



**ir. A. (Ad) C. Vriend**  
Senior geotechnisch adviseur  
Acécon B.V.



**ir. G. (Guido) Meinhardt**  
Senior specialist / Partner  
Crux Engineering



**ir. A. (Arjan) J. Grashuis**  
Senior specialist geotechniek  
Rijkswaterstaat - GPO



**ir. T. (Thomas) M.A. Lankreijer**  
Specialist geotechniek  
ABT

# HERZIENE 3<sup>E</sup> DRUK CROW-CUR RAPPORT 236 RICHTLIJN ANKERPALEN (2)

## Inleiding

Recent is een 3<sup>e</sup> herziene druk verschenen. Reden om verdeeld over een tweetal artikelen in te gaan op de achtergronden van de belangrijkste aanpassingen. Na het eerste artikel (zie het juni-nummer van Geotechniek) wordt in dit tweede artikel eerst aandacht besteed aan het afleiden van de paalklassefactor  $\alpha_t$  in het geval van het uitvoeren van bezwijkproeven in vast zand en de consequenties daarvan voor het berekenen van de schachtwrijving. Vervolgens komen nieuwe rekenregels en achtergronden voor het controleren van de knikstabiliteit van op druk belaste ankerpalen aan bod.

## Berekenen van de schachtwrijving

Het berekenen van de schachtwrijving bij ankerpalen vindt, afgezien van een bij ankerpalen te hanteren reductiefactor  $f_3$  vanwege het zogenoemde lengte-effect en het zo nodig moeten beperken van de schachtwrijving langs de bovenste meters van de paalschacht (zie het eerste artikel in het juni-nummer van Geotechniek), plaats op basis van de reguliere rekenregels volgens NEN 9997-1.

Ten aanzien van de te hanteren paalklassefactor  $\alpha_t$  respectievelijk  $\alpha_s$ , kan gekozen worden voor twee opties:

1. gebruik van een veilige ondergrenswaarde volgens de tabellen 6.1 tot en met 6.4 in de Richtlijn Ankerpalen, zonder dat er paalproeven nodig zijn om die waarde aan te tonen;
2. gebruik van een project specifieke waarde die volgt uit daartoe uit te voeren bezwijkproeven. Navolgend wordt nader op de 2<sup>e</sup> optie met het doen van bezwijkproeven in gegaan.

## Bezwijkproeven op ankerpalen

Bij ankerpalen gaat de voorkeur er naar uit om voorafgaand aan de start van een project, op het dan voorziene type ankerpalen, bezwijkproeven uit te voeren. Op die manier kan goed inzicht worden verkregen in de te verwachten wrijvings-eigenschappen van de paalschacht met de aanliggende draagkrachtige grondlagen. Deze wrijvingseigenschappen zijn vanwege de uitvoeringsgevoeligheid van ankerpalen sterk afhankelijk van het type ankerpaal en de wijze waarop deze wordt gemaakt. Daarnaast zijn per afzonderlijke draagkrachtige grondlaag van groot belang factoren zoals de vorm (rond, hoekig) en de fractie (grof, fijn) van de gronddeeltjes, de pakkingsgraad en eventuele bijmenging met cohesieve bestanddelen. In geval van voor Nederland meer bijzondere grondlagen zoals mergel en glauconiet houdend zand, en bij toepassing van ankerpalen in overgeconsolideerde klei- of leemlagen is het doen van

bezwijkproeven een vereiste.

Behalve het aspect van proefbelasten en het analyseren van de meetresultaten is zeker ook het daaraan voorafgaande uitvoeringsproces bij het maken van de proefpalen cruciaal. Tenslotte wordt daarmee de geschiktheid van het gekozen type ankerpaal in gegeven grondslag aangetoond. Voor de meeste situaties is uiteraard al veel ervaring opgedaan, maar inboordiepten nemen steeds verder toe en er blijven zich op het gebied van het boorproces en materieel nieuwe ontwikkelingen voordoen.

Het doen van bezwijkproeven vindt altijd plaats op trek, waarbij via een stapelconstructie relatief eenvoudig de te mobiliseren reactiekracht naar maaiveld kan worden afgeleid, zie figuur 1.

