



**ir. W.P. Munsterman**  
Adviseur Geotechniek GWW –  
Comol5 / Arthe civil & structure b.v.



**ing. N. Kalle**  
Teamleider Geotechniek GWW –  
Comol5 / Arthe civil & structure b.v.



**ir. B. Lietaert**  
Adviseur Geotechniek GWW –  
Comol5 / Dredging International

# TUNNELLOGISTIEK OP EN NAAST EEN PAALMATRAS IN DE POLDER

## Inleiding

Voor het door Comol5 te realiseren Knooppunt Hofvliet, de verbinding van de nieuwe N434 met Rijksweg A4, zijn drie hoge terpen benodigd om de N434, met behulp van twee Fly-overs (KW20 en KW21), over de A4 te laten kruisen. In figuur 1 is de locatie van het Knooppunt Hofvliet weergegeven. Vanaf de Startschacht (KW17)/Toerit-oost (KW18) (aan de westzijde) tot het Knooppunt Hofvliet (aan de oostzijde) zijn tevens een Werkterrein, voor de realisatie van de Startschacht/Toerit-oost, en het Tunnellogistiek terrein op de slappe bodem gerealiseerd. De bodem ter plaatse van de Oostvliet-, Hof- en Spekpolder bestaat uit lagen veen en humeuze klei met op sommige locaties een

totale dikte van 10 m, zie figuur 2. Bovendien is er hier sprake van een tussenzandlaag. De combinatie van een maximale ophoging van 9 m voor de terp aan de westzijde van het knooppunt, de uitdagende uitvoeringsplanning en zeer slappe bodembouw heeft ervoor gezorgd dat ter plaatse van de hoogste delen van de terpen paalmatrasen toegepast worden. Het als eerste gerealiseerde Paalmatras Hofvliet-West dient tevens als fundering voor een Slurry Treatment Plant (STP), die benodigd is voor het boren van de tunnels (N434). De STP behandelt de vrijgekomen grond, die door een boorspoeling wordt getransporteerd uit de TBM. Deze paalmatras Hofvliet-West is de grootste paalmatras, naast de twee overige te realiseren paalmatrasen,

die zich ter plaatse van de bestaande A4 bevinden, aan de noord- en zuidoostzijde van het Knooppunt Hofvliet.

Dit artikel behandelt naast de toegepaste risicobenadering en observational method, de ontwerp-kwaliteit en het ontwerp en de realisatie van het Werkterrein, het Tunnellogistiek terrein en de Paalmatras Hofvliet-West.

## Risicobenadering en Observational method

De door de opdrachtgever voor de aanbesteding onderkende hoofd risico's (EMVI-criteria) zijn:

- Percelen zijn niet (tijdig) beschikbaar voor start werkzaamheden;
- Schade aan bestaande of nieuwe constructies, dan wel ongemak door weggebruiker, door slechte bodemgesteldheid/zettingen ter plaatse van Knooppunt Hofvliet.

Tevens is voorafgaand aan de werkzaamheden een inventarisatie van de overige van toepassing zijnde risico's gemaakt.

De monitoring is opgezet door het ontwerpteam gedurende het opstellen van het ontwerp.

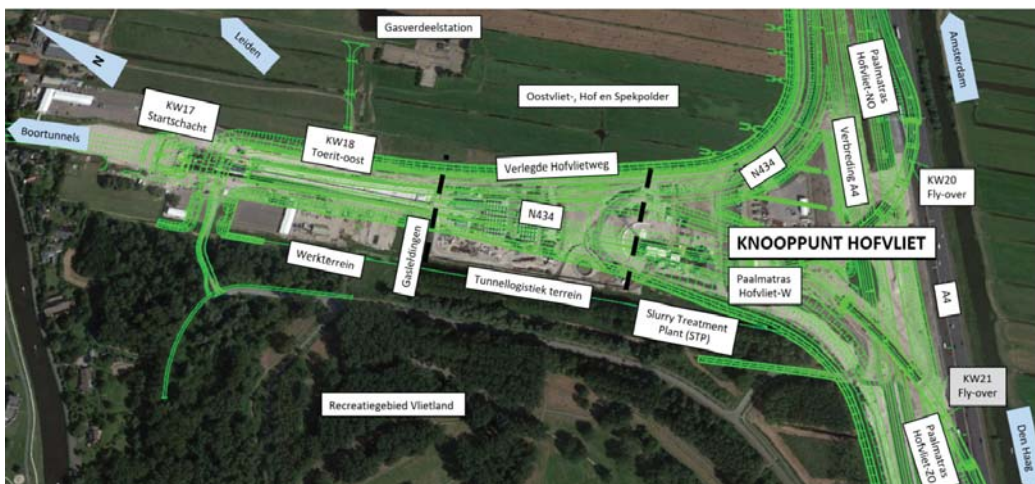
De site-engineering (uitvoeringsbegeleiding) maakte tevens onderdeel uit van het ontwerpteam om de lijnen zo kort mogelijk te houden.

