

Onderzoek calamiteit Prinses Margriettunel

Plan van aanpak veldonderzoek



Datum
23 januari 2023

Ons kenmerk
11209150-000-GEO-0001

Pagina
2 van 69

Onderzoek calamiteit Prinses Margriettunnel
Plan van aanpak veldonderzoek

Auteur(s)
[REDACTED] 5.1.2.e

Onderzoek calamiteit Prinses Margrietunnel

Plan van aanpak veldonderzoek

| | |
|----------------|---|
| Opdrachtgever | Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud Gebouw Westraven |
| Contactpersoon | de heer [REDACTED] 5.1.2.e |
| Referenties | Deltares project 11209150 titel Calamiteit en herstel Prinses Margrietunnel |
| Trefwoorden | Fundering, tunnel, trekpalen, calamiteit, veldonderzoek |

Documentgegevens

| | |
|---------------|-----------------------|
| Versie | 1.0 |
| Datum | 23-02-2023 |
| Projectnummer | 11209150-004 |
| Document ID | 11209150-004-GEO-0002 |
| Pagina's | 69 |
| Classificatie | |
| Status | definitief |

Auteur(s)

| | |
|--------------------|--|
| [REDACTED] 5.1.2.e | |
| | |

Gebruik van deze tabel is voor de controle van de juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

| Doc. Versie | Auteur | Controle | Akkoord |
|-------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1.0 | [REDACTED] [REDACTED] 5.1.2.e | [REDACTED] [REDACTED] | [REDACTED] [REDACTED] |
| | | | |

Samenvatting

In december 2022 is een moot van de Prinses Margriettunnel omhoog gekomen. Dit rapport beschrijft het plan van aanpak voor het veldonderzoek naar de oorzaak van deze gebeurtenis. Het doel van het onderzoek is enerzijds om vast te stellen wat de oorzaak is geweest van het omhoog komen van moot 26 van de Prinses Margriettunnel, anderzijds om vast te stellen op welke wijze vergelijkbare constructies onderzocht zouden kunnen worden, om tijdig vast te stellen of daar vergelijkbare problemen kunnen ontstaan.

Het rapport analyseert de resultaten van eerder onderzoek aan vergelijkbare funderingen (Vlaketunnel, Heinenoordtunnel). Op basis van beschikbare informatie over en metingen aan de Prinses Margriettunnel wordt een plan van aanpak geschetst en gemotiveerd. De nadruk ligt daarbij op het verwerven van inzicht in de staat van de fundering en het verwerven van de informatie waarmee scenario's kunnen worden beoordeeld.

Onderzocht worden de verplaatsingen van de tunnel (inclusief historische data), de staat van de palen en de voorspanning in de voorspanstaven en de eigenschappen van de ondergrond. Tijdens het onderzoek worden monsters van het beton, het staal en de grond genomen voor het bepalen van de eigenschappen en kwaliteit van deze materialen.

Vervolanalyses en numerieke analyses zijn noodzakelijk. Voor deze analyses zijn betrouwbare data van de materialen nodig. Deze berekeningen kunnen worden gevalideerd met de resultaten van het veld onderzoek.

Inhoud

| | | |
|----------|--|-----------|
| | Samenvatting | 4 |
| 1 | Inleiding | 8 |
| 1.1 | Aanleiding | 8 |
| 1.2 | Doelstellingen | 8 |
| 1.3 | Gevolgde aanpak | 8 |
| 1.4 | Disclaimer | 8 |
| 2 | Ervaringen eerder onderzoek | 9 |
| 3 | Beschikbare informatie Prinses Margriettunnel | 11 |
| 4 | Faalmechanismes | 16 |
| 4.1 | Algemeen | 16 |
| 4.2 | Van belang zijnde aspecten | 18 |
| 4.3 | Falen van de voorspanstaven | 19 |
| 4.4 | Horizontale belasting op de palen | 20 |
| 4.4.1 | Maximale belasting van de palen bij horizontale verplaatsing | 20 |
| 4.4.2 | Mogelijke oorzaken van problemen die samenhangen met horizontale belasting op de palen | 21 |
| 4.5 | Ongelijke belasting van de staven | 22 |
| 4.6 | Het verlengen van de tunnel | 23 |
| 4.7 | Samenvatten van de belangrijkste faalmechanismes | 24 |
| 5 | Voorstel onderzoek | 25 |
| 5.1 | Vorbereiding | 25 |
| 5.2 | Te onderzoeken moten | 25 |
| 5.3 | Vervormingen van de tunnel | 27 |
| 5.3.1 | Insar-metingen | 27 |
| 5.3.2 | Rioolinspectie | 27 |
| 5.3.3 | Inspectie holle ruimte onder de vloer | 28 |
| 5.3.4 | Inmeten van de vervorming van de tunnelwanden | 28 |
| 5.3.5 | Vervormingen van de voegen | 28 |
| 5.4 | Onderzoek van moten 25, 26 en 27 | 29 |
| 5.4.1 | Overzicht werkzaamheden | 29 |
| 5.4.2 | Toelichting en motivatie | 31 |
| 5.4.3 | Palen met bezweken voorspanstaaf | 32 |
| 5.4.4 | Palen waarin de voorspanstaaf intact is | 32 |
| 5.4.5 | Onderzoek aan de palen onder de wand | 33 |
| 5.5 | Onderzoek overige moten | 33 |
| 5.6 | Sondeeronderzoek i.v.m. variatie in bodemeigenschappen | 34 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.7 | Additioneel grondonderzoek | 36 |
| 6 | Planning experimenteel werk | 37 |
| 6.1 | Veldwerkzaamheden | 37 |
| 6.2 | Laboratorium onderzoek | 38 |
| 7 | Voorgestelde vervolg werkzaamheden | 39 |
| 7.1 | Rapportage waarnemingen | 39 |
| 7.2 | Analyse historische data | 39 |
| 7.3 | Scenario analyse | 40 |
| 7.4 | Numerieke analyses | 40 |
| | Referenties | 42 |
| | Bijlagen | 43 |
| A | Overzicht horizontale verplaatsing van de tunnel | 44 |
| A.1 | Primaire gegevens van de meetcampagne | 44 |
| A.2 | Gesommeerde resultaten | 44 |
| A.3 | Verplaatsingen in lengterichting over de tunnel (figuren) | 45 |
| A.4 | Verplaatsingen over de tunnellengte | 47 |
| A.5 | Verticale verplaatsingen over de tunnel | 47 |
| B | Verticale verplaatsingen | 49 |
| C | Aanleg leiding langs de tunnel | 52 |
| D | Enkele details van de palen | 54 |
| D.1 | Standaard ontwerp | 54 |
| D.2 | Afwijkingen van het standaard ontwerp | 56 |
| E | Faalboom Vlaketunnel onderzoek | 57 |
| F | Berekening horizontale belastbaarheid trekpaal | 58 |
| G | Belasting op en verplaatsing van de moot na falen | 59 |
| G.1 | Belastingen in de tunnel, eerste fase | 59 |
| G.2 | Belastingen in de tunnel, tweede fase | 60 |
| G.3 | Gemeten verplaatsingen | 60 |
| G.4 | Opmerkingen over deze gegevens | 61 |
| H | Details van de fundering | 62 |
| H.1 | Tunnelmoten | 62 |
| H.2 | Grondonderzoek 1974 | 62 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| I | Beschrijving enkele meetmethodes | 64 |
| I.1 | Impedantiemetingen voorspanstaven | 64 |
| J | Vervallen onderzoeken | 65 |
| J.1 | Inmeten verplaatsingen tunnelmoten | 65 |
| J.2 | Onderzoek palen onder de wand | 66 |
| K | Specificatie veldonderzoek | 67 |

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Op dinsdag 13 december 2022 stelde een wegininspecteur van Rijkswaterstaat schade aan het asfalt vast bij moot 26 van de Noordelijke toerit van de Prinses Margriettunnel (snelweg A7). Moot 26 is omhooggekomen.

Teneinde een onderbouwd herstelvoorstel voor deze schade op te kunnen stellen heeft Rijkswaterstaat Deltares gevraagd een onderzoek naar de oorzaak van het falen van de tunnel uit te voeren. Onderdeel van het onderzoek is een veldonderzoek waarvoor in deze rapportage een plan van aanpak wordt gepresenteerd. De kennis uit dit onderzoek zal worden gebruikt voor (het versnellen van) het herstel van de Prinses Margriettunnel. Een achterliggend doel is dat het beoordelen, bewaken en ontwerpen van soortgelijke tunnels en vergelijkbare constructies zal worden verbeterd.

1.2 Doelstellingen

Het doel van het onderzoek is enerzijds om vast te stellen wat de oorzaak is geweest van het omhoog komen van moot 26 van de Prinses Margriettunnel, anderzijds om vast te stellen op welke wijze vergelijkbare constructies onderzocht zouden kunnen worden, om tijdig vast te stellen of daar vergelijkbare problemen kunnen ontstaan.

Idealiter zou het onderzoek ook informatie kunnen geven over de kwaliteit van de fundering van de overige moten, maar dat lijkt niet goed mogelijk [5].

1.3 Gevolgde aanpak

Het onderzoek is opgesplitst in een veldonderzoek en een theoretisch deel. Het veldonderzoek heeft in beginsel tot hoofddoel de oorzaak van falen van de tunnel vast te stellen en het theoretisch onderzoek te ondersteunen met data en de resultaten van berekeningen te valideren.

Om dit rapport op te zetten zijn de beschikbare documenten door verschillende medewerkers met elk een eigen invalshoek bestudeerd. Door onderlinge discussies zijn verschillende faalmechanismes geïdentificeerd. Daarbij zijn ook medewerkers van TNO betrokken.

Op verzoek van vertegenwoordigers met Rijkswaterstaat wordt bij elk onderwerp aangegeven hoe de onderzoeksresultaten naar verwachting zullen bijdragen aan de doelstellingen van het onderzoek.

1.4 Disclaimer

Dit document is een voortgangsdokument waarin de ontwikkelende gedachten zijn samengevat zodat deze met het onderzoeksteam van Rijkswaterstaat, aannemer Volker Stevin Funderingen en Deltares kunnen worden besproken en verder uitgewerkt. Als werkdocument is het geen definitieve rapportage en het document is niet conform het Deltares kwaliteitssysteem beoordeeld.

2 Ervaringen eerder onderzoek

In 2010 vond bij de Vlaketunnel een vergelijkbaar incident plaats met het opdrijven van een tunnelmoot. Ook daar is een oorzakonderzoek gestart en is veldwerk uitgevoerd. Het veldwerk bij de Vlaketunnel heeft goed gewerkt. De daar gevolgde aanpak met een trekproef op de staven is daarna ook gevolgd bij de Heinenoordtunnel [3].

Bij het onderzoek aan de Vlaketunnel bleek dat de vloer in het midden omhoog was gekomen en dat de wanden direct na het bezwijken naar buiten stonden [4]. Omdat de vloer kon worden teruggedrukt met ballast, is toentertijd geconcludeerd dat geotechnisch bezwijken (d.w.z. dat de palen als geheel uit de grond zijn getrokken, zie voor meer informatie paragraaf 4.1) niet aannemelijk was. Het onderzoek aan de oostelijke oprit van de Vlaketunnel is gefaseerd uitgevoerd, waarbij na de eerste fase het onderzoek is beperkt tot het openen van de conussen, een visuele inspectie van de staafkop en een trekproef aan de staaf. Daarnaast zijn de gebroken staven meegenomen naar het laboratorium van TNO voor materiaalkundig onderzoek.

In de opgedreven moot van de Vlaketunnel is bij 6 palen de voorspanstaaf getest. Hiervan bleken er 5 gebroken. De enige onderzochte staaf die niet was gebroken, had een zeer beperkte voorspanning. Deze had vermoedelijk wel taai gedrag vertoond tijdens het opdrijven. De lagere voorspanning is dan ontstaan door het terugduwen van de moot.

In de moten aan de oostelijke oprit die niet waren bezweken, bleek bij 39% van de geteste staven de voorspanstaaf gebroken. Het betrof meestal een brosse breuk. Op de uit de constructie gehaalde (dus gebroken) voorspanstaven zijn op verschillende plaatsen scheurinitiaties gevonden.

Hoewel spanningscorrosie de directe oorzaak van de verminderde sterkte van de voorspanstaven is geweest, is niet duidelijk geworden waardoor de spanningscorrosie is geïnitieerd. Het vermoeden bestond dat externe krachtswerking tot geopende scheuren in de palen heeft geleid en dat het zoute grondwater vervolgens is doorgedrongen tot aan de voorspanstaven, maar dat aspect is niet verder onderzocht.

In de Vlaketunnel zijn ook rioolinspecties en voeg-inspecties met videosystemen uitgevoerd. Deze waren succesvol en hebben tot aanvullende informatie geleid, o.a. over de situatie in de voegen bij de overige moten en over verplaatsingsverschillen tussen de moten.

In het Vlaketunnel onderzoek is geconcludeerd dat chloride indringing niet de primaire oorzaak (start van de keten in een faalmechanisme) is geweest. In het onderzoeksrapport worden als primaire verdachten scheefstand van de palen of spanningscorrosie benoemd.

In vergelijking met de Vlaketunnel zijn de onderdelen "akoestisch doormeten van de palen" en "het nemen van betonmonsters voor chloride bepaling" geschrapt. Akoestische metingen op de palen leverden geen resultaat en er bleek geen chloride indringing in het beton te zijn.

Er bleek wel bij het aanslaan van de staaf met een nylon hamer een hoorbaar verschil te zijn tussen de gebroken en niet gebroken staven. Deze activiteit wordt wel uitgevoerd. Dit is een eenvoudige proef, waarbij getracht moet worden dit aspect vast te leggen met een geluidsopname.

Het ultrasoon doormeten van de wapeningsstaven bij de Heinenoordtunnel [2] heeft geen overtuigende resultaten opgeleverd. Dit stemt overeen met de bevinding van het akoestisch meten in de Vlaketunnel. Het idee hierbij is momenteel dat de reflectie op de voorspanmoer in de tunnelbodem het indringen en de reflectie van de signalen verhindert.

In de Heinenoordtunnel zijn een aantal staven getrokken en deze bleken alle in goede staat.

De diepte van de gebroken staven varieerde bij de Vlaketunnel aanzienlijk. De vloerdikte in de Vlaketunnel is ongeveer 0.8 m (nabij de wand) tot 1.0 m (in het midden), de kop van de voorspanstaaf zit ongeveer 10 cm onder de bovenkant van de vloer. Uit Tabel A.1 van [4] kan worden afgeleid:

- Vijf gebroken voorspanstaven hadden een lengte van 0.7 m of minder. Deze zijn dus in de vloer gebroken.
- De overige zeven staven hadden een lengte variërend van 1.3 m tot 12 m. Deze zijn dus (ver) onder de vloer gebroken.

Aan de oostzijde van de Vlaketunnel is bij een boorkernonderzoek over de volledige vloerdikte geconstateerd dat de geboorde kernen omlaag vielen. Bij meerdere moten is ter plaatse van de middenberm een ruimte van circa 100-130 mm aanwezig. Aan de westzijde van de Vlaketunnel is geen ruimte onder de vloer aangetroffen.

Op basis van visuele waarnemingen leek het bezwijken van de Vlaketunnel geen grote rotatie van de tunnelmoot te hebben veroorzaakt. De vloer was opgebeld en de wanden enigszins naar buiten gedrukt [4].

3 Beschikbare informatie Prinses Margriettunnel

Veel informatie over het ontwerp en de constructie van de tunnel is ter beschikking gesteld in documenten.

De bezweken moot bevindt zich aan de noordwest zijde van de tunnel. Aan die zijde van de tunnel zijn de moten vanaf de tunnel genummerd van 23 tot en met 48 (tellend vanaf het Prinses Margrietkanaal). De bezweken moot is moot 26, de vierde moot vanaf de tunnel. Moot 26 heeft een lengte van 18 m en een breedte van circa 30 m. Aan de hoge zijde heeft de moot een totale hoogte van circa 9,3 m en aan de lage zijde circa 9,9 m.

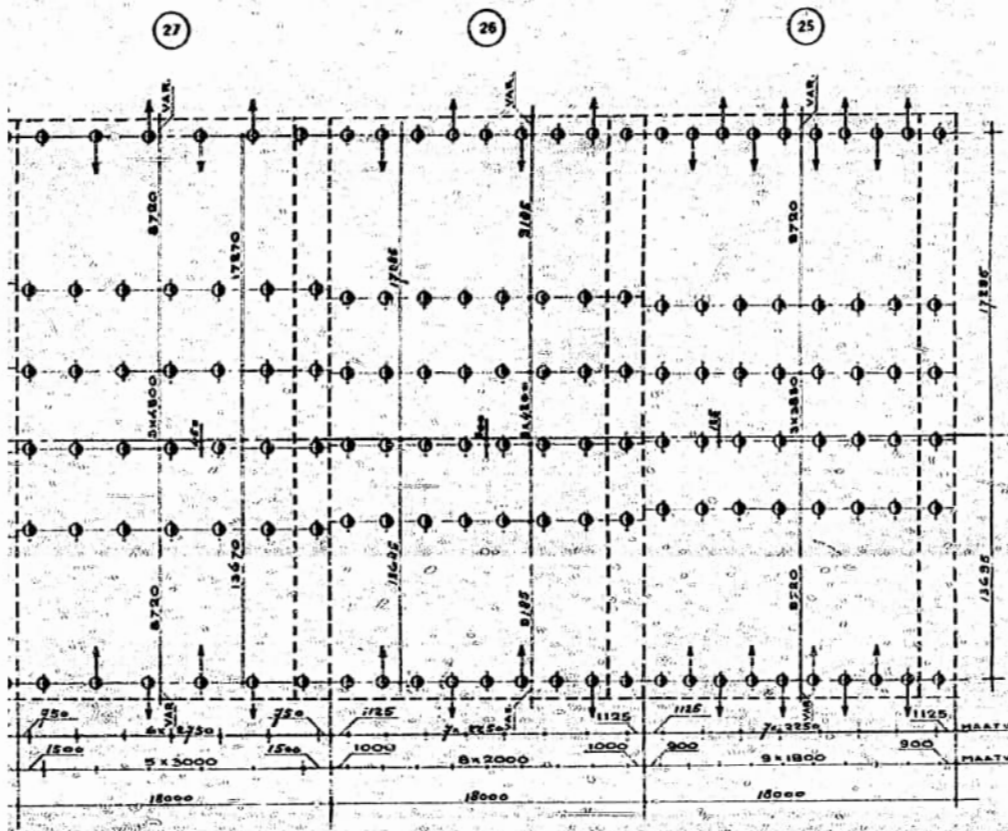
Figuur 3.1 geeft het bovenaanzicht van de betreffende moot met de verdeling van de trekpalen onder de moot. De twee uiterste rijen palen staan onder de wand, zie [10].

Uit de bouwtekeningen is afgeleid: Onder moot 26 staan 50 palen, diameter 450 mm met een 36 mm Dywidag voorspanstaaf. De totale trek lengte is 547.5 m, zodat per paal 10.95 m beschikbaar is, dus de palen zijn circa 12 m lang. De details van het paalontwerp zijn opgenomen in bijlage D. Onder de aangrenzende moten 25 en 27 staan 52 respectievelijk 40 palen die hetzelfde zijn opgebouwd.

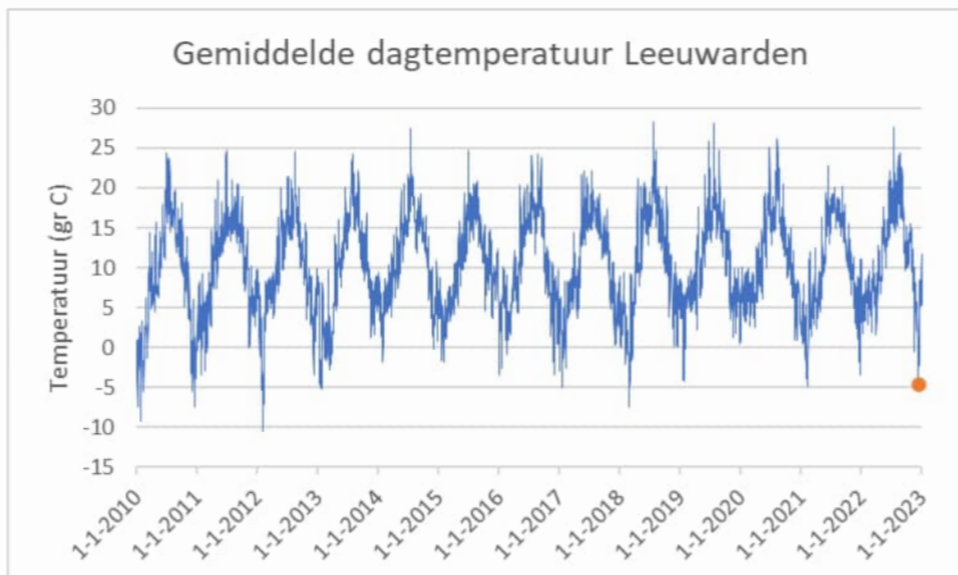
Tijdens de bouw fase is één paal (of zijn meer palen) gebroken. De precieze oorzaak en eventueel daarnaar uitgevoerd onderzoek zijn ons niet bekend. De gebroken paal onder moot 26 is vervangen door twee groutankers met een Dywidagstaaf 32 mm. Dit betreft in ieder geval de tweede paal vanaf moot 25 langs de as van de tunnel, zoals aangegeven in de aanvullende tekening (MT-81A_mt 26). Conform de tekening heeft deze staaf een polyethyleen bescherming en is na het na-spannen (twee maanden na het aanbrengen van de eerste voorspanning) nog geïnjecteerd.

Het incident heeft plaatsgevonden op 14 december 2022. Dat was een relatief koude dag, met een gemiddelde dagtemperatuur van $-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figuur 3.2).

Het Artikel in Cement [6] geeft veel informatie over het ontwerp en de bouw van de tunnel. Een opvallend detail is dat de zuidoostelijke oprit als bouwdok voor de zinktunnel is gebruikt. Deze is daardoor zwaarder belast geweest en om de zinktunnel uit te varen tijdelijk onderwater gezet. De omhooggekomen moot 26 ligt in de noordelijke toerit. De eerste verwachting is dan ook dat het bouwen van de afzinktunnel in de zuidoostelijke toerit geen gevolgen heeft gehad voor de paalfundering van moot 26. Uit [6] blijkt dat de afzinktunnel gebouwd is op de tweede tot en met de zesde moot van de toerit. Dit zijn de moten 17 (zesde moot) tot en met 21 (tweede moot). Daarom is de toerit bij deze moten 3 m breder dan de overige moten (zie tekening MT-104D_mt 5 t-m 22.pdf)



Figuur 3.1 Palenplan moot 26 (links is noordwest richting Sneek, rechts is zuidoost richting Joure).

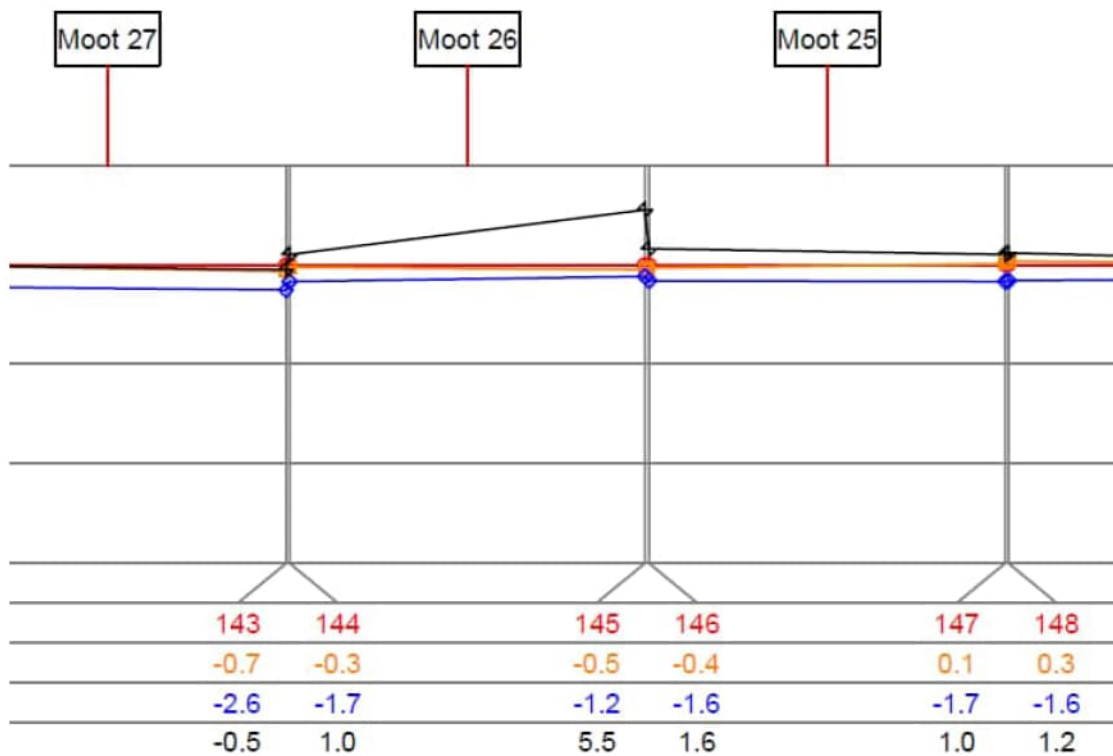


Figuur 3.2 Gemiddelde dagtemperatuur weerstation Leeuwarden – de rode stip is de dag waarop de tunnelmoot omhoog is gekomen (bron KNMI).

Enkele extra informatie betreft:

- Uit metingen is gebleken dat de tunnel nabij moot 26 in 2021 enkele jaren geleden al enige verhoging had ondergaan [11].
- De tunnel is vanaf 2010 4 keer ingemeten. Het betreft de vervormingen van meetpunten op de wand aan beide zijden van de voegen tussen de moten, in verticale en in horizontale richting [12], in zowel lengterichting als dwarsrichting. Het betreft metingen ten opzichte van een lokale referentie.

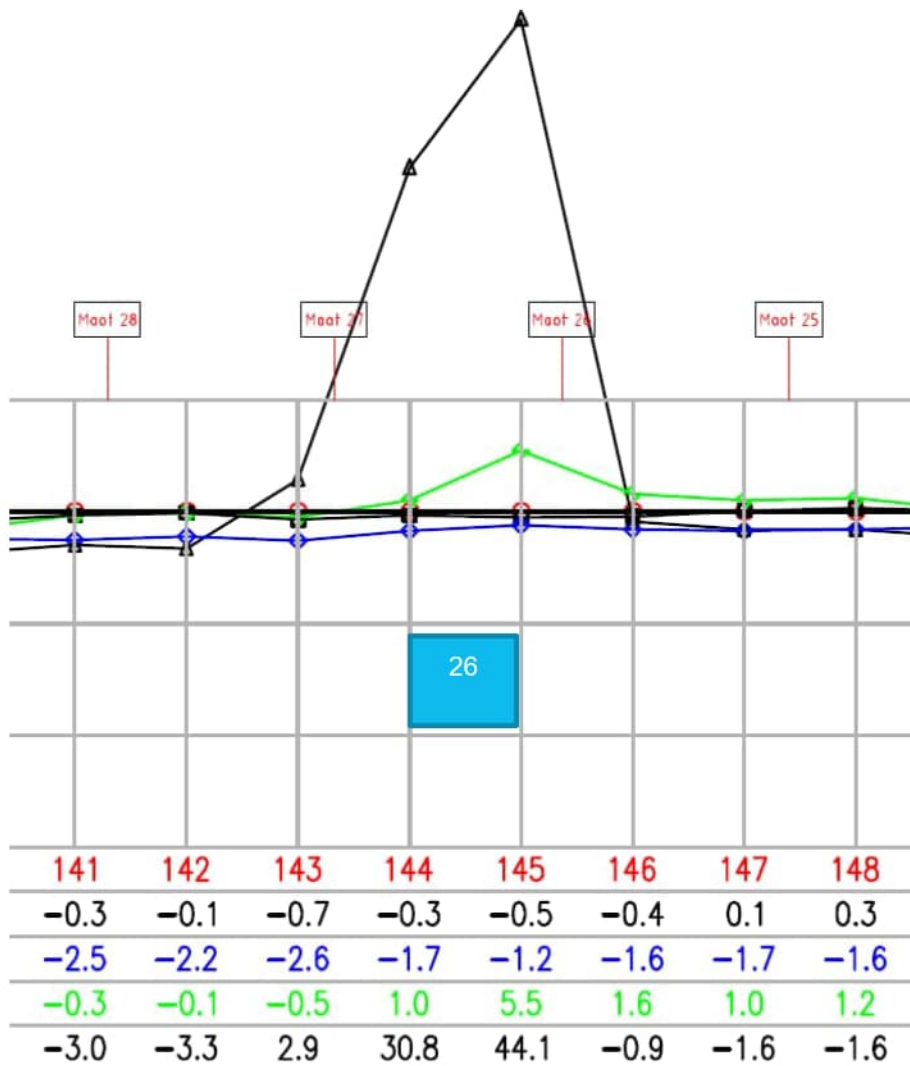
- Specifiek voor moot 26 valt op dat deze moot bij de derde meting (in 2021) een veel grotere rotatie ondergaat dan de overige diepliggende moten, zie Figuur 3.3. De rotatie aan de oostzijde van de tunnel (in profielen 100-197) is orde 4.5 mm over de mootlengte van 18 m , dus $0.25 \cdot 10^{-3}$. Aan de westzijde van de tunnel (in de profielen 200-297) is de rotatie veel kleiner en in lijn met de overige moten. Dit resultaat suggereert een tordering van de tunnelvloer. In Figuur 3.1 betekent dit dat de hoek rechtsboven 4.5 mm hoger ligt.
- Tijdens de 3^e herhalingsmeting was de aangrenzende moot 25 mogelijk ook al iets omhoog gekomen (zie Figuur 3.3 en bijlage B).
- De gehele tunnel is in vergelijking met de metingen in 2010 in totaal circa 82 mm langer (zie ook bijlage A.4).



