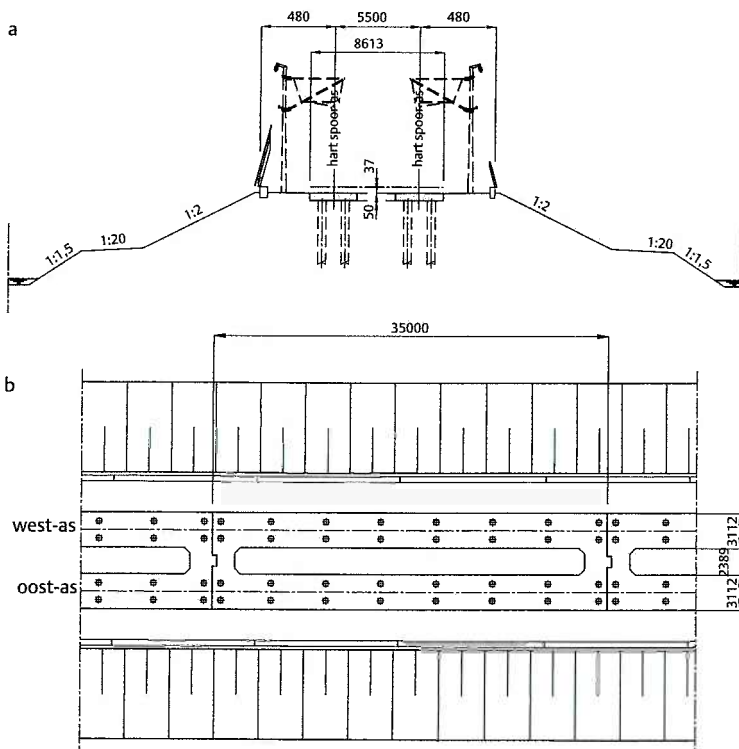


Ontwerp van de zettingsvrije plaat

ir. R.S. Beurze, HSL-Combinatie Zuid-Holland Midden/Delta Marine Consultants

ir. D.P. Heikoop, HSL-Combinatie Zuid-Holland Midden/Multiconsult

570 000 m³ grond, 17 000 m³ beton, 2400 ton wapeningstaal en 5500 prefab-betonpalen worden verwerkt in het projectdeel HSL Zuid-Holland Midden voor de aanleg van een hooggelegen zettingsvrije plaat over een lengte van 4,5 km even ten oosten van Zoetermeer. De zettingsvrije plaat is een op palen gefundeerde betonnen plaat die vanwege de slechte grondgesteldheid noodzakelijk is om de hsl binnen de gestelde comforteisen met hoge snelheid te laten rijden. De keuze voor een op ongeveer 4,5 m hoogte gelegen baan is gemaakt om wegen en watergangen op het huidige maaiveldniveau de baan te laten kruisen.



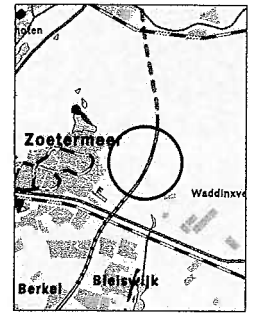
In figuur 1 is een typische doorsnede van de zettingsvrije plaat gegeven. Elk van de twee sporen is ondersteund door een plaat met een breedte van 3,1 m en een dikte van 0,5 m. De plaatmoten hebben een lengte van 35 m en zijn ter plaatse van de dilatatie aan elkaar gekoppeld door een dwarsbalk. Onder elk spoor bevinden zich acht palenrijen van twee verticale palen (prefab, vierkant 420 mm), dat wil zeggen totaal 32 funderingspalen per zettingsvrije plaat-

moot. Een speciale tandconstructie bij de dilatatievoeg zorgt ervoor dat kleine hoekverdraaiingen en langsvormingen door temperatuurschommelingen ongehinderd kunnen plaatshebben zonder dat een horizontale verschilverplaatsing tussen de moten kan optreden.