Voor en gedurende de uitvoering van de ophoogwerkzaamheden werd in nauw overleg binnen Comol5 (ontwerp en realisatie) besloten om waar nodig bij te sturen in het ontwerp naar aanleiding van de actuele situatie gedurende de realisatie:

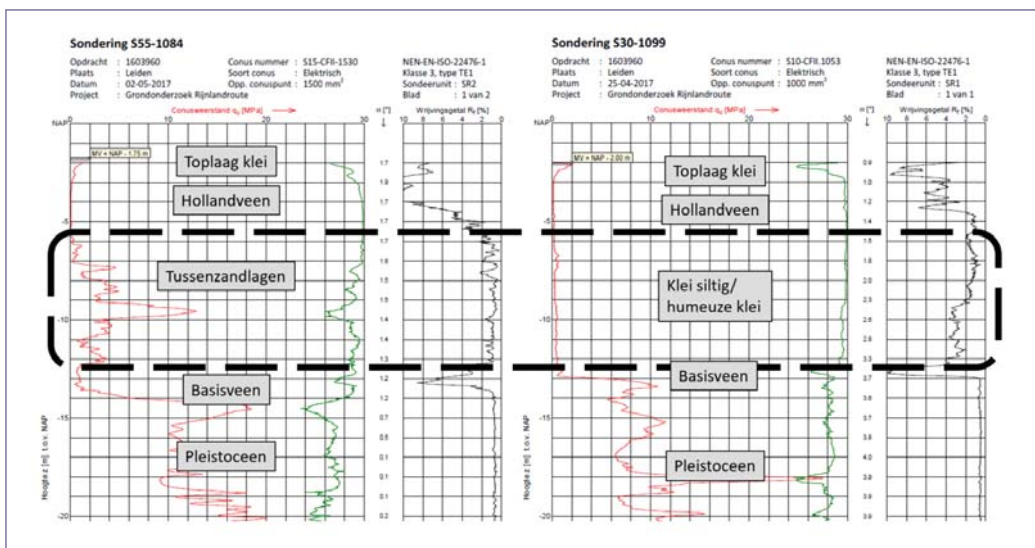
- Het herzien van de veiligheidsbenadering voor de beschouwing van de stabiliteit van de ophoogslagen;
- Het bepalen op basis van evaluatie van de zakbakenmetingen of er wordt voldaan aan de restzettingseisen en hierop anticiperen voor kritieke locaties in de uitvoeringsplanning;
- Het bijstellen van het geotechnisch ontwerp, naar aanleiding van de herziening van de grondparameters, op basis van de resultaten van het aanvullend laboratoriumonderzoek (stabiliteit en zetting).

## Kwaliteit geotechniek

Voor de kwaliteitsborging van het geotechnisch ontwerp is door Deltares een audit ten aanzien van geotechniek en het geotechnisch risicomanagement voor een aantal specifiek onderdelen uitgevoerd. Het doel van deze zogenaamde GeoRisico-Scan 2.0 was het behalen van het 'Geo-OK+-label, die als maatstaf dient voor de kwaliteit van het



**Figuur 1** – Overzicht ontwerp eindsituatie Knooppunt Hofvliet (A4-N434) in relatie tot de Tunnellogistiek. (Bron: Google Earth)



**Figuur 2** – Sonderingen ter plaatse van Knooppunt Hofvliet met en zonder tussenzandlagen.

## SAMENVATTING

Voor het realiseren van boortunnels is Tunnellogistiek van groot belang. Uitdagend was de aanleg van een Tunnellogistiek terrein in een polder met zeer slappe bodemopbouw. Het terrein bestaat uit vele constructies met hieraan gestelde eisen. Integrale samenwerking binnen de disciplines - tunnel, kunstwerken, realisatie en GWW - is belangrijk gebleken en heeft geleid tot een goed

functionerend Tunnellogistiek terrein. Er is voor gezorgd dat alles volgens uitvoeringsplanning gereed was en de risico's en raakvlakken zijn goed beheerst. Op dit moment functioneert het paalmatras deels nog als fundering van een Slurry Treatment Plant. Begin 2022 worden de aardebanen gerealiseerd, zodat uiteindelijk het verkeer erover kan rijden.

Georiscomanagement in het project.

Hiervoor zijn onder andere het Geotechnisch Basisrapport met grondonderzoek en grondparameters, het Definitief en Uitvoeringsontwerp voor de maatgevende hoge terpen en het monitoringsplan beoordeeld.