Figuur 3.3 Verticale deformatie oostzijde van de tunnel [in mm] (1^e regel nummer meetpunt. (rood); achtereenvolgens de deformatie metingen in januari 2013 (oranje), november 2017 (blauw), juni 2021 (zwart)) [12].

Figuur 3.4 geeft de meting van de verticale positie aan de oostzijde van de tunnel op 21 december 2022, nadat de schade is ontstaan. Onbekend is hoeveel ballast er was geplaatst op het tijdstip van de meting. Bij de interpretatie van deze figuur moet rekening worden gehouden met het feit dat 143 en 144 en de punten 145 en 146 vlak bij elkaar liggen maar op een andere moot. Figuur 3.3 geeft dit duidelijk weer.

Het meetpunt 143 dat op het zuidelijke uiteinde van moot 27 ligt is ook enigszins omhooggekomen, zodat die moot 6 mm scheef ligt.

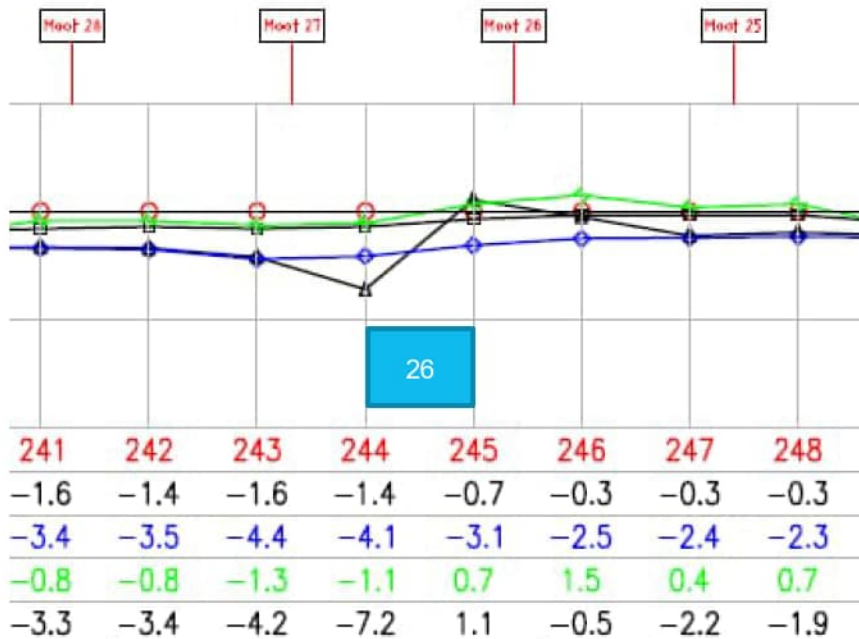


Figuur 3.4 Verticale deformatie oostzijde van de tunnel t.p.v. schade (noot de teksten maat 25 t/m 28 bovenaan staan vermoedelijk op de verkeerde positie, de verwachte positie maat 26 is met een blokje weergegeven) (1^e regel nummer meetpunt. (rood); achtereenvolgens de deformatie metingen in januari 2013 (zwart), november 2017 (blauw), juni 2021 (groen) en december 2022 (zwart) [12] tekening 10H-302-(01+02)-04-ZG-03 100Z.pdf.

Figuur 3.5 geeft de verticale positie aan de oostzijde van de tunnel. De deformatie is daar kleiner en de noordwest punt van de moot is naar beneden gedrukt.

In bijlage B is een grafische weerhave van de vervormingspatronen weergegeven. Opvallend is de grote overeenkomst in vervorming, afgezien van de grootte van de vervorming.

Een vergelijking van de meting in 2023 met de eerdere meting in 2021 geeft aan dat de moot gemiddeld orde 20 mm naar boven is gekomen, en een grote rotatie om de tunnel as heeft ondergaan en een kleine rotatie om de horizontale as loodrecht op de tunnelrichting. Dit suggereert dat in de gemeten situatie de palen onder de westelijke wand niet op trek zijn bezweken, maar een extra drukbelasting hebben gehad.



Figuur 3.5 Deformatie metingen westzijde van de tunnel t.p.v. schade (noot: de teksten moot 26 t/m 28 staat vermoedelijk op de verkeerde positie, de verwachte positie moot 26 is met een blokje weergegeven) (1^e regel meetpunt. (rood); achtereenvolgens de deformatie metingen in januari 2013 (zwart), november 2017 (blauw), juni 2021 (groen) en december 2022 (zwart) [12] tekening 10H-302-(01+02)-04-ZG-03 100Z.pdf.

4 Faalmechanismes

Het omhoogkomen van moot 26 van de tunnel vereist het falen van de funderingsconstructie, waarbij op voorhand niet duidelijk is of dit falen is veroorzaakt door omstandigheden binnen de oorspronkelijke ontwerp aannamen (belastingen en sterktes) en/of falen door onvoorziene mechanismen en effecten die buiten de oorspronkelijke ontwerp-randvoorwaarden vallen. Het uit te voeren veldonderzoek moet erop gericht zijn om nader inzicht te krijgen in het gerealiseerde ontwerp en in eventueel optredende, onvoorziene mechanismes.

4.1 Algemeen

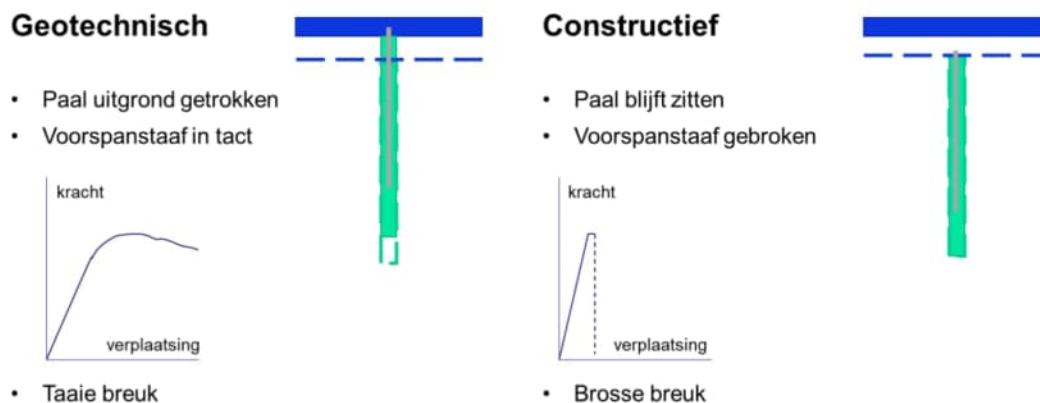
In het kader van het onderzoek naar aanleiding van het falen van de Vlaketunnel is destijds een faalboom opgesteld [3]. Deze faalboom is integraal opgenomen in bijlage E.

Bij het beoordelen van de faalmechanismes moet worden bedacht dat een faalboom een hulpmiddel is. Falen is veelal een keten van opeenvolgende gebeurtenissen, die elkaar kunnen beïnvloeden. Ook kunnen twee mechanismes tegelijk optreden, die samen een extra ongunstige situatie opleveren.

Om niet alle in de faalboom genoemde faalmechanismes individueel te hoeven onderzoeken, is eerst een algemene analyse uitgevoerd van de wijze waarop de tunnelmoot heeft gefaald. De op basis hiervan gedefinieerde hoofdmechanismes vormen vervolgens de basis voor het onderzoek.

In feite is het omhoog komen van een moot alleen mogelijk als de paalfundering onder een moot faalt. Het falen van de paalfundering kan zijn veroorzaakt door de volgende twee hoofdmechanismes:

- 1 Constructief falen van de palen. Daarbij wordt het falen van de tunnelmoot geïnitieerd door het falen van de verbinding van de paal met de tunnelvloer, waardoor de opwaartse belasting op de tunnelvloer niet meer kan worden overgedragen naar de paal. Dit kan door:
 - a Onvoldoende sterkte.
 - b Te hoge belasting.
- 2 Geotechnisch falen van de palen. Daarbij wordt het falen van de tunnelmoot geïnitieerd doordat één paal of een groep palen de gevraagde trekcapaciteit niet kan overdragen aan de grond en de paal(groep) als geheel door de grond wordt getrokken en er bezwijken op het grensvlak paal-grond of paalgroep-grond optreedt. Dit kan door:
 - a Onvoldoende sterkte.
 - b Te hoge belasting.



Figuur 4.1 Schematische weergave geotechnisch en constructief falen enkele funderingspaal.

Bij beide hoofdmechanismes is als mogelijke oorzaak een te hoge belasting aangegeven. Dit betreft een te hoge opwaartse belasting door het grondwater. Dat betekent dat in ieder geval een onderzoek moet worden uitgevoerd naar de waterspanning tegen de onderzijde van de tunnelvloer. Mogelijk loopt dit onderzoek al in het kader van een mogelijke bemaling, echter in aanvulling op stijghoogte-registraties in peilbuizen moet zeker ook gedacht aan het "direct" meten van de stijghoogte (in de spleet) onder de vloer.

Uit het onderzoek bij de Vlaketunnel is gebleken dat daar sprake is geweest van het constructief falen van de verbinding van meerdere palen met de tunnelvloer. Dat falen betrof het breken van voorspanstaven als gevolg van spanningscorrosie. Spanningscorrosie kan optreden doordat de corrosiebescherming van de voorspanstaaf (plaatselijk) faalt en het milieu rondom de staven verandert, doordat de trekspanning in de voorspanstaaf significant toeneemt of doordat het staal niet aan de eisen voldoet, waardoor het gevoeliger wordt voor spanningscorrosie. Het lijkt aannemelijk dat het milieu rondom de voorspanstaven pas kan veranderen als er sprake is van scheuren in de paal die doorlopen tot aan de voorspanstaaf. De spanning in een voorspanstaaf kan toenemen als de tunnelbak omhoog komt, bijvoorbeeld door een te hoge belasting, of als er één paal (of meer palen) in de omgeving van de betreffende paal faalt. Dit falen van één paal kan zowel geotechnisch als constructief van aard zijn.

Het voorgaande betekent dat in ieder geval onderzocht wordt of er sprake is van het falen van voorspanstaven. Indien dit niet het geval is, kan dit hoofdmechanisme geen rol gespeeld hebben. Indien wel sprake is van het falen van voorspanstaven, is sprake van een situatie die qua verschijningsvorm vergelijkbaar is met die in de Vlaketunnel.

Uit het onderzoek aan de Vlaketunnel is echter niet eenduidig naar voren gekomen of het daar waargenomen falen van voorspanstaven initieel is geweest of gevolgschade na het geotechnisch bezwijken van één of meer omliggende palen. Het is momenteel niet duidelijk hoe dit onderscheid kan worden gemaakt.

Als een paal geotechnisch bezwijkt wordt deze als geheel uit de grond getrokken met een min of meer constante kracht. De belasting die de bezwijken paal niet kan dragen zal worden gedragen door de palen nabij de bezwijken paal, die daardoor mogelijk ook gaan falen. Omdat de paal die als eerste geotechnisch is bezwijken nog volledig intact is, zal deze bij het testen van de voorspanstaaf als goed worden beschouwd. Dit kan betekenen dat de paal die het bezwijken heeft geïnitieerd, als intact wordt bestempeld.

Geotechnisch bezwijken kan ook optreden als meerdere palen gelijktijdig uit de grond getrokken worden als gevolg van kluitwerking.

Beide vormen van het geotechnisch bezwijken zijn tijdens het onderzoek aan de Vlaketunnel niet in beschouwing genomen. In het onderhavige onderzoek wordt dit wel in beschouwing genomen.

4.2 Van belang zijnde aspecten

Geotechnisch gezien treedt bij een vervorming van ongeveer 10 mm de maximale kracht in een paal op. Bij het opleggen van een grotere belasting ontstaat geotechnisch falen, waarbij de vervorming in een paal wel toeneemt, maar de kracht constant blijft. De grootte van de kracht die bij een bepaalde vervorming optreedt hangt onder andere af van de grondeigenschappen.

Constructief bezwijken van een paal wordt veroorzaakt door het falen van een voorspanstaaf. Ook voor een voorspanstaaf geldt dat deze, tot aan de bezwijkbelasting, een bepaalde vervormingscapaciteit heeft. Echter, als een voorspanstaaf breekt, valt de trekkracht in die paal volledige weg.

Uitgaande van een relatief stijve tunnelvloer wordt aan alle palen vrijwel dezelfde vervorming opgelegd. Door mogelijke variaties in de grondeigenschappen en door mogelijke variaties in het voorspanniveau in de voorspanstaven zullen de krachten per paal verschillen.

Op basis van gesprekken en internet worden de volgende aspecten, die niet in de faalboom staan, ook meegenomen in het onderzoek:

- 1 Er is in 2020 naast de tunnel een gasleiding onder het kanaal door aangelegd. Deze kan aanleiding zijn tot extra (horizontale) vervormingen en krachten in de fundering, zie Bijlage C.
- 2 De waterspanningen tegen de vloer geven extra horizontale krachten in de constructie, die niet zijn beschouwd.
- 3 Extra belastingen of vervormingen tijdens de bouw van de fundering en tunnel. Bijvoorbeeld: Scheurvorming in de palen tijdens de periode tussen installatie van de palen en voorspannen van de palen. Dit betreft een mogelijk specificatie van het aspect "Lagere kwaliteit in de grond gevormde palen als gevolg van de uitvoering".
- 4 De tussen 2010 en 2021 geconstateerde horizontale vervormingen van de tunnel.
- 5 Toename verkeersbelasting.
- 6 Overschatting van de paal capaciteit door de aanwezige overconsolidatie in de ondergrond.

Op basis van de visuele waarnemingen tot nu toe wordt verondersteld dat moot 26 als star lichaam omhoog is gekomen, zodat de mechanismes falen van de vloer of de wand niet aannemelijk zijn. De twee benoemde effecten verminderde wrijving langs de wand en temperatuurseffecten kunnen nog niet worden weggelaten als onderdeel van een globaal mechanisme.

Op basis van de liggingsmetingen lijkt het mogelijk dat er al in 2017 2021, tijdens de 3^e herhalingsmeting, een probleem met de fundering in de zuidoost hoek van deze moot 26 bestond (zie Bijlage B). Die hoek van moot 26 was enkele mm's omhoog gekomen ten opzichte van de aangrenzende moot 25 en mogelijk was moot 25 daar ook al iets omhoog gekomen. Dit kan enerzijds duiden op het lokaal falen van een deel van de palen onder moot 26, waarna de palen toen niet verder zijn bezweken, omdat de moot klem kwam te zitten tussen de aangrenzende moten. Anderzijds kan dit duiden op het vervormen van de palen en/of de voorspanstaven, zonder dat die volledig hebben gefaald. Beide aspecten worden onderzocht, waarbij tevens wordt nagegaan of de rij palen hier als groep te zwaar belast is.

Opgemerkt wordt dat dit niet de zijde is waar de leiding is aangelegd. De beweging omhoog is geconcentreerd aan de diepe zijde van de moot waar de grootste waterdruk heerst.

De randpalen staan onder de wand en zijn daardoor mogelijk niet voor inspectie beschikbaar, omdat deze vermoedelijk onder de wand van de moot staan: Aan de onderzijde is de wand 1.26 m dik, dit is ook de orde van de afstand van de palen tot de rand.

Het bleek mogelijk de moot door ballasten terug te duwen tot de oorspronkelijke positie. In het algemeen wordt aangenomen dat dit alleen mogelijk is als de palen constructief zijn bezweken, omdat bij het terugduwen van een geotechnisch bezweken fundering de resterende wrijving van de bezweken palen moet worden overwonnen voordat de constructie naar beneden gaat bewegen. Een of enkele geotechnisch bezweken palen kunnen mogelijk wel worden teruggedrukt als het gat onder de paal redelijk in tact is gebleven. Daarnaast moert mogelijk ook de wandwrijving worden overwonnen.

Bijlage G geeft een overzicht van de belasting op de gefaalde moot na falen en de met een total station gemeten vervormingen van de meetpunten op de hoeken van de wanden van de moot. De eerste analyse van de waarnemingen geeft aan dat er aan de oostzijde een grotere kracht nodig is dan uit de waterdruk volgt. Er kan dan ook niet zondermeer worden gesteld dat er geen sprake is van geotechnisch falen.

4.3 Falen van de voorspanstaven

Spanningscorrosie is een scheurvormende corrosievorm onder invloed van de gelijktijdige inwerking van een corrosief medium en trekspanningen [15]. Spanningscorrosie kan dus zowel ontstaan door een verandering van het milieu waarin de voorspanstaaf zich bevindt, als een significante toename van de staalspanning.

Spanningscorrosie, zoals is geconstateerd bij de Vlaketunnel, kan optreden doordat de corrosiebescherming van de voorspanstaaf (plaatselijk) faalt en het milieu rondom de staven verandert.

Voor het calamiteiten onderzoek moet de kwaliteit en de samenstelling van het staal worden gecontroleerd, zodat kan worden bepaald c.q. uitgesloten dat het falen is ontstaan door een staalkwaliteit die afwijkt van hetgeen was voorgeschreven.

Bij de Vlaketunnel is geconstateerd dat het hoge zoutgehalte in het grondwater een rol heeft gespeeld bij het constructief falen van palen. Door dit hoge zoutgehalte zal een voorspanstaaf in een gescheurde paal kunnen corroderen, als het grondwater via een scheur kan doordringen tot aan de voorspanstaaf. Het is niet aannemelijk dat er sprake is van zoutindringing in ongescheurd beton tot aan de voorspanstaaf. De gebruikte palen zijn ongewapend, waardoor een horizontale belasting en/of een opgelegde vervorming kan resulteren in scheurvorming in de palen. De voorspanning in de palen zorgt er echter voor dat de scheuren weer dichtgedrukt te worden. Buigende momenten in de paal kunnen wel openstaande scheuren veroorzaken.

Teneinde na te gaan of er sprake is van indringing van grondwater tot aan de voorspanstaven wordt bij het veldonderzoek onderzocht of er scheuren in de palen aanwezig zijn en zo ja op welk niveau in de palen. Indien scheuren worden aangetroffen, wordt nader onderzoek uitgevoerd naar de oorzaak van die scheuren (zie paragraaf 4.4 en 4.5). Indien het bij het veldonderzoek niet mogelijk is om vast te stellen of er sprake is van scheuren in de palen, wordt op basis van afgeleide waarnemingen en/of op basis van theoretische gronden nagegaan of er scheuren aanwezig kunnen zijn.

Er moet rekening worden gehouden met het feit dat tijdens het breken van een voorspanstaaf een plotselinge herverdeling van de krachten in de paal optreedt, die mogelijk tot scheurvorming kan leiden.

Spanningscorrosie kan ook ontstaan als de trekspanning in een voorspanstaaf significant toeneemt. Teneinde te controleren of dit een rol kan spelen wordt het voorspanniveau in een aantal voorspanstaven onderzocht.

4.4 Horizontale belasting op de palen

De trekpalen hebben geen kopwapening nabij de wand van de paal (maar alleen een centrale voorspanstaaf). Daardoor kunnen deze palen, bij een horizontale belasting, een beperkt buigend moment en dwarskrachten opnemen. Het ontbreken van (kop-)wapening langs de wand betekent ook dat na het optreden van een scheur in de beton, het doorgroeien van de scheur niet wordt verhinderd door randwapening, maar alleen door de drukvoorspanning in het beton. Scheurvorming leidt dan direct tot doorgaande scheurvorming.

Dit mechanisme is een mogelijk verklaring voor de initiatie van de spanningscorrosie, die bij de Vlaketunnel als oorzaak van het breken van de voorspanstaven is vastgesteld. De achtergrond van de indringing van het zoute water is bij de Vlaketunnel niet opgehelderd.

4.4.1 Maximale belasting van de palen bij horizontale verplaatsing

De palen kunnen een horizontale belasting krijgen, waardoor dwarskrachten en buigende momenten in de paalkop ontstaan. Deze paragraaf geeft een eerste indruk van de opneembare verplaatsingen en krachten tot scheurvorming optreedt. Bijlage F geeft meer details van de berekening van het horizontale draagvermogen van de trekpalen.

Uit de berekeningen blijkt dat de waargenomen horizontale verplaatsingen (zie Bijlage A) voldoende zijn om de paal aan de kop te laten scheuren.

De volgende uitgangspunten voor de berekening van de paal zijn toegepast:

Paal

- diameter 450 mm.
- stijfheid $EI = 40000 \text{ kNm}^2$ (gebaseerd op $E_{\text{grout}} = 20000 \text{ N/mm}^2$).
- paal scheurt bij $M = 47 \text{ kNm}$; bij overschrijden van de belasting heeft de paal een geringe stijfheid. Gerekend is met 400 kNm^2 . Dit is een arbitraire waarde.
- paal is bij kop ingeklemd.
- paallengte 10 m.

Berekening scheurmoment:

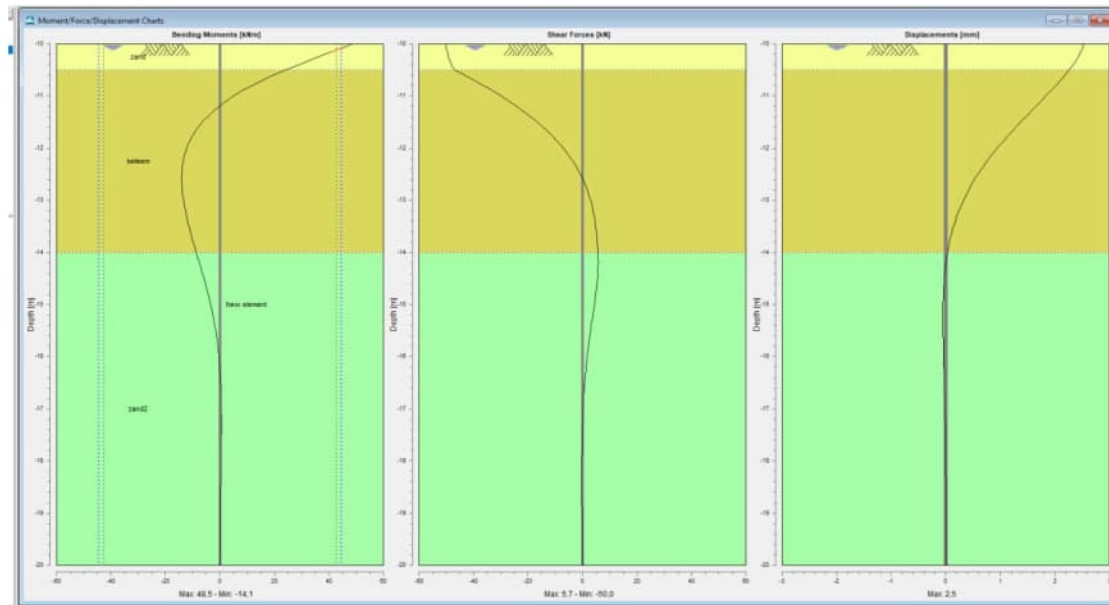
- trekkracht op paal = 600 Kn.
- voorspanning kracht = 700 kN.
- netto drukbelasting = $700 - 600 = 100 \text{ kN}$.
- drukspanning in paal = $100 \text{ kN} / (1/4 * \pi * 0,45^2) = 0,63 \text{ N/mm}^2$.
- buigtreksterkte = $4,5 \text{ N/mm}^2$ (dit hoort bij B30; sterkte van de groutschil rondomde paal is waarschijnlijk lager).
- $I_{\text{paal}} = 1/64 * \pi * D^4 = 0,002 \text{ m}^4$.
- scheurmoment $M_r = (4,5 + 0,63) * 10^3 * 0,002 / 0,225 = 47 \text{ kNm}$.

Paalbelasting

De paal is belast door een horizontale kracht. In de berekening is hiervoor 50 kN aangehouden.

Resultaat

De opgelegde belasting leidt tot een horizontale verplaatsing van de paalkop van 2,5 mm. Het buigend moment is ongeveer 50 kNm, zodat bij deze horizontale vervorming het scheurmoment wordt overschreden.



Figuur 4.2 Resultaten van de berekening van het gedrag van de paal onder horizontale belasting (links is het buigend moment, midden de schuifkracht en rechts de horizontale vervormingen alle als functie van de diepte).

4.4.2 Mogelijke oorzaken van problemen die samenhangen met horizontale belasting op de palen

Horizontale belastingen op de paal kunnen een probleem vormen als deze zo groot worden dat de sterkte van de constructie wordt overschreden. Dit kan ontstaan doordat de belasting op de paal te groot wordt of doordat de sterkte van de constructie afneemt. Om na te gaan of horizontale belasting op de palen kan optreden is een lijst opgesteld van mechanismes die een horizontale belasting kunnen veroorzaken en een lijst van mechanismes die de weerstand tegen horizontale belasting verlagen. Dit is een uitbreiding van de oorspronkelijke foutenboom. In eerste instantie wordt geen aandacht besteed aan de grootte van de belasting en ook niet aan de kans op optreden, het gaat in eerste instantie om een lijst met mogelijke mechanismes.

Een horizontale belasting of een toename van de belasting in de tijd kan ontstaan door:

- 1 De paal is scheef geïnstalleerd. Dit leidt ook tot een horizontale kracht op de paal indien de vloer niet in de richting van de paal-as verplaatst. Bij het onderzoek in de Vlaketunnel is gevonden dat de voorspanstaven scheef stonden. Mogelijk is dit al bij de installatie gebeurd.
- 2 Tijdens het aanbrengen van de vloer en het spannen van de voorspanstaven. Dit is een complex proces, waarbij het niet direct duidelijk is wat de invloed van de verschillende stappen is:
 - Na installatie van de palen is de vloer gestort. De verse specie zal niet tot grote horizontale verplaatsing van de paalkoppen leiden, hoewel verwacht mag worden dat de grond rondom de randpalen door de betondruk (1.3 m [zie tekening MT-157.pdf] betonspecie van 25 kN/m^3 is een bovenbelasting van 32.5 kPa, die plm. 1 m naast de paal plots eindigt) een buitenwaartse beweging kan ondergaan. Op dit moment zijn de

voorspanstaven aanwezig en zijn zij via de bitumineuze spie aan de verhardende vloer verbonden. In het voorspankanaal kunnen zij enigszins bewegen in het vet dat in het kanaal is aangebracht.