Bij de analyse van de zettingsvrije plaat hebben de interactieaspecten tussen grond en constructie een belangrijke rol gespeeld.

Hierbij moet gedacht worden aan het paalgroep-effect en aan de invloed van de reductie van de laterale stijfheid door de aanwezigheid van het talud van de ophoging.

Ter optimalisering van de uitvoering, waarbij de grote mate van repetitie opvalt, is veel aandacht besteed aan de detaillering van de wapening en vooral aan de aansluiting van de paalkopwapening met de plaat.



Ontwerpuitgangspunten

Raakvlak met spoorstelsel

De onderbouwconstructies (kunstwerken) en de bovenbouw (spoorstelsel) zijn opgedragen via separate contracten, waardoor het voor de opdrachtgever noodzakelijk was in het onderbouwcontract een aantal functionele eisen te definiëren waaraan de onderbouwconstructie moet voldoen ten behoeve van de bovenbouw.

Naast algemene eisen met betrekking tot sterkte en duurzaamheid, zijn hierin kenmerkend de strenge eisen die gesteld zijn met betrekking tot het dynamisch gedrag en de benodigde stijfheid van de onderbouwconstructie. Meer specifiek:

- de onderbouwconstructie moet geschikt zijn voor verschillende spoorstelsels die gedurende de levensduur kunnen worden toegepast. Hierdoor moet bij het ontwerp van de onderbouw rekening worden gehouden met verschillende sterkte- en stijfheidskarakteristieken van de spoorstelsels;
- de verticale acceleratie van een met 330 km/h passerende trein mag in verband met het reizigerscomfort niet meer zijn dan 0,7 m/s²;
- de verticale verschilverplaatsing ter plaatse van de voegovergang tussen de moten ten gevolge van de treinbelasting mag niet meer bedragen dan 0,75 mm;
- de horizontale verschilverplaatsing ter plaatse van de

1 | Zettingsvrije plaat in doorsnede (a) en bovenaanzicht (b)

voegovergang tussen de moten mag niet meer bedragen dan 0,9 mm.

Gegeven deze stringente vervormingseisen is een zeer gedegen analyse van de grond-constructie-interactie noodzakelijk. Hierbij is dit artikel beperkt tot de horizontale stijfheid en vervormingen.

Ophoogmateriaal van het baanlichaam

De afdracht van de horizontale krachten op de zettingsvrije plaat naar de ondergrond heeft plaats via de aardebaan. In het HSL-cluster Zuid-Holland Midden is voor het ophoogmateriaal gekozen voor het toepassen van vrijkomende grond uit depots en andere projectdelen. De vereiste sterkteparameters van dit ophoogmateriaal kunnen tot op zekere hoogte door de ontwerper worden gekozen. Echter, stringenter eisen geven minder mogelijkheden voor het hergebruik van vrijkomende grond. In het ontwerp is uitgegaan van een karakteristieke gedraineerde hoek van inwendige wrijving variërend van 28 tot 32° met een cohesie van 4 tot 5 kPa.

De toegepaste grond werd vooraf getoetst aan bovenstaande sterkte-eisen door middel van beproeving bij een voorgeschreven verdichting. Vervolgens is de in-situ verdichtingsgraad van het aangebrachte ophoogmateriaal geverifieerd met proctorproeven.