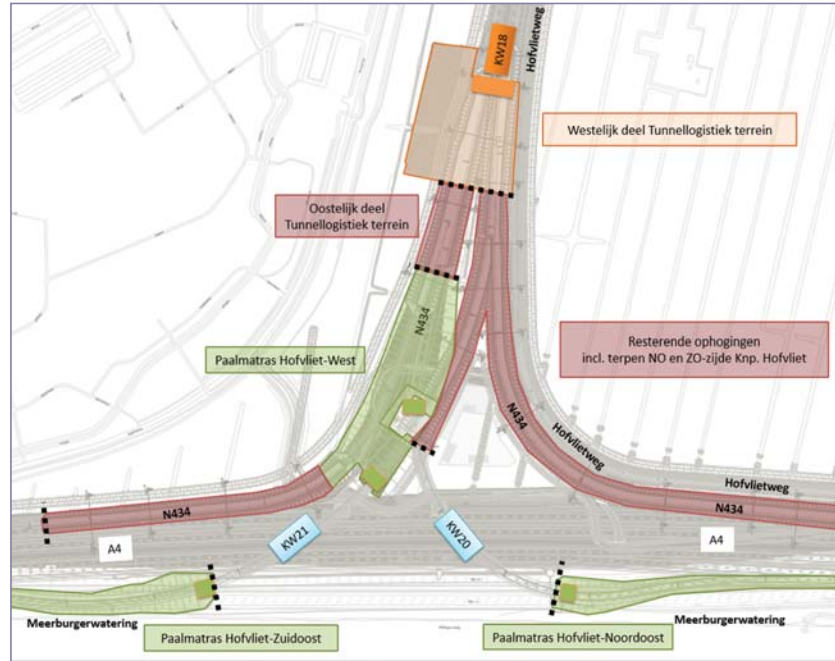
De gevolgde processtappen en vastlegging van de inhoudelijke beheersing zijn voor het project aantoonbaar correct uitgevoerd, waarmee de hoogste score van het "Geo-OK+-label" is behaald.

### Werkterrein Startschacht (KW17)/Toerit-oost (KW18) en werkwegen

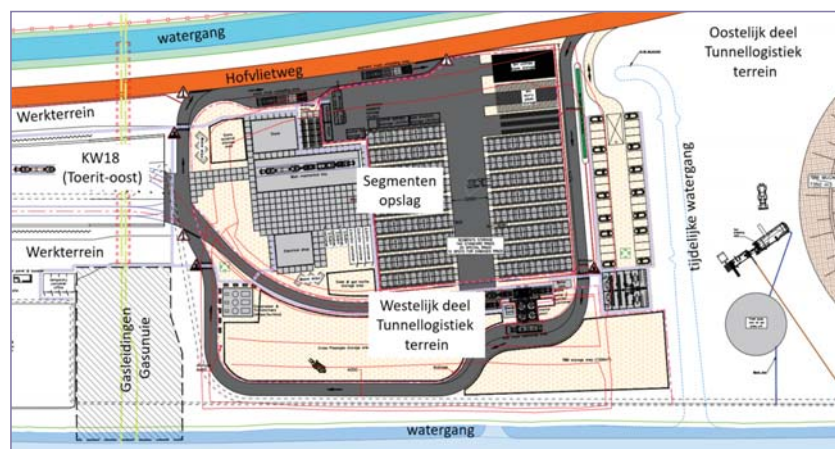
Voor het realiseren van de Startschacht, ten behoeve van de tunnelboormachine, en Toerit-oost zijn onder andere een werkterrein, opslagterreinen, keten en werkwegen gerealiseerd. De draagkracht, stabiliteit en zettingen zijn beschouwd voor de diverse belastingen, waaronder een diepwand- en ankerpalenstelling (maximaal 170 ton). Hiervoor is gedurende een periode van 3 maanden het terrein voorbelast. Hierbij is rekening gehouden met de gebruikperiode van het werkterrein, de waterkerende functie van de diepwand (restzettingseis van 0,10 m in verband met de sleufstabiliteit en benodigde hoogte) en de benodigde drooglegging van 0,7 m. De drooglegging is van belang voor de maximaal toegestane restzetting van het terrein. De kraan voor het inhijzen van het TBM-graafwiel stond op een op palen gefundeerde vloer.

Er is bij het ontwerp van de diepwand en damwand rekening gehouden met het raakvlak bestaande uit de beoordeling van de invloed van het aangelegde werkterrein (verticale en horizontale belasting).