- Tijdens het uitharden zal krimp optreden in de vloer. Per individuele moot zullen daardoor de palen langs de rand van de moot (onder de wand en langs de voegen) naar het midden van de moot worden getrokken.
 - Vervolgens zijn de palen voorgespannen en zit het bovenste deel van de paal in de vloer vast en zal de helling van de staaf niet meer veranderen.
- 3 De vloer ligt scheef. Hierdoor geeft waterdruk die ontstaat na beëindiging van de bemaling een horizontale kracht op de paal.
 - 4 Beweging van de vloer. Het uitzetten en krimpen van de vloer door o.a. temperatuur belasting geeft een heen en weer gaande verplaatsing van de paal. Netto is het nul. Dit mechanisme wordt ook beschouwd in paragraaf 4.6.
 - 5 Toename van de voegbreedte door indringing van vuil en/of grond met als gevolg een horizontale verplaatsing van de vloer. Deze vervorming wordt opgelegd aan de palen. Als de elementen door een lage temperatuur vanwege thermische krimp tijdelijk verkort zijn, kan er mogelijk materiaal in de voegen terecht komen.
 - 6 Een permanente scheefstand van de palen die in de tijd toeneemt. Dit leidt tot een toename van de horizontale component van de belasting op de palenrestspanningen.
 - 7 Verkeersbelasting. Remmende en versnellende vrachtwagens. Dit geeft horizontale dynamische krachten op de palen. Ook de passage van voegen kan tot horizontale belasting leiden.

Daarnaast moet rekening gehouden worden dat de sterkte van de palen lager is dan aangenomen:

- 8 Afname van de voorspankracht. Hierdoor wordt de drukspanning in het beton minder en dus de gevoeligheid voor horizontale krachten groter.
- 9 De voorspankracht wordt niet bij de voet van de paal afgedragen maar op een hoger niveau. Hierdoor kan onderin de paal trek optreden (resterende voorspankracht kleiner dan trekkracht).
- 10 Afbreken voorspanstaaf bij klokanker (onderin de paal)? Dit werd in de bouwverslagen genoemd.
- 11 Herhaalde belastingen door het passerende vrachtverkeer, dat mogelijk ook zwaarder is (of vaker rijdt) dan in het ontwerp is voorzien.

4.5 Ongelijke belasting van de staven

Onduidelijk is momenteel hoe precies de palen zijn ontworpen. Het is/was niet ongebruikelijk om voor het constructieve model alle palen als even stijve veerelementen te modelleren. De werkelijkheid is dat, naast onbekende variatie in de bodem, ook door groepswerking en rand-effecten verschillen ontstaan in de paalbelastingen die vaak niet werden meegenomen in het ontwerp. Eerder genoemde variatie in de bodem zelf kan lokaal dit effect versterken zodat minder, en wellicht te weinig, capaciteitsruimte overblijft.

Een opvallend aspect in moot 26 is dat de tweede paal (geteld vanaf moot 25) langs de as van de tunnel (rij C) ontbreekt. Deze is vervangen door twee groutankers, waarvan het groutlichaam op 11 m onder de vloer (dus onder het puntniveau van de palen) begint. Het groutlichaam is 6 m lang. Elk groutanker bestaat uit een Dywidag staaf rond 32 mm en is afgespannen op 300 kN voorspankracht na plm. 2 maanden. De grotere lengte en kleinere doorsnede doet vermoeden dat deze elementen een veel lagere stijfheid hebben dan de trekpalen en daardoor weinig belasting dragen, wat zou leiden tot een grotere belasting van de palen in de omgeving.

4.6 Het verlengen van de tunnel

In de afgelopen tijd zijn er regelmatig lekkages geweest in diepliggende constructies, zoals tunnels. Dit aspect is beschreven in een rapport van Rijkswaterstaat [9]. Dit rapport is nagelopen op waarnemingen, die relevant kunnen zijn voor de Prinses Margriettunnel:

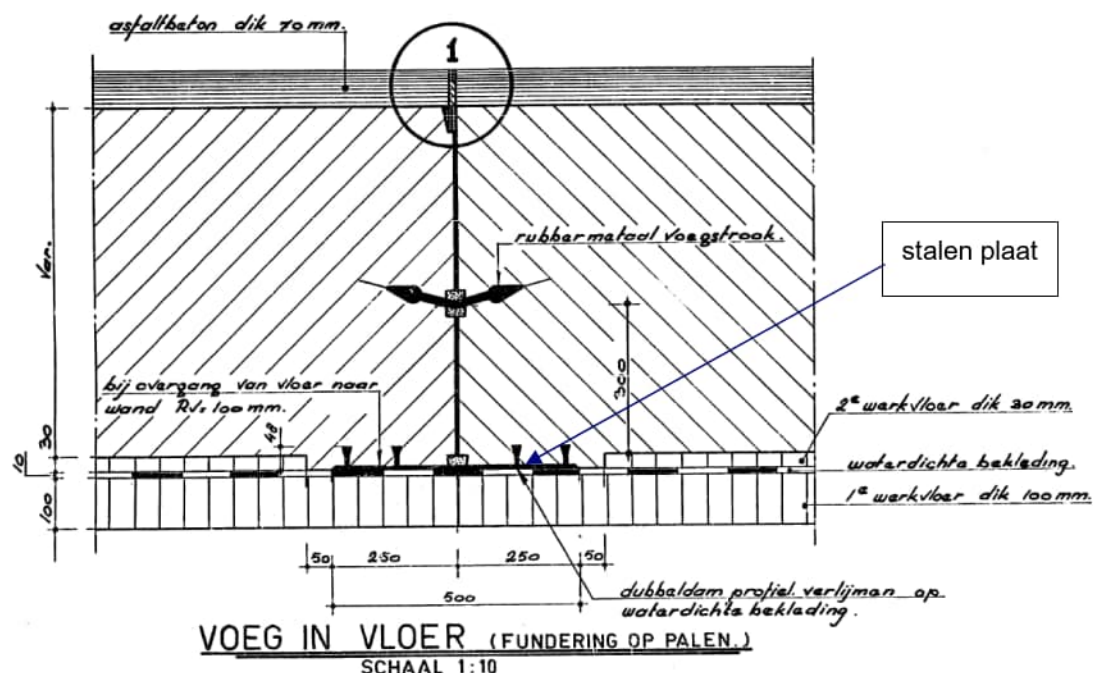
- Bij de Vlaketunnel is 1 voeg in 35 jaar van 0 naar 25 mm gegaan (pag. 34).
- Bij de Coentunnel is 10 jaar gemeten, en hier nam de voegbreedte met gemiddeld 1 mm/jaar toe.
- Bij de Vlaketunnel is zand, asfaltresten etc. in de voegen gevonden (pag.37).
- Bij een kleine onderdoorgang onder de A15 in Hardinxveld stroomt zand uit de voeg (pag. 56).

Het document geeft verschillende overwegingen die een rol kunnen spelen in de problematiek van de voegen.

- Palen verhinderen de krimp van het beton; Hierdoor ontstaan scheuren in de betonvloer.
- Voegen in niet onderheide delen zijn groter dan in onderheide delen. Dit geeft aan dat palen de verplaatsing beperken; dus kracht op de paal.

In de voeg zijn verschillende maatregelen genomen om deze flexibel te houden. Figuur 4.3 toont deze in detail:

- Onder het beton ligt een stalen plaat.
- Halverwege is er rubberprofiel ingestort.
- Bovenin zit een rubberafdichting. Er is niet geïnjecteerd.
- Over de rubberafdichting ligt het asfalt.



Figuur 4.3 Details van de voeg in de vloer (moot 40, schaal is oorspronkelijke tekening).

In Bijlage A zijn de vierjaarlijkse lengtemetingen van de Prinses Margriettunnel vanaf 2010 (start metingen) uitgewerkt [11]. Tabel 4-1 geeft een samenvatting van de resultaten.

Tabel 4-1 Samenvatting gesommeerde lengtes moten en voegen.

| Meting | Temperatuur | Voegen | Moten | Gesommeerd |
|-------------|--------------|--------|-------|------------|
| | [°C] | [mm] | [mm] | [mm] |
| H0 20100310 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| H1 20130129 | n.g. (plm 7) | 32 | -20 | 13 |
| H2 20171107 | 7 | 7 | 35 | 42 |
| H3 20210601 | 18 | -106 | 183 | 77 |

Bij deze metingen speelt de temperatuur van de constructie een belangrijke rol. Het temperatuurverschil tussen de nulmeting H0 en de derde herhalingsmeting H3 is 15°C. Voor het opentunneldeel geeft dit een verlenging van orde 150 mm, wat redelijk overeenkomt met de gemeten 183 mm. Ook herhalingsmeting H2 geeft een vergelijkbaar resultaat. Bij herhalingsmeting H1 wijkt het resultaat sterk af, wat mogelijk verklaard kan worden uit het feit dat in KNMI meetstation Leeuwarden kort voor de metingen een lange zeer koude periode is geweest [7].

In het algemeen blijkt dat de tunnel langer wordt, en dat de voegen de vervormingen van de moten niet volgen. De voegen worden wijder. Dit is bij andere tunnels ook geconstateerd. De oorzaak hiervan is niet bekend. Er kan gedacht worden aan:

- Het vervuilen van de voegen (instromen van grond aan de onderzijde, straatvuil aan de bovenzijde).
- Een hysterese mechanisme waardoor de wrijvingsweerstand tijdens uitzetten lager is dan tijdens krimpen. Dit kan ontstaan door horizontale krachten op de constructie of het roteren van de moten, bijvoorbeeld per seizoen.
- De (dynamische) verkeersbelastingen die tijdens oprijden anders kunnen zijn dan tijdens afrijden.
- Een ander mechanisme of een combinatie van mechanismes.

Als de moten horizontaal verplaatsen, leidt deze opgelegde verplaatsing onvermijdelijk tot horizontale verplaatsingen in de paalkoppen. In bijlage A zijn de verplaatsingen in lengterichting bekeken. Deze verplaatsing treedt op, hierbij moeten een eventuele verplaatsing in dwarsrichting nog worden opgeteld.

4.7 Samenvatten van de belangrijkste faalmechanismes

De belangrijkste mechanismes zijn:

- Het breken van een voerspanstaaf, waardoor andere staven een hogere belasting krijgen en er steeds sneller meer voerspanstaven gaan breken.
- Het geotechnisch bezwijken van een deel van de fundering, waarna een herverdeling van krachten in de palen leidt tot het breken van voerspanstaven.

Bij het echt omhoogkomen van de moot zullen de zwaarst belaste voerspanstaven breken door overbelasting, maar in de fase daarvoor kan spanningscorrosie optreden. Hiervoor is een hoge spanning of een corrosief milieu noodzakelijk. Een verhoogde spanning kan onder andere ontstaan door variatie in bodem- en paaleigenschappen. Een meer corrosief milieu kan ontstaan doordat de palen scheuren. Het ontbreken van een randwapening veroorzaakt dat deze scheuren direct tot (voor)bij de voerspanstaaf kunnen komen.

Opgemerkt moet worden dat voortdurend rekening moet worden gehouden met de mogelijkheid dat andere aspecten dan hier genoemd een (belangrijke) rol hebben gespeeld.

5 Voorstel onderzoek

Dit hoofdstuk beschrijft het voorstel voor de start van het onderzoek. Hierbij ligt de nadruk op het noodzakelijke veldwerk.

5.1 Voorbereiding

Vanuit het oogpunt van veiligheid moet er van worden uitgegaan dat de palen gescheurd zijn, zodat er bij gebroken staven water door het vrij gekomen kanaal de tunnelbak kan instromen de waterstand buiten de tunnel boven de tunnelvloer ligt. Maatregelen om dit te voorkomen zijn noodzakelijk (lage grondwaterstand, aanwezigheid afdichting kanalen).

Om verder omhoogkomen van de constructie te voorkomen, moet elke moot zo stabiel zijn, dat het wegvallen van één of een enkele paal niet tot problemen kan leiden. Overwogen kan worden om tijdens en na de werkzaamheden de ligging van de moot goed te monitoren zodat vervormingen die de verkeersveiligheid kunnen beïnvloeden tijdig worden opgemerkt.

Om het palenplan zoals dat uitgevoerd is (en inzicht in de locaties waar palen eventueel gebroken zijn) vast te kunnen stellen moet ter plaatse van de palen het asfalt worden weggefreest. In de Vlaketunnel waren de paalkoppen van zowel de reguliere palen als de vervangende palen daarna duidelijk zichtbaar.

5.2 Te onderzoeken moten

Het onderzoek wordt beperkt tot de moten die op trekpalen zijn gefundeerd. Dit zijn aan de zuidzijde de moten 7-22 en aan de noordzijde de moten 23-36. Dit zijn dus in totaal 30 moten.

De keuze van de te onderzoeken moten wordt gebaseerd op:

- De diameter van de voorspanstaven. Zowel 32 mm als 36 mm voorspanstaven moeten in het onderzoek worden beschouwd. De moten 7 t/m 10 en 33 t/m 36 hebben een 32 mm voorspanstaaf, alle tussenliggende moten een 36 mm voorspanstaaf.
- De diepte van de moten. De plaatsing van de palen in het veld zijn aangepast op de diepte van de moot i.v.m. de invloed van de buigende momenten uit de wand [6].
- De grondsoort onder de moten, ontleend aan het grondonderzoek in 1974 (zie bijlage H.2)
- De waargenomen bewegingen van de moten in de afgelopen jaren [11].
- De voorbelasting van de moten 17-21 in de zuidelijke toerit door het bouwen van de afzinktunnel.
- De staal leveringen ('batches') tijdens de bouw. Deze zijn echter momenteel onbekend.
- De door VSF gekozen locaties voor kernboringen voor sonderen door de vloer. Momenteel zijn sonderingen voorzien op 6 locaties Sneek (noordwest)zijde en 4 locaties Joure (zuidoost)zijde.

Tabel 5-1 Overzicht karakteristieke eigenschappen moten voor keuze onderzoek.

| | Moot | Staaft | Diepte | Zink-deel | Grond | Beweging | Opmerking |
|-----------|------|--------|--------|-----------|------------------|-----------|--------------------------|
| | | veld | [m] | | | 2021 | |
| ZO | 7 | 32 | 4.1 | x | Holocene zand | | Wand op drukpalen |
| | 8 | 32 | 4.8 | x | Holocene zand | | Wand op drukpalen |
| | 9 | 32 | 5.5 | x | Holocene zand | | Wand op voorspanstaaf 32 |
| d | 10 | 32 | 6.2 | x | Klei | | Wand op voorspanstaaf 32 |
| | 11 | 36 | 6.9 | x | Overgang | | Wand op voorspanstaaf 32 |
| | 12 | 36 | 8.2 | x | Drente klei | | |
| | 13 | 36 | 9.0 | x | Drente klei | | |
| c | 14 | 36 | 9.9 | x | Drente klei | Oostzijde | |
| | 15 | 36 | 10.8 | x | Drente klei | | |
| | 16 | 36 | 11.6 | x | Drente klei | | |
| | 17 | 36 | 12.4 | zink | Drente klei | | |
| c | 18 | 36 | 12.9 | zink | Drente klei | Westzijde | |
| | 19 | 36 | 13.4 | zink | Pleistocene zand | | |
| | 20 | 36 | 13.7 | zink | Pleistocene zand | | |
| c | 21 | 36 | 13.9 | zink | Pleistocene zand | | |
| | 22 | 36 | 16.2 | x | Pleistocene zand | | Pompkelder met damwanden |
| NW | 23 | 36 | 14.9 | x | Drente klei | | Pompkelder met damwanden |
| | 24 | 36 | 11.9 | x | Drente klei | Westzijde | |
| b | 25 | 36 | 11.1 | x | Drente klei | Westzijde | |
| a | 26 | 36 | 10.3 | x | Drente klei | Oostzijde | Gefaalde moot |
| b | 27 | 36 | 9.5 | x | Drente klei | | |
| | 28 | 36 | 8.7 | x | Drente klei | | |
| | 29 | 36 | 7.9 | x | Holocene zand | | |
| c | 30 | 36 | 6.9 | x | Holocene zand | | Wand op voorspanstaaf 32 |
| | 31 | 36 | 6.2 | x | Holocene zand | | Wand op voorspanstaaf 32 |
| d | 32 | 36 | 5.7 | x | Holocene zand | | Wand op voorspanstaaf 32 |
| | 33 | 32 | 5.1 | x | Holocene zand | | Wand op drukpalen |
| | 34 | 32 | 4.6 | x | Holocene zand | | Wand op drukpalen |
| | 35 | 32 | 4.1 | x | Overgang | | Wand op drukpalen |
| | 36 | 32 | 3.7 | x | Klei | | Wand op drukpalen |

De volgende moten zijn geselecteerd voor onderzoek (de z.g. "onderzoeksmoten"):

- a Moot 26 die omhoog is gekomen (Drente klei).
- b De moten 25 en 27 (beide op Drente klei) naast de omhoog gekomen moot 26, omdat deze mogelijk een rol hebben gespeeld bij het omhoogkomen van moot 26.
- c De moten 14 (Drente klei), 18 (Drente klei), deze hadden in 2021 relatief veel verplaatsing, en moot 21 (Pleistocene zand) de diepste moot waarop de zinktunnel is

- gebouwd en moot 30 (Holocene zand), eveneens met 36 mm voorspanstaven, maar met een verschillend palenpatroon en andere waterdruk.
- d De moten 10 en 34 met 32 mm voorspanstaven, onder vloer en wand op trekpalen (Holocene zand).

Tabel 5-2 geeft een overzicht van de genoemde "onderzoeksmoten", naast natuurlijk moot 26. Ongeveer één op de vier moten wordt onderzocht.

Tabel 5-2 Overzicht onderzoeksmoten (diepte is bovenzijde vloer aan de hoge zijde).

| Moot noord | Diepte [m] | Type fundering | Moot zuid | Diepte [m] |
|------------|------------|------------------------------|-----------|------------|
| 34 | 4.6 | Trekpaal 45 cm Dywidag 32 mm | 10 | 6.2 |
| 30 | 6.9 | Trekpaal 45 cm Dywidag 36 mm | 14 | 9.9 |
| 27 | 9.5 | Trekpaal 45 cm Dywidag 36 mm | 18 | 12.9 |
| 25 | 11.1 | Trekpaal 45 cm Dywidag 36 mm | 21 | 13.9 |

5.3 Vervormingen van de tunnel

De eerste vraag die beantwoord moet worden, is of er sprake is van geotechnisch bezwijken of constructief bezwijken van de funderingspalen. Om het onderscheid tussen deze twee bezwijkmechanismes te kunnen vaststellen is het in ieder geval noodzakelijk om te controleren of er sprake is van bezweken voorspanstaven (zie volgende paragraaf).

Daarnaast is het noodzakelijk om inzicht te verkrijgen in de vervormingen die in de loop van de tijd in de constructie zijn opgetreden. De volgende onderzoeken kunnen daarover informatie geven:

- Analyseren van Insar-metingen, waarmee inzicht wordt verkregen in verplaatsingen in de tijd.
- Uitvoeren van een rioolinspectie, waarmee inzicht wordt verkregen in verplaatsingen ter plaatse van de voegen tussen de moten.
- Controleren of zich onder de tunnelvloer een holle ruimte bevindt.
- Het inmeten van de vervormingen van de tunnelmoten
- Nader analyseren van de deformatiemetingen die de laatste jaren zijn uitgevoerd.

5.3.1 Insar-metingen

De Insar metingen zijn over een langere tijdsperiode beschikbaar. Deze zijn dus al uitgevoerd en geven de mogelijkheid het historische vervormingsgedrag te beoordelen. De Insar metingen geven inzicht in de seizoensinvloed van de verticale verplaatsingen, en mogelijke trend in verplaatsingen, de variatie over de tunnel en de maximaal opgetreden waarden. Onduidelijk is of horizontale verplaatsingen met voldoende betrouwbaar uit de Insar metingen kunnen worden afgeleid.

5.3.2 Rioolinspectie

De ligging van het riool ter plaatse van alle mootvoegen wordt in beeld gebracht. Hierbij moet worden bepaald of er schade zichtbaar is en hoe groot de horizontale of verticale verplaatsing in het riool is.

Een rioolspecie geeft inzicht in de schade aan de riolering. Als de riolering ter plaatse van de mootovergangen is beschadigd, betekent dit dat het aannemelijk is dat op deze mootovergang een (te) groot verschil in verplaatsing is opgetreden.

5.3.3 **Inspectie holle ruimte onder de vloer**

De eventuele aanwezigheid van een holle ruimte onder de vloer wordt onderzocht bij voorkeur voor alle onderzoeksmoten. De vier hoekpunten en punten onder de middenberm nabij de randen van de moot zijn de voorkeurspunten

Bij de Vlaketunnel was dergelijk onderzoek goed uitvoerbaar omdat er een bemaling actief was. In de Vlaketunnel zijn hiervoor kernboringen gebruikt, die toch al nodig waren.

Uit praktische overwegingen is besloten om de boringen die voor de sonderingen door de vloer heen worden gemaakt, hiervoor te gebruiken. Er zal een voorziening nodig zijn om lekkage door deze openingen te voorkomen.

De aanwezigheid van een holte onder de vloer is voor het calamiteiten onderzoek relevant, omdat de aanwezigheid van een holte uitsluit dat er een gronddruk tegen de tunnel vloer werkt. Dan is aangetoond dat alleen de waterdruk hier actief is. Deze holte kan watervoerend zijn en daardoor is de druk niet per sé hydrostatisch. Kennis omtrent de afwijking van de hydrostatische druk is van belang voor het calamiteiten onderzoek en het ontwerp van de fundering.

Deze openingen kunnen mogelijk ook worden gebruikt om de actuele waterdruk tegen de vloer te bepalen. Deze meting is nog niet met de aannemer besproken, maar kan een nuttige validatie van de aangenomen verdeling van de waterdrukken zijn omdat een doorgaande spleet onder de tunnelvloer zal resulteren in een stijghoogte die afhangt van de stijghoogtes in de doorsneden grondlagen op basis van de toestroom-weerstand vanuit ieder van de pakketten naar de ruimte onder de vloer.

5.3.4 **Inmeten van de vervorming van de tunnelwanden**

Naast de onderzoeksmoten wordt de helling van beide tunnelwanden opgemeten. Deze activiteit kan vermoedelijk vanaf de rand van de tunnel worden uitgevoerd. Het doel is inzicht te krijgen in de kromming en daarmee de kracht op de wand als gevolg van de gronddruk tegen de wand. Als deze gronddruk hoog is, werken er grote momenten op de overgang tussen de wand en de vloer, die invloed hebben op de belasting op de trekpalen. De aanname voor deze belasting die tijdens het ontwerp is gedaan, kan hiermee worden gecontroleerd.

Het opmeten van de stand van de wand op 4 hoogtes, 0%, 50%, 70 en 90% van de wand en bovenzijde van de wand. De 0% hoogte is zo dicht mogelijk bij bovenzijde vloer. Het betreft twee lijnen aan de uiteinden van de moot en één in het midden van de moot, dus per moot drie verticalen. Beide wanden van een onderzoeksmoot worden opgemeten.

De andere vervormingsmetingen aan de vloer en de wanden van de overige moten (zie bijlage J.1) worden voorlopig niet voorgesteld. Deze kunnen indien deze toch noodzakelijk blijken, later alsnog worden uitgevoerd.

5.3.5 **Vervormingen van de voegen**

De vervormingen van de voegen worden gemonitord (in de tijd regelmatig vastgelegd). Uit paragraaf 4.6 lijkt te volgen dat de voegen niet (meer) in staat zijn de vervormingen (door temperatuur variaties) volledig te compenseren. Dit kan leiden tot additionele (horizontale) krachten op de palen.

Naast het meten van de voegwijdtes is het ook noodzakelijk op hetzelfde moment de lengte van de moten te bepalen en de temperatuur van de constructie. Deze meting moet regelmatig worden uitgevoerd, zodat seizoensinvloeden goed worden meegenomen. Als startfrequentie wordt één maal per maand voorgesteld. Als alternatieve aanpak kan worden overwogen

alleen in de heel koude tijd en in de heel warme tijd een aantal metingen uit te voeren, zodat de extreme waarden goed inzichtelijk worden.

In overleg met de aannemer is afgesproken deze meting uit te voeren met de operationele total station, dus aan de bovenzijde van de wanden. Uit deze metingen kunnen de voegwijdte en de elementlengte worden bepaald. Aanvullend wordt er in het hart van de tunnel (ter plaatse van de middengeleiding) een monitoring van de voegwijdte gedaan, om na te gaan of de aan de wanden gemeten voegwijdtes redelijk overeenkomen met de voegwijdtes in de vloer.

Als de voegen inderdaad niet goed functioneren moet worden nagegaan wat daar de oorzaak van is en zou er rekening mee moeten worden gehouden bij het ontwerp van de nieuwe fundering en de beoordeling van tunnels met een vergelijkbare fundering.

5.4 Onderzoek van moten 25, 26 en 27

Om te onderzoeken of er sprake is van geotechnisch bezwijken of constructief bezwijken van de funderingspalen is het in ieder geval noodzakelijk om te controleren of er sprake is van bezweken voerspanstaven. Hiervoor worden alle conussen van de te onderzoeken palen onder de rijvloer worden open gemaakt om de koppen van de voerspanstaven te kunnen inspecteren.

5.4.1 Overzicht werkzaamheden

Voor alle te openen conussen

Voor alle te openen conussen bestaat de inspectie uit:

- Een visuele inspectie van de kop van de voerspanstaaf.
- Het opmeten van de positie van de voerspanstaaf en de lengte van de beschikbare schroefdraad.
- Het meten van de "weerstand" tussen de voerspanstaaf en het grondwater onder de tunnelmoten.
- Het aanslaan van de voerspanstaaf met een rubberhamer. Dit wordt ter plaatse beoordeeld, maar ook opgenomen voor latere analyse. Hiervoor is het noodzakelijk dat er regelmatig geen verkeer is of dat de tunnel kortdurend in beide richtingen wordt afgesloten. Op basis van de beoordeling van het geluid en het uiterlijk van de staafkop wordt de keuze van de palen die aan een trekproef worden onderworpen heroverwogen.
- Het meten van de hoek van de staaf met de verticaal in twee richtingen, d.w.z. evenwijdig met en loodrecht op de tunnel as, inclusief de richting van de scheefstand.

Er worden in beginsel acht voerspanstaven getest volgens het patroon dat getoond wordt in Figuur 5.1. Dit kan lopende het onderzoek nog worden aangepast op basis van voorafgaande inspecties en bevindingen en de mogelijkheid of onmogelijkheid om de ballast te verplaatsen. Ook de twee aanwezige trekankers moeten volgens dit protocol worden beoordeeld.

Het testen bestaat uit twee delen:

- Gestart wordt met de controle of de staaf is gebroken (dus zonder wezenlijke weerstand uit het voerspankanaal kan worden getrokken). Dit kan met een kraan worden uitgevoerd, onder de voorwaarde dat deze de belasting langzaam kan worden opgevoerd en de trekkracht wordt gemeten.
- Voor de voerspanstaven waarbij dit niet lukt wordt de trekinstallatie wordt geplaatst en met de vizeelopstelling de voerspanstaaf aangespannen tot de voerspanmoer loskomt van het onderliggende beton. Voor deze activiteit moeten specifieke veiligheidsmaatregelen worden genomen. De kracht op- en de verplaatsing van de voerspanstaaf worden bij beide processen gemeten.

