

VHB-CIV-MEM-DO-0016 - Memo corrosiebescherming ankerpalen

A7 Prinses Margriettunnel

Status : [Status]
 Revisie : 1.0
 Revisiedatum : 28-03-2023
 Werkpakket : WP-00086 - DO team 3 herstelwerkzaamheden
 Documentnummer : W23-003-1023

5.1.2.e

Aan :  RWS
 Opstellers : 
 CC :

1 Aanleiding

In document 'W23-003-577 VHB-CIV-RAP-DO-0004 – Ontwerpbasis' is in paragraaf 5.3.2.3 beschreven hoe in de uitwerking van het ontwerp wordt gerekend met afroesting van de nieuwe ankerstaven. Het toepassen van dubbele corrosiebescherming (DCP)¹ is geen vereiste, mits de bepalingen in de NEN 6766 worden gevolgd.

Deze ontwerpbasis is afgestemd met de toetsers van RWS en Deltares die specifiek voor het project A7 PM Tunnel zijn betrokken.

In een breder gremium van RWS wordt deze keuze ter discussie gesteld. De oorzaak van het bezwijken van de bestaande palen staat nl. nog niet vast. De vraag is of op termijn hetzelfde fenomeen kan optreden en daarom voor extra robuustheid uit voorzorg de ankerstaven uitgevoerd moeten worden in DCP?

Deze memo geeft een aanvullende onderbouwing van de ontwerpkeuze om te rekenen met afroesting, en brengt vervolgens in beeld wat de consequenties zijn als DCP wordt geëist.

2 Onderbouwing ontwerpkeuze

In navolgende paragraaf wordt uitgelegd wat de argumenten zijn om uit te gaan van afroesting van de ankerstaaf (opoffering van een deel van de doorsnede), in plaats van het staal te beschermen tegen de corrosie door het te omhullen met een kunststof ribbelbuis geïnjecteerd met grout.

2.1 Kwaliteit

Allereerst is het goed om te beseffen dat de bestaande vibropalen zijn uitgevoerd met een relatief dunne trekstaaf (ø32 of ø36 mm) van hoogwaardig staal (treksterkte 1050 MPa) dat met de huidige inzichten zeer gevoelig is voor corrosie. Dit betreft niet alleen normale oppervlakte corrosie, maar bijzondere vormen zoals spanningscorrosie

Het ontwerp bestaat nu uit significant grotere diameters (i.e. Ø63,5 en Ø75mm) van een lagere staalkwaliteit waarbij de leverancier een certificaat afgeeft dat het materiaal niet gevoeliger is voor corrosie dan normaal constructiestaal (treksterkte 355 MPa). Deze staalkwaliteit is conform de norm niet gevoelig voor bijvoorbeeld spanningscorrosie. Om deze reden mag met een genormeerde hoeveelheid afroesting aan het oppervlak worden gerekend.

De nieuwe ankerpalen worden 'dubbel verbuisd aangebracht met de 'reversed circulation' (RC) techniek. Hierbij kunnen twee boorbuizen (een buiten- en binnenbuis) in één stuk en boorgang op diepte worden gebracht en na aanbrengen van de ankerstaaf getrokken waarbij onder druk een groutlichaam rond de staaf wordt gevormd.

De ankerpaal wordt in één gang op diepte gebracht zonder dat boorbuizen tussentijds gekoppeld dienen te worden. De boorspoeling wordt afgevangen en stroomt niet over het maaiveld (lees

¹ Dubbele corrosiebescherming afgekort DCP (Double Corrosion Protection)

tunnelvloer), maar wordt afgevoerd via een retourleiding. Om het geotechnisch draagvermogen te garanderen worden voorafgaand aan de productiepalen 9 bezwijkproeven uitgevoerd.

Met deze techniek kunnen de ankerpalen evt. ook worden geboord beheerst tegen de waterdruk in middels een sluisconstructie gemonteerd op de vloer.

Dit systeem geeft echter wel een beperking voor wat betreft de afmeting van de in te voeren ankerstaaf (zie hiervoor 3.1.1).