Vanwege de werkzaamheden voor een te realiseren overkluizing voor twee te verleggen Gasleidingen (12" en 30") kon het werkterrein voor de Toerit-oost niet direct in zijn geheel worden aangelegd. In een relatief laat stadium is onder hoge tijdsdruk zodoende de oostelijke uitbreiding van het werkterrein gerealiseerd. Hiervoor is de invloed op de Gasleidingen met behulp van D-Settlement en Plaxis 2D beschouwd en getoetst aan de door de Gasunie vastgestelde verplaatsingscriteria. Het grondgedrag is in Plaxis 2D gemodelleerd met het model Hardening soil en er is rekening gehouden met het tijdsafhankelijk gedrag van de grond (klei en veen). Tevens is de stabiliteit van de ophogingen in Plaxis 2D beschouwd. De indeling van het Werkterrein en Tunnellogistiek terrein zijn op basis van de berekeningsresultaten aangepast. In eerste



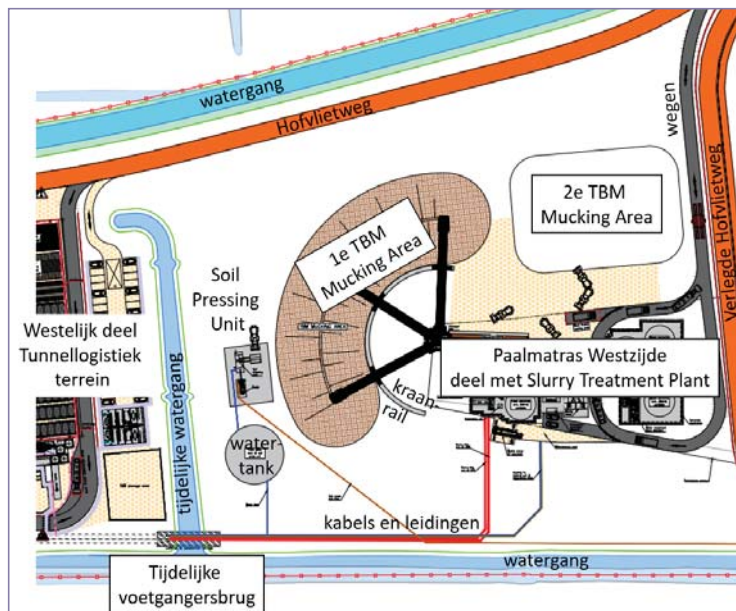
**Figuur 3 –** Overzicht met beschouwde delen aardebaan (schematische weergave).



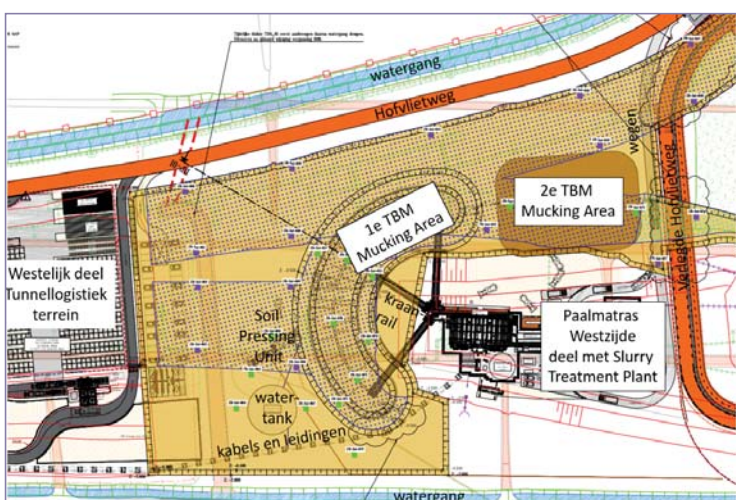
**Figuur 4 –** Overzicht indeling Westelijk deel Tunnellogistiek terrein.



**Figuur 5 –** Overzicht voorbelastingsmaatregel Westelijk deel Tunnellogistiek terrein.



**Figuur 6 –**  
Overzicht indeling  
Oostelijk deel  
Tunnellogistiek  
terrein.



**Figuur 7 –**  
Overzicht  
voorbelastings-  
maatregel  
Oostelijk deel  
Tunnellogistiek  
terrein.

instantie was namelijk een opslag met een relatief zware belasting nabij de gasleidingen gepland.

### Tunnellogistiek terrein met TBM Mucking areas

Voor het boren van de tunnels is een Tunnellogistiek terrein tussen de Toerit-oost (KW18) en het paalmatras Hofvliet-West (zie figuur 3) gerealiseerd. Op het terrein bevindt zich alle benodigde logistiek voor het tunnelboren, waaronder tevens een aantal werkwegen. Er werden criteria ten aanzien van de tunnelsegmentenopslag, loods, keet, water-tank, waterdepot, hydraulisch transportleidingen en cementfabriek gesteld. Het terrein heeft bijvoorbeeld een gebruiksduur van 2 jaar, de restzetting en restzettingsverschillen van de segmentenopslag dienen beperkt te zijn, het terrein dient voldoende draagvermogen voor de verschillende belastingen te bieden en er dient rekening te worden gehouden met de rijbanen van de N434 in de eindsituatie.