Voor palen waar de voorspanstaaf is gebroken

Van de voorspankanalen waar de staaf verwijderd kan worden wordt de hoek van het voorspankanaal in de vloer en de paal gemeten. Een visuele inspectie van de overgang van de vloer en de paal wordt uitgevoerd. De volgende gegevens zijn wenselijk:

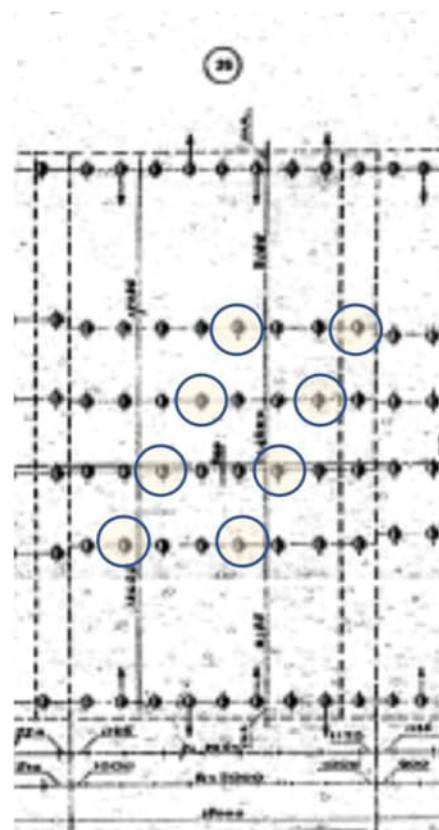
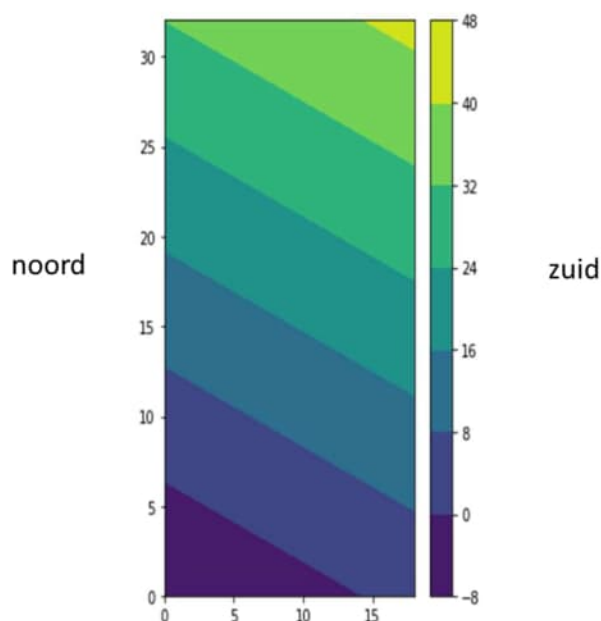
- Is er een verschuiving van de tunnelvloer ten opzichte van de paalkop (grootte en richting vastleggen).
- Is er sprake van een hoekverdraaiing van de paalkop ten opzichte van de verticaal (grootte en richting vastleggen).

Tevens wordt een redelijke hoeveelheid van het vet en de compriband opgevangen voor nader laboratorium onderzoek.

Voor palen waar de voorspanstaaf nog intact is (niet is gebroken)

Voor de palen waarvan de voorspanstaaf niet kan worden verwijderd wordt de aanhechting tussen de paal en de vloer als volgt onderzocht:

- Direct naast de conus wordt een kernboring tot de stalen plaat uitgevoerd (diameter 100 mm); de betonnen boorkern wordt opgeslagen om later eventueel te gebruiken voor materiaaltesten.
- De vloerdikte tot aan de stalen plaat wordt ingemeten.
- In de stalen plaat wordt een klein inspectiegat voor de minicamera geboord.
- Controle op de aanwezigheid van een (openstaande) opening (scheur) onder de plaat met een minicamera. Vaststellen grootte en richting van het verloop van de opening.
- Doorzetten van de kernboring tot in de paal voor tweede inspectie; de betonnen boorkern wordt opgeslagen om later eventueel te gebruiken voor materiaaltesten en/of voor het vaststellen van de aanwezigheid van scheuren.
- Uitvoeren tweede visuele inspectie en eventueel vaststellen van de scheurwijdte en het verloop hiervan over de paalkop (hoekverdraaiing van de paalkop ten opzichte van de vloer).



Figuur 5.1 Positie meetpunten moot 26.

Er worden twee kernboringen uitgevoerd in palen waarvan de voorspanstaaf is gebroken. Deze worden in het begin uitgevoerd zoals dit voor een niet gebroken staaf wordt gedaan. Deze kernboringen hebben tot doel de materiaal eigenschappen van de beton te bepalen. Dit bepaalt de grootte van de kernboring. Indien mogelijk wordt de kernboring doorgezet tot vlak onder het breukpunt van de voorspanstaaf, waarna het boorgat wordt geïnspecteerd op de eventuele aanwezigheid van scheuren in de paal ter plaatse van de breuk.

5.4.2 Toelichting en motivatie

Gezien de planning om het traject snel toegankelijk te maken voor (eventueel beperkt) verkeer [13] is het uitvoeren van werkzaamheden op en door de vloer en in de wand lastig. De ontwerpnota voorziet dat de belasting die de moot op zijn positie moet houden, bestaat uit rijplaten. Deze moeten tot ongeveer 1.80 m worden opgestapeld langs de wanden. Het restant van het benodigde belasting wordt gespreid over 8 rijen in het vloerveld. Dit geeft een geschatte stapelhoogte van 93 platen dus orde 1.4 m. Om te kunnen werken zullen steeds twee rijen moeten worden verwijderd en worden verdeeld over de resterende 6 rijen. Dit geeft een stapelhoogte orde 1.9 m. Als dit al mogelijk is, moet worden overwogen bij het plaatsen van de ballast hiermee rekening te houden. De benodigde stapelhoogte kan mogelijk worden beperkt door een (kortdurende lokale) bemaling toe te passen.

Na het openen van de conussen worden de palen aangeslagen en het geluid wordt ter plaatse beoordeeld. In de Vlaketunnel bestond duidelijk het idee dat het hoorbaar was of een voorspanstaaf gebroken was. Aangezien dit een krachtig instrument kan zijn voor het onderzoek is het wenselijk dit beter te onderzoeken en een betrouwbaar (en mogelijk objectief) criterium te bepalen. Dit resultaat kan nuttig zijn voor het onderzoek aan de Prinses Margriet tunnel, maar zeker ook voor toekomstige inspecties van de fundering van andere tunnels.

Het nagaan van de kwaliteit van de voorspan staven in de omhooggekomen moot is een belangrijk onderdeel om te beoordelen of er sprake is van geotechnisch of constructief bezwijken. Voor de bepaling van het faalmechanisme is dit essentieel.

Zeker in de onderzoeksmoot moet een voldoende aantal conussen worden geopend. Dit is noodzakelijk, omdat voor het onderzoek zoveel mogelijk moet worden uitgesloten dat de conclusies worden gebaseerd op toevallige afwijkingen.

Ook de twee aanwezige trekankers moeten worden beoordeeld. Het is een lastig probleem om te bepalen of deze een rol hebben gespeeld bij het falen van deze moot. Daarom moet voor deze ankers worden vastgesteld of deze nog in tact zijn en welke spanning er in de staven aanwezig is door deze te trekken tot de moer gaat bewegen.

Voor de overige moten wordt voorgesteld een aantal palen te openen, deze staven aan te slaan en de voorspanstaaf met een trekproef te belasten, zodat kan worden nagegaan welke percentage van voorspanstaven is gebroken. hiervoor moet nog een protocol worden opgesteld, waarbij aandacht moet worden besteed aan de veiligheid. De staven worden belast tot de voorspanmoer loskomt van de constructie.

Inzicht in de kwaliteit van de fundering onder de overige moten is van belang om te bepalen of het omhoogkomen van moot 26 een uitzonderlijke situatie is geweest of dat deze gebeurtenis de eerste van een te verwachten reeks is. Bij de Vlaketunnel heeft het verschil tussen de oostelijke en westelijke inrit een belangrijke ondersteuning gegeven voor de invloed van het chloridegehalte op het falen van de fundering.

5.4.3 Palen met bezweken voorspanstaaf

Als een voorspanstaaf is gebroken kan deze worden verwijderd en komt een deel van het kanaal vrij voor (visuele) inspectie van de wand van het voorspankanaal. Voor een visuele inspectie moet geen water of schoon water in het kanaal staan. Een risico voor dit onderzoek is dat het vet rondom de voorspanstaaf het zicht belemmert. Misschien is het mogelijk met een sterk vetoplosmiddel in combinatie met roterende staalborstel de vet- en compriband resten te verwijderen.

Het vet en de compriband worden voor nader onderzoek bewaard. Indien er in het grondwater stoffen worden aangetroffen die tot versnelde spanningscorrosie kunnen leiden, dan kan dit compriband worden gebruikt om na te gaan of deze stoffen de voorspanstaaf hebben bereikt.

Alle verwijderde materialen worden zorgvuldig verpakt en afgevoerd voor nader onderzoek in het laboratorium. Zie paragraaf 6.2 voor een korte nadere omschrijving.

Verder wordt voorgesteld om bij één paal waarvan de voorspanstaaf is gebroken een lange kern te boren, net naast de voorspanstaaf, bij voorkeur tot net voorbij het bezwijkvlak van de voorspanstaaf. Via een beoordeling van de boorkern en van het boorgat kan vastgesteld worden waar zich eventuele scheuren in de palen bevinden. Door een dergelijk onderzoek wordt de waterdichte afdichting onder de vloer mogelijk doorbroken. Dat betekent dat vooraf moet worden bepaald op welke wijze die afdichting na het onderzoek weer wordt hersteld.

Er moet rekening worden gehouden met het feit dat tijdens het breken van een voorspanstaaf een plotselinge herverdeling van de krachten in de paal optreedt, die mogelijk tot scheurvorming kan leiden.

5.4.4 Palen waarin de voorspanstaaf intact is

Als een voorspanstaaf niet is gebroken kan deze niet worden verwijderd. Deze staaf wordt op voorspanning getest.

Het verdere onderzoek wordt primair uitgevoerd op niet bezweken moten naast palen waarvan de voorspanstaaf niet is gebroken, maar overwogen kan worden dit ook uit te voeren op een paal onder moot 26 die geen grote vervorming heeft gehad (dus een paal die aan de westzijde van de moot staat).

Dit onderzoek kan worden waarschijnlijk op de volgende manier worden uitgevoerd:

- Direct naast de conus wordt een kernboring tot stalen plaat uitgevoerd, boorkern beton gebruiken voor materiaaltesten.
- In de stalen plaat wordt een klein inspectie gat aangebracht.
- Controle op de aanwezigheid van een (openstaande) scheur onder de plaat met een minicamera.
- Doorzetten van de kernboring tot in de paal voor tweede inspectie en boorkern beton gebruiken voor materiaaltesten. Hiervoor kan eventueel een beperktere diameter worden gebruikt dan de kernboring in de vloer.
- Uitvoeren tweede visuele inspectie en eventueel vaststellen de scheurwijdte en het verloop hiervan over de paalkop (hoekverdraaiing van de paalkop ten opzichte van de vloer).

De controle op de stand van de paal ten opzichte van de vloer is van groot belang, omdat hiermee ondersteuning of verwerping van het faalmechanisme dat berust op horizontale vervorming kan worden gevonden. Het (systematisch) ontbreken van de scheur aan de paalkop zou suggereren dat het faalmechanisme bezwijken door horizontale verplaatsingen onwaarschijnlijk is.

Naast het maken van betonnen proefstukken moet worden nagegaan of het mogelijk is een stukje van de staaf te verwijderen voor materiaalkundig onderzoek. Voor sterkte onderzoek is het deel van de staaf dat redelijkerwijze kan worden verwijderd (boven de voerspan moer) te kort. Hierbij moet aandacht worden besteed aan het beperken van de invloed van het verwijderen van het materiaal (b.v. warmte ontwikkeling) op de kwaliteit.

5.4.5 Onderzoek aan de palen onder de wand

Onderzoek naar de staat van de palen onder de wand (zie bijlage J.2) is erg lastig uitvoerbaar en wordt daarom vooralsnog uitgesloten. Gezien het feit dat deze palen de grootste verplaatsing hebben gehad en daarom mogelijk wel geotechnisch zijn bezweken is deze (noodzakelijke?) uitsluiting potentieel een beperking die een definitieve vaststelling van het faalmechanisme onmogelijk maakt.

5.5 Onderzoek overige moten

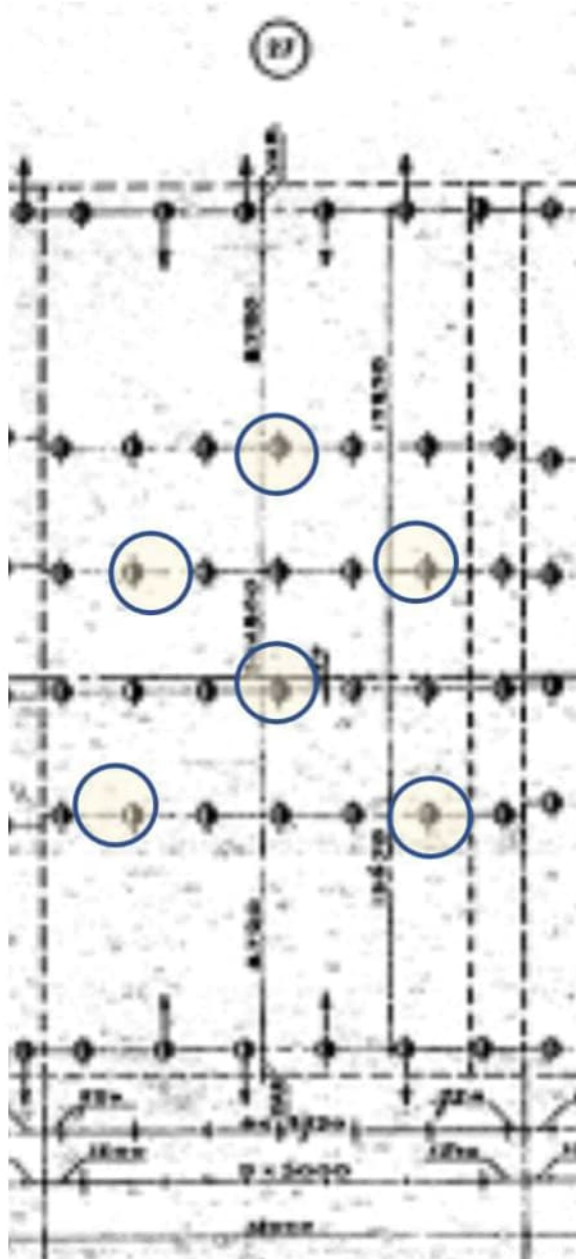
Deze metingen zoals uitgevoerd op de moten 25-27 moeten op een beperkt aantal moten in de omgeving van moot 26 en een aantal moten in de zuidelijke oprit worden herhaald. Het aantal te openen conussen per moot kan kleiner zijn dan bij moot 26. Bij de Vlaketunnel bleek in de oostelijke oprit 40% van de voerspanstaven beschadigd, terwijl in de westelijke oprit in de steekproef geen defecte staven zijn gevonden. De (optimale) grootte van de steekproef moet nader worden bepaald.

Op de overige moten werd voorgesteld per moot zes palen te inspecteren. Figuur 5.2 toont het voorgestelde patroon, dat bestaat uit over de breedte 1,2,1,2 palen. Daardoor ontstaat een redelijk beeld van de fundering. In verband met de toegankelijkheid van de tunnel bleek het vooralsnog echter nodig van dit patroon af te wijken en is het nu geplande aantal te onderzoeken palen gereduceerd tot 5 per moot.

De werkzaamheden zijn identiek aan de werkzaamheden aan moot 26, waarbij

- Alleen de te inspecteren conussen worden geopend.
- Het aantal uit te voeren kernboringen tot het punt van paalbreuk worden uitgevoerd zal worden vastgesteld op basis van de resultaten van het onderzoek aan moot 26. Dit is naar verwachting lager dan twee per moot.

Op basis van praktische overwegingen (toegankelijkheid) en variatie van lokale omstandigheden zal er enige variatie in de locaties en aantallen van te inspecteren palen ontstaan, maar het basis patroon van 1, 2, 1, 2 palen blijft voorgesteld.



Figuur 5.2 Voorstel inspectiepatroon onderzoeksmoten.

5.6 Sondeonderzoek i.v.m. variatie in bodemeigenschappen

Aan de buitenzijde van de tunnelwand worden sonderingen uitgevoerd tot 1 m onder het paalpunt niveau in de moot. Dit gebeurt naast beide wanden in een onderlinge afstand die overeenkomt met de afstand tussen de palen. Omdat dit in een aanzienlijk aantal sonderingen resulteert, wordt dit onderzoek in eerste instantie beperkt tot tweemaal 9 sonderingen per wand langs moot 26.

Het sondeonderzoek moet primair de variatie in de grond op het niveau van de trekpalen opleveren, dus worden uitgevoerd tot 24 m -NAP. Het traject langs de wand is minder interessant, maar moet wel volgens de norm worden uitgevoerd. Dit onderzoek kan mogelijk informatie opleveren over het type van de aanvulling achter de wand en de druk tegen de wand.

Deze sonderingen zijn wenselijk voor het calamiteiten onderzoek van moot 26. In de gangbare ontwerpmethodiek werd ten tijde van het ontwerp zeer beperkt rekening gehouden met de variatie in bodemeigenschappen. Uit de destijds uitgevoerde sonderingen blijkt dat er wel variatie in eigenschappen bestaat. Aangezien de palen door de grote stijfheid van de vloer met vrijwel gelijke vervorming worden belast, leidt een verschil in bodemstijfheid tot een grotere belasting in de palen met een grotere stijfheid. De daaruit volgende ongelijkheid in trekbelasting kan een bijdrage hebben geleverd aan het falen van de fundering. Omdat de moten voornamelijk onafhankelijk van elkaar functioneren, is inzicht in de variatie binnen één moot noodzakelijk. Door de sonderingen in lijn te brengen met de afstand tussen de palen in de moot, ontstaat een statistisch verantwoord idee over de verschillen in stijfheid van de palen. Deze verschillen kunnen als invoer dienen voor de numerieke analyse van de paalfundering.

Als uit deze analyses blijkt dat dit effect een belangrijke bijdrage heeft geleverd aan het falen van moot 26, moet nagegaan worden of dit aspect bij andere moten een rol kan spelen.

Tabel 5-3 geeft een overzicht van de afstanden tussen de palen in de verschillende moten en de daarop gebaseerde aantallen sonderingen langs de wand van de tunnel. Zoals de tabel laat zien betreft dit dus $2 \cdot (3 \cdot 9 + 4 \cdot 6) = 102$ sonderingen. Het betreft moten in de noord-westelijke toerit. Op basis van de resultaten van de analyses in moot 26 moet worden nagegaan of dit de meest wenselijke aanpak is en of er ook sonderingen aan de zuid-oostelijke toerit wenselijk zijn. Overwogen kan worden een aantal van deze sonderingen ten behoeve van het ontwerp van de herstelwerkzaamheden door te zetten tot onder het toekomstige funderingsniveau (vermoedelijk 40 m onder maaiveld).

Tabel 5-3 Locaties sondering langs de wand.

| Moot | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----|
| Aantal randpalen | 13 | 10 | 9 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| Afstand randpalen [m] | 1.4 | 1.8 | 2.0 | 3.0 | 4.15 | 3.75 | 4 |
| Aantal veldpalen in as-richting | 8 | 8 | 8 | 7 | 6 | 7 | 6.0 |
| Afstand veldpalen in as-richting [m] | 2.25 | 2.25 | 2.25 | 2.75 | 3.0 | 3.75 | 3.0 |
| Afstand cpt in as-richting [m] | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Aantal cpt's per wand | 6 | 9 | 9 | 9 | 6 | 6 | 6 |

Toelichting bij Tabel 5-3:

- Afstand rand is de h.o.h. paalafstand tussen de randpalen in lengterichting van de tunnel (in as-richting).
- Afstand cpt is de h.o.h. afstand tussen de sonderingen in lengterichting van de tunnel.

5.7 Additioneel grondonderzoek

In een aantal moten (bij voorkeur de moten 25, 26 en 27 en de onderzoeksmoten) wordt één sondering door de tunnelvloer uitgevoerd. Momenteel wordt gestart met de locaties waar de aannemer grondonderzoek wenselijk acht in verband met de herstel werkzaamheden.

Door tussen de palen in te sonderen zou een beeld kunnen worden verkregen van de beschikbare geotechnische capaciteit. Aanbevolen wordt om ook deze sonderingen zo diep uit te voeren dat deze ook voor het ontwerp van de vernieuwde fundering kunnen worden gebruikt.

De beschikbare sonderingen laten sterk overgeconsolideerd zand zien. Hiervan is bekend dat dit een sterk vertekend beeld kan geven over de beschikbare geotechnische trekcapaciteit na installatie. Door heien wordt veelal het grootste deel van de extreem hoge horizontale spanningen in de ondergrond gereduceerd, en de vraag is in hoeverre de hier toegepaste installatie deze hoge horizontale spanning in tact heeft gelaten. Door sonderingen door de vloer heen uit te voeren kan inzicht worden verkregen over de conusweerstand die nu heersen onder de vloer (het gecombineerde effect van paalinstallatie en de trekkracht in de paal(groep)).

De groepswerking kan in dit geval een grote rol spelen gezien het feit dat relatief korte palen volgens de huidige inzichten een grote trekcapaciteit leveren. Het huidige inzicht in het verschijnsel paalgroepswerking zat tijdens het ontwerp van de Prinses Margrietunnel nog niet in de ontwerpregels, deze zijn pas jaren na het falen bij het Verolme dok (1974) in de ontwerpregels opgenomen.

Voor de situatie dat er door de vloer tegen de waterdruk moet worden gesondeerd zijn speciale afsluiters beschikbaar. Deze techniek is bijvoorbeeld ook in 1977 bij het afgezonken deel van deze tunnel toegepast.

6 Planning experimenteel werk

6.1 Veldwerkzaamheden

Een belangrijke vraag met betrekking tot de planning ligt op het onderwerp bemaling. Het vaststellen van de vervormingen van de tunnel worden bij voorkeur uitgevoerd voordat een eventuele bemaling wordt gestart. De werkzaamheden waarbij gaten in de vloer noodzakelijk zijn, zijn vanuit werkbaarheid beter te doen als de waterstand in de omgeving laag is. Een diepe kernboring in een paal geeft ook een grotere kans op een verbinding met het grondwater want de boring kan (onverwacht) uit de paal lopen of op een andere wijze een grote (doorstroom)opening opleveren. Specifiek is het toegankelijk maken van de conussen onder de wand bij waterdruk risicovol met de waterdruk tegen de wand, omdat de opening zich vermoedelijk in de drukzone van de wand bevindt.

Concluderend wordt gesteld dat de metingen van de openingen onder de paalvloer en eventuele scheurvorming in de palen voor een waterstandsverlaging en de uitsluitend werkzaamheden met een grote kans op lekkage na de waterstandsverlaging moeten worden uitgevoerd.

De werkzaamheden per onderdeel hebben wel een volgorde, die uit de beschrijving volgt. De onderlinge volgorde is minder relevant, waarbij het onderzoek rondom de moten 25, 26 en 27 voorrang zou moeten krijgen. Als een waterstandsverlaging voorzien wordt, zouden eerst de vervormingsmetingen moeten worden uitgevoerd, en later de boorwerkzaamheden tot grotere diepte. Een dergelijke aanpak is waarschijnlijk vanuit logistiek oogpunt niet volledig te verwezenlijken.

De definitieve planning wordt in belangrijke mate bepaald door de werkzaamheden die de aannemer moet doen om de benodigde tunneldelen vrij te maken van ballast en verkeer en eventueel de waterstandsverlaging en herstelwerkzaamheden.

De volgende planning is gemaakt op basis van de constatering dat het verkrijgen van extra informatie op moot 26 een complexe herplaatsing van de ballast noodzakelijk maakt. Het werd daarom verstandig geacht te starten met moten waar meer ruimte voor onderzoek is. Het uitvoeringplan is om deze reden als volgt uitgewerkt

- Start met de onderzoeken bij moot 34 en moot 30.
- Onderzoek de eerste set palen in moot 26.
- Onderzoek moot 25.
- Onderzoek de moten op de zuidoostelijke toerit, van boven (ondiep) naar beneden (diep): d.w.z. achtereenvolgens moot 10, 14, 18 en 21.

Moot 27 is momenteel niet toegankelijk. Onderzoek naar deze moot en vervolg onderzoek op de moten 26 en 25 is afhankelijk van de resultaten en het verwachte nut van vervolgonderzoek.

Tijdens het uitvoeren van de veldonderzoek moet regelmatig kritisch worden beoordeeld of bijstelling van de planning wenselijk of zelfs noodzakelijk is. Geadviseerd wordt tussentijdse evaluaties in de planning op te nemen.

In samenspraak met de aannemer van Hattum en Blankevoort is een gedetailleerd overzicht van de processtappen voor het veldonderzoek opgesteld. Dit overzicht is opgenomen in bijlage K.

6.2 Laboratorium onderzoek

Na het inwinnen van materiaal m.n. het staal van de voorspanstaven en de kernboringen, zal worden onderzocht door TNO. Het betreft onder meer:

- Het reinigen van de voorspanstaven.
- Het afgenomen vet wordt onderzocht op corroderende stoffen die in het grondwater zijn aangetroffen.
- Een (visuele) inspectie van het oppervlak van de staven op sporen van beschadigingen en spanningscorrosie.
- Een (visuele en/of microscopisch) onderzoek) van de breukvlakken om na te gaan welk type breuk is geweest.
- Het vaststellen van de samenstelling van de materialen.
- Het vaststellen van de sterkte eigenschappen van de materialen.
- Het vaststellen van de corrosiegevoeligheid van het staal, met speciale aandacht voor stoffen die in het grondwater zijn aangetroffen.

Opgemerkt wordt dat er al grondonderzoek is uitgevoerd en dat de ingewonnen grondmonsters al in het laboratorium worden beproefd. Dit is een afzonderlijk spoor.

7 Voorgestelde vervolg werkzaamheden

7.1 Rapportage waarnemingen

Tijdens het onderzoek zullen alle metingen en waarnemingen worden vastgelegd in documenten. Na het onderzoek worden deze uitgewerkt en gerapporteerd. De meeste data zullen digitaal beschikbaar worden gesteld, zodat het rapport ook een beschrijving moet bevatten van de database waarin de onderzoeksgegevens staan. Deze beschrijving moet de toegankelijkheid van de data in de toekomst, zowel intern als voor externe partijen garanderen.

7.2 Analyse historische data

Inzicht in het verloop van de vervormingen en de invloed van de seizoenen hierop is wenselijk. Bij voorkeur vanaf het tijdstip van de bouw van de tunnelconstructie, maar dat zal niet mogelijk zijn.

De volgende data bronnen kunnen wel informatie geven:

- Insar metingen van de positie. Het betreft meestal zowel de invloed van de seizoenen als de trend van de verplaatsingen over langere tijd.
- Waterstanden in het kanaal en de omgeving, met name de variaties in en verschillen tussen de watervoerende lagen.
- Historische ontwikkeling van de verkeersbelasting.
- Uitgevoerde vervormingsmetingen.
- Waterstandmetingen in de peilbuizen die na het omhoogkomen zijn geplaatst.

Deze analyses geven inzicht in de werkelijke verplaatsingen van de tunnel en de moten gedurende de een langer deel van levensduur. Deze informatie kan belangrijk zijn, omdat deze de werkelijke vervormingen ten opzichte van de situatie tijdens de aanleg beter zal benaderen en noodzakelijke informatie geeft over mogelijk belastingen (of veranderingen) die hebben bijgedragen aan het ontstaan van het omhoogkomen.

Deze metingen geven vermoedelijk ook de gemiddelde waarden van de vervormingen, die als redelijk nulpunt kunnen dienen voor de beschikbare deformatiemetingen sinds 2010.

Direct na het omhoogkomen van moot 26 is gestart met het belasten van de moot om verdere schade te beperken. In een tweede fase is extra belasting aangebracht om de moot terug te duwen, om verkeer door de tunnel mogelijk te maken. Tijdens deze werkzaamheden is de verplaatsing van de hoekpunten van de moot regelmatig gecontroleerd, meestal elk uur, maar er ontbreken metingen [14]. Door de belasting, de verdeling van de belasting en de verplaatsingen te beoordelen kan mogelijk informatie worden verkregen over de vraag waar de palen wel en niet functioneren, omdat een bezweken paal een ander stijfheidsgedrag heeft dan een functionerende paal.

Inzicht in de vervormingen en de staat van de voorspanstaven geeft de mogelijkheid om onderscheid te maken tussen geotechnisch bezwijken en constructief bezwijken. Tabel 7-1 geeft aan hoe de beoordeling van de verschillende situaties is.