## Afleiden van de paalklassefactor $\alpha_t$ uit bezwijkproeven

Ten tijde van het verschijnen van de 1<sup>e</sup> druk van CUR 236 werd in de (inmiddels vervallen) geotechnische norm NEN 6745 beschreven hoe uit bezwijkproeven de project specifieke paalklassefactor moest worden bepaald. Maar dat was alleen geldig voor zandgronden met een conusweerstand tot maximaal 15 MPa. Afgezien dat bij ankerpalen de afsnuitwaarde is verhoogd tot 15 of 20 MPa (afhankelijk van het type ankerpaal), moest er ook een aanpak komen voor het geval dat bezwijkproeven plaatsvinden in vast gepakt zand met een conusweerstand  $q_{c,z} > 15$  respectievelijk 20 MPa.

Oplossing is toentertijd gevonden door in lijn te blijven met hoe volgens NEN 9997-1 de schachtwrijving berekend moet worden. Ofwel door de  $q_{c,z}$  af te snuiten op  $q_{c,z;a} = 15$  respectievelijk 20 MPa en vervolgens bij de bezwijkproef de maximaal gemobiliseerde wrijving

$T_{mob,max} = F_{bezwijk} / \pi \cdot \phi_s \cdot L_s$  te delen door deze afgesnuten conuswaarde wat resulteert in:

$$\alpha_t = T_{mob,max} / q_{c,z;a}$$

Bij het verschijnen van NPR 7201 in 2017 bleek een andere aanpak voorgeschreven, waarbij de over de lengte van het verankeringslichaam gemiddelde gemeten conusweerstand  $q_{c,z;gem}$  deze waarde direct op de maximaal gemobiliseerde wrijving wordt gedeeld, dus zonder de conusweerstand eerst op een lagere waarde af