2.2 Tijd, geld

Naast de kwaliteit is er ook belang om de herstelwerkzaamheden zo snel mogelijk te realiseren.

Het voordeel van de gekozen uitvoeringsmethodiek RC boren is de productiesnelheid. Er kan met een grote boorstelling in één buislengte worden geboord. Vaak worden deze paalsystemen geïnstalleerd met kleinere machines waarbij het koppelen van zowel de binnen- en de buitenboorbuizen een tijdrovend proces is.

Een bijkomend voordeel is dat hiermee de ankerpalen tegen de waterdruk in kunnen worden geboord. Dat betekent dat geen bemaling benodigd is. Het verkrijgen van een watervergunning en het (mogelijk) doorlopen van MER procedure is een tijdrovend proces wat de voortgang van het project niet ten goede komt. Ook de installatie van een retourbemaling tot nabij de belendingen in de omgeving zal het startmoment van de uitvoering 1 à 2 maanden vertragen. Vanwege ervaringen uit het verleden ligt het bemalen ook gevoelig in de omgeving.

Voor een relatief hoge productiesnelheden daarmee ook lagere installatiekosten van het paalsysteem is het dus belangrijk dat het RC boorsysteem kan worden toegepast. De huidig beschikbare dimensionering van de buizen en waarmee ook nu de proefpalen worden uitgevoerd om de karakteristieke capaciteit van de grond op dit project te bepalen kent een binnendiameter van 108 mm. De totale diameter van de te installeren elementen -staaf inclusief te assembleren omhullingen- wordt dus hierin beperkt.

Naast productietijd en –kosten afhankelijk van de boormethoden en –condities zullen de kosten van een kleinere staafdiameter met DCP hoger uitvallen dan van een iets groter diameter waar met 6 mm afroesting in 100 jaar moet worden gerekend.

2.3 Ontwerpverantwoording

De afroesting is afgeleid op basis van de recent uitgegeven norm 'NEN 6766: 2022 Corrosie van stalen elementen in de ondergrond - Eisen voor ontwerp en toepassing', die specifiek handelt over deze toepassing. Hiervoor wordt verwezen naar de ontwerpbasis paragraaf 5.2.3.3.

Hierbij wordt uitgegaan van:

- Grondconditie type 1: schone grond, permanent beneden de laagste grondwaterspiegel en waarbij geen regelmatige verversing optreedt door stroming;
- Levensduur 100 jaar (bewuste conservatieve keuze om hier meer aan te houden dan de theoretische restlevensduur kunstwerk van 30 jaar);
- Groep 4 (van toepassing voor op druk en trek belaste funderingselementen);

Uit onderstaande blijkt dat een corrosiereductie van 6 mm op de diameter van toepassing is. Voor dit project geldt de classificatie van schone grond waarbij geen regelmatige verversing optreedt. Voor de hoog gelegen moten kan deze aanname onderbouwd worden doordat de onderzijde van de vloer in de leemlaag ligt. De doorlatendheid van het leem lager is dan $1,0 \text{ E-}06 \text{ m/s}$. Conform onderstaande tabel mag er dan vanuit gegaan worden dat geen regelmatige verversing optreedt. Vanaf ca. NAP -14 m start het Pleistoceen zand. In deze grondlaag is de doorlatendheid groter en is sprake van enige grondwaterstroming. Omdat op de projectlocatie geen sprake is van frequente stijghoogte verschillen in de watervoerende grondlagen mag worden aangenomen dat het zuurstofgehalte in dit watervoerend pakket laag ($< 5 \text{ mg/l}$) is. Deze aanname wordt nog geverifieerd met metingen.