Tabel 7-1 Onderscheid geotechnisch en constructief falen op basis van vervormingen en staat voorspanstaaf.

| Verplaatsing vloer Staat voorspanstaaf | << 10 mm | >> 10 mm |
|---|---------------|-------------------------------|
| In tact en op spanning | Niet bezweken | Geotechnisch |
| Gebroken | Constructief | Constructief (waarschijnlijk) |

7.3 Scenario analyse

Vervolgens wordt op basis van de resultaten na gegaan welk faalmechanisme aannemelijk is en wordt de invoer voor de numerieke analyses ondersteund.

Op basis van de bij het veldonderzoek verkregen informatie en op basis van de analyse van de historische data worden scenario's opgesteld voor de wijze waarop de tunnel heeft gefaald. Die scenario's zijn in dit stadium kwalitatief van aard, waarbij volgorde wordt aangegeven hoe het scenario in de tijd is opgetreden. Per scenario wordt, op basis van de beschikbare informatie, ingegaan op de waarschijnlijkheid ervan.

De aldus opgestelde scenario's worden nader geanalyseerd met numerieke analyses. Afhankelijk van de uitkomst van de scenario analyse dienen deze numerieke analyses ofwel om definitief vast te stellen welk scenario het meest waarschijnlijk is geweest (als de analyse geen eenduidig scenario heeft gegeven) ofwel om een definitief vastgesteld scenario numeriek te verifiëren.

7.4 Numerieke analyses

Een numerieke analyse van het geotechnisch gedrag van de fundering is essentieel voor het vaststellen van het faalmechanisme. Dit betreft gedetailleerde eindige elementen berekeningen (bijv. Plaxis) en berekeningen met D-Foundation. De invloed van de stijfheid van de tunnelconstructie wordt met plaat elementen ingebracht. Belangrijke aspecten in deze berekening zijn de invloed van de variatie in de bodemeigenschappen, invloed van de overconsolidatie en bouwvolgorde. Ook moet worden nagegaan of de rij palen onder de wand hier als groep te zwaar belast is.

Omdat de constructie zelf geen star element (denk aan de vastgestelde torsie in de vloer) is moet rekening worden gehouden met de interactie tussen de vervormingen van de constructie en het gedrag van de fundering. Het in de geotechnische modellering meegenomen tunnelmoot-model moet daarom wel realistische constructiestijfheden tonen. Overigens kan, indien het effect van de tordering wil worden meegenomen, geen gebruik worden gemaakt van de symmetrie langs de as van de tunnel en zal de een deel van de tunnelbak (tenminste 3, maar liever nog meer moten) over de volle breedte moeten worden gemodelleerd.

Met deze modellen kunnen ook probabilistische analyses worden uitgevoerd. Op basis van de gemeten variatie in bodemeigenschappen en ervaringsdata van variatie in paaleigenschappen en verkeersbelasting, kan een schatting worden gemaakt van de belasting op de palen in statistische termen van gemiddelde en spreiding.

Aangezien de constructie zelf geen problemen lijkt te hebben, wordt een gedetailleerde numerieke berekening die het constructieve gedrag als geheel beschrijft minder wenselijk geacht. Echter, om inzicht te krijgen in het gedrag van de verbinding tussen de paal en de vloer onder de gevonden paalbelastingen en de invloed van de uitvoering en ontwerpdetails is een (numerieke) analyse van dit gedrag wel wenselijk. De belastingen kunnen worden afgeleid van de (probabilistische) resultaten van de geotechnische detail analyses.

Deze analyse moet primair antwoord geven op de vraag of geotechnisch of constructief falen opgetreden is (of wat de kans op beiden is). Daarnaast wordt gezocht naar aspecten die naar verwachting hebben bijgedragen aan het falen. Hierbij wordt momenteel aan de volgende bijdragen gedacht (nog aan te vullen):

- Het optreden van ongelijkmatige krachtsverdeling in de palen:
 - Door groepswerking en randeffecten.
 - Door heterogeniteit van de ondergrond.
 - Door variabiliteit in de paaleigenschappen.
- Het optreden van horizontale belastingen:
 - Door buigende momenten vanuit de wand.
 - Door verticale verplaatsingen opgelegd aan schoor staande palen.
 - Door wisselende thermische uitzetting met cumulatieve effecten (wegkruipen, voegverstoppingen,...)

Nagegaan moet worden welke bijdragen geschikt zijn om in een numeriek model te vatten en welke bijdragen eerst (of alleen maar) op basis van een theoretische analyse kunnen worden beoordeeld.

Referenties

De gebruikte externe documenten worden in deze lijst benoemd. In het rapport wordt hiernaar verwezen door het nummer te nemen in deze lijst. De bouwtekeningen zijn hier in beginsel buiten gehouden, deze zijn gespecificeerd door de bestandsnaam in de tekst op te nemen.

- [1] Deltares, Foutenboom Vlaketunnel kenmerk 1203900-000-GEO-0065, 2010
- [2] Mistras Group, drie meetverslagen in rapport Heijmans Civiel B.V. Span- en Verplaatsingstechnieken, Onderzoek trekpalen Heinenoordtunnel, Evaluatierapportage, Zaaknummer RWS: 31132267, april 2018
- [3] Heijmans Civiel B.V. Span- en Verplaatsingstechnieken, rapport Onderzoek trekpalen Heinenoordtunnel, Evaluatierapportage, Zaaknummer RWS: 31132267, april 2018
- [4] Deltares, Vlaketunnel Uitwerking kijkproef moten 8, 9, 10 en 12 Oost, verslag en analyse resultaten, kenmerk 1203900-000-GEO-0067 jan 2011
- [5] Deltares, memo Prinses Margriettunnel Relatie tussen oorzaakonderzoek en herstel operatie, kenmerk 11209150-004-GEO-0001_v1.0 14 februari 2023
- [6] Kieft, P., van Kinderen, P.J.M., Resink, J.H.; Tunnel onder het Prinses Margrietkanaal in rijksweg 43, tussen Sneek en Joure, deel A. Het ontwerp en deel B. Uitvoering; Maandblad Cement, pp. 143-154, jaargang 28, no. 4, april 1976
- [7] KNMI.nl, historische data meetstation Leeuwarden, www.knmi.nl, bezocht 27 januari 2023
- [8] Rijkswaterstaat, ontwerptekeningen fundering moot 26: MT-81A_mt 26, MT-60 en MT-105C_mt23 t-m 38, 1976
- [9] Rijkswaterstaat Bouwdienst, rapport Lekkage in tunnels, dilatatievoegen en beton, (geen kenmerk), L. Leeuw, 1 september 2008
- [10] Rijkswaterstaat, ontwerptekeningen wapening moot 26: MT-157, MT-183, MT-599-WA en MT-651-WA
- [11] Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening, meetrapport Deformatiemeting Prinses Margriettunnel en Viaduct Prinses Margriettunnel, 10H-302-(01+02)-03, versie 20210804, opgesteld door J. Den Ridder IV-Infra B.V.
- [12] Rijkswaterstaat, rapport: Deformatiemeting Prinses Margriettunnel en viaduct herhalingsmeting 04 spreadsheets met meetresultaten
- [13] Van Hattum en Blankevoort, Ontwerpnota beperkt openstellen A7, datum 18-1-2023
- [14] Vision 42, data portal IV-Infra, geraadpleegd 16 februari 2023
- [15] Wikipedia.nl, lemma Spanningscorrosie, <https://nl.wikipedia.org/wiki/Spanningscorrosie>, geraadpleegd 15 februari 2023

Bijlagen

A Overzicht horizontale verplaatsing van de tunnel

Er zijn vanaf 2010 verplaatsingsmetingen in de tunnel uitgevoerd [11]. Daardoor is bekend hoe de verplaatsingen zijn geweest. Van de laatste meting na het omhoogkomen van de moot zijn uitsluitend de verticale verplaatsingen van de tunnel gemeten. (Regelmatig wordt in dit rapport gesproken wordt over vervormingsmetingen, maar feitelijk zijn verplaatsingen gemeten. Door de kijken over welke afstand bepaalde verschilverplaatsingen zijn opgetreden kan worden bepaald hoe groot vervormingen over die afstand zijn.)

Deze bijlage presenteert de resultaten van de metingen in de lengte van de tunnel.

A.1 Primaire gegevens van de meetcampagne

A-tabel A-1 geeft een overzicht van de datums en omstandigheden van de meting. De constructietemperatuur in meting H1 is niet gemeten. Deze meting heeft plaatsgevonden na een koude periode, maar die was al drie dagen voorbij [7], dus de temperatuur in de constructie zal niet veel afwijken van de lucht temperatuur.

A-tabel A-1 Overzicht uitgevoerde deformatie metingen[11].

| nummer meting | datum | temperatuur constructie | lucht temperatuur | bewolking |
|---------------|----------|-------------------------|-------------------|---------------|
| H0 | 20100310 | 3 | 4 | bewolkt |
| H1 | 20130129 | n.g. | 5 | zwaar bewolkt |
| H2 | 20171107 | 7 | 8 | bewolkt |
| H3 | 20210601 | 18 | 19 | half bewolkt |
| H4 | 20221221 | | | |

Meting H3 is in de zomer bij een aanzienlijk hogere temperatuur uitgevoerd dan de overige metingen.

A.2 Gesommeerde resultaten

Uit de meetgegevens zijn per meting te totale verlenging van de voegen en de tunnel bepaald. Onderstaande tabellen geven de resultaten.

A-tabel A-2 Deformatiemeting H1.

| Samenvatting | Voegen | Moten | Gesommeerd |
|----------------------|--------|-------|------------|
| 20130129 | [mm] | [mm] | [mm] |
| Verlenging oostzijde | 28 | -14 | 14 |
| Verlenging westzijde | 37 | -25 | 12 |
| Gemiddelde | 32 | -20 | 13 |

A-tabel A-3 Deformatiemeting H2.

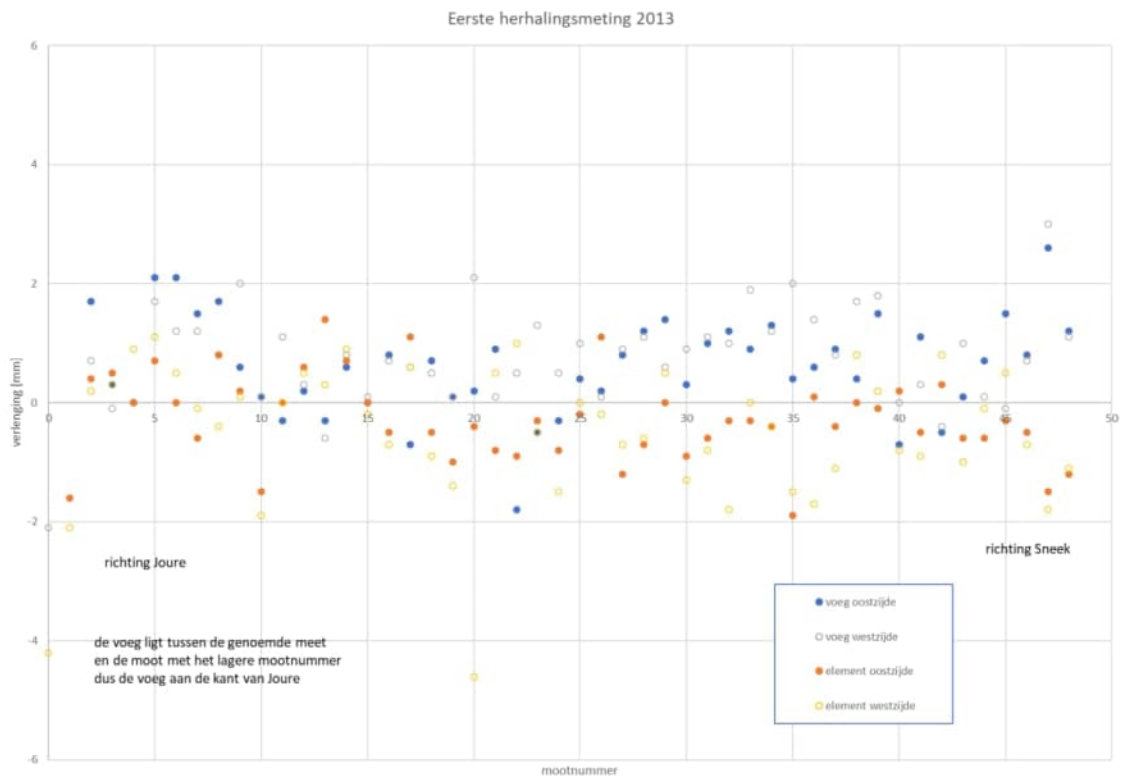
| Samenvatting | Voegen | Moten | Gesommeerd |
|----------------------|--------|-------|------------|
| 20171107 | [mm] | [mm] | [mm] |
| Verlenging oostzijde | 1 | 45 | 46 |
| Verlenging westzijde | 12 | 25 | 37 |
| Gemiddelde | 7 | 35 | 42 |

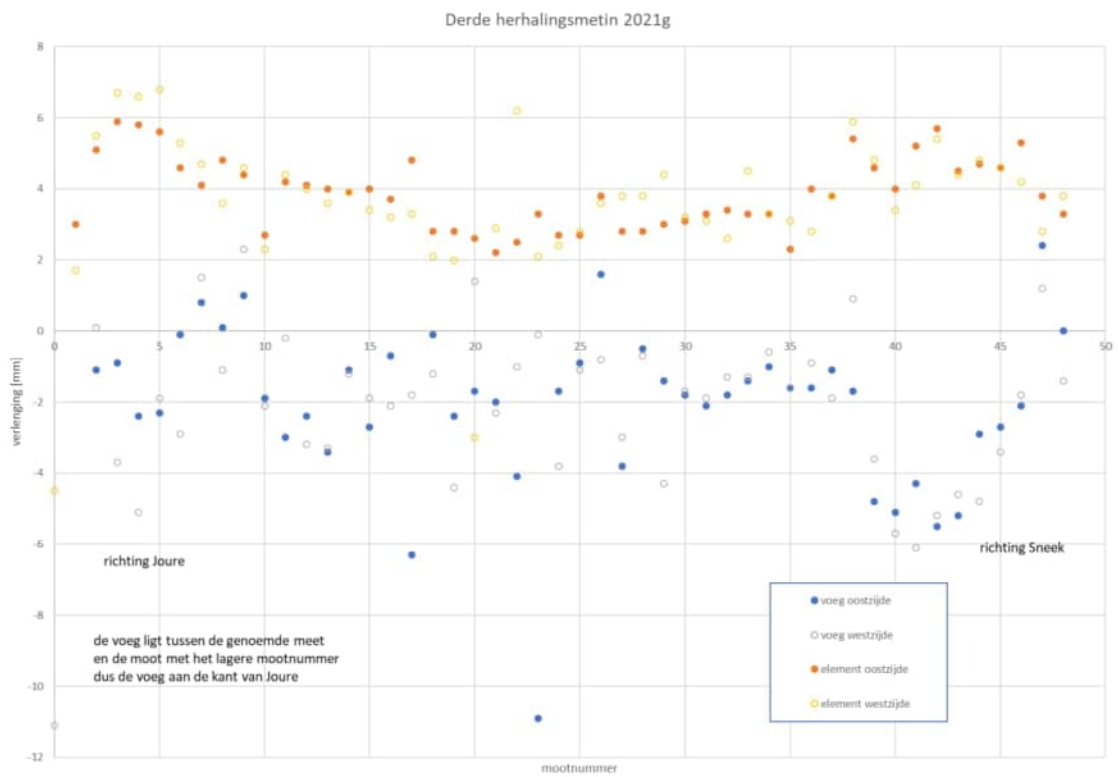
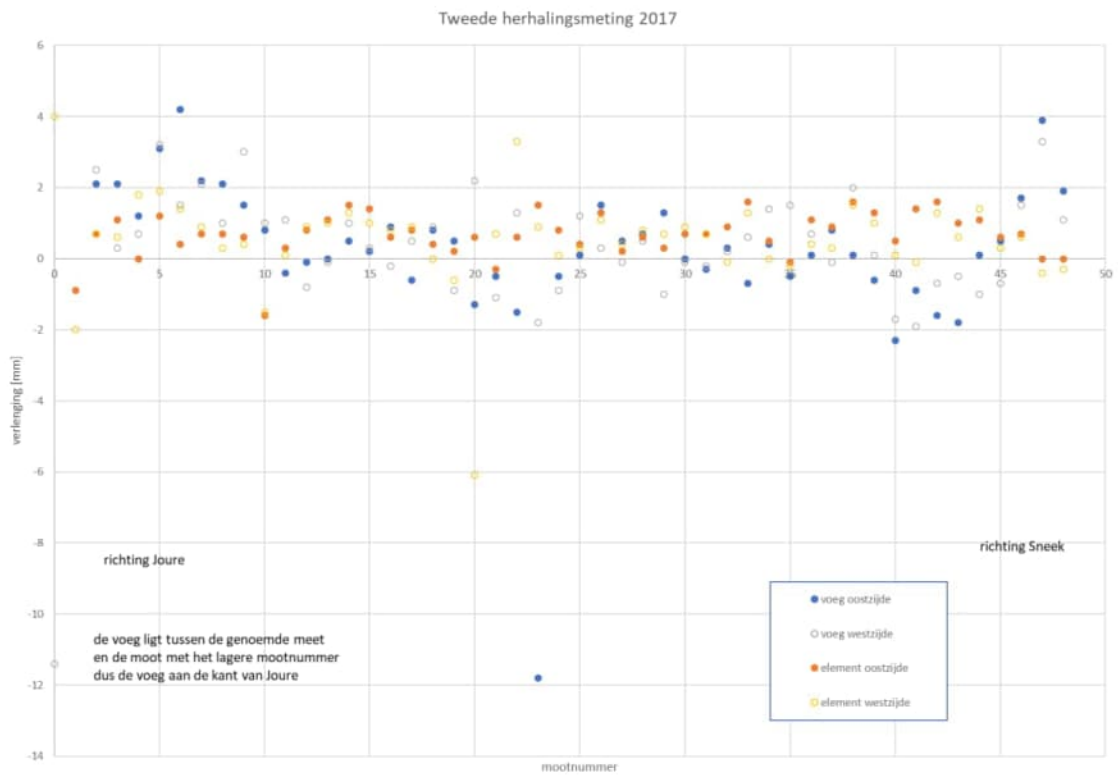
A-tabel A-4 Deformatiemeting H3.

| Samenvatting | Voegen | Moten | Gesommeerd |
|----------------------|--------|-------|------------|
| 20210601 | [mm] | [mm] | [mm] |
| Verlenging oostzijde | -108 | 190 | 82 |
| Verlenging westzijde | -105 | 177 | 72 |
| Gemiddelde | -106 | 183 | 77 |

Uit deze resultaten blijkt dat de verlenging van de elementen niet volledig door de voegen wordt opgenomen en dat de voegen langzaam maar zeker wijder worden en de tunnel daardoor langer wordt.

A.3 Verplaatsingen in lengterichting over de tunnel (figuren)

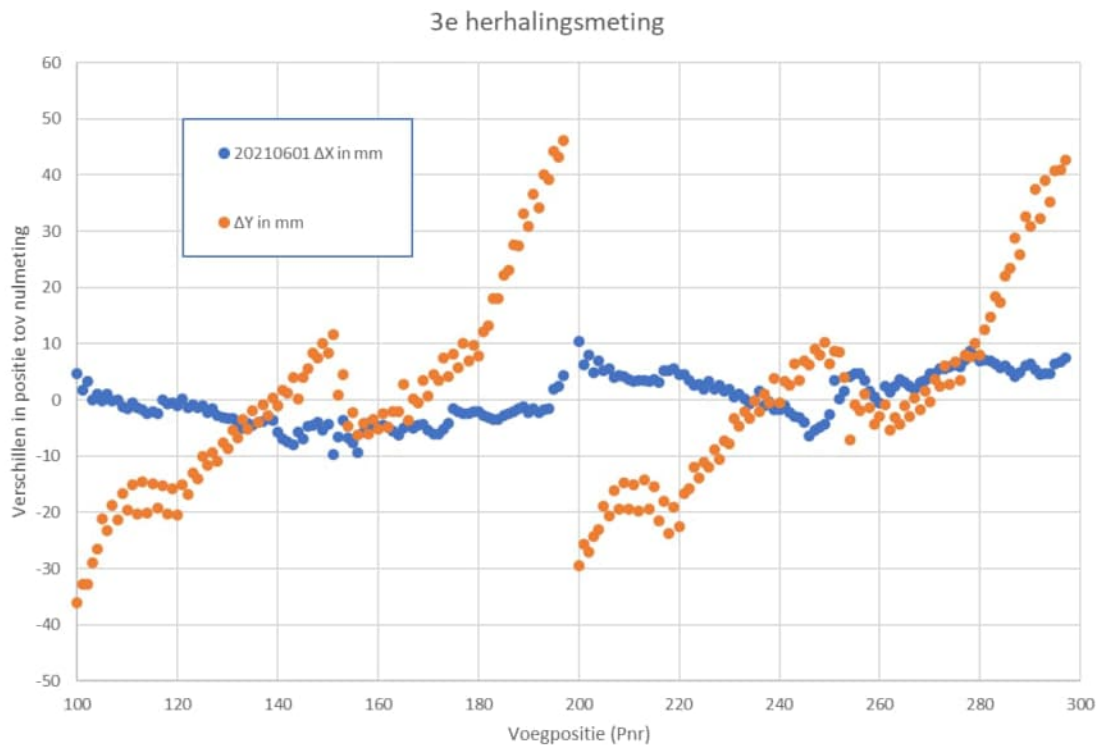




A.4 Verplaatsingen over de tunnellingte

B-figuur A-1 toont de gemeten verplaatsingen tijdens de derde herhalingsmeting. Op de horizontale as staan horizontale posities van de voegen volgens nummer. Hierbij geldt de volgende nummering.

| toerit | noord | zuid |
|-----------|---------|---------|
| west wand | 100-153 | 154-197 |
| oost wand | 200-253 | 254-297 |

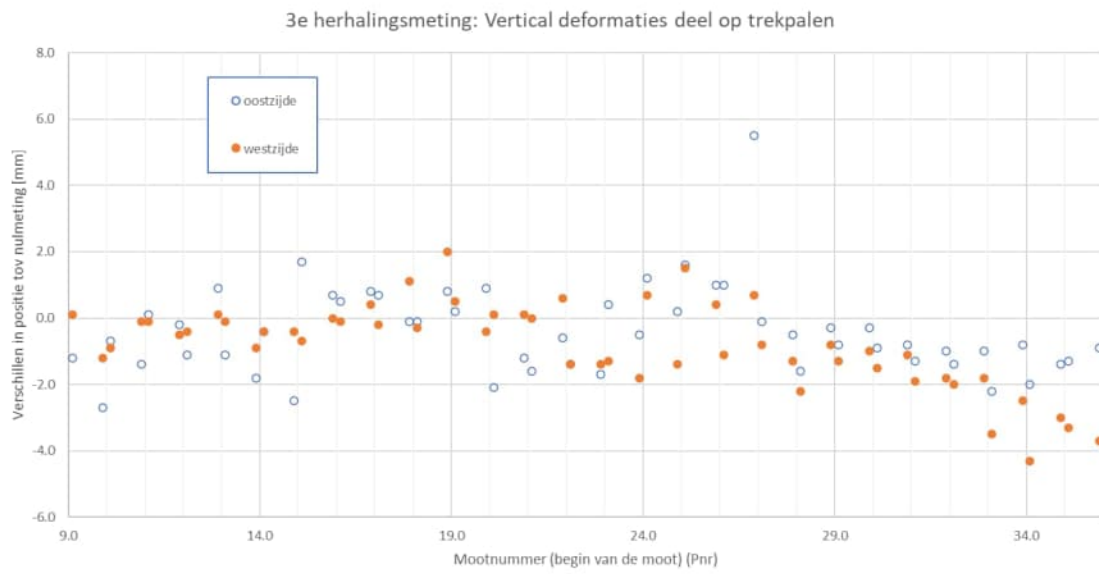


B-figuur A-1 Gemeten verplaatsingen van de meetpunten tijdens de derde herhalingsmeting (x verplaatsing is dwars op de tunnel-as, y-verplaatsing is in de lengterichting van de tunnel).

De punten 144 en 145 (oostzijde) en 244 en 245 (westzijde) liggen op moot 26. De horizontale verplaatsing van de paalkoppen wordt bepaald uit de formule van Pythagoras en ligt in de orde van 5 tot 8 mm.

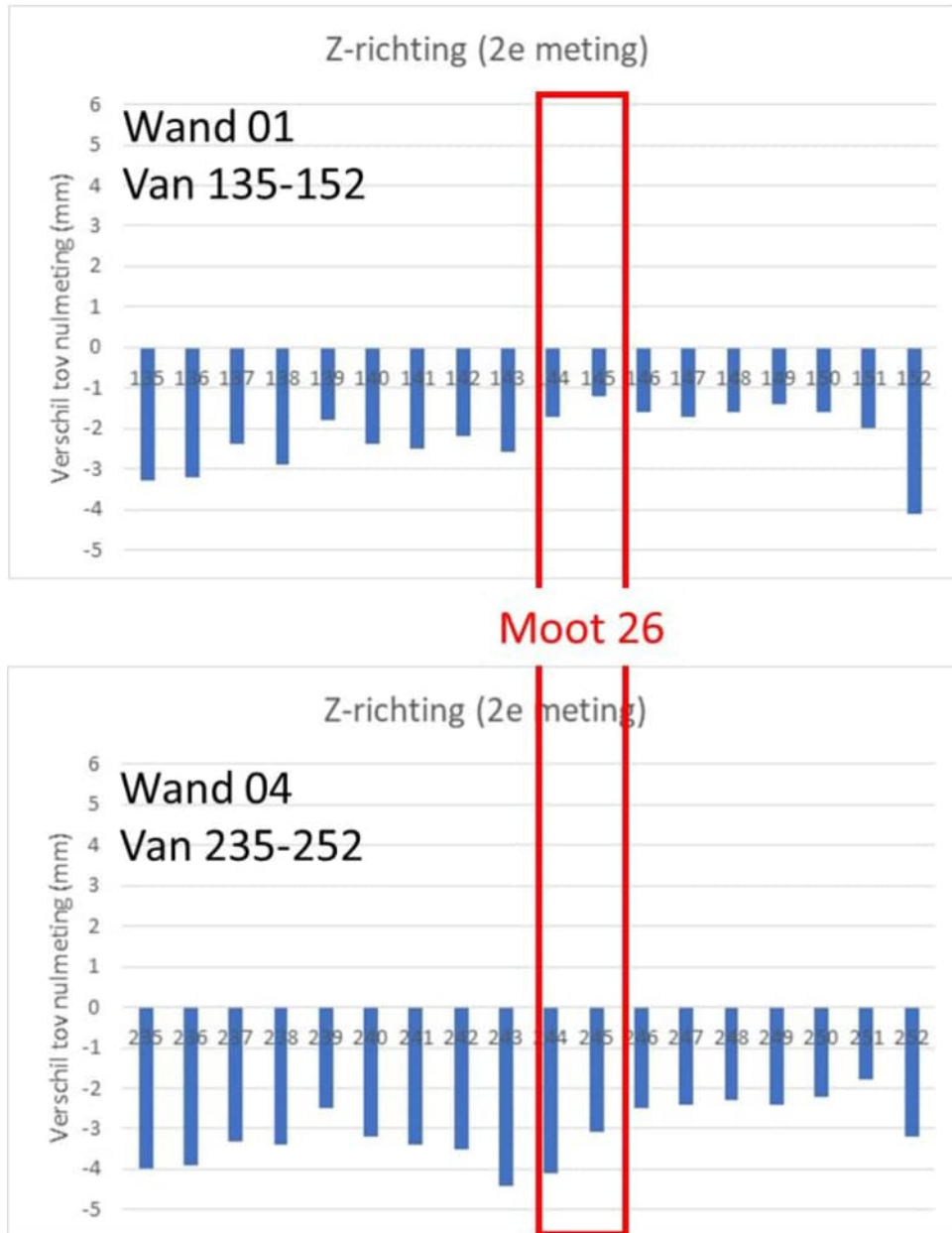
A.5 Verticale verplaatsingen over de tunnel

B-figuur A-2 toont de verticale verplaatsingen die zijn gemeten in de derde herhalingsmeting in 2021. De verplaatsing van moot 26 is duidelijk zichtbaar. Verder valt op dat de verplaatsing in het midden van de tunnel positief is, en dat de rotatie van de moten 23, 24 en 25 aan de westzijde van de tunnel ten opzichte van de overige rotaties relatief groot is. Maar de rotatie van moot 18 is vergelijkbaar.