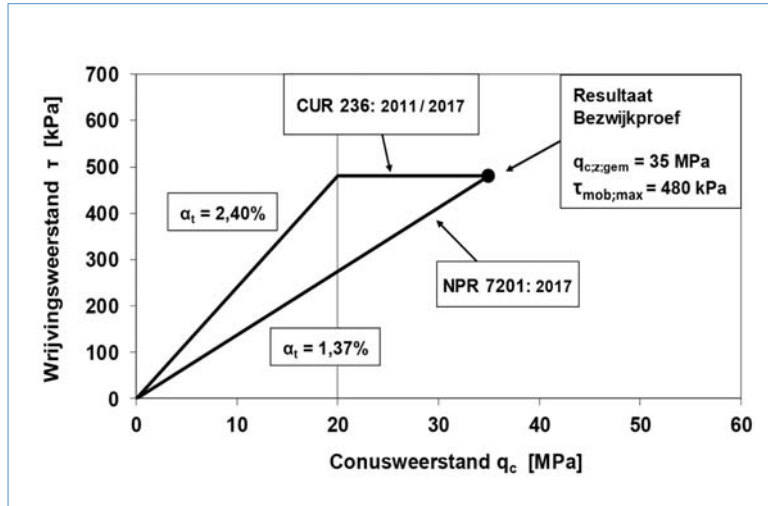


**Figuur 1** – Uitvoering van bezwijkproeven.

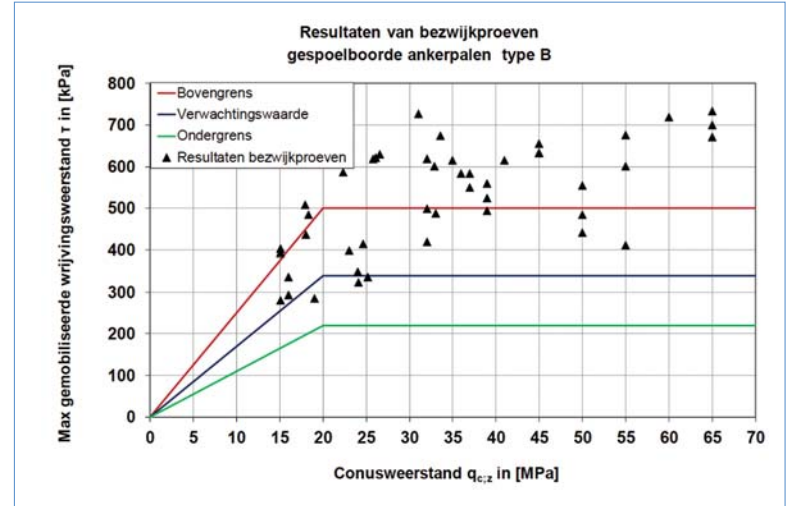
## SAMENVATTING

In de 3e herziene druk van "CROW-CUR Rapport 236 Richtlijn Ankerpalen" zijn vele verbeteringen en toelichtingen aangebracht. De aanpassingen zijn grondmechanisch gezien zodanig fundamenteel, dat enkele berekeningen en afleidingen aanvullend zijn op de vigerende norm NEN 9997-1 en afwijken van de (inmiddels) norm NEN 7201. Het gaat daarbij met name om het bepalen van

de schachtwrijving van op trek te belasten ankerpalen en het uit bezwijkproeven afleiden van de wrijvings eigenschappen tussen het verankeringslichaam en het aanliggende (vaste) draagkrachtige zandpakket. Ook zijn er voor op druk te belasten ankerpalen nieuwe rekenregels om de knikstabiliteit te controleren. Reden om hiervan de achtergronden te belichten.



Figuur 2 – Paalklassefactor  $\alpha_t$  afgeleid uit bezwijkproeven - voorbeeld.



Figuur 3 – Resultaten bezwijkproeven ankerpalen type B.

te snuiten:  $\alpha_t = \tau_{mob,max} / q_{c,z,gem}$

In figuur 2 zijn aan de hand van een rekenvoorbeeld beide methoden volgens CUR 236 en NPR 7201 weergegeven.

Naar aanleiding van het voorgaande doen zich nu enkele vragen voor, waaronder:

- Is de aanpak volgens 1<sup>e</sup> en 2<sup>e</sup> druk CUR 236 niet altijd te optimistisch geweest? Zo ja, waarom zijn er dan bij het doen van geschiktheidsproeven op productiepalen niet regelmatig palen losgetrokken?
- Als de aanpak volgens de NPR 7201 de juiste is, wijst dit dan niet op een discrepantie in berekeningsmethode van de schachtwrijving volgens NEN 9997-1 in geval er wel bezwijkproeven zijn gedaan versus de situatie dat dit niet het geval is?

Tenslotte zal bij gebruik van de paalklassefactor uit tabel 7c van NEN 9997-1 en dus zonder het doen van bezwijkproeven, een hoge gemeten conusweerstand vanwege ontgraven daarvoor eerst gereduceerd en daarna zo nodig alsnog worden afgesnoten. De bijbehorende wrijvingsweerstand blijft dan constant van waarde zolang de gereduceerde conusweerstand hoger blijft dan de afsnuitwaarde. Dit is strijdig met de aanpak in combinatie met NPR 7201 als er wél bezwijkproeven worden gedaan, waarbij in geval van ontgraven behalve de conusweerstand ook direct de wrijvingsweerstand afneemt.

De kern van voorliggende vragen is hoe in geval van hoge conusweerden bij ontgraven de wrijvingsweerstand al of niet afneemt en zo ja in welke mate.

### Nieuwe aanpak analyse bezwijkproeven bij ankerpalen

Na overleg en discussie tussen vertegenwoordigers van de CROW-Werkgroep Ankerpalen, NEN Normcommissie Geotechniek en Deltares / TU-Delft, is als uitgangspunt genomen dat na het doen van bezwijkproeven in vast zand met een conusweerstand hoger dan 15 respectievelijk 20 MPa de daarbij vastgestelde wrijvingsweerstand  $\tau_{mob,max}$  direct afneemt zodra er sprake is van reductie van de conusweerstand, zoals bij ontgraven.