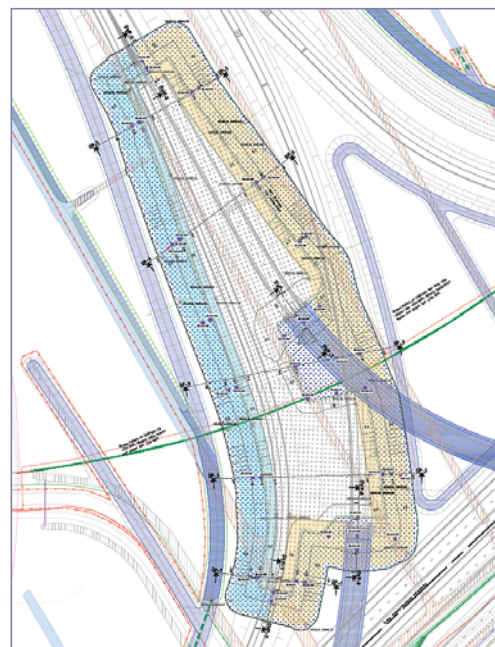
Het westelijk deel van het Tunnellogistiek terrein (zie figuur 4) is meer dan 8 maanden voorbelast met deels verticale drainage (zie figuur 5). Deze maat-

regelen waren benodigd om aan de restzettingseisen van de N434 in de eindsituatie te voldoen. Het terrein is hierbij verdeeld in 5 gebieden met verschillende uiteindelijk rustende belastingen en restzettingseisen. Voor deze gebieden zijn ophogingen met totale hoogten variërend van 3 tot 6 m zand aangebracht (inclusief voorbelasting). De benodigde ophogingen voor de eindsituatie zijn 1 tot 3 m. Er zijn zettingen van meer dan 2 m opgetreden.

De indeling van het Tunnellogistiek terrein (waaronder locatie wegen, depots en tunnelsegmentenopslag) is in overleg met ontwerp geotechniek afgestemd. Voor het ontwerp waren tevens de stabiliteit en de drooglegging van het terrein van belang.

Er is daarnaast rekening gehouden met de invloed van de voorbelasting op de in aanbouw zijnde constructie van Toerit-oost (KW18). De horizontale en verticale belastingen op de gerealiseerde funderingspalen zijn hiervoor beschouwd.

Voor de cementfabriek is gezien de 4 silo's met een hoogte van meer dan 28 m (grote belastingen door onder meer wind) ervoor gekozen deze te funderen



**Figuur 8 –**  
Overzichtstekening  
van de ringdijk met  
voorbelasting  
rondom het  
paalmatras.

op palen. Uiteindelijk zijn deze cementfabriek en de Slurry Treatment Plant gefundeerd op het paalmatras de enigste constructies, die niet zijn gefundeerd op staal.

Het oostelijk deel van het Tunnellogistiek terrein wordt gebruikt voor twee zogenaamde TBM Mucking Areas (grond- en stenendepots met verschillende korrelgrootten), die vrijkomen uit de op het paalmatras Hofvliet-West gefundeerde Slurry Treatment Plant (zie figuur 6). Ter plaatse van de TBM Mucking Areas wordt de geboorde grond tijdelijk opgeslagen voordat deze verder wordt afgevoerd.

De TBM Mucking Area I, voor zandig materiaal, heeft in het bovenaanzicht de vorm van een banaan vanwege de roterende transportband (conveyer belt), die de grond aanvoert. De hoogte hiervan is maximaal 6 m (in een driehoekige vorm). Het materiaal van de TBM Mucking Area I wordt na verloop van tijd getransporteerd naar de nabij gelegen Meeslouwerplas. Ter plaatse van TBM Mucking Area I is in een korte periode voorbelasting inclusief verticale drainage toegepast (zie 7). Deze voorbelasting is aangebracht om de stabiliteit van het depot gedurende het relatief snel storten, gedurende het tunnelboren, te kunnen garanderen.

TBM Mucking Area II voor keien, grind en de fijne fractie uit de centrifuge-units van de Slurry Treatment Plant, is kleiner qua oppervlakte en beduidend minder hoog dan TBM Mucking Area I. Hiervoor was geen maatregel benodigd.

Tevens zijn op het terrein een Mixing unit (mengeenheid), Soil pressing unit (grondpers) en Water-tank gerealiseerd.

Voor het ontwerp van de tunnellogistieke constructies zijn de draagkracht, stabiliteit, zetting,

drooglegging, belastingen op de funderingspalen voor de transportband en de invloed op het naastgelegen paalmatras beschouwd.

Het oostelijk deel van het tunnellogistiek terrein zal na de realisatie van de boortunnels plaatsmaken voor de resterende voorbelasting (tot 5 m hoogte) ten behoeve van de rijbanen van de N434.