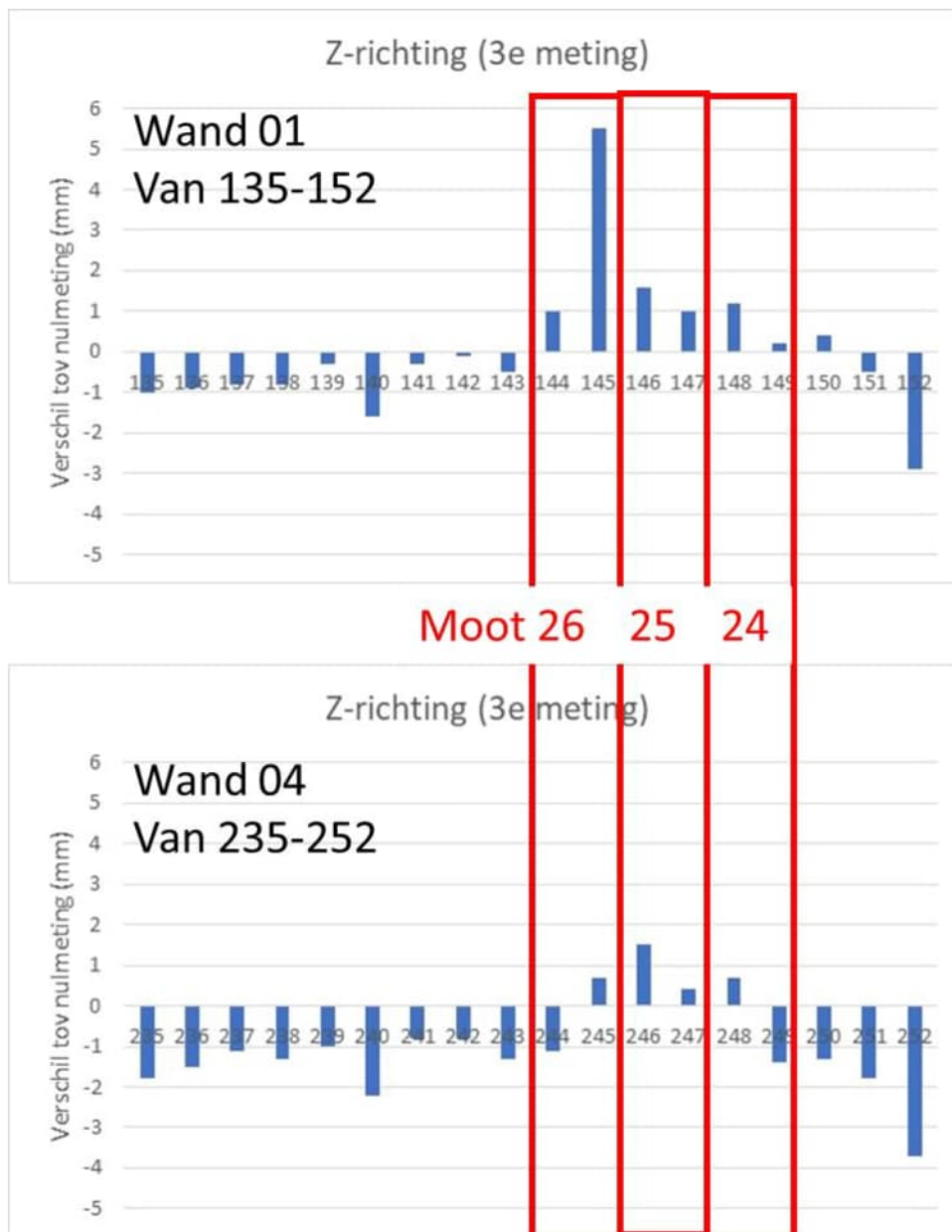


B-figuur A-2 Verticale verplaatsingen in herhalingsmeting H3 (2021).

B Verticale verplaatsingen

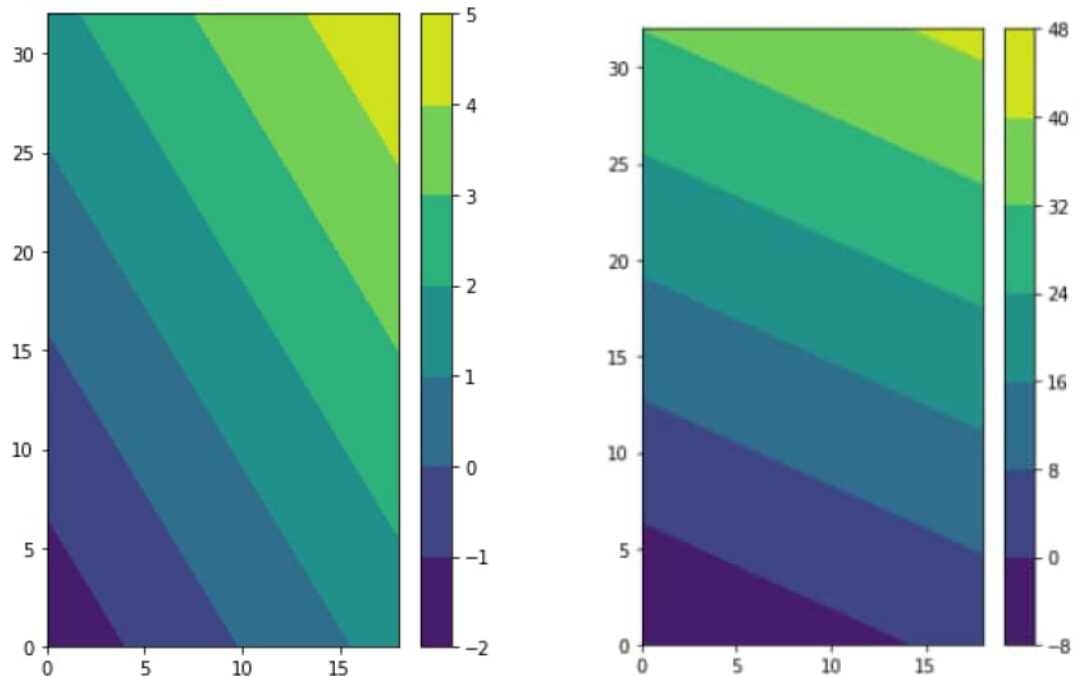


B-figuur B-1 Gemeten verticale deformaties tijdens tweede herhalingsmeting 7 november 2017. Bovenste figuur is de oost wand, onder de west wand.



B-figuur B-2 Gemeten verticale deformaties tijdens derde herhalingsmeting 1 juni 2021.. Bovenste figuur is de oost wand, onder de west wand.

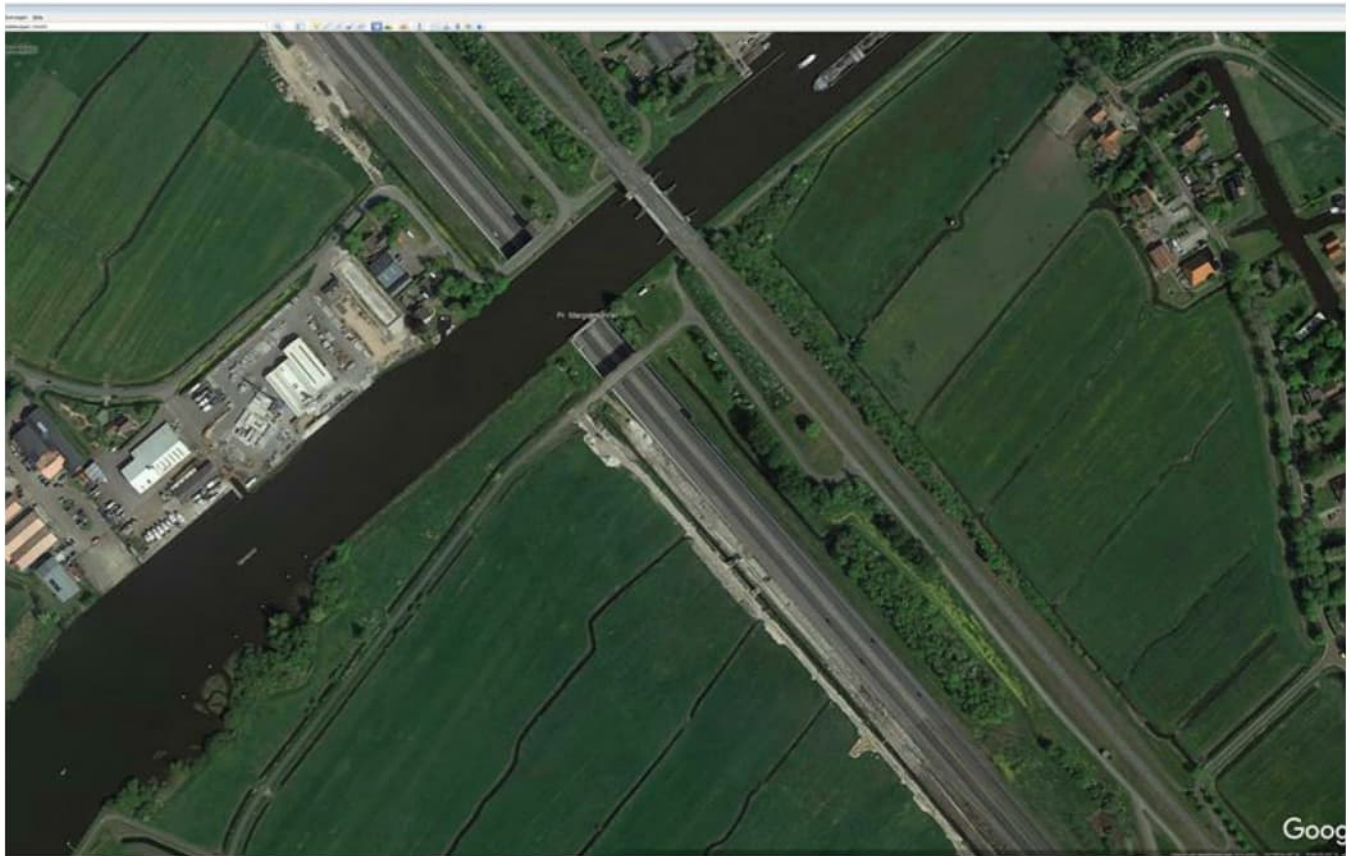
B-figuur B-3 geeft een grafische weergave van de verplaatsingen in beide metingen. Deze is gemaakt door een vlak te trekken door de gemiddelde verplaatsing met de gemiddelde gemeten helling. De mogelijke buiging van de vloer is daarbij dus verwaarloosd.



B-figuur B-3 Verplaatsingen vloer (gelineariseerd) links herhalingsmeting H3 op 1 juni 2021, rechts herhalingsmeting H4 op 21 december 2022 (met eerste ballast op de vloer) [maten in mm].

C Aanleg leiding langs de tunnel

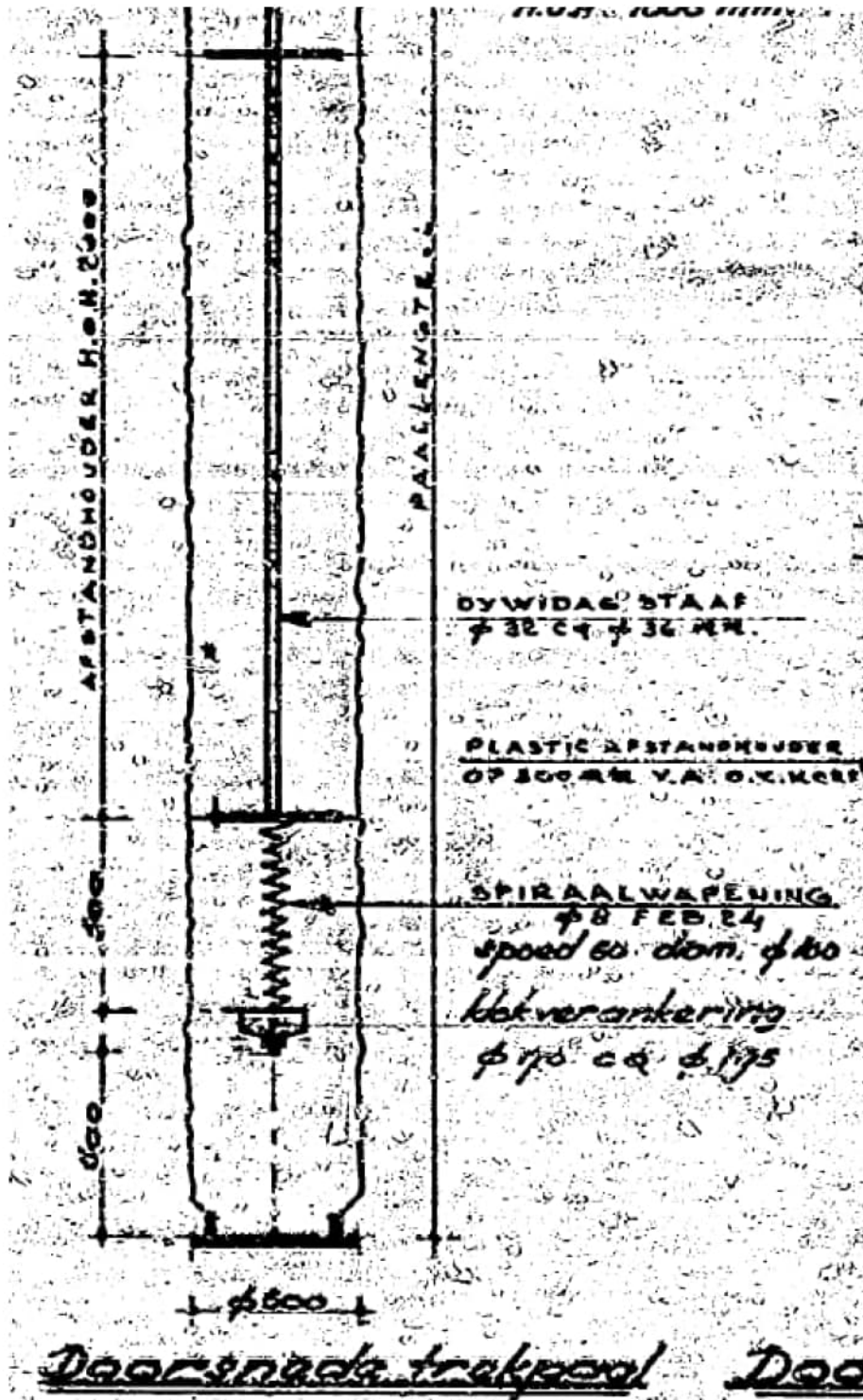
In 2020 hebben ze werkzaamheden uitgevoerd naast de toerit. Onderstaande 1^e foto is van maart 2020. Het lijkt er op dat er voor 2 grote leidingkruisingen heel veel grondverzet is gepleegd. Het lijkt er verder op dat er een vele meters hoge hoop grond tegen/ naast de tunnelbak is gegooid, zie 2^e foto en verder lijkt het op de 2^e foto erop dat er dus een zandaanvulling aanwezig is.



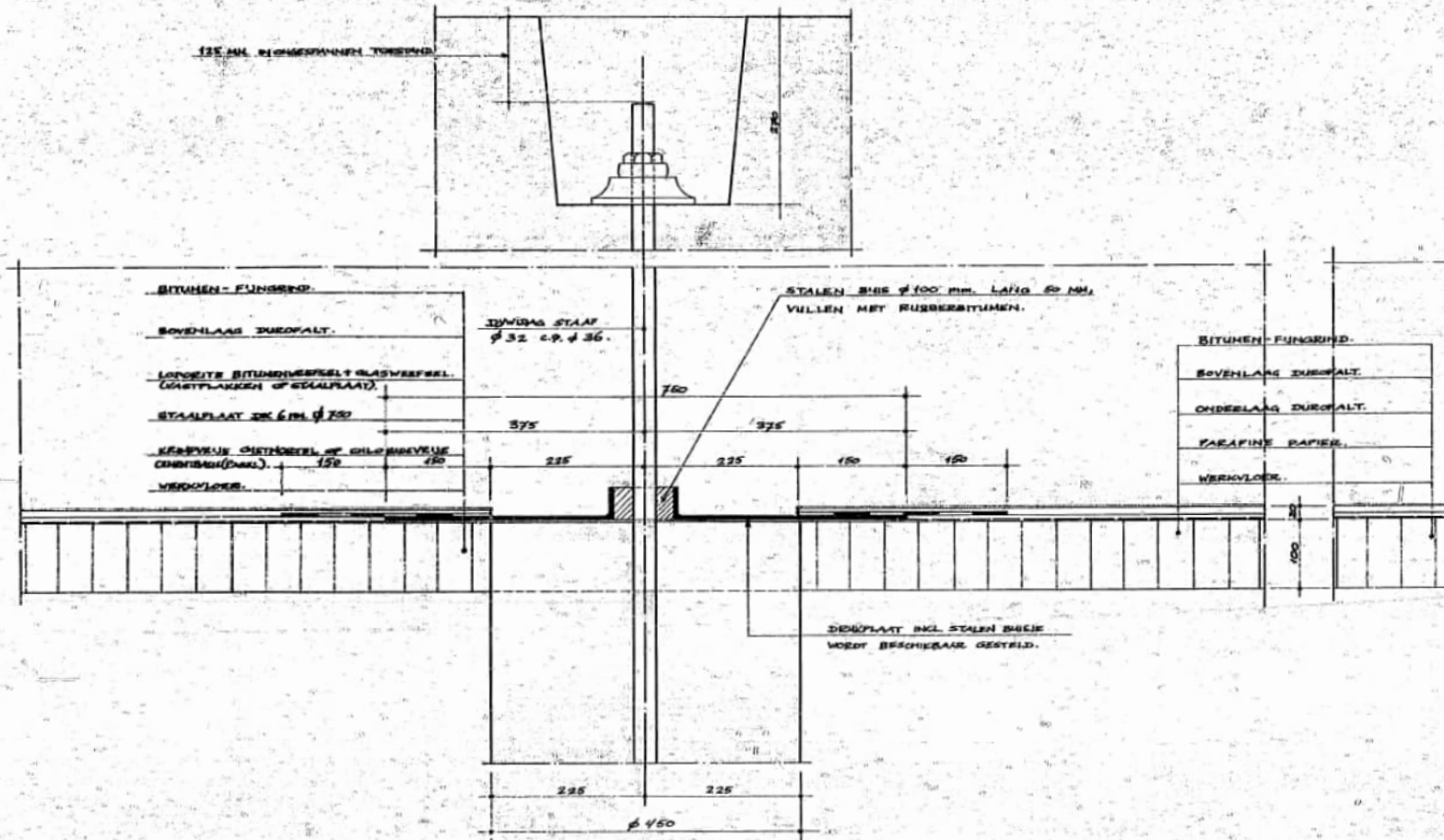


D Enkele details van de palen

D.1 Standaard ontwerp



B-figuur D-1 Detail van de paalvoet en de verankering [tekening MT-104D_mt 5 t-m 22.pdf].



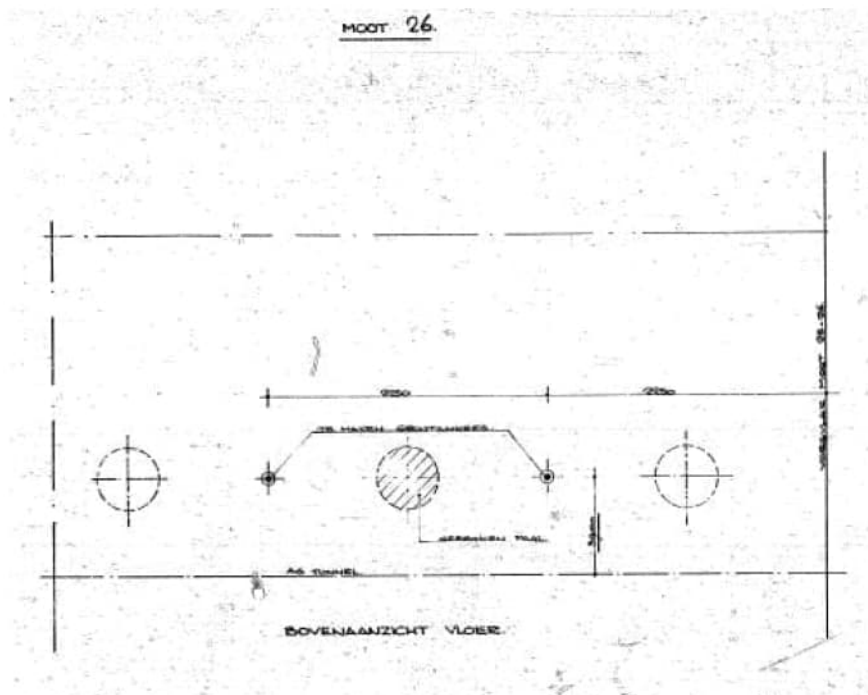
DETAIL TREKPAAL
schaal: 1:5

B-figuur D-2 detail van de verbinding tussen de paal en de vloer [tekening MT-60.pdf]

D.2 Afwijkingen van het standaard ontwerp

Gebroken palen op basis van tekeningen die bekeken zijn (mogelijk niet volledig):

- Moten 16 en 22 (tekening MT-386_mt 16 en 22).
- Moot 16 (tekening MT-80_mt 16) en extra wapening (tekening MT-743_mt 16).
- Moot 21 (tekening MT-75_mt 21).
- Moot 26 (tekening MT-81A_mt 26).



B-figuur D-3 Aanpassing funderingsplan moot 26 [tekening MT-81A_mt 26].

Deze tekening toont duidelijk dat het de tweede paal vanaf de voeg tussenmoot 25 en 26 betreft, dus aan de lage kant van de moot. Het betreft hoogst waarschijnlijk de eerste rij palen vanaf de tunnel-as aan de oostkant.

E Faalboom Vlaketunnel onderzoek

Document: 1203900-000-GEO-0065-v1-m-Foutenboom Omhoog komen vloer Vlaketunnel

Memo

Aan

5.1.2.e

Datum
27 december 2010

Kenmerk
1203900-000-GEO-0065

Aantal pagina's
2

Van

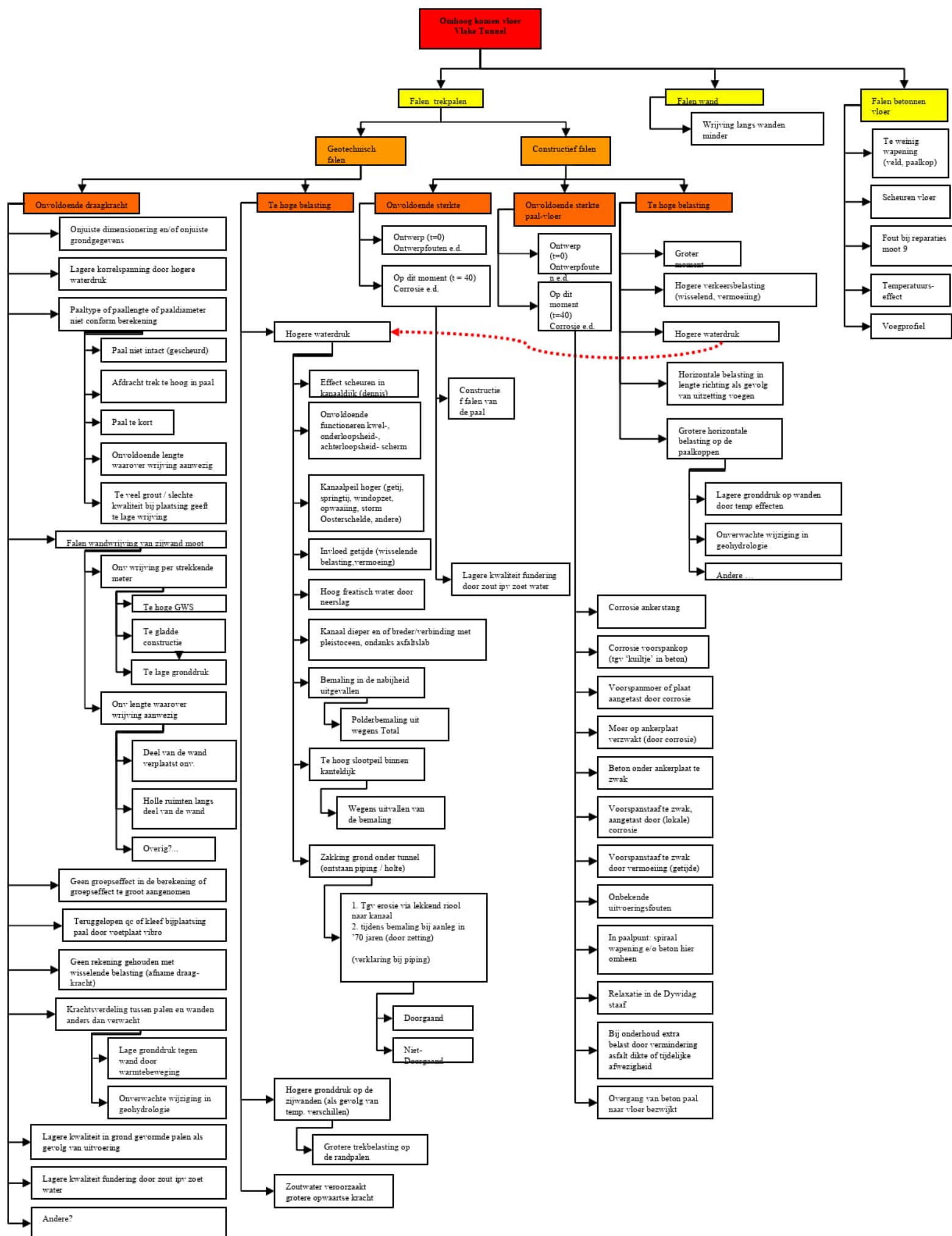
Doorkiesnummer

E-mail

@deltares.nl

Onderwerp

Foutenboom Omhoog komen vloer Vlaketunnel



F Berekening horizontale belastbaarheid trekpaal

Report for D-Sheet Piling 22.2

Design of Diaphragm and Sheet Pile Walls
Developed by Deltares



Company: Stichting Deltares

Date of report: 3-2-2023

Time of report: 12:59:58

Report with version: 22.2.2.38813

Date of calculation: 29-1-2023

Time of calculation: 19:31:15

Calculated with version: 22.2.2.38813

File name: sneek7.

1 Table of Contents

| | |
|---|----|
| 1 Table of Contents | 2 |
| 2 Summary | 3 |
| 2.1 Overview of Maxima | 3 |
| 2.2 Supports | 3 |
| 2.3 Calculation Errors | 3 |
| 3 Input Data | 4 |
| 3.1 General Input Data | 4 |
| 3.2 Pile Properties | 4 |
| 3.2.1 General Properties | 4 |
| 3.2.2 Elasto-Plastic Behaviour (Moment-Curvature Diagram with 4 Branches) | 4 |
| 3.2.3 Maximum Allowable Moments | 4 |
| 3.3 Rigid Supports | 4 |
| 3.4 Horizontal Forces | 4 |
| 3.5 Water Level | 5 |
| 3.6 Surface | 5 |
| 3.7 Soil Material Properties | 5 |
| 3.8 Soil Material Properties Calculated Using Brinch Hansen | 5 |
| 3.9 Modulus of Subgrade Reaction | 5 |
| 4 Calculation Results | 6 |
| 4.1 Moments, Forces and Displacements | 6 |
| 4.2 Stresses | 9 |
| 4.3 Rigid and Spring Supports | 12 |

2 Summary

2.1 Overview of Maxima

| Displacement [mm] | Moment [kNm] | Shear force [kN] | Mob. perc. moment [%] | Mob. perc. resistance [%] |
|----------------------|-----------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 2,5 | 48,52 | -50,00 | 0,3 | 1,4 |

2.2 Supports

| Support inklemming | | |
|-----------------------|-----------------|--------|
| Force [kN] | Moment [kNm] | Status |
| 0,00 | 48,52 | |

2.3 Calculation Errors

The maximum calculated moment exceeds the maximum allowable elastic moment in one or more stages.