Om vast te stellen in welke mate de wrijvingsweerstand bij ontgraven dan afneemt is besloten om de oplossing te zoeken in de resultaten vanuit bezwijkproeven uitgevoerd op ankerpalen type B (met enkele boorbuis gespoelboorde ankerpalen met af te persen verankeringslichaam). Zie figuur 3.

Na analyse van deze proefresultaten is de relatie tussen de conusweerstand  $q_{c,z}$  en de maximaal gemobiliseerde wrijvingsweerstand  $\tau_{mob,max}$  als volgt geschematiseerd:

- traject 1: tot 20 MPa een relatief steile tak met  $\tau_1 = \alpha_{t,1} \cdot q_{c,z}$
- traject 2: vanaf 20 MPa en hoger een verdere geringe lineaire toename met  $\tau_2 = \alpha_{t,2} \cdot (q_{c,z} - 20)$ ;

- onderlinge verhouding in toename tussen beide trajecten aangenomen als  $\alpha_{t,2} = \alpha_{t,1} / 5$ ;
- het punt op 20 MPa wordt nu een 'knikpunt' in plaats van de afsnuitwaarde;
- deze schematisering is voor alle typen ankerpalen van toepassing verklaard, met dien verstande dat bij ankerpalen type D (geschroefde ankerpalen) het "knikpunt" op 15 MPa is genomen.

Uit een bezwijkproef bij een over de lengte van het verankeringslichaam gemiddelde gemeten conusweerstand  $q_{c,z,gem,bezwijkproef}$  en maximaal gemobiliseerde wrijvingsweerstand  $\tau_{mob,max}$  kunnen beide deelwaarden van de paalklassefactoren  $\alpha_{t,1}$  en  $\alpha_{t,2}$  als volgt worden afgeleid:

- $\alpha_{t,1} = 5 \cdot \tau_{mob,max} \cdot 10^{-3} / (80 + q_{c,z,gem,bezwijkproef})$  (typen A,B,C,E)
- $\alpha_{t,1} = 5 \cdot \tau_{mob,max} \cdot 10^{-3} / (60 + q_{c,z,gem,bezwijkproef})$  (type D)
- $\alpha_{t,2} = \alpha_{t,1} / 5$

Waarin de wrijvingsweerstand  $\tau_{mob,max}$  in kPa en de gemiddelde gemeten conusweerstand  $q_{c,z,gem,bezwijkproef}$  in MPa.

Voorbeeld ter illustratie:

Uit een bezwijkproef op een ankerpaal type B zijn de volgende resultaten verkregen:

- gemiddelde uiterste netto testbelasting (met  $k_s \leq 2,0$  mm)  $F_{test,max} = 1.990$  kN
- lengte verankeringslichamen verloren proefpalen:  $L_a = 5,5$  m
- diameter verankeringslichamen:  $\varnothing_s = 250$  mm
- GEWI®/SAS-staaf:  $\varnothing = 75$  mm

- gemiddeld gemeten conusweerstand:  $q_{c;z;gem} = 35,0$  MPa
- gemiddeld maximaal gemobiliseerde wrijvingsweerstand:  $\tau_{mob;max} = 460$  kPa

De (nog niet genormaliseerde) deelwaarden van de paalklassefactoren worden hiermee:

$$\alpha_{t;1;proef} = 5 \times 460 \times 10^{-3} / (80 + 35) = 0,0200$$

$$\alpha_{t;2;proef} = 0,0200 / 5 = 0,0040$$

NB. Voor toelichting omtrent de genormaliseerde waarden wordt verwezen naar het 1<sup>e</sup> artikel in het juni-nummer van Geotechniek.

