbalk is onwaarschijnlijk, omdat het aannemelijk is dat er voldoende wapening aanwezig is in deze verbinding (alhoewel gegevens van de wapening niet beschikbaar zijn).
- Enige schade aan de funderingsbalk kan niet worden uitgesloten omdat de funderingsbalk in de rotatievaste situatie onvoldoende flanken beugelwapening heeft (ook hier ontbreken eenduidige gegevens van de wapening).

Vervolgonderzoek of werkelijk schade aan de paalfundering is opgetreden was dus noodzakelijk, waarbij de verbinding paalkop met de oplanger het meest kritisch is.

Funderingsinspectie

Op 3 locaties in de betreffende woonwijk is een funderingsonderzoek uitgevoerd. Voor dit onder-

zoek is een visuele inspectie, een lintvoegwaterpassing en een meting ten opzichte van het verticaal over de drie gehele woonblokken uitgevoerd. Bij elk van de drie woonblokken is een funderingsinspectie uitgevoerd, waarbij minimaal 2 palen per inspectieput zijn geïnspecteerd.

Aan de panden is geen funderingstechnische schade waargenomen. De gemeten scheefstanden zijn nihil.

De fundering van de panden is opgebouwd uit een betonnen funderingsbalk, betonnen oplangers met daaronder houten funderingspalen. In het beton zijn geen scheuren en schollen waargenomen en geen zichtbare corrosie van de wapening. De houten funderingspalen sluiten zichtbaar goed aan op de betonnen oplangers (zie ook figuur 1).

De diameter van de betonnen oplangers is 275 tot 280 mm en de lengte is 1,0 tot 1,3 m.

De grondwaterdekking op het funderingshout is ruim voldoende, circa 1 meter, zodat er geen schimmelaantasting kan optreden. De houten paalkoppen hebben een gemiddelde diameter van 181 mm en een gemiddelde indringwaarde van 8 mm. Van de 7 geïnspecteerde houten funderingspalen

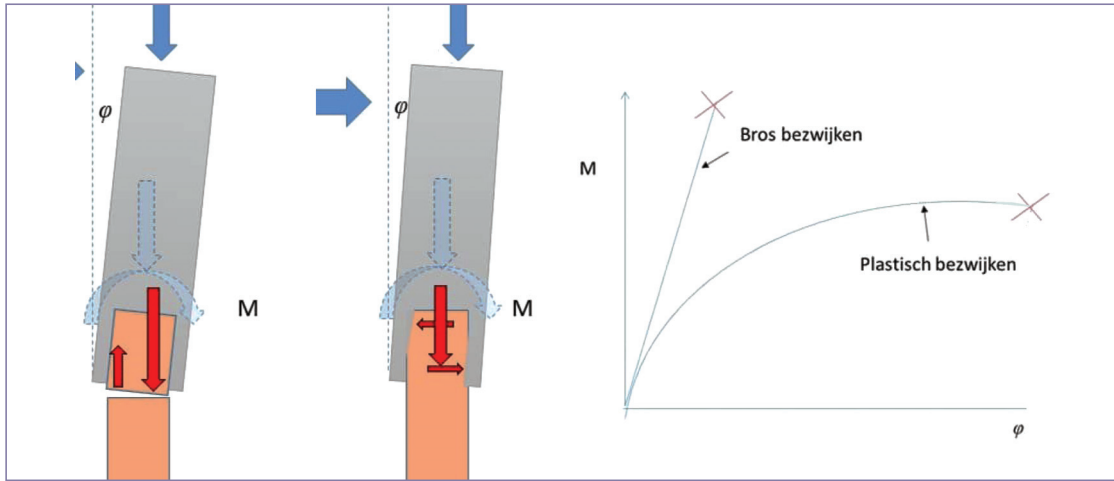
zijn 10 houtmonsters genomen ter bepaling van de houtsoort en eventuele aantastingsmechanismen. De houtsoort van de funderingspalen blijkt vuren te zijn. Ernstige bacteriële aantasting is niet aangetroffen. In 2 houtmonsters is bruinrot aangetroffen, mogelijk al voor de bouw van de panden aanwezig in het funderingshout.