Ontwerpfilosofie grond-constructie-interactie

Bij aanvang van het project is besloten de analyse van de betonconstructie uit te voeren met een lineair eindige-elementenprogramma. Het is echter ook duidelijk dat complexe en niet-lineaire interactieaspecten tussen grond en constructie van de zettingsvrije plaat een belangrijke rol spelen. Dit heeft geleid tot een splitsing in drie hoofdberekeningen:

- bepaling van de buigende momenten in de funderingspalen door de horizontale grondbelasting ten gevolge van de restzetting van de ophoging (fig. 2). Deze momenten worden in het paalontwerp opgeteld bij de momenten uit de constructieberekening;
- funderingsanalyse waarin de paal-grond-paal-interactie, inclusief de effecten van de taluds van de ophoging, beschouwd is ter bepaling van equivalente dummypalen. Een equivalente dummypaal is een lineair element zonder grondveren dat onder gelijke paalkopkrachten dezelfde verplaatsingen van de paalkop geeft als de funderingspaal in het grondmodel (zie verder);
- ontwerp van de betonconstructie waarin de stijfheid van de fundering gemodelleerd is

met behulp van equivalente dummypalen.

De laatste twee stappen zijn verder uitgewerkt in het ontwerpschema zoals in figuur 3 is weergegeven. De hoofdonderdelen hiervan worden hierna nader toegelicht.

Funderingsanalyse

Vanwege de verticale palen is de horizontale stijfheid van de zettingsvrije plaat direct afhankelijk van de steundruk van de bovenste meters van de aardebaan. De paal-grond-paal-interactieanalyse is uitgevoerd met een programma bekend vanuit de offshore-industrie voor het analyseren van paalgroepen (SPLICE).

Aangezien dit programma uitgaat van een horizontaal grondniveau, is de invloed van het talud verdisconteerd in een reductie van de toelaatbare horizontale druk in het last-verplaatsingsdiagram (p-y-curve) van de grond.

De invloed van het talud op de stijfheid van de palen is afhankelijk van de afstand van de paal tot de rand van het talud en is weergegeven in figuur 4.

De stijfheid van de paalgroep, inclusief de paalgroep- en taludeffecten, is ongeveer 66% van de som van de stijfheid van de afzonderlijke palen.

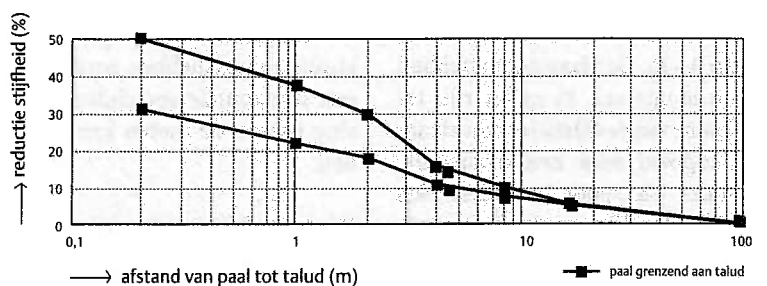
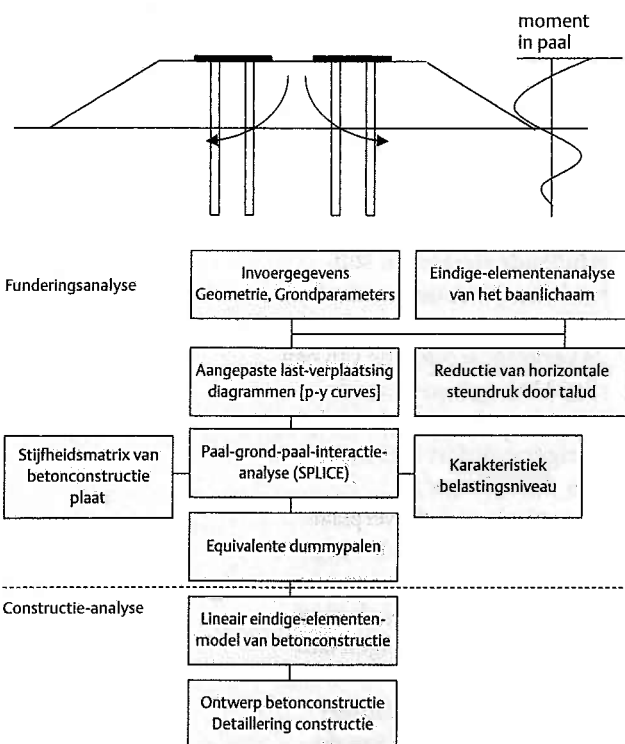
De resultaten van de funderingsanalyse worden vervolgens gebruikt voor het afleiden van de dummypalen.