Tabel 4 — Staal dikte ^c afname van funderingselementen of delen van funderingselementen die volledig door schone grond^a zijn omsloten

Funderingselement type volg. tabel 3	Grondconditie type conform tabel 1	Rekenwaarde van de staal dikte afname ^{b,c} (mm)				
		t=5 jaar	t=10 jaar	t=25 jaar	t=50 jaar	t=100 jaar
groep 1	I	0,2	0,3	0,5	0,8	1,4
	II	0,3	0,5	0,9	1,4	2,4
groep 2	I	0,2	0,3	0,6	1,2	2,4
	II	0,4	0,7	1,4	2,4	4,4
groep 3	I	0,5	0,8	1,3	2,0	3,5
	II	0,8	1,3	2,3	3,5	6,0
groep 4	I	0,5	0,8	1,5	3,0	6,0
	II	1,0	1,8	3,5	6,0	11,0

^a Zie voor de definitie van schone grond 3.17.
^b Voor tussenliggende periodes mag lineair worden geïnterpoleerd.
^c In geval van massieve stalen staven of volledig met grout of beton gevulde holle ankerstaven lees 'afname diameter', in geval van al dan niet afgesloten buizen lees 'afname wanddikte', zie ook figuur 2.

Tabel 1 — Conditie typering schone grond ^a

Conditie waarin de grond zich bevindt	Grondconditie type
Schone grond ^a die zich permanent beneden de laagste grondwaterspiegel ^b bevindt en waarbij bovendien geen regelmatige verversing van het grondwater optreedt door stroming ^c	I
Alle overige gevallen van schone grond ^a	II

^a Zie voor de definitie van schone grond 3.17.
^b De laagste grondwaterspiegel kan worden bepaald door uit te gaan van de laagste grondwaterstand die gedurende 1 jaar is gemeten, minus 0,5 m.
^c 'Verversing van grondwater' staat voor de situatie waarin er door stroming regelmatige aanvoer is van oxiderende stoffen (zoals zuurstof). Als sprake is van grondwater dat zich niet verplaatst, is het oxidatieproces eindig, omdat er geen nieuwe aanvoer is van oxiderende stoffen zoals zuurstof. Voorbeelden waarbij verversing van het grondwater door grondwaterstroming kan optreden is bij gebieden met een significante kwel en infiltratie maar ook in geval van wisselende verhangen zoals bij sluizen, in getijgebieden, langs rivieren en beken. Als de doorlatendheid van de grond k lager is dan $1 \cdot 10^{-6}$ m/s, mag worden aangenomen dat er geen verversing van grondwater optreedt.

3 Consequenties toepassen DCP

3.1 Gevolgen ontwerp

3.1.1 Geometrie

Eigenschappen van het toegepaste equipment:

- Buitenboorbuis $\varnothing 178$ mm (uitwendige maat)
- Binnenboorbuis $\varnothing 108$ mm (inwendige maat)

Indien DCP een eis wordt, kan een $\varnothing 75$ mm staaf niet toegepast worden. De staaf kan niet in één lengte geassembleerd worden. De bijbehorende koppelmof zonder krimpkous is al $\varnothing 108$ mm.

Met DCP als voorwaarde kan maximaal een $\varnothing 63,5$ mm staaf toegepast worden. Dit is hieronder nader onderbouwd.

Met kunststof ribbelbuis wordt de uitwendige diameter $\varnothing 100 \pm 0,5$ mm. Met aangepaste hoogwaardige koppelmof kan de diameter teruggebracht worden van $\varnothing 114$ mm naar $\varnothing 90$ mm. Inclusief krimpkous om de koppelmof wordt de uitwendige diameter van de geassembleerde staaf $\varnothing 103$ mm. De koppelmof zal zo laag mogelijk aangebracht worden vanwege vermoeiing.

Om de ankerpalen te kunnen beproeven is het nodig om elke staaf te voorzien van een gladde kunststof (PVC) omhullingsbuis $\varnothing 105,4$ met wanddikte 1,8 mm over de hoogte van de vloer.

Een buis met een uitwendige diameter van $\varnothing 105,4 \pm 0,5$ mm, en/of een krimpkous $\varnothing 103$ mm zou theoretisch net passen in het boorsysteem $\varnothing 108$ mm ± 2 mm. Echter, als we hier de toleranties en het passeren van de groutspoeling mee in ogenschouw nemen, blijkt dat de omhullingsbuis welke is benodigd voor de beproeving van de palen niet te passen. Zie hiervoor ook paragraaf 3.2. Het risico is aanwezig dat de staaf mee omhoog wordt getrokken bij het trekken van de boorbuizen.