Verbinding paalkop en oplanger

Uit de eerste analyse was geconcludeerd dat de waargenomen zettingen aanleiding hebben gegeven tot een horizontale grondbeweging, die voor een belangrijk deel door de in de grond aanwezige palen zal zijn gevolgd. De interessante vraag is echter of dergelijke horizontale grondbewegingen ook kunnen leiden tot bezwijken van de zwakste doorsnede langs de paal, namelijk de verbinding tussen oplanger en houten paal. De gehanteerde wijze van toetsen van deze verbinding op de combinatie van buigend moment in de paal en axiale paalbelasting impliceert immers dat er sprake zou zijn van een extern opgelegd moment dat de paal moet kunnen weerstaan. Als de paal het optredende buigend moment niet kan weerstaan, zal deze door de omringende grond echter nog steeds in dezelfde



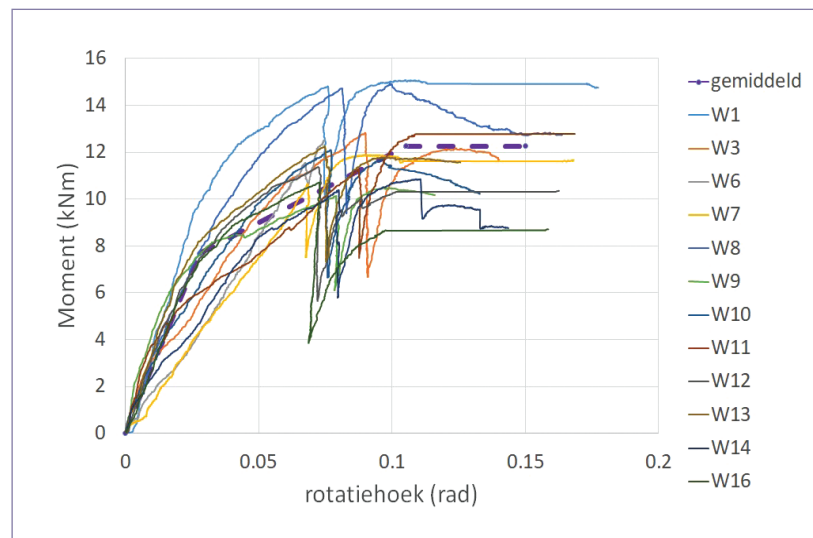
Figuur 1 – Verbinding paal met oplanger.



Figuur 2 – Bros bezwijken van de paal net onder de oplanger ten gevolge van combinatie normaalkracht en moment (links) en plastisch bezwijken van de paal in de oplanger ten gevolge van druk loodrecht op de vezel (midden). Gestippeld lichtblauw het moment en de normaalkracht bet boven de paalkop, in rood de krachten zoals deze op de paalkop worden aangenomen. Rechts de moment-rotatiediagrammen die behoren bij bros en plastisch bezwijken.



Figuur 3 – Rotatie van de verbinding tijdens de proef.



Figuur 4 – Moment-rotatiediagrammen van de verbindingsoeven met in paars de gearceerde lijn die het gemiddeld gedrag aangeeft.

positie worden vastgehouden. Met andere woorden: er is in dit geval sprake van een opgelegde vervorming en niet van een opgelegd buigend moment. De vraag waar het eigenlijk om gaat is of een dergelijke verbinding, nadat er een bepaalde rotatie is opgetreden, nog steeds de verticale belasting uit de bovengelegen constructie met voldoende veiligheid kan overbrengen. Daarbij is het van belang om vast te stellen of het optredende bezwijkgedrag bros of plastisch is. Uit de literatuur is af te leiden dat hout bij belasting onder (buig) trek evenwijdig aan de vezel tot brosse breuk leidt en bij druk loodrecht op de vezel tot plastisch bezwijkgedrag. Hierbij worden de cellen platgedrukt, maar blijven de vezels zelf intact. Dat wijst op een mogelijk plastisch vloeigedrag en niet op brosse breuk. Ervaring met funderingsonderzoek boden daarnaast ook aanwijzingen om te veronderstellen dat horizontale grondbewegingen niet direct tot problemen met oplangers en houten palen leiden.