Constructieanalyse

In de lineair eindige-elementenberekeningen van de betonnen plaat worden de funderingspalen geschematiseerd door dummypa-

2 | Horizontale grondbelasting op palen

3 | Funderings- en constructieanalyse



4 | Invloed van talud van baanlichaam

len. De dummypalen zijn ingeklemd aan de paalpunt en hebben een zodanige lengte en stijfheid dat de werkelijke stijfheid van de fundering zo goed mogelijk gemodelleerd wordt. Het voordeel van dummypalen ten opzichte van veren, direct verbonden met de plaat, is dat bij dummypalen de koppeling tussen horizontale krachten en hierdoor optredende buigende momenten in de paalkop wordt gemodelleerd.

Equivalente dummypaal

Bij de bepaling van de equivalente dummypaal worden de paalkopkrachten en paalkopverplaatsingen gebruikt uit de funderingsanalyse (fig. 5).

Voor de x-richting is vanuit de mechanica af te leiden dat bij kleine hoekverdraaiingen van de paalkop (hetgeen het geval is voor de zettingsvrije plaat), de equivalente lengte en buigstijfheid worden gevonden uit:

$$l_{eq;x} = \frac{2 M_{yy}}{F_x}$$

en

$$EI_{eq;x} = \frac{2 M_{yy}^3}{3 \delta_x F_x^2}$$

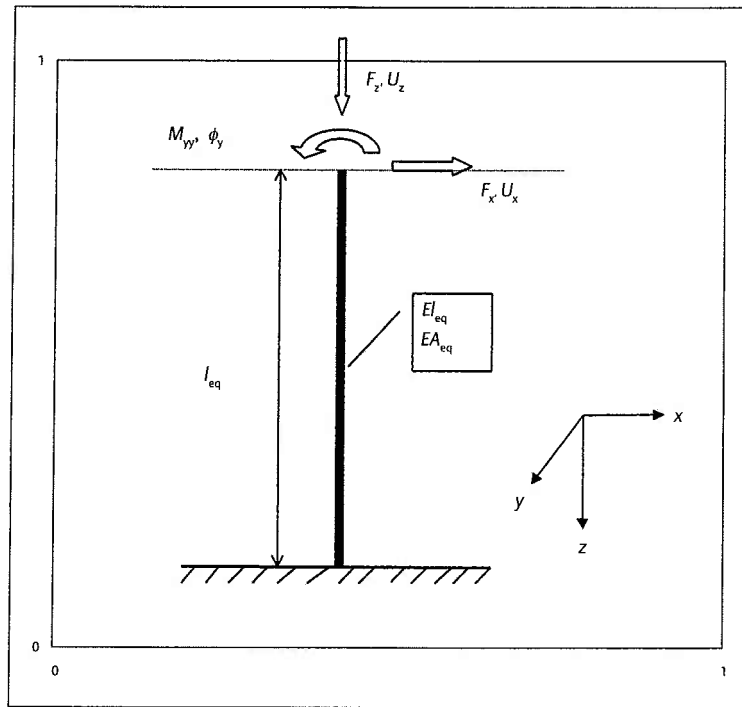
en voor de y-richting uit:

$$l_{eq;y} = \frac{2 M_{xx}}{F_y}$$

en

$$EI_{eq;y} = \frac{2 M_{xx}^3}{3 \delta_y F_y^2}$$

In het eindige-elementenmodel worden de gemiddelde equivalente lengte en de berekende buigstijfheden in x- en y-richting gebruikt. Aangezien de dummypaal een lineaire benadering is van het niet-lineaire paalgedrag, is het belangrijk dat het goede belastingsniveau in de funderingsanalyse wordt gebruikt. Er worden in de gebruiksanalyse en de bezwijkanalyse dan ook verschillende equivalente dummypalen gehanteerd.