## Paalmatras Hofvliet-West met Slurry Treatment Plant

### VOORBELASTING

Er is uitgegaan van de toepassing van paalmatrasen voor ophogingen groter of gelijk aan 4,5 m (figuur 9). Dit betekent dat de terpen voor de aardebanen zijn voorbelast voor ophogingen kleiner dan 4,5 m. Deze ophogingen bevinden zich zowel in de aansluitingen op het paalmatras in de lengterichting als de taluds in de dwarsrichting van de aardebaan (flanken paalmatras). Om ervoor te zorgen dat de horizontale verplaatsing van de cohesieve lagen ter plaatse van de eerste palenrijen binnen de perken blijft, is rondom het paalmatras een voorbelasting (inclusief verticale drainage) in de vorm van een 'ringrij' toegepast met een hoogte van 6 m (figuur 10). Ter plaatse van het westelijke landhoofd van de fly-over KW20 was de voorbelasting echter 10 m hoog. Deze ring-

dijk met voorbelasting heeft 3 maanden zettingen geforceerd (figuur 8).

Aangezien uit het grondonderzoek bleek dat de dimensies en consistentie van de zandlaag erg grillig zijn is de ligging van deze zandlaag in kaart gebracht. Het bleek dat in het Holocene pakket er een aantal zandlagen elkaar afwisselden c.q. in elkaar overliepen: ten eerste een zogenaamde tussenzandlaag (i.e. jonge wadafzettingen op circa NAP-6,0 m tot NAP-10,0 m, zie figuur 2) die uitwigt ter plaatse van het paalmatras (figuur 11). Tevens was er een diepere zandlaag met relatief lage qc-waardes (< 10MPa) aangetroffen, voornamelijk tussen NAP-10 m en NAP-16 m. Deze zandlaag maakt onderdeel uit van oudere Holocene wadafzettingen, die hier en daar zeer diepe geulen (tot NAP-18 m) in het meer vastgepakte Pleistocene zand (met een gemiddeld niveau op NAP-13 m) hebben uitgesleten.

Deze heterogeniteit van de geologie en de hoogte van de ophogingen (groter of gelijk aan 4,5 m) ter plaatse van het paalmatras zijn gecombineerd in Figuur 11.

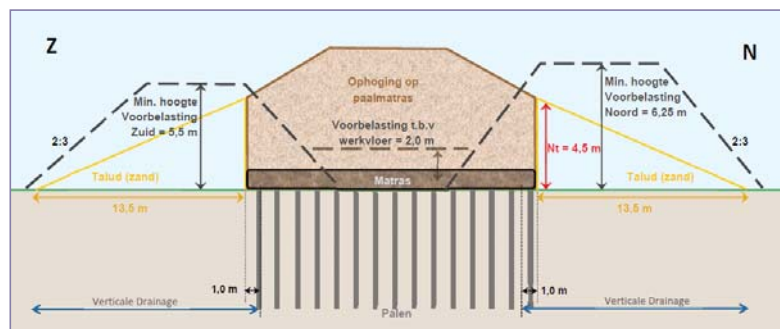
Na deze variabelen te hebben gecombineerd is het oppervlak van het paalmatras in 7 kwadranten opgedeeld met elk een eigen ontwerpniveau en dus maximale ophoging (variërend van 3,2 tot 9,5 m). Bij de bepaling van de verticale draagkracht van de geprefabriceerde betonpalen heeft elk

kwadrant een uniform paalpuntniveau en dus paallengte verkregen. Bij een orthogonaal stramien met een hart op hart-afstand van 2,25 m, waarvan de stramienlijnen parallel tot semi-parallel aan de bovenliggende wegassen zijn ontworpen, zijn bovendien voor elk kwadrant de bijbehorende sterktes van de geokunststofwapening in zowel de lengterichting als de dwarsrichting ontworpen (figuur 14).

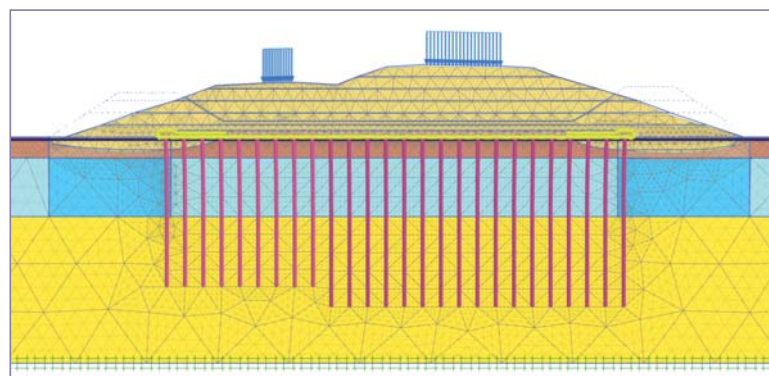
In totaal heeft het Paalmatras Hofvliet-West 2.540 stuks palen en een oppervlakte van 12.173 m<sup>2</sup>. Bovendien is er circa 4,0 km geotextiel in de dwarsrichting en 3,4 km geogrid in de lengterichting aangebracht.