Rotterdamse ervaring

Houten palen met betonoplagers zijn in de stad Rotterdam vanaf eind jaren '20 tot kort na de 2e wereldoorlog veelvuldig toegepast. Uit oude krantenartikelen blijkt dat er in 1935 al circa 600 panden bestonden die op deze wijze gefundeerd

zijn, vooral in de wijken Blijdorp en Bospolder Tussendijken. Bekend is dat ook in deze wijken sprake is van een zettingsgevoelige grondslag. Er wordt periodiek onderhoud uitgevoerd aan de straten, waarbij het straatpeil telkens wordt opgehoogd tot het streefpeil. Hierbij is in het verleden (zeker tot in de jaren '90) in alle gevallen gebruik gemaakt van zand als ophoogmateriaal. De precieze diktes en tijdstippen van die ophogingen zijn niet bekend, maar vast staat dat de totale zetting na aanleg huizen tenminste in de orde is van één meter of meer. Een groot deel van de voorgevels van de huizen in deze wijken grenst direct aan de straat, zodat daar telkens 'van gevel tot gevel' is opgehoogd. Daarmee staat ook vast dat er horizontale grondbewegingen zijn geweest ter plaatse van de funderingspalen onder de gevels. Funderingsproblemen komen in deze wijken regelmatig voor, maar er zijn geen gevallen bekend waar bezwijken van de verbinding tussen oplanger en houten paal hiervan de oorzaak is.

Laboratoriumonderzoek TU-Delft

Het probleem bij de toetsing van de verbinding tussen de paalkop en de betonoplager is dat Eurocode 5 voor het verifiëren van houtconstructies, hier niet voldoende handvaten voor geeft.

Het principe van de verbinding is dat de kop van de paal over een lengte van 280 mm is ingeklemd in een betonnen oplager, zie figuur 2. Wanneer de toetsing wordt gedaan op basis van een elastische berekening met de combinatie van buigend moment en normaalkracht evenwijdig aan de vezel (in axiale richting van de paal, zie figuur 2 links), volgens de interactieformule gegeven in de Eurocode 5, zal de verbinding bros bezwijken. Echter, de inklemming in de paal wordt tot stand gebracht door krachten die de paal door druk loodrecht op de vezel uitoefent op de betonoplager. Druk loodrecht op vezel is een plastisch bezwijkmechanisme. Indien dit bezwijken eerder optreedt kan door plastisch gedrag herverdeling optreden die in de berekening kan worden meegenomen. Daarvoor is het nodig om het moment-rotatie diagram van de verbinding te bepalen.

Om het gedrag van de verbinding te onderzoeken is een testprogramma opgesteld om het bezwijkgedrag van de verbinding en de mogelijke ductiliteit te bepalen. Daartoe zijn 12 koppen van vuren houten funderingspalen in het Stevin lab van de TU Delft beproefd. De toegepaste betonnen oplagers hadden volgens bouwtekeningen een buitendiameter van 280 mm, en een binnendiameter van 180 mm. De lengte van de inkassing was

280 mm. Voor de representatie van de betonplanger is een stalen buis met een ingelaste staalplaat gebruikt, met dezelfde buigstijfheid als de betonplanger. De houten paalkoppen hadden een vochtgehalte hoger dan 60%, wat overeenkomt met dat van houten palen in de grond. De testen werden uitgevoerd als een vervormingsgestuurde proef zodat het ductiele gedrag geobserveerd kan worden. Tijdens de proef werd een maximale normaalkracht van 170 kN aangebracht, hoger dan normaal gesproken aanwezig is op een houten funderingspaal. De laterale kracht op de verbinding werd gemeten en daaruit kon het optredende moment worden berekend. De rotatie van de verbinding werd gemeten. Zie figuur 3 voor de proef in uitvoering.