De staven worden geassembleerd met deze omhullingen, inclusief een vulling van cementgrout tussen staaf en kunststof ribbelbuis. Het aanbrengen van de kunststof ribbelbuis over de staaf is bij grote lengtes moeilijk uitvoerbaar. De staaf moet immers aan één zijde worden vastgepakt om via de andere zijde de buis eroverheen te kunnen schuiven. De maximale lengte om dit te kunnen doen is 25 m. Bij langere staven moet dus in 2 delen worden geassembleerd, die middels een koppelmof met elkaar worden verbonden. Deze koppelmof kan niet in een ribbelbuis met groutvulling worden opgenomen. Hier zal de bescherming bestaan uit een zgn. krimpkous, dus een kunststof omhulling. Bij een maximale staaf lengte van 28m is de positie van de koppelmof dermate diep in de paal dat de optredende spanningen zeer laag zijn en de invloed van evt. corrosievorming verwaarloosbaar.

Een oplossing voor voornoemde beperking van toepassing van staven $\varnothing 63,5$ mm zou zijn om de ankerstaven over de onderste 3-5 meter niet te voorzien van een dubbele corrosiebescherming, maar alleen de bescherming van het groutlichaam. Zodoende hoeft de koppelmof niet beschermd te worden en past het systeem in de boorbuis.

Argumentatie is dat op deze diepte de staalspanningen in de staaf inmiddels fors zijn teruggelopen, en corrosie niet op deze diepte zal optreden.

3.1.2 Moot 26

In moot 26 is nu uitgegaan staafdiameters $\varnothing 75$ voor de randpalen en $\varnothing 63,5$ mm voor de middenpalen voor respectievelijk de rand- en middenpalen. Hierbij is gerekend met 6 mm afroesting.

Dominant in de doorsnede controle van de staven is m.n. het invloed van het paalkopmoment dat vooral wordt veroorzaakt door opgelegde vervorming door verlenging/verkorting (temperatuur) van de vloer. Circa 60% van de doorsnede capaciteit wordt opgesoupeerd aan deze paalkopmomenten.

Ook zijn in de palen zonder DCP geen koppelmoffen noodzakelijk. De staven zijn uit één lengte. Dit is aanmerkelijk gunstiger voor de vermoeiingstoets dan wanneer koppelmoffen die nodig zijn bij toepassing DCP, worden toegepast.

Voor de middenpalen kunnen DCP $\varnothing 57,5$ mm staven met TR kwaliteit (S670/800) toegepast kunnen worden. Echter voor de randpalen kunnen maximaal DCP $\varnothing 63,5$ mm staven met TR kwaliteit toegepast worden. De capaciteit hiervan is minder dan de netto doorsnede $\varnothing 69$ mm (i.e. $75 - 6$ mm). De verwachting is dat in plaats van 4 x 8 rijen randpalen naar 4 x 10 rijen benodigd zijn (d.w.z. 8 palen extra). Alternatief hierop is het toepassen van een wandverankering, waarbij de effectiviteit wordt beperkt door het beschikbare drukdraagvermogen van de palen door knik in de maatgevende belastingcombinatie op druk. Onzeker is of dit een haalbare ontwerp oplossing. Dit zal nader beschouwd moeten worden.

3.1.3 Overig moten

Voor de overige moten zal net als voor moot 26 moeten worden gerekend met de beperking van de staafdiameter tot $\varnothing 63,5$ mm. Met name voor dieper gelegen moten kan dit voor problemen gaan zorgen doordat het palenplan te 'dicht' wordt. Het niet kunnen toepassen van $\varnothing 75$ mm staven vermindert de flexibiliteit in het ontwerp.

3.2 Gevolgen uitvoering

Omdat voor de middenpalen hoogstwaarschijnlijk een staafdiameter $\varnothing 57,5$ mm kan worden gebruikt, lijken de consequenties voor toepassing van DCP hier mee te vallen.