The maximum calculated moment exceeds the maximum allowable plastic moment in one or more stages.

According to article 5.2.1(2) of Eurocode 3 (Design of steel structures - Part 5: Piling), if a plastic global analysis of pile is performed with a sheet pile, the rotation capacity shall be checked (see Table 5-1 of Eurocode 3). This check is not done by D-Sheet Piling.

3 Input Data

3.1 General Input Data

| | |
|----------------------|------------------------------------|
| Model | Single pile; Pile loaded by forces |
| Unit weight of water | 9,81 kN/m ³ |
| Elastic calculation | No |

3.2 Pile Properties

| | |
|--------------------|----------|
| Length | 10,00 m |
| Level top side | -10,00 m |
| Number of sections | 1 |

3.2.1 General Properties

| Section name | From [m] | To [m] | Material type | Diameter [m] |
|--------------|-------------|-----------|---------------|-----------------|
| New element | -20,00 | -10,00 | Concrete | 0,45 |

3.2.2 Elasto-Plastic Behaviour (Moment-Curvature Diagram with 4 Branches)

| Section name | Elastic stiffness EI [kNm ²] | Stiffness EI 2nd branch positive [kNm ²] | Stiffness EI 2nd branch negative [kNm ²] | Stiffness EI 3rd branch positive [kNm ²] | Stiffness EI 3rd branch negative [kNm ²] | Note to reduction factor |
|--------------|---|---|---|---|---|--------------------------|
| New element | 4,0000E+04 | 4,0000E+02 | 4,0000E+02 | 4,0000E+02 | 4,0000E+02 | |

| Section name | Corrected elas. stiffness EI [kNm ²] | Corrected EI 2nd branch positive [kNm ²] | Corrected EI 2nd branch negative [kNm ²] | Corrected EI 3rd branch positive [kNm ²] | Corrected EI 3rd branch negative [kNm ²] | Red. factor on EI [-] |
|--------------|---|---|---|---|---|--------------------------|
| New element | 4,0000E+04 | 4,0000E+02 | 4,0000E+02 | 4,0000E+02 | 4,0000E+02 | 1,00 |

| Section name | Moment point 1 positive [kNm] | Moment point 1 negative [kNm] | Moment point 2 positive [kNm] | Moment point 2 negative [kNm] | Plas. moment point 3 positive [kNm] | Plas. moment point 3 negative [kNm] |
|--------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|--|
| New element | 47,00 | 47,00 | 48,00 | 48,00 | 49,00 | 49,00 |

3.2.3 Maximum Allowable Moments

| Section name | Mr;char;el [kNm] | Mr;char;pl [kNm] | Modification factor [-] | Material factor [-] | Red. factor allow. moment [-] | Mr;d;el [kNm] | Mr;d;pl [kNm] |
|--------------|---------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------|------------------|
| New element | 47,00 | 49,00 | 1,00 | 1,10 | 1,00 | 42,73 | 44,55 |

3.3 Rigid Supports

| Name | Level [m] | Prevention of rotation | Prevention of translation |
|------------|--------------|------------------------|---------------------------|
| inklemming | -10,00 | Yes | No |

3.4 Horizontal Forces

| Name | Level [m] | Load [kN] |
|------|--------------|--------------|
| 1 | -10,00 | 50,00 |

3.5 Water Level

Water level: -10,00 [m]

3.6 Surface

Surface level: -10,00 [m]

3.7 Soil Material Properties

| Layer name | Level [m] | Unit weight | | Cohesion [kN/m ²] | Friction angle phi [°] | Brinch Hansen used |
|------------|-----------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------|--------------------|
| | | Unsat [kN/m ³] | Sat. [kN/m ³] | | | |
| zand | -10,00 | 17,00 | 20,00 | 0,00 | 30,00 | Yes |
| keileem | -10,50 | 18,00 | 18,00 | 5,00 | 25,00 | Yes |
| zand2 | -14,00 | 17,00 | 20,00 | 0,00 | 35,00 | Yes |

| Layer name | Level [m] | Earth pressure coefficients | | | Additional pore pressure | |
|------------|-----------|-----------------------------|-------------|-------------|--------------------------|-----------------------------|
| | | Active [-] | Neutral [-] | Passive [-] | Top [kN/m ²] | Bottom [kN/m ²] |
| zand | -10,00 | 0,00 | 0,00 | 5,47 | 0,00 | 0,00 |
| keileem | -10,50 | 0,00 | 0,00 | 6,05 | 0,00 | 0,00 |
| zand2 | -14,00 | 0,00 | 0,00 | 21,62 | 0,00 | 0,00 |

3.8 Soil Material Properties Calculated Using Brinch Hansen

| Layer name | Level [m] | Fictive cohesion [kN/m ²] |
|------------|-----------|---------------------------------------|
| zand | -10,00 | 0,00 |
| keileem | -10,50 | 24,83 |
| zand2 | -14,00 | 0,00 |

3.9 Modulus of Subgrade Reaction

| Layer name | Level [m] | Ménard used | E-Mod Ménard [kN/m ²] | Soil type Ménard | Branch 1 | |
|------------|-----------|-------------|-----------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | | | | | Top [kN/m ³] | Bottom [kN/m ³] |
| zand | -10,00 | Yes | 5000,00 | Sand | 30602,99 | 30602,99 |
| keileem | -10,50 | Yes | 6000,00 | Sand | 36723,58 | 36723,58 |
| zand2 | -14,00 | Yes | 20000,00 | Sand | 122411,94 | 122411,94 |

4 Calculation Results

Number of iterations: 3

4.1 Moments, Forces and Displacements

| Segment number | Level [m] | Moment [kNm] | Shear force [kN] | Displacement [mm] |
|----------------|-----------|--------------|------------------|-------------------|
| 1 | -10,00 | 48,52 | -50,00 | 2,5 |
| 1 | -10,08 | 44,36 | -49,91 | 2,5 |
| 2 | -10,08 | 44,36 | -49,91 | 2,5 |
| 2 | -10,17 | 40,21 | -49,65 | 2,5 |
| 3 | -10,17 | 40,21 | -49,65 | 2,5 |
| 3 | -10,25 | 36,09 | -49,22 | 2,4 |
| 4 | -10,25 | 36,09 | -49,22 | 2,4 |
| 4 | -10,33 | 32,01 | -48,61 | 2,4 |
| 5 | -10,33 | 32,01 | -48,61 | 2,4 |
| 5 | -10,42 | 27,99 | -47,82 | 2,3 |
| 6 | -10,42 | 27,99 | -47,82 | 2,3 |
| 6 | -10,50 | 24,05 | -46,86 | 2,3 |
| 7 | -10,50 | 24,05 | -46,86 | 2,3 |
| 7 | -10,60 | 19,67 | -43,28 | 2,2 |
| 8 | -10,60 | 19,67 | -43,28 | 2,2 |
| 8 | -10,69 | 15,63 | -39,83 | 2,1 |
| 9 | -10,69 | 15,63 | -39,83 | 2,1 |
| 9 | -10,79 | 11,92 | -36,50 | 2,0 |
| 10 | -10,79 | 11,92 | -36,50 | 2,0 |
| 10 | -10,89 | 8,52 | -33,32 | 1,9 |
| 11 | -10,89 | 8,52 | -33,32 | 1,9 |
| 11 | -10,99 | 5,43 | -30,27 | 1,9 |
| 12 | -10,99 | 5,43 | -30,27 | 1,9 |
| 12 | -11,08 | 2,63 | -27,37 | 1,8 |
| 13 | -11,08 | 2,63 | -27,37 | 1,8 |
| 13 | -11,18 | 0,11 | -24,62 | 1,7 |
| 14 | -11,18 | 0,11 | -24,62 | 1,7 |
| 14 | -11,28 | -2,16 | -22,01 | 1,6 |
| 15 | -11,28 | -2,16 | -22,01 | 1,6 |
| 15 | -11,38 | -4,18 | -19,55 | 1,5 |
| 16 | -11,38 | -4,18 | -19,55 | 1,5 |
| 16 | -11,47 | -5,96 | -17,23 | 1,4 |
| 17 | -11,47 | -5,96 | -17,23 | 1,4 |
| 17 | -11,57 | -7,53 | -15,05 | 1,3 |
| 18 | -11,57 | -7,53 | -15,05 | 1,3 |
| 18 | -11,67 | -8,90 | -13,02 | 1,2 |
| 19 | -11,67 | -8,90 | -13,02 | 1,2 |
| 19 | -11,76 | -10,07 | -11,12 | 1,1 |
| 20 | -11,76 | -10,07 | -11,12 | 1,1 |
| 20 | -11,86 | -11,06 | -9,35 | 1,1 |
| 21 | -11,86 | -11,06 | -9,35 | 1,1 |
| 21 | -11,96 | -11,89 | -7,72 | 1,0 |
| 22 | -11,96 | -11,89 | -7,72 | 1,0 |
| 22 | -12,06 | -12,57 | -6,20 | 0,9 |
| 23 | -12,06 | -12,57 | -6,21 | 0,9 |
| 23 | -12,15 | -13,10 | -4,81 | 0,8 |
| 24 | -12,15 | -13,10 | -4,81 | 0,8 |
| 24 | -12,25 | -13,51 | -3,54 | 0,8 |
| 25 | -12,25 | -13,51 | -3,54 | 0,8 |
| 25 | -12,35 | -13,79 | -2,37 | 0,7 |
| 26 | -12,35 | -13,79 | -2,37 | 0,7 |
| 26 | -12,44 | -13,97 | -1,31 | 0,6 |
| 27 | -12,44 | -13,97 | -1,31 | 0,6 |
| 27 | -12,54 | -14,05 | -0,35 | 0,6 |
| 28 | -12,54 | -14,05 | -0,35 | 0,6 |
| 28 | -12,64 | -14,04 | 0,51 | 0,5 |

| Segment number | Level [m] | Moment [kNm] | Shear force [kN] | Displacement [mm] |
|----------------|-----------|--------------|------------------|-------------------|
| 29 | -12,64 | -14,04 | 0,51 | 0,5 |
| 29 | -12,74 | -13,95 | 1,29 | 0,5 |
| 30 | -12,74 | -13,95 | 1,29 | 0,5 |
| 30 | -12,83 | -13,79 | 1,98 | 0,4 |
| 31 | -12,83 | -13,79 | 1,98 | 0,4 |
| 31 | -12,93 | -13,57 | 2,60 | 0,4 |
| 32 | -12,93 | -13,57 | 2,60 | 0,4 |
| 32 | -13,03 | -13,29 | 3,14 | 0,3 |
| 33 | -13,03 | -13,29 | 3,14 | 0,3 |
| 33 | -13,13 | -12,96 | 3,61 | 0,3 |
| 34 | -13,13 | -12,96 | 3,61 | 0,3 |
| 34 | -13,22 | -12,59 | 4,02 | 0,2 |
| 35 | -13,22 | -12,59 | 4,02 | 0,2 |
| 35 | -13,32 | -12,18 | 4,37 | 0,2 |
| 36 | -13,32 | -12,18 | 4,37 | 0,2 |
| 36 | -13,42 | -11,74 | 4,67 | 0,2 |
| 37 | -13,42 | -11,74 | 4,67 | 0,2 |
| 37 | -13,51 | -11,28 | 4,91 | 0,1 |
| 38 | -13,51 | -11,28 | 4,91 | 0,1 |
| 38 | -13,61 | -10,79 | 5,12 | 0,1 |
| 39 | -13,61 | -10,79 | 5,12 | 0,1 |
| 39 | -13,71 | -10,28 | 5,28 | 0,1 |
| 40 | -13,71 | -10,28 | 5,28 | 0,1 |
| 40 | -13,81 | -9,77 | 5,40 | 0,1 |
| 41 | -13,81 | -9,77 | 5,40 | 0,1 |
| 41 | -13,90 | -9,24 | 5,49 | 0,0 |
| 42 | -13,90 | -9,24 | 5,49 | 0,0 |
| 42 | -14,00 | -8,70 | 5,56 | 0,0 |
| 43 | -14,00 | -8,70 | 5,56 | 0,0 |
| 43 | -14,10 | -8,14 | 5,68 | 0,0 |
| 44 | -14,10 | -8,14 | 5,68 | 0,0 |
| 44 | -14,20 | -7,58 | 5,72 | 0,0 |
| 45 | -14,20 | -7,58 | 5,72 | 0,0 |
| 45 | -14,30 | -7,02 | 5,70 | 0,0 |
| 46 | -14,30 | -7,02 | 5,70 | 0,0 |
| 46 | -14,39 | -6,46 | 5,62 | 0,0 |
| 47 | -14,39 | -6,46 | 5,63 | 0,0 |
| 47 | -14,49 | -5,92 | 5,50 | 0,0 |
| 48 | -14,49 | -5,92 | 5,50 | 0,0 |
| 48 | -14,59 | -5,38 | 5,33 | 0,0 |
| 49 | -14,59 | -5,38 | 5,33 | 0,0 |
| 49 | -14,69 | -4,87 | 5,13 | 0,0 |
| 50 | -14,69 | -4,87 | 5,14 | 0,0 |
| 50 | -14,79 | -4,37 | 4,91 | 0,0 |
| 51 | -14,79 | -4,37 | 4,91 | 0,0 |
| 51 | -14,89 | -3,90 | 4,66 | 0,0 |
| 52 | -14,89 | -3,90 | 4,67 | 0,0 |
| 52 | -14,98 | -3,46 | 4,40 | 0,0 |
| 53 | -14,98 | -3,46 | 4,41 | 0,0 |
| 53 | -15,08 | -3,04 | 4,14 | -0,1 |
| 54 | -15,08 | -3,04 | 4,14 | -0,1 |
| 54 | -15,18 | -2,64 | 3,86 | -0,1 |
| 55 | -15,18 | -2,64 | 3,86 | -0,1 |
| 55 | -15,28 | -2,28 | 3,58 | -0,1 |
| 56 | -15,28 | -2,28 | 3,59 | -0,1 |
| 56 | -15,38 | -1,94 | 3,31 | -0,1 |
| 57 | -15,38 | -1,94 | 3,31 | -0,1 |
| 57 | -15,48 | -1,63 | 3,03 | -0,1 |
| 58 | -15,48 | -1,63 | 3,04 | -0,1 |
| 58 | -15,57 | -1,34 | 2,77 | 0,0 |
| 59 | -15,57 | -1,34 | 2,77 | 0,0 |
| 59 | -15,67 | -1,08 | 2,51 | 0,0 |
| 60 | -15,67 | -1,08 | 2,51 | 0,0 |
| 60 | -15,77 | -0,85 | 2,26 | 0,0 |

| Segment number | Level [m] | Moment [kNm] | Shear force [kN] | Displacement [mm] |
|----------------|-----------|--------------|------------------|-------------------|
| 61 | -15,77 | -0,85 | 2,26 | 0,0 |
| 61 | -15,87 | -0,64 | 2,02 | 0,0 |
| 62 | -15,87 | -0,64 | 2,02 | 0,0 |
| 62 | -15,97 | -0,45 | 1,80 | 0,0 |
| 63 | -15,97 | -0,45 | 1,80 | 0,0 |
| 63 | -16,07 | -0,28 | 1,58 | 0,0 |
| 64 | -16,07 | -0,28 | 1,58 | 0,0 |
| 64 | -16,16 | -0,14 | 1,38 | 0,0 |
| 65 | -16,16 | -0,14 | 1,38 | 0,0 |
| 65 | -16,26 | -0,01 | 1,19 | 0,0 |
| 66 | -16,26 | -0,01 | 1,20 | 0,0 |
| 66 | -16,36 | 0,10 | 1,02 | 0,0 |
| 67 | -16,36 | 0,10 | 1,02 | 0,0 |
| 67 | -16,46 | 0,19 | 0,86 | 0,0 |
| 68 | -16,46 | 0,19 | 0,86 | 0,0 |
| 68 | -16,56 | 0,27 | 0,71 | 0,0 |
| 69 | -16,56 | 0,27 | 0,71 | 0,0 |
| 69 | -16,66 | 0,33 | 0,58 | 0,0 |
| 70 | -16,66 | 0,33 | 0,58 | 0,0 |
| 70 | -16,75 | 0,38 | 0,46 | 0,0 |
| 71 | -16,75 | 0,38 | 0,46 | 0,0 |
| 71 | -16,85 | 0,42 | 0,35 | 0,0 |
| 72 | -16,85 | 0,42 | 0,35 | 0,0 |
| 72 | -16,95 | 0,45 | 0,25 | 0,0 |
| 73 | -16,95 | 0,45 | 0,25 | 0,0 |
| 73 | -17,05 | 0,47 | 0,16 | 0,0 |
| 74 | -17,05 | 0,47 | 0,16 | 0,0 |
| 74 | -17,15 | 0,48 | 0,08 | 0,0 |
| 75 | -17,15 | 0,48 | 0,08 | 0,0 |
| 75 | -17,25 | 0,49 | 0,01 | 0,0 |
| 76 | -17,25 | 0,49 | 0,01 | 0,0 |
| 76 | -17,34 | 0,49 | -0,05 | 0,0 |
| 77 | -17,34 | 0,49 | -0,05 | 0,0 |
| 77 | -17,44 | 0,48 | -0,10 | 0,0 |
| 78 | -17,44 | 0,48 | -0,10 | 0,0 |
| 78 | -17,54 | 0,47 | -0,14 | 0,0 |
| 79 | -17,54 | 0,47 | -0,14 | 0,0 |
| 79 | -17,64 | 0,45 | -0,18 | 0,0 |
| 80 | -17,64 | 0,45 | -0,18 | 0,0 |
| 80 | -17,74 | 0,43 | -0,21 | 0,0 |
| 81 | -17,74 | 0,43 | -0,21 | 0,0 |
| 81 | -17,84 | 0,41 | -0,23 | 0,0 |
| 82 | -17,84 | 0,41 | -0,23 | 0,0 |
| 82 | -17,93 | 0,39 | -0,25 | 0,0 |
| 83 | -17,93 | 0,39 | -0,25 | 0,0 |
| 83 | -18,03 | 0,36 | -0,26 | 0,0 |
| 84 | -18,03 | 0,36 | -0,26 | 0,0 |
| 84 | -18,13 | 0,34 | -0,27 | 0,0 |
| 85 | -18,13 | 0,34 | -0,27 | 0,0 |
| 85 | -18,23 | 0,31 | -0,27 | 0,0 |
| 86 | -18,23 | 0,31 | -0,27 | 0,0 |
| 86 | -18,33 | 0,28 | -0,27 | 0,0 |
| 87 | -18,33 | 0,28 | -0,27 | 0,0 |
| 87 | -18,43 | 0,26 | -0,27 | 0,0 |
| 88 | -18,43 | 0,26 | -0,27 | 0,0 |
| 88 | -18,52 | 0,23 | -0,27 | 0,0 |
| 89 | -18,52 | 0,23 | -0,27 | 0,0 |
| 89 | -18,62 | 0,21 | -0,26 | 0,0 |
| 90 | -18,62 | 0,21 | -0,26 | 0,0 |
| 90 | -18,72 | 0,18 | -0,25 | 0,0 |
| 91 | -18,72 | 0,18 | -0,25 | 0,0 |
| 91 | -18,82 | 0,16 | -0,24 | 0,0 |
| 92 | -18,82 | 0,16 | -0,24 | 0,0 |
| 92 | -18,92 | 0,13 | -0,23 | 0,0 |

| Segment number | Level [m] | Moment [kNm] | Shear force [kN] | Displacement [mm] |
|------------------------|-----------|--------------|------------------|-------------------|
| 93 | -18,92 | 0,13 | -0,23 | 0,0 |
| 93 | -19,02 | 0,11 | -0,21 | 0,0 |
| 94 | -19,02 | 0,11 | -0,21 | 0,0 |
| 94 | -19,11 | 0,09 | -0,19 | 0,0 |
| 95 | -19,11 | 0,09 | -0,19 | 0,0 |
| 95 | -19,21 | 0,07 | -0,18 | 0,0 |
| 96 | -19,21 | 0,07 | -0,18 | 0,0 |
| 96 | -19,31 | 0,06 | -0,16 | 0,0 |
| 97 | -19,31 | 0,06 | -0,16 | 0,0 |
| 97 | -19,41 | 0,04 | -0,14 | 0,0 |
| 98 | -19,41 | 0,04 | -0,14 | 0,0 |
| 98 | -19,51 | 0,03 | -0,12 | 0,0 |
| 99 | -19,51 | 0,03 | -0,12 | 0,0 |
| 99 | -19,61 | 0,02 | -0,10 | 0,0 |
| 100 | -19,61 | 0,02 | -0,10 | 0,0 |
| 100 | -19,70 | 0,01 | -0,07 | 0,0 |
| 101 | -19,70 | 0,01 | -0,07 | 0,0 |
| 101 | -19,80 | 0,00 | -0,05 | 0,0 |
| 102 | -19,80 | 0,00 | -0,05 | 0,0 |
| 102 | -19,90 | 0,00 | -0,03 | 0,0 |
| 103 | -19,90 | 0,00 | -0,03 | 0,0 |
| 103 | -20,00 | 0,00 | 0,00 | 0,0 |
| Max | | 48,52 | -50,00 | 2,5 |
| Max, minor nodes incl. | | 48,52 | -50,00 | 2,5 |

4.2 Stresses

| Node number | Level [m] | Left | | | | Right | | | |
|-------------|-----------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|
| | | Effective Stress [kN/m ²] | Water stress [kN/m ²] | Stat* [A] | Mob** [%] | Effective Stress [kN/m ²] | Water stress [kN/m ²] | Stat* [P] | Mob** [%] |
| 1 | -10,00 | 0,00 | 0,00 | A | | 0,00 | 0,00 | P | |
| 1 | -10,08 | 0,00 | 0,82 | A | | 4,65 | 0,82 | P | |
| 2 | -10,08 | 0,00 | 0,82 | A | | 4,65 | 0,82 | P | |
| 2 | -10,17 | 0,00 | 1,64 | A | | 9,29 | 1,64 | P | |
| 3 | -10,17 | 0,00 | 1,64 | A | | 9,29 | 1,64 | P | |
| 3 | -10,25 | 0,00 | 2,45 | A | | 13,94 | 2,45 | P | |
| 4 | -10,25 | 0,00 | 2,45 | A | | 13,94 | 2,45 | P | |
| 4 | -10,33 | 0,00 | 3,27 | A | | 18,59 | 3,27 | P | |
| 5 | -10,33 | 0,00 | 3,27 | A | | 18,59 | 3,27 | P | |
| 5 | -10,42 | 0,00 | 4,09 | A | | 23,24 | 4,09 | P | |
| 6 | -10,42 | 0,00 | 4,09 | A | | 23,24 | 4,09 | P | |
| 6 | -10,50 | 0,00 | 4,91 | A | | 27,88 | 4,91 | P | |
| 7 | -10,50 | 0,00 | 4,91 | A | | 83,23 | 4,91 | - | 54 |
| 7 | -10,60 | 0,00 | 5,86 | A | | 80,44 | 5,86 | - | 51 |
| 8 | -10,60 | 0,00 | 5,86 | A | | 80,44 | 5,86 | - | 51 |
| 8 | -10,69 | 0,00 | 6,81 | A | | 77,49 | 6,81 | - | 48 |
| 9 | -10,69 | 0,00 | 6,81 | A | | 77,49 | 6,81 | - | 48 |
| 9 | -10,79 | 0,00 | 7,77 | A | | 74,40 | 7,77 | - | 44 |
| 10 | -10,79 | 0,00 | 7,77 | A | | 74,40 | 7,77 | - | 44 |
| 10 | -10,89 | 0,00 | 8,72 | A | | 71,21 | 8,72 | - | 41 |
| 11 | -10,89 | 0,00 | 8,72 | A | | 71,21 | 8,72 | - | 41 |
| 11 | -10,99 | 0,00 | 9,67 | A | | 67,94 | 9,67 | - | 38 |
| 12 | -10,99 | 0,00 | 9,67 | A | | 67,94 | 9,67 | - | 38 |
| 12 | -11,08 | 0,00 | 10,63 | A | | 64,63 | 10,63 | - | 36 |
| 13 | -11,08 | 0,00 | 10,63 | A | | 64,63 | 10,63 | - | 36 |
| 13 | -11,18 | 0,00 | 11,58 | A | | 61,29 | 11,58 | - | 33 |
| 14 | -11,18 | 0,00 | 11,58 | A | | 61,29 | 11,58 | - | 33 |
| 14 | -11,28 | 0,00 | 12,54 | A | | 57,96 | 12,54 | - | 30 |
| 15 | -11,28 | 0,00 | 12,54 | A | | 57,96 | 12,54 | - | 30 |
| 15 | -11,38 | 0,00 | 13,49 | A | | 54,64 | 13,49 | - | 28 |
| 16 | -11,38 | 0,00 | 13,49 | A | | 54,64 | 13,49 | - | 28 |
| 16 | -11,47 | 0,00 | 14,44 | A | | 51,35 | 14,44 | - | 26 |
| 17 | -11,47 | 0,00 | 14,44 | A | | 51,35 | 14,44 | - | 26 |
| 17 | -11,57 | 0,00 | 15,40 | A | | 48,12 | 15,40 | - | 23 |