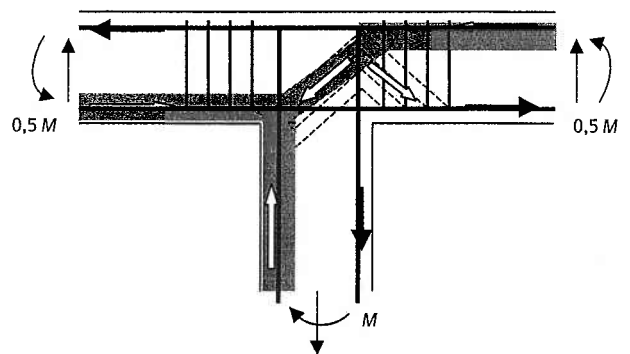
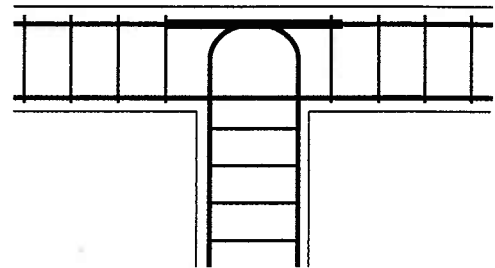
5 | Model equivalente dummypaal

Specifieke details

Paalkop-plaataansluiting

Een van de specifieke details in het ontwerp van de zettingsvrije plaat is de aansluiting van de paalkop met de betonnen plaat. Het is een belangrijk detail voor zowel de krachtsafdracht als de optimalisering van de uitvoering. Een bekend detail voor de aansluiting van een kolom met een balk is zoals weergegeven in figuur 6. Hierbij wordt de paalwapening omgebogen en gevlochten met de bovenwapening. Alhoewel deze oplossing uitstekend is voor de krachtsafdracht van buigende momenten, is het vereiste arbeidsintensieve vlechtwerk een nadeel van deze oplossing.

Voor de zettingsvrije-plaatconstructie is ervoor gekozen de prefab voorgespannen palen met zachtstaal-kopwapening te snellen en vervolgens de rechte zachtstaal-stekken op te nemen in de zettingsvrije plaat tot het bovennet. De krachtsafdracht is weergegeven in figuur 7. De onderwapening loopt over de paalkop heen en de dwarskrachtwapening wordt voldoende dicht bij de paalkopwapening geplaatst om een goede krachtsafdracht te garanderen.



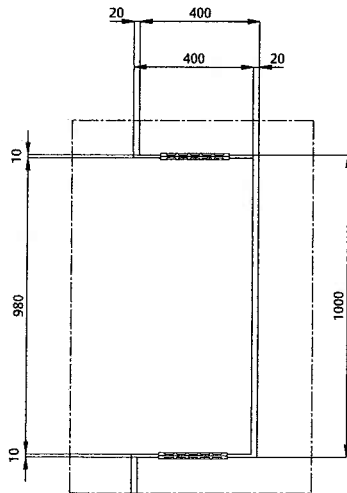
Tandconstructie

De moten van de zettingsvrije platen dienen horizontaal gekoppeld te worden om aan de gestelde vervormingseisen te kunnen voldoen. De koppeling dient langsvormingen en kleine hoekverdraaiingen mogelijk te maken, waarbij de horizontale verschuivingsverplaatsingen tussen de moten, ten gevolge van bijvoorbeeld de