Uitgaande van het beoogde RC-systeem is de toepassing van $\varnothing 63,5$ mm staven in de randpalen theoretisch mogelijk. De marges t.o.v. maatafwijkingen zijn echter zeer klein, zeker als men bedenkt dat het geheel $\varnothing 105,4 \pm 0,5$ mm moet worden ingevoerd in een diameter $\varnothing 108 \pm 2$ mm waartussen ook cementgrout moet kunnen stromen. Praktisch zal dit tot problemen leiden tijdens het plaatsen van de staven in het boorsysteem met stagnatie of beschadiging van de PVC-buis als gevolg. Om die reden is de maakbaarheid van palen met $\varnothing 63,5$ mm staven i.c.m. DCP twijfelachtig met het voorziene boorsysteem. Althans als deze palen ook beproefd moeten kunnen worden. Volgens de richtlijn moet

dit op 3% van de palen woerden uitgevoerd. Omdat in het middenveld hoogstwaarschijnlijk $\varnothing 57,5$ mm kan worden toegepast (en waar het overgrote deel van de palen wordt gemaakt en deze ook in de eerste fase van het project plaatsvindt), is het logisch om hier de paaltesten uit te voeren. Voor de randpalen met een grotere staafdiameter dan de keuze maken om deze niet te kiezen voor proefing, zodat de palen hier over het algemeen goed maakbaar blijven.

Indien voor de randpalen $\varnothing 75$ mm staven nodig zijn met DCP, dan zal het boorbuissysteem moeten worden aangepast. Traditioneel door in segmenten van 2 tot 4 m met losse binnen- en buitenbuizen te werken. Dit leidt tot een langere uitvoeringstijd en hogere kosten. Ook neemt het risicoprofiel toe als dit moet worden gedaan zonder bemaling van het grondwater, dus als er tegen de waterdruk in moet worden gewerkt.

Alternatief is om naar een groter RC-systeem te gaan. De binnen- en daarmee ook de buitendiameter wordt dan groter. Voor de randpalen zal dan een ca. 30 mm grotere boring door de vloer moeten worden uitgevoerd (ca. 250 mm kernboring i.p.v. 220 mm). De doorkruising van de onderwapening wordt dus groter. Een grotere binnenbuis resulteert wel in een lagere stroomsnelheid van de retourstroming tijdens het inboren en daarmee kans dat de meegevoerde grond deel sedimenteert en niet volledig wordt afgevoerd. Voor de randpalen zijn dan extra proeven nodig om dit te verifiëren.

Bij een grotere boordiameter kunnen de palen waarschijnlijk iets korter worden. Hier tegenover staat dat het inboren zwaarder zal gaan.

4 Vervolgstappen

4.1 Voorstel aanpassen ontwerpuitgangspunten

Ten tijde van het vaststellen van de ontwerpuitgangspunten zoals opgenomen in de ontwerpbasis zijn er op een aantal ogenblikken conservatieve keuzes gemaakt. Specifiek voor de staafdiameter is het besluit om alleen met het elastische weerstandmoment te rekenen in de UGT snedetoets, een dominante.

Heroverwegen van dit besluit, en dus plastisch rekenen leidt tot vergroten van de capaciteit om het paalkopmoment op te nemen. Hiermee kan worden volstaan met één slag kleinere staafdiameter. Dit geeft meer flexibiliteit en verkleint het risico dat een ontwerp dat niet meer maakbaar is.

4.2 Onderzoek levering materialen

In overleg met de leveranciers enige optimalisaties onderzocht:

- Kleinere diameter mantelbuis om het anker over de hoogte van de vloer en/of vrije ankerlengte te onthechten. Voor de $\varnothing 63,5$ mm staven is dit al doorgevoerd, zoals boven beschreven. Standaard wordt hiervoor nl. een buisdiameter van 110 mm toegepast i.p.v. het 105,4 mm.
- Daar waar $\varnothing 57,5$ mm (buitendraad $\varnothing 63$) staven kunnen worden toegepast kan met een slankere DCP (ribbelbuis $\varnothing 80$ mm, inwendig $\varnothing 71$) worden gewerkt dan normaal wordt gebruikt, mits wordt geaccepteerd dat de maximale groutdekking op de buitendraad van de staaf circa 4 mm is, in plaats van de in de norm vereiste 5 mm. Normaal worden hiervoor nl. dezelfde kunststof omhulling $\varnothing 100$ mm gebruikt als bij staven $\varnothing 63,5$ mm staven. De leverancier dient nog een test uit te voeren of deze afwijkende kleinere maat dan ook te assembleren is.