De uitkomst van de proeven was dat het ductiele bezwijkmechanisme optreedt. De resultaten kunnen weergegeven worden in een moment-rotatiediagram, zie figuur 4. De teruggang in het moment bij een rotatie van circa 0,08 rad is het gevolg van relaxatie. Op dat moment werd de vervorming een uur lang constant gehouden en nam de gemeten kracht af.

Conclusie van het onderzoek was dat het in eerdere berekeningen aangenomen brosse bezwijkgedrag niet optreedt, maar dat er sprake is van ductiel bezwijkgedrag van de verbinding. Bij de maximale rotatiehoek die tijdens de proeven is opgetreden (0,15 rad) was er nog geen sprake van dat de op de paal uitgeoefende normaalkracht niet meer zou kunnen worden opgenomen. Met het geschematiseerde moment-rotatie diagram kan het effect van de verbinding op de krachtsverdeling in de paal verder worden onderzocht in geotechnische berekeningen.

Nieuwe constructieve toets van de verbinding

De werkelijk opgetreden rotatiehoek tussen paal en oplanger kan worden afgeleid uit de vervormingslijn voor de paal. Deze is vastgesteld met behulp van D-Sheet Piling, zie figuur 5. Hierbij is het verband tussen rotatiehoek en buigend moment ter plaatse van de verbinding tussen oplanger en paal gekozen conform de in figuur 4 aangegeven gemiddelde lijn. De stijfheid van de verbinding is in de berekening uitgesmeerd over een paaldeel met een hoogte van 0,3 m. Omdat D-Sheet Piling uitgaat van lineair elastisch materiaal voor de paal, terwijl de stijfheid volgens figuur 4 multilineair is, moest de werkelijk optredende stijfheid voor dit paaldeel iteratief worden bepaald.

De meest ongunstige situatie voor de optredende rotatie blijkt op te treden indien de oplanger als volledig ingeklemd in de funderingsbalk wordt verondersteld. Hier is in de toetsing vanuit gegaan, hetgeen een conservatieve aanname is. De rotatie

die op basis hiervan wordt gevonden voor de verbinding paalkop / oplanger bedraagt 0,016 rad, dus een orde lager dan de maximale rotatie waarbij de verbinding is getest van 0,15 rad.

Hiermee staat vast dat bij de gronddeformatie die is opgetreden in deze case geen bezwijken van de verbinding paalkop / oplanger kan zijn opgetreden.

Incasservermogen bij toenemende zettingen

Aanvullend is de vraag interessant hoeveel de maaiveldzetting in dit geval nog zou kunnen toenemen, voordat alsnog een risicovolle situatie ontstaat voor deze verbinding. Dit is onderzocht door de rotatiehoek te berekenen bij oplopende grondvervorming, volgens dezelfde methode als hierboven beschreven. Hierbij is een oplopende vermenigvuldigingsfactor toegepast over de horizontale grondvervormingen, dus uitgaande van een lineair verband tussen maaiveldzetting en horizontale grondvervorming

Uit de berekening blijkt dat bij toenemende gronddeformatie de invloed op de deformatie van de paal steeds geringer wordt, in de slappe grond waarvan is uitgegaan (zie ook tabellen 1 en 2). Dit wordt geïllustreerd in figuur 6. Uit de figuur blijkt dat de rotatiehoek ook bij grote maaiveldzakkingen ruim blijft onder de waarde van 0,15 rad waarbij door de TU Delft is getest.