### Consequentie voor berekening schachtwrijving

Het uitgangspunt dat bij afname van de conusweerstand ook de wrijvingsweerstand lager wordt, heeft na het doen van bezwijkproeven in zand met hoge gemeten conusweerstand gevolgen voor de berekening van de schachtwrijving bij op trek belaste ankerpalen:

In de formule

$$\int_0^{L_a} (O_p \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot \alpha_t \cdot q_{c;z;ontgr} / (\xi \cdot \gamma_{st} \cdot \gamma_{m;var;q_c})) dz$$

moet het product  $\alpha_t \cdot q_{c;z;ontgr}$  (=  $\tau$ ) worden vervangen door

$$\alpha_{t;1} \cdot q_{c;knik} + \alpha_{t;2} \cdot (q_{c;z;ontgr} - q_{c;knik})$$

indien  $q_{c;knik} < q_{c;z;ontgr} \leq q_{c;a}$

respectievelijk  $\alpha_{t;1} \cdot q_{c;z;ontgr}$

indien  $q_{c;z;ontgr} \leq q_{c;knik}$

waarin:

$\alpha_{t;1}$  = paalklassefactor

indien  $q_{c;z;ontgr} \leq q_{c;knik}$

$\alpha_{t;2}$  = paalklassefactor

indien  $q_{c;z;ontgr} > q_{c;knik}$

$q_{c;knik}$  = 20 MPa ankerpaal type A, B, C en E  
15 MPa ankerpaal type D

$q_{c;z;ontgr}$  = de vanwege ontgraven gereduceerde conusweerstand in MPa

$q_{c;a}$  = de afsnuitwaarde, zijnde de

bij de bezwijkproef gemiddeld gemeten conusweerstand

$q_{c;z;gem;bezwijkproef}$  in MPa

Een ander gevolg betreft het afsnuiten van de al of niet vanwege ontgraven gereduceerde waarde van de conusweerstand:

- de oorspronkelijke afsnuitwaarden van 15 respectievelijk 20 MPa (afhankelijk van het type ankerpaal) worden, in verband met het geknikte verloop in de relatie tussen de conusweerstand en de wrijvingsweerstand, nu "knikpunten" genoemd;
- als "afsnitwaarde" wordt nu aangehouden de bij de uitgevoerde bezwijkproeven gemiddeld gemeten conusweerstand, ofwel

$$q_{c;a} = q_{c;z;gem;bezwijkproef}$$

(met  $q_{c;z;gem;bezwijkproef} > 15$  resp. 20 MPa).

Bij op druk belaste ankerpalen is een en ander analoog met  $\alpha_s = \alpha_t$ .

Voor een compleet overzicht van de verschillende situaties en randvoorwaarden omtrent de toe te passen paalklassefactor voor de schachtwrijving, is in de bijlagen van de herziene Richtlijn Ankerpalen een verzameltabel opgenomen.

### Knikstabiliteit van ankerpalen

In de 2<sup>e</sup> druk van de Richtlijn Ankerpalen was voor controle van de knikstabiliteit een empirische benadering opgenomen (methode Shields). Het betreft in beginsel een veilige ondergrens-benadering, maar is daarentegen ook sterk afhankelijk van de bijdrage van de groutschil rondom het stalen element. In de 2<sup>e</sup> druk stonden nog geen duidelijke aanbevelingen voor hoe met deze bijdrage moet worden omgegaan.

In de nieuwe versie van de richtlijn is voor de knikstabiliteit een meer nauwkeurige benadering opgenomen, gebaseerd op een door de TU München ontwikkelde methode. In een afstudeer-

onderzoek is die methode geverifieerd voor Nederlandse omstandigheden en waarin veiligheidsconform de vigerende Eurocode 3 (staal) en 7 (geotechniek) geïntegreerd zijn. Verder worden nu wel duidelijke aanbevelingen genoemd omtrent de bijdrage van de groutschil.

De nieuwe nauwkeurige berekeningsmethode bestaat uit twee componenten:

- De bepaling van de theoretische "Eulerse" elastische kracht met inachtneming van plaatsingsimperfecties ten gevolge van het vervaardigingsproces van de ankerpaal.
- De controle van de staalspanning aan de hand van Eurocode 3, i.e. de NEN-EN 1993-1-1 en NEN-EN 1993-5. In de vorige versies van de richtlijn ontbrak deze staaltoets.