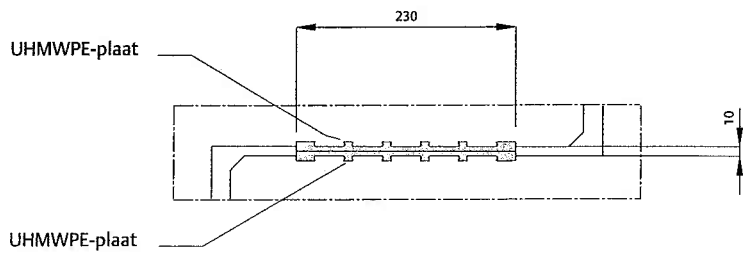
6 | Aansluiting paalkop-plaat met omgebogen wapening

7 | Aansluiting paalkop-plaat met rechte stekken

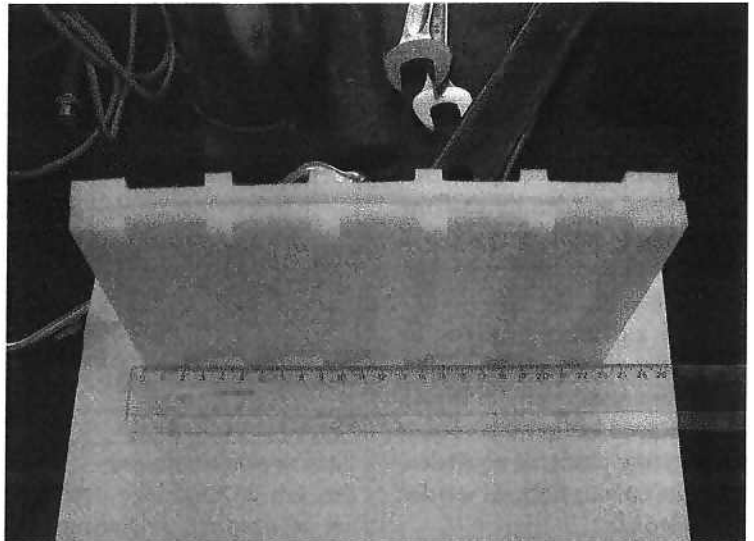
8 | Horizontale doorsnede tandconstructie



9 | UHMWPE-plaat in horizontale doorsnede tandconstructie



10 | Proefopstelling UHMW PE-plaat



horizontale stoot van de trein of de middelpuntvliedende kracht, beperkt blijft tot 0,9 mm. Er is een aantal varianten beschouwd, onder meer een stalen nokconstructie, waaruit uiteindelijk een tandconstructie bekleed met UHMWPE-materiaal als technisch en economisch meest aantrekkelijke naar voren kwam. De tandconstructie tussen de moten is gepositioneerd ter plaatse van de middenbalk zodat dit geen beperking geeft ten aanzien van de bovenbouw en het inspecteerbaar is. De tandconstructie is weergegeven in figuur 8. Het UHMWPE-materiaal (fig. 9, ook wel bekend onder de merknaam Hakorit) heeft een hoge stijfheid

(1 GPa in compressie) bij een zeer lage wrijvingscoëfficiënt (0,1 – 0,2). Het materiaal is getest bij TNO op bezwijkkracht, kruipgedrag en vermoeiing (foto 10). De nokconstructie met plaatafmetingen 230 x 375 mm² is geschikt om een horizontale kracht (uiterste grenstoestand) van ruim 600 kN

over te dragen. De verwachte verschilverplaatsing bij deze belasting zal kleiner zijn dan 0,2 mm.

Ten slotte

Het ontwerp van de hooggelegen zettingsvrije plaat kent enkele bijzondere ontwerpaspecten, waaronder de interactie tussen de grond en de fundering van de constructie. Het in het artikel beschreven ontwerpproces en de aandacht die gegeven is aan enkele specifieke ontwerpdetails, hebben geleid tot een economisch en uitvoeringstechnisch verantwoord ontwerp van de zettingsvrije plaat, dat voldoet aan de gestelde eisen. ■

Wegen en watergangen kunnen de hoog gelegen baan op zettingsvrije plaat op maaiveldniveau kruisen