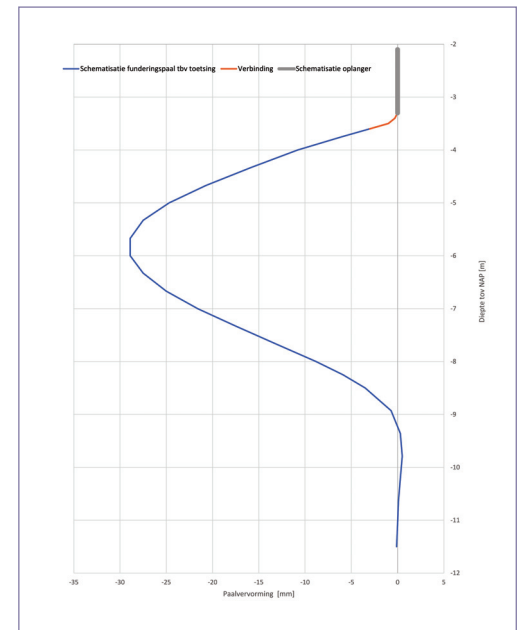
Op basis hiervan kan worden gesteld dat het genoemde mechanisme in deze grondopbouw niet maatgevend zal zijn. Indien in de ondergrond stijvere grondlagen voorkomen zou deze conclusie echter anders kunnen zijn.

Conclusies

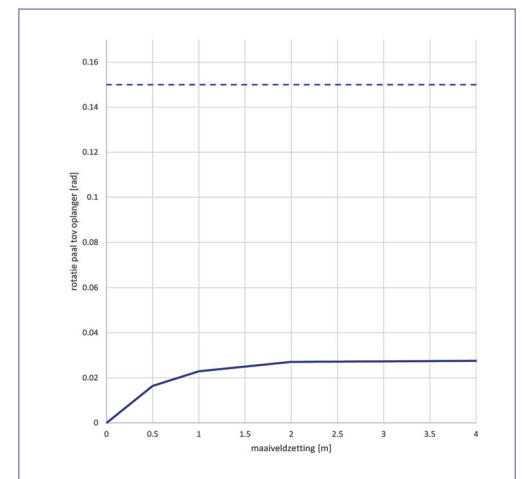
Aan de hand van door de TU Delft uitgevoerde laboratoriumproeven is aangetoond dat de verbinding tussen de houten paalkop en de betonnen oplanger, zoals toegepast onder de onderzochte panden te Zegveld, in geval van horizontale grondverplaatsingen niet snel kritisch is voor het functioneren van de fundering. Bij rotaties groter dan 0,02 rad neemt het optredende moment in de paalkop steeds minder toe en tot een opgelegde rotatie van tenminste 0,15 rad blijft de normaalkracht die het gevolg is van de belasting uit gewicht van de woning goed opneembaar.

Dat betekent dat de horizontale grondverplaatsingen die gepaard gaan met zettingen naast panden, in het onderzochte geval niet hebben geleid tot beperkingen in het functioneren van de fundering. Deze conclusie is voor het onderzochte geval ook van toepassing indien er aanmerkelijk grotere zettingen, in de orde van meerdere meters, zouden optreden.

In Rotterdamse stadswijken met grote aantallen op oplangers gefundeerde panden, waarvan bekend



Figuur 5 – Paalvervorming en schematisatie voor de toetsing.



Figuur 6 – Effect maaiveldzetting op de rotatie verbinding paalkop / oplanger

is dat er sinds de aanleg grote maaiveldzettingen zijn opgetreden, zijn vrijwel geen gevallen bekend van schade aan de verbinding paal en oplanger. Die observatie sluit aan bij het resultaat van het uitgevoerde onderzoek.

Nader te onderzoeken is of de verbinding in andere grondcondities wel kritisch zou kunnen zijn.

Literatuur

- Buchanan AH. Bending Strength of Lumber. Journal of Structural Engineering, ASCE. 1990; 116(5):1213-1229
- NEN 5491. *Kwaliteitseisen voor hout (KVH 2010) – Heipalen- Europees Naaldhout, 2010*
- Verbinding betonnen oplangers met houten palen. Technische Houtdocumentatie E18/3. J.G. Rensman, december 1997
- Richtlijn Houten Paalfunderingen. Onderzoek en beoordeling – 3e herziene editie. F30/SBRCurnet, Delft oktober 2016. ●