### EULERSE ELASTISCHE KNIKKRACHT

Conform [1] kan de rekenwaarde van de elastische knikkracht bij een gegeven kniklengte voor een axiaal belaste ankerpaal in een statische belastingsituatie worden berekend met het volgende model:

$$N_{buc;d} = \frac{w_f \cdot \left(\frac{\pi}{L_{buc}}\right)^2 \cdot EI_s + p_{f;d} \cdot D_{eq} \cdot \left(\frac{L_{buc}}{\pi}\right)^2}{(w_f + e_0)}$$

Omdat de kniklengte in de praktijk kleiner kan zijn dan de dikte van het slappe lagen pakket moet de vergelijking worden opgelost voor oplopende waarden van  $L_{buc}$  totdat de minimumwaarde van de knikkracht wordt gevonden. Dit minimum is formeel gedefinieerd als de rekenwaarde van de kritieke elastische kracht  $N_{cr;d}$ . Het principe van de bepalingwijze van de kniklast is weergegeven in figuur 5. De resulterende kritieke elastische kracht  $N_{cr;d}$  dient vervolgens gehanteerd te worden als ingang voor de staaltoetsen conform Eurocode 3.

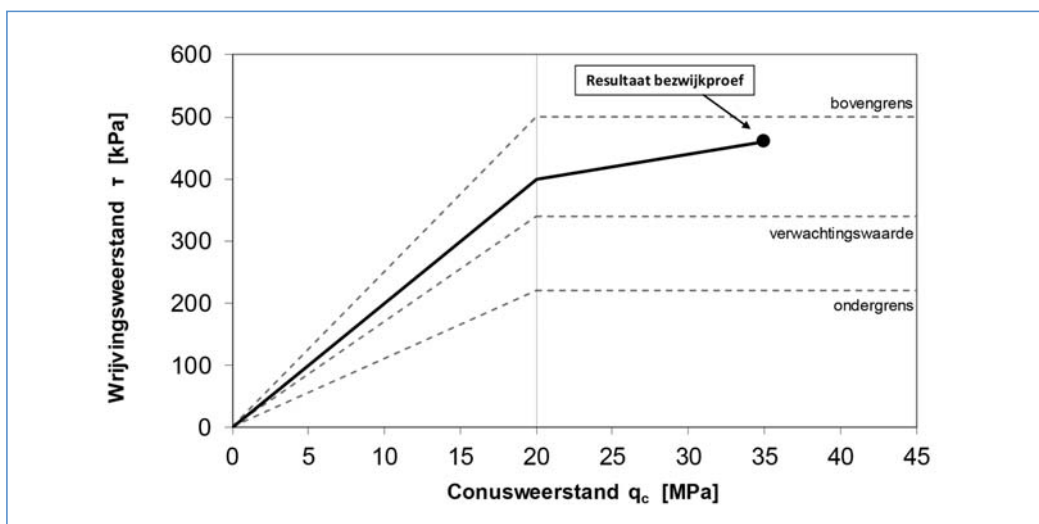
### CONTROLE STAALSPANNING

Na het bepalen van de kritieke elastische kracht moet deze waarde worden meegenomen in de sterktecontrole van het ankerstaal. Voor de ingang van de kniktoets van de NEN-EN 1993-1-1 artikel 6.3.1.1 is aangesloten op de grenswaarde uit de NEN-EN 1993-5. Hierin geldt dat bij optredende axiale belastingen groter dan 10% van de kritieke elastische kracht  $N_{cr;d}$  de staaldoorsnede moet worden getoetst op knik.

### AANDACHTSPUNTEN

Bij het gebruik van de nieuwe berekeningsmethode moet onderstaande worden bedacht:

- De knikcurven in Eurocode 3 zijn specifiek bedoeld voor constructiestaal. Op dit moment is er onvoldoende inzicht in het verloop van de knikcurven voor staalkwaliteiten en bewerkingsprocessen van staalsoorten die bij ankerpalen worden toegepast, maar aansluiten bij de bestaande kaders levert voor nu de beste oplossing.



Figuur 4 - Voorbeeld afleiden paalklassefactor  $\alpha_t$  in geval van bezwijkproef in zand met  $q_{c;z} > 20$  MPa.