### Slurry Treatment Plant

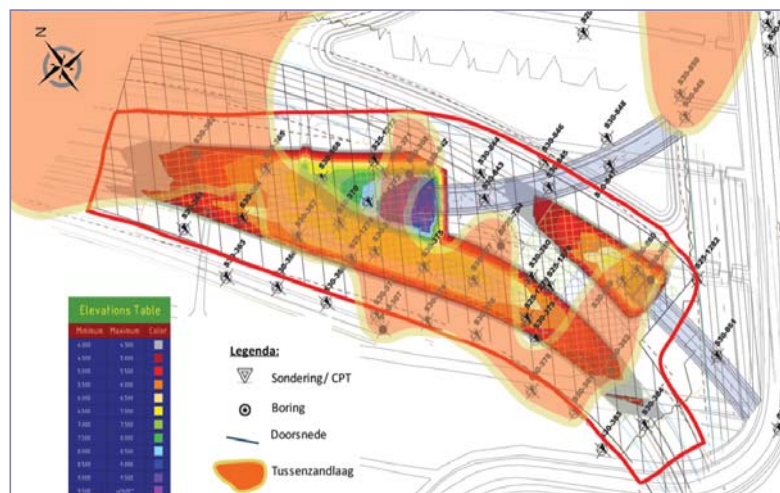
Ter plaatse van de westzijde/tunnelzijde van het paalmatras Hofvliet-West dient, gedurende het boren van de tunnelbuizen door de TBM, een Slurry Treatment Plant (STP) in bedrijf te zijn. Aangezien deze uit zware onderdelen bestaande installatie op een zettingsvrij oppervlak dient te staan, is ervoor gekozen om de STP op het paalmatras te installeren. De locatie van de STP op het paalmatras is in figuur 12 aangegeven met een zwart gestippelde lijn. Tijdens het ontwerp is geverifieerd of de belastingen van de afzonderlijke zware STP-onderdelen, zoals hoge silo's (bentoniet- en kalkpoeder), grote tanks (water-, slurry- en



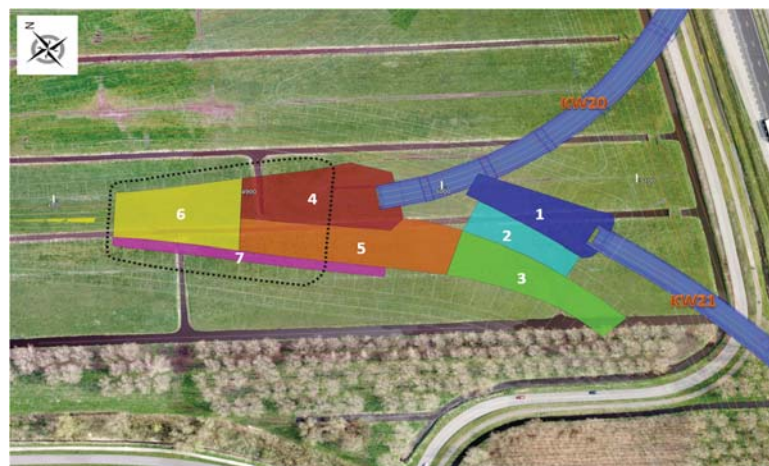
Figuur 9 – Schematische weergave van de dimensies van de voorbelasting.



Figuur 10 – Dwarsprofiel met het Plaxismodel van het paalmatras Knooppunt Hofvliet. Aan beide zijdes hiervan zijn de contouren van de voorbelasting te zien.



Figuur 11 – Ontwerp paalmatras Knooppunt Hofvliet: contouren vlekkenkaart met ophogingen groter of gelijk aan 4,5 m en tussenzandlaag zijn m.b.v. GIS gecombineerd.