4.3 Onderzoek aanpassen uitvoeringsmethodiek

De afmeting van de ankerstaaf met DCP wordt met de gekozen uitvoeringsmethodiek beperkt door de inwendige diameter van de binnenste boorbuis $\varnothing 108$ mm.

- Een boorsysteem met grotere diameter boorbuis worden ontwikkelen. Hierbij in acht nemen dat hiervoor grotere gaten in de vloer en grotere sluisen moeten worden voorzien. Dit afwijkt van de 'standaard'. Boorbuizen wellicht een lange levertijd hebben.
- Indien de tunnel wordt bemalen, en niet middels sluisconstructies tegen de waterdruk in wordt gewerkt is het eenvoudiger om ankerpalen te maken waarbij de binnenbuis getrokken kan worden voordat de staaf wordt ingevoerd. Of buitenom spoelen zonder binnenbuis. Aandachtspunt hierbij is het opvangen van de retourspoeling op vloer niveau.

5 Resumé

Er is in het huidig ontwerp ontworpen met 6 mm afroesting van de staven $\varnothing 75$ en $\varnothing 63,5$ mm. Deze 6 mm is bepaald op basis van de norm NEN6766. Er wordt geen DCP toegepast.

Er wordt geboord met een gemodificeerd dubbel verbuisd boorsysteem (RC boren). Hiermee kunnen de palen tegen de waterdruk in, in één lengte worden geboord zonder dat boorbuizen tijdens het boorproces moeten worden (af)gekoppeld. Dit komt ten gunste van de kwaliteit van de palen en de productiesnelheid.

Indien toch DCP wordt geëist, dan heeft dit de volgende gevolgen:

- De maximale staafdiameter bedraagt dan $\varnothing 63,5$ mm voorzien van DCP;
- Het DCP systeem kan worden aangebracht rond staven met maximale lengte van 25 m; De ontworpen staaf lengte loopt tot bijna 30 m. Er is een koppelmof noodzakelijk;
- De onderste 3-5 m kunnen bij deze staafdiameter $\varnothing 63,5$ mm niet worden voorzien van DCP omdat de diameter van het systeem ter plaatse van de koppelmof te groot is in relatie tot de binnendiameter van de boorbuis;
- De palen met staafdiameter $\varnothing 63,5$ met DCP kunnen niet worden beproefd. De maximale staafdiameter die kan worden beproefd is $\varnothing 57,5$ mm (incl. DCP).
- Indien de staafdiameter beperkt blijft tot $\varnothing 57,5$ mm, kan een iets kleinere diameter ribbelbuis van de DCP worden toegepast. Echter, dan is de groutomhulling in de ribbelbuis circa 4 mm, en voldoet hierbij niet aan de norm (5 mm).

NB: Dit moet nog worden getest door de leverancier.

Concreet voor het ontwerp betekent dit dat er meer palen moeten worden toegepast. De staafdiameter is m.n. nodig om het paalkopmoment uit opgelegde vervorming op te kunnen nemen.

Andere opties om DCP mogelijk te maken zijn:

- Snedetoetsingen van de paalkopmoment plastisch uitvoeren. Hiermee komen we uit met een kleinere staafdiameter en wordt DCP beter mogelijk;
- Aanpassen van het boorsysteem, grotere diameters boorbuizen en sluisjes. Hiervoor zijn grotere gaten in de vloer nodig. Het boren zal zwaarder gaan. Het RC systeem moet opnieuw worden beproefd;
- De tunnel bemalen waardoor een eenvoudiger boorsysteem kan worden gekozen door met gekoppelde boorbuizen te werken en/of methode 'buitenom spoelen'