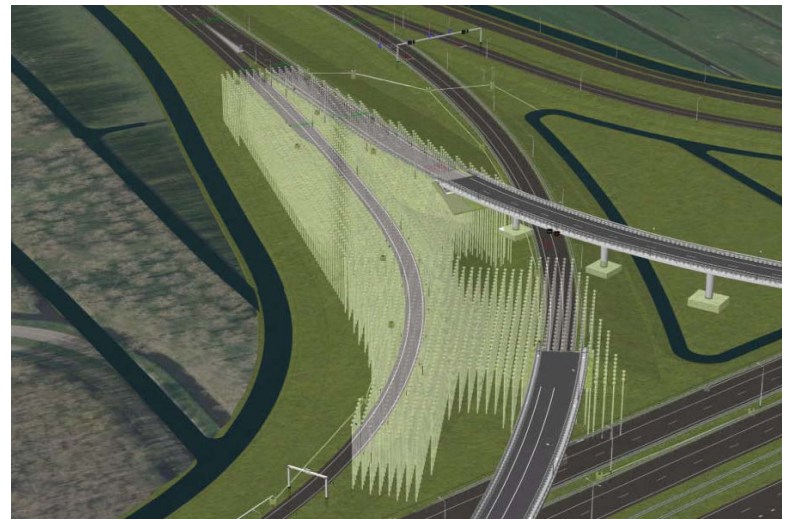
Figuur 12 – Overzicht ligging Kwadranten 1 t/m 7 en de contouren van het paalmatrasysteem Hofvliet-West.



**Figuur 13 –** Links: weergave van de grootte van de heiknobbel op de geprefabriceerde betonpalen. Rechts: installatie van de paaldeksels op de paalkoppen met daar tussen het oplegrubber met opening.



**Figuur 14 –** Het uitrollen van de geokunststofwapening voor het paalmatras Knooppunt Hofvliet West.



**Figuur 15–** 3D Palenveld onder het paalmatras Knooppunt Hofvliet West afkomstig uit het BIM.

bentonietmengsel), niet het totale eigen gewicht van de aardebaan, wegfundering en asfalt in de eindsituatie op het paalmatras, zullen overschrijden, waarbij rekening is gehouden met de maximale draagkracht van het paalmatras per kwadrant.

### Uitvoeringsaspecten

Hoewel ter plaatse van de te heien palen reeds was voorbelast, was het niet mogelijk om deze voorbelasting af te graven tot aan het aanlegniveau van het paalmatras op NAP-2,0 m in verband met de stabiliteit van de heistelling. Vanwege deze reden zijn de palen geheid met een oplanger. Door het heien met een oplanger, zou de nauwkeurigheid van de locatie van de palen mogelijk in het geding kunnen komen, aangezien de paalkoppen niet geschouwd konden worden. Echter, door de heitoleranties in zowel het horizontale vlak (maximaal  $\pm 10$  cm) als in verticale richting (maximaal  $\pm 5$  cm) duidelijk voor te schrijven zijn, ondanks het gebruik van een oplanger, de heiwerkzaamheden goed verlopen.

Na het afgraven van de werkvloer tot aan bovenkant paal bestond er een kans dat de werkvloer op

het aanlegniveau van NAP-2,0 m te nat zou worden door de opbolling van de grondwaterstand. Grote oppervlaktes van het paalmatras bleven echter tijdens het uitrollen van de geokunststofwapening droog. Op een aantal locaties was het iets te nat, zodat bemaling toegepast is om een droge werkvloer te creëren. Daarnaast heeft een relatief droge herfst meegeholpen aan deze gunstige werkomstandigheden!

### Paaldeksel en oplegrubber

Tijdens de realisatie bleek een forse heiknobbel aanwezig te zijn op de paalkop (figuur 13 links). Hierdoor zou na installatie van de paaldeksel op de paalkop, de paaldeksel scheef kunnen komen te liggen, met grote piekspanningen tot gevolg. Daarom is besloten om een oplegrubber toe te passen op de paalkop met een opening in het midden, die over de heiknobbel van de paalkop heen valt (figuur 13 rechts).

### Conclusies

Bij het realiseren van boortunnels vanuit een startschacht is naast het ontwerp en de realisatie van de boortunnels, tevens de bijbehorende Tunnel-

logistiek van groot belang. Uitdagend bij de RijnlandRoute was de aanleg van een Tunnellogistiek terrein in een polder met een zeer slappe bodemopbouw onder grote tijdsdruk. Tevens bleek dat een Tunnellogistiek terrein uit vele verschillende constructies bestaat met hieraan gestelde eisen en vele raakvlakken met objecten. De integrale samenwerking binnen de verschillende disciplines (tunnel, kunstwerken, realisatie en GWW) is van groot belang gebleken en heeft geleid tot een goed functionerend tunnellogistiek terrein. De hands-on mentaliteit bij het ontwerp en site-engineering heeft er bovendien voor gezorgd dat alles volgens uitvoeringsplanning gereed was en de risico's en raakvlakken zodoende aantoonbaar voldoende zijn beheerst.

Op dit moment functioneert een derde deel van het paalmatras nog als fundering van de Slurry Treatment Plant. Begin 2022 zullen de aardebanen ter plaatse van het westelijk deel van Knooppunt Hofvliet worden gerealiseerd (figuur 15), zodat het paalmatras zijn uiteindelijke doel kan gaan dienen: er kan dan uiteindelijk verkeer over gaan rijden! ●