| Node number | Level [m] | Left | | | | Right | | | |
|-------------|-----------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------|-----------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------|-----------|
| | | Effective Stress [kN/m ²] | Water stress [kN/m ²] | Stat* | Mob** [%] | Effective Stress [kN/m ²] | Water stress [kN/m ²] | Stat* | Mob** [%] |
| 18 | -11,57 | 0,00 | 15,40 | A | | 48,12 | 15,40 | - | 23 |
| 18 | -11,67 | 0,00 | 16,35 | A | | 44,96 | 16,35 | - | 21 |
| 19 | -11,67 | 0,00 | 16,35 | A | | 44,96 | 16,35 | - | 21 |
| 19 | -11,76 | 0,00 | 17,30 | A | | 41,87 | 17,30 | - | 19 |
| 20 | -11,76 | 0,00 | 17,30 | A | | 41,87 | 17,30 | - | 19 |
| 20 | -11,86 | 0,00 | 18,26 | A | | 38,86 | 18,26 | - | 18 |
| 21 | -11,86 | 0,00 | 18,26 | A | | 38,86 | 18,26 | - | 18 |
| 21 | -11,96 | 0,00 | 19,21 | A | | 35,96 | 19,21 | - | 16 |
| 22 | -11,96 | 0,00 | 19,21 | A | | 35,96 | 19,21 | - | 16 |
| 22 | -12,06 | 0,00 | 20,16 | A | | 33,16 | 20,16 | - | 14 |
| 23 | -12,06 | 0,00 | 20,16 | A | | 33,16 | 20,16 | - | 14 |
| 23 | -12,15 | 0,00 | 21,12 | A | | 30,46 | 21,12 | - | 13 |
| 24 | -12,15 | 0,00 | 21,12 | A | | 30,46 | 21,12 | - | 13 |
| 24 | -12,25 | 0,00 | 22,07 | A | | 27,88 | 22,07 | - | 12 |
| 25 | -12,25 | 0,00 | 22,07 | A | | 27,88 | 22,07 | - | 12 |
| 25 | -12,35 | 0,00 | 23,03 | A | | 25,42 | 23,03 | - | 10 |
| 26 | -12,35 | 0,00 | 23,03 | A | | 25,42 | 23,03 | - | 10 |
| 26 | -12,44 | 0,00 | 23,98 | A | | 23,07 | 23,98 | - | 9 |
| 27 | -12,44 | 0,00 | 23,98 | A | | 23,07 | 23,98 | - | 9 |
| 27 | -12,54 | 0,00 | 24,93 | A | | 20,85 | 24,93 | - | 8 |
| 28 | -12,54 | 0,00 | 24,93 | A | | 20,85 | 24,93 | - | 8 |
| 28 | -12,64 | 0,00 | 25,89 | A | | 18,75 | 25,89 | - | 7 |
| 29 | -12,64 | 0,00 | 25,89 | A | | 18,75 | 25,89 | - | 7 |
| 29 | -12,74 | 0,00 | 26,84 | A | | 16,77 | 26,84 | - | 6 |
| 30 | -12,74 | 0,00 | 26,84 | A | | 16,77 | 26,84 | - | 6 |
| 30 | -12,83 | 0,00 | 27,80 | A | | 14,91 | 27,80 | - | 6 |
| 31 | -12,83 | 0,00 | 27,80 | A | | 14,91 | 27,80 | - | 6 |
| 31 | -12,93 | 0,00 | 28,75 | A | | 13,18 | 28,75 | - | 5 |
| 32 | -12,93 | 0,00 | 28,75 | A | | 13,18 | 28,75 | - | 5 |
| 32 | -13,03 | 0,00 | 29,70 | A | | 11,56 | 29,70 | - | 4 |
| 33 | -13,03 | 0,00 | 29,70 | A | | 11,56 | 29,70 | - | 4 |
| 33 | -13,13 | 0,00 | 30,66 | A | | 10,05 | 30,66 | - | 4 |
| 34 | -13,13 | 0,00 | 30,66 | A | | 10,05 | 30,66 | - | 4 |
| 34 | -13,22 | 0,00 | 31,61 | A | | 8,66 | 31,61 | - | 3 |
| 35 | -13,22 | 0,00 | 31,61 | A | | 8,66 | 31,61 | - | 3 |
| 35 | -13,32 | 0,00 | 32,56 | A | | 7,37 | 32,56 | - | 3 |
| 36 | -13,32 | 0,00 | 32,56 | A | | 7,37 | 32,56 | - | 3 |
| 36 | -13,42 | 0,00 | 33,52 | A | | 6,20 | 33,52 | - | 2 |
| 37 | -13,42 | 0,00 | 33,52 | A | | 6,20 | 33,52 | - | 2 |
| 37 | -13,51 | 0,00 | 34,47 | A | | 5,12 | 34,47 | - | 2 |
| 38 | -13,51 | 0,00 | 34,47 | A | | 5,12 | 34,47 | - | 2 |
| 38 | -13,61 | 0,00 | 35,42 | A | | 4,14 | 35,42 | - | 1 |
| 39 | -13,61 | 0,00 | 35,42 | A | | 4,14 | 35,42 | - | 1 |
| 39 | -13,71 | 0,00 | 36,38 | A | | 3,26 | 36,38 | - | 1 |
| 40 | -13,71 | 0,00 | 36,38 | A | | 3,26 | 36,38 | - | 1 |
| 40 | -13,81 | 0,00 | 37,33 | A | | 2,46 | 37,33 | - | 1 |
| 41 | -13,81 | 0,00 | 37,33 | A | | 2,46 | 37,33 | - | 1 |
| 41 | -13,90 | 0,00 | 38,29 | A | | 1,75 | 38,29 | - | 1 |
| 42 | -13,90 | 0,00 | 38,29 | A | | 1,75 | 38,29 | - | 1 |
| 42 | -14,00 | 0,00 | 39,24 | A | | 1,12 | 39,24 | - | |
| 43 | -14,00 | 0,00 | 39,24 | A | | 3,74 | 39,24 | - | 1 |
| 43 | -14,10 | 0,00 | 40,20 | A | | 1,87 | 40,20 | - | |
| 44 | -14,10 | 0,00 | 40,20 | A | | 1,87 | 40,20 | - | |
| 44 | -14,20 | 0,00 | 41,17 | A | | 0,24 | 41,17 | - | |
| 45 | -14,20 | 0,00 | 41,17 | A | | 0,24 | 41,17 | - | |
| 45 | -14,30 | 1,16 | 42,13 | - | | 0,00 | 42,13 | A | |
| 46 | -14,30 | 1,16 | 42,13 | - | | 0,00 | 42,13 | A | |
| 46 | -14,39 | 2,36 | 43,10 | - | | 0,00 | 43,10 | A | |
| 47 | -14,39 | 2,36 | 43,10 | - | | 0,00 | 43,10 | A | |
| 47 | -14,49 | 3,36 | 44,06 | - | | 0,00 | 44,06 | A | |
| 48 | -14,49 | 3,36 | 44,06 | - | | 0,00 | 44,06 | A | |
| 48 | -14,59 | 4,19 | 45,03 | - | | 0,00 | 45,03 | A | |
| 49 | -14,59 | 4,19 | 45,03 | - | | 0,00 | 45,03 | A | |

| Node number | Level [m] | Left | | | | Right | | | |
|-------------|-----------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------|-----------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------|-----------|
| | | Effective Stress [kN/m ²] | Water stress [kN/m ²] | Stat* | Mob** [%] | Effective Stress [kN/m ²] | Water stress [kN/m ²] | Stat* | Mob** [%] |
| 49 | -14,69 | 4,86 | 45,99 | - | 1 | 0,00 | 45,99 | A | |
| 50 | -14,69 | 4,86 | 45,99 | - | 1 | 0,00 | 45,99 | A | |
| 50 | -14,79 | 5,39 | 46,96 | - | 1 | 0,00 | 46,96 | A | |
| 51 | -14,79 | 5,39 | 46,96 | - | 1 | 0,00 | 46,96 | A | |
| 51 | -14,89 | 5,78 | 47,92 | - | 1 | 0,00 | 47,92 | A | |
| 52 | -14,89 | 5,78 | 47,92 | - | 1 | 0,00 | 47,92 | A | |
| 52 | -14,98 | 6,06 | 48,89 | - | 1 | 0,00 | 48,89 | A | |
| 53 | -14,98 | 6,06 | 48,89 | - | 1 | 0,00 | 48,89 | A | |
| 53 | -15,08 | 6,24 | 49,85 | - | 1 | 0,00 | 49,85 | A | |
| 54 | -15,08 | 6,24 | 49,85 | - | 1 | 0,00 | 49,85 | A | |
| 54 | -15,18 | 6,33 | 50,82 | - | 1 | 0,00 | 50,82 | A | |
| 55 | -15,18 | 6,33 | 50,82 | - | 1 | 0,00 | 50,82 | A | |
| 55 | -15,28 | 6,34 | 51,78 | - | 1 | 0,00 | 51,78 | A | |
| 56 | -15,28 | 6,34 | 51,78 | - | 1 | 0,00 | 51,78 | A | |
| 56 | -15,38 | 6,28 | 52,75 | - | 1 | 0,00 | 52,75 | A | |
| 57 | -15,38 | 6,28 | 52,75 | - | 1 | 0,00 | 52,75 | A | |
| 57 | -15,48 | 6,17 | 53,71 | - | 1 | 0,00 | 53,71 | A | |
| 58 | -15,48 | 6,17 | 53,71 | - | 1 | 0,00 | 53,71 | A | |
| 58 | -15,57 | 6,00 | 54,68 | - | 1 | 0,00 | 54,68 | A | |
| 59 | -15,57 | 6,00 | 54,68 | - | 1 | 0,00 | 54,68 | A | |
| 59 | -15,67 | 5,80 | 55,64 | - | 1 | 0,00 | 55,64 | A | |
| 60 | -15,67 | 5,80 | 55,64 | - | 1 | 0,00 | 55,64 | A | |
| 60 | -15,77 | 5,57 | 56,61 | - | | 0,00 | 56,61 | A | |
| 61 | -15,77 | 5,57 | 56,61 | - | | 0,00 | 56,61 | A | |
| 61 | -15,87 | 5,31 | 57,57 | - | | 0,00 | 57,57 | A | |
| 62 | -15,87 | 5,31 | 57,57 | - | | 0,00 | 57,57 | A | |
| 62 | -15,97 | 5,03 | 58,54 | - | | 0,00 | 58,54 | A | |
| 63 | -15,97 | 5,03 | 58,54 | - | | 0,00 | 58,54 | A | |
| 63 | -16,07 | 4,73 | 59,50 | - | | 0,00 | 59,50 | A | |
| 64 | -16,07 | 4,73 | 59,50 | - | | 0,00 | 59,50 | A | |
| 64 | -16,16 | 4,43 | 60,47 | - | | 0,00 | 60,47 | A | |
| 65 | -16,16 | 4,43 | 60,47 | - | | 0,00 | 60,47 | A | |
| 65 | -16,26 | 4,13 | 61,43 | - | | 0,00 | 61,43 | A | |
| 66 | -16,26 | 4,13 | 61,43 | - | | 0,00 | 61,43 | A | |
| 66 | -16,36 | 3,82 | 62,40 | - | | 0,00 | 62,40 | A | |
| 67 | -16,36 | 3,82 | 62,40 | - | | 0,00 | 62,40 | A | |
| 67 | -16,46 | 3,52 | 63,36 | - | | 0,00 | 63,36 | A | |
| 68 | -16,46 | 3,52 | 63,36 | - | | 0,00 | 63,36 | A | |
| 68 | -16,56 | 3,23 | 64,33 | - | | 0,00 | 64,33 | A | |
| 69 | -16,56 | 3,23 | 64,33 | - | | 0,00 | 64,33 | A | |
| 69 | -16,66 | 2,94 | 65,29 | - | | 0,00 | 65,29 | A | |
| 70 | -16,66 | 2,94 | 65,29 | - | | 0,00 | 65,29 | A | |
| 70 | -16,75 | 2,66 | 66,26 | - | | 0,00 | 66,26 | A | |
| 71 | -16,75 | 2,66 | 66,26 | - | | 0,00 | 66,26 | A | |
| 71 | -16,85 | 2,39 | 67,22 | - | | 0,00 | 67,22 | A | |
| 72 | -16,85 | 2,39 | 67,22 | - | | 0,00 | 67,22 | A | |
| 72 | -16,95 | 2,14 | 68,19 | - | | 0,00 | 68,19 | A | |
| 73 | -16,95 | 2,14 | 68,19 | - | | 0,00 | 68,19 | A | |
| 73 | -17,05 | 1,89 | 69,15 | - | | 0,00 | 69,15 | A | |
| 74 | -17,05 | 1,89 | 69,15 | - | | 0,00 | 69,15 | A | |
| 74 | -17,15 | 1,67 | 70,12 | - | | 0,00 | 70,12 | A | |
| 75 | -17,15 | 1,67 | 70,12 | - | | 0,00 | 70,12 | A | |
| 75 | -17,25 | 1,45 | 71,08 | - | | 0,00 | 71,08 | A | |
| 76 | -17,25 | 1,45 | 71,08 | - | | 0,00 | 71,08 | A | |
| 76 | -17,34 | 1,25 | 72,05 | - | | 0,00 | 72,05 | A | |
| 77 | -17,34 | 1,25 | 72,05 | - | | 0,00 | 72,05 | A | |
| 77 | -17,44 | 1,07 | 73,01 | - | | 0,00 | 73,01 | A | |
| 78 | -17,44 | 1,07 | 73,01 | - | | 0,00 | 73,01 | A | |
| 78 | -17,54 | 0,90 | 73,98 | - | | 0,00 | 73,98 | A | |
| 79 | -17,54 | 0,90 | 73,98 | - | | 0,00 | 73,98 | A | |
| 79 | -17,64 | 0,74 | 74,94 | - | | 0,00 | 74,94 | A | |
| 80 | -17,64 | 0,74 | 74,94 | - | | 0,00 | 74,94 | A | |
| 80 | -17,74 | 0,60 | 75,91 | - | | 0,00 | 75,91 | A | |

| Node number | Level [m] | Left | | | | Right | | | |
|-------------|-----------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------|-----------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------|-----------|
| | | Effective Stress [kN/m ²] | Water stress [kN/m ²] | Stat* | Mob** [%] | Effective Stress [kN/m ²] | Water stress [kN/m ²] | Stat* | Mob** [%] |
| 81 | -17,74 | 0,60 | 75,91 | - | | 0,00 | 75,91 | A | |
| 81 | -17,84 | 0,47 | 76,87 | - | | 0,00 | 76,87 | A | |
| 82 | -17,84 | 0,47 | 76,87 | - | | 0,00 | 76,87 | A | |
| 82 | -17,93 | 0,35 | 77,84 | - | | 0,00 | 77,84 | A | |
| 83 | -17,93 | 0,35 | 77,84 | - | | 0,00 | 77,84 | A | |
| 83 | -18,03 | 0,25 | 78,80 | - | | 0,00 | 78,80 | A | |
| 84 | -18,03 | 0,25 | 78,80 | - | | 0,00 | 78,80 | A | |
| 84 | -18,13 | 0,15 | 79,77 | - | | 0,00 | 79,77 | A | |
| 85 | -18,13 | 0,15 | 79,77 | - | | 0,00 | 79,77 | A | |
| 85 | -18,23 | 0,06 | 80,73 | - | | 0,00 | 80,73 | A | |
| 86 | -18,23 | 0,06 | 80,73 | - | | 0,00 | 80,73 | A | |
| 86 | -18,33 | 0,00 | 81,70 | A | | 0,01 | 81,70 | - | |
| 87 | -18,33 | 0,00 | 81,70 | A | | 0,01 | 81,70 | - | |
| 87 | -18,43 | 0,00 | 82,66 | A | | 0,08 | 82,66 | - | |
| 88 | -18,43 | 0,00 | 82,66 | A | | 0,08 | 82,66 | - | |
| 88 | -18,52 | 0,00 | 83,63 | A | | 0,14 | 83,63 | - | |
| 89 | -18,52 | 0,00 | 83,63 | A | | 0,14 | 83,63 | - | |
| 89 | -18,62 | 0,00 | 84,59 | A | | 0,19 | 84,59 | - | |
| 90 | -18,62 | 0,00 | 84,59 | A | | 0,19 | 84,59 | - | |
| 90 | -18,72 | 0,00 | 85,56 | A | | 0,24 | 85,56 | - | |
| 91 | -18,72 | 0,00 | 85,56 | A | | 0,24 | 85,56 | - | |
| 91 | -18,82 | 0,00 | 86,52 | A | | 0,28 | 86,52 | - | |
| 92 | -18,82 | 0,00 | 86,52 | A | | 0,28 | 86,52 | - | |
| 92 | -18,92 | 0,00 | 87,49 | A | | 0,32 | 87,49 | - | |
| 93 | -18,92 | 0,00 | 87,49 | A | | 0,32 | 87,49 | - | |
| 93 | -19,02 | 0,00 | 88,45 | A | | 0,36 | 88,45 | - | |
| 94 | -19,02 | 0,00 | 88,45 | A | | 0,36 | 88,45 | - | |
| 94 | -19,11 | 0,00 | 89,42 | A | | 0,39 | 89,42 | - | |
| 95 | -19,11 | 0,00 | 89,42 | A | | 0,39 | 89,42 | - | |
| 95 | -19,21 | 0,00 | 90,38 | A | | 0,41 | 90,38 | - | |
| 96 | -19,21 | 0,00 | 90,38 | A | | 0,41 | 90,38 | - | |
| 96 | -19,31 | 0,00 | 91,35 | A | | 0,44 | 91,35 | - | |
| 97 | -19,31 | 0,00 | 91,35 | A | | 0,44 | 91,35 | - | |
| 97 | -19,41 | 0,00 | 92,31 | A | | 0,46 | 92,31 | - | |
| 98 | -19,41 | 0,00 | 92,31 | A | | 0,46 | 92,31 | - | |
| 98 | -19,51 | 0,00 | 93,28 | A | | 0,48 | 93,28 | - | |
| 99 | -19,51 | 0,00 | 93,28 | A | | 0,48 | 93,28 | - | |
| 99 | -19,61 | 0,00 | 94,24 | A | | 0,51 | 94,24 | - | |
| 100 | -19,61 | 0,00 | 94,24 | A | | 0,51 | 94,24 | - | |
| 100 | -19,70 | 0,00 | 95,21 | A | | 0,53 | 95,21 | - | |
| 101 | -19,70 | 0,00 | 95,21 | A | | 0,53 | 95,21 | - | |
| 101 | -19,80 | 0,00 | 96,17 | A | | 0,55 | 96,17 | - | |
| 102 | -19,80 | 0,00 | 96,17 | A | | 0,55 | 96,17 | - | |
| 102 | -19,90 | 0,00 | 97,14 | A | | 0,57 | 97,14 | - | |
| 103 | -19,90 | 0,00 | 97,14 | A | | 0,57 | 97,14 | - | |
| 103 | -20,00 | 0,00 | 98,10 | A | | 0,59 | 98,10 | - | |

Stat* Status (A=active, P=passive, Number is branche, 0 is unloading)
 Mob** Percentage passive mobilized

4.3 Rigid and Spring Supports

| Node number | Level [m] | Force [kN] | Moment [kNm] |
|-------------|-----------|------------|--------------|
| 1 | -10,00 | 0,00 | 48,52 |

End of Report

G Belasting op en verplaatsing van de moot na falen

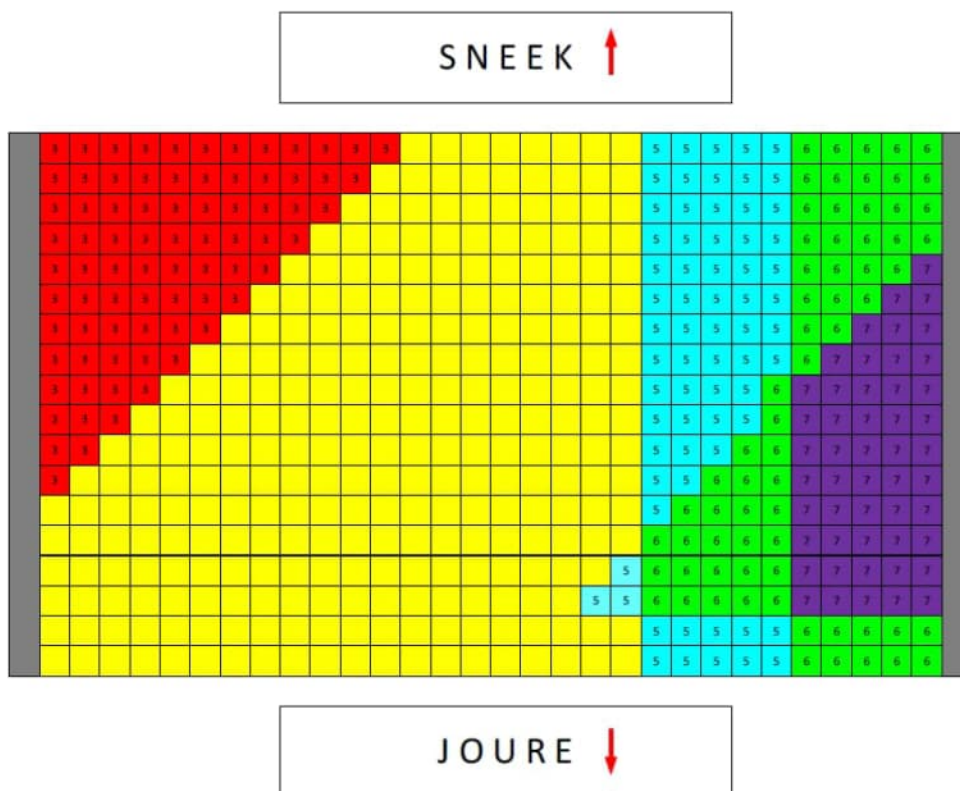
Direct na het omhoogkomen van de moot is gestart met het belasten van de moot, om de schade aan de tunnel te beperken. In tot en met week 2 van 2023 is dit een noodoplossing geweest, na week 2 is het systeem aangepast op basis van een ontwerpberekening om de tunnel weer toegankelijk te maken voor het verkeer over één rijstrook.

Vanaf 16 december zijn de verplaatsingen van de hoekpunten van de moten van het gefaalde tunneldeel gemonitord met een meetfrequentie van één meting per uur.

G.1 Belastingen in de tunnel, eerste fase

Het belastingsschema is als volgt:

- 14 dec – 58431 [kN] ofwel: 98 [kN/m²] uniform (3 lagen big bags).
- 17 dec – Opgehoogd naar totaal 67975 [kN] ofwel: 114 [kN/m²]: uniform (4 lagen big bags in totaal).
- Week 1 januari – 180 big bags geplaatst t.p.v. de noordzijde van de wand.
- Week 2 januari – Reshuffeling big bags (16 kN/stuk) zie B-figuur G-1.



B-figuur G-1 Stapeling big bags zoals uitgevoerd op 9 januari.

De oppervlakte van de moot is $18 \times 30 = 540 \text{ m}^2$. Vier lagen big bags zijn dus in totaal $4 \times 540 = 2160$ big bags.

Per 9 januari:

- aantal big bags: $78 \cdot 3 + 279 \cdot 4 + 64 \cdot 5 + 69 \cdot 6 + 50 \cdot 7 = 2434$.
- totale belasting $2434 \cdot 16 = 38944$ Kn.

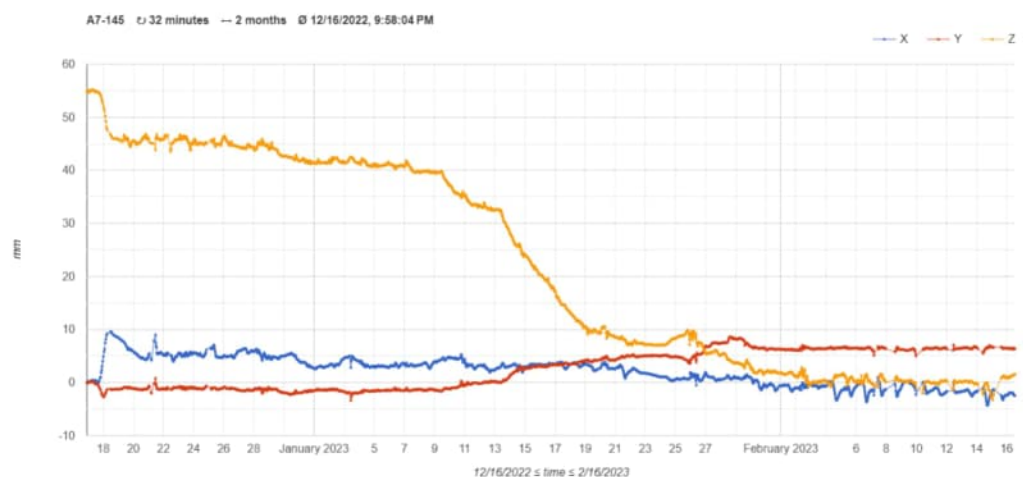
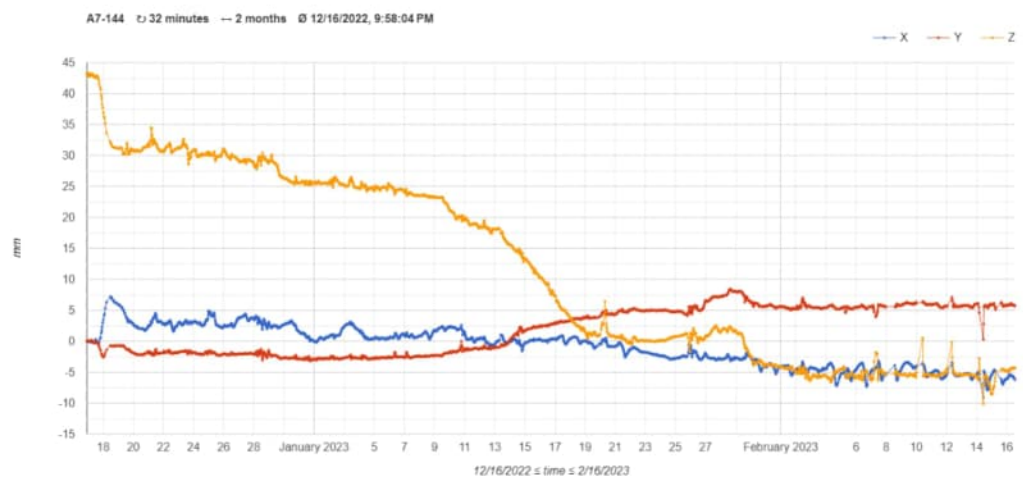
G.2 Belastingen in de tunnel, tweede fase

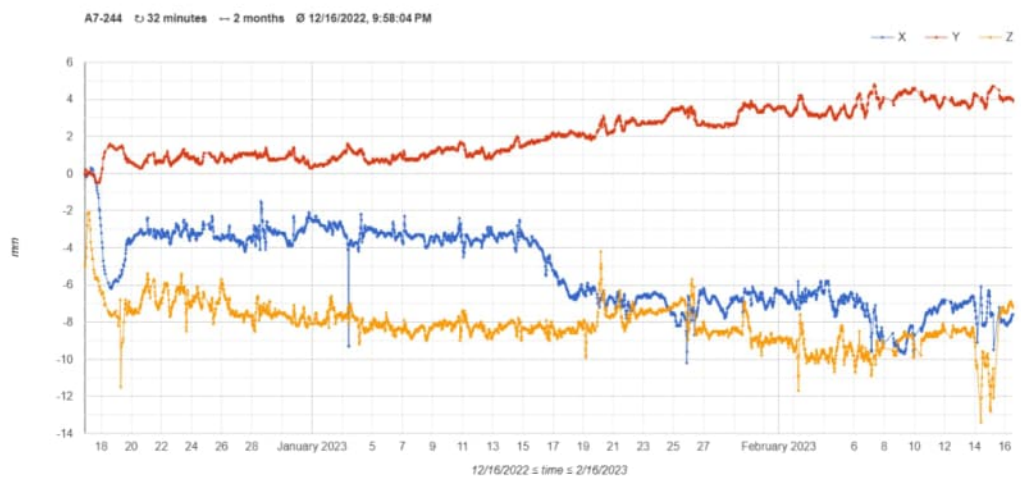
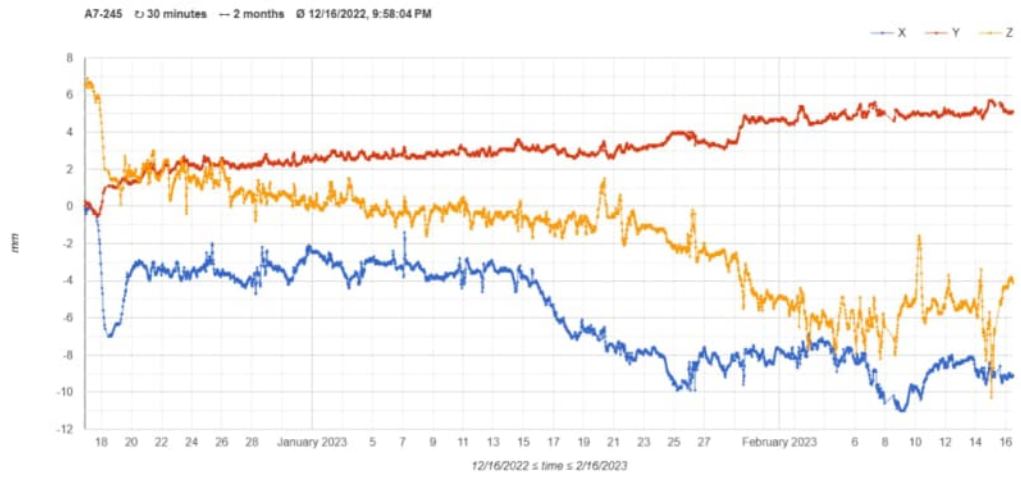
In de ontwerpnota [13] is afgeleid dat voor het compenseren van de waterdruk in totaal 62576 kN belasting nodig is. Deze waarde is inclusief de veiligheidsfactoren 0.95 en 1.05 voor ongunstige en gunstige termen. Het gewicht van de moot is wel in rekening gebracht, de wandwrijving is niet in rekening gebracht. De aanname was dat alle palen waren bezweken.

De belasting is nu vervangen door een gelijkmatig verdeelde belasting op de hele moot.

G.3 Gemeten verplaatsingen

Deze figuren geven de resultaten van de deformatiemetingen aan de mootwand weer [14]. Hierin is Z de verticale verplaatsing, Y de verplaatsing in lengterichting van de tunnel en X de verplaatsing in dwarsrichting van de tunnel (identiek aan de eerdere monitoring).





G.4 Opmerkingen over deze gegevens

Bij de eerste belasting zijn de hoekpunten 244 en 245 aan de westzijde van de moot wat naar beneden bewogen, maar de waarde is beperkt. Dit zou een min of meer elastische verplaatsing kunnen zijn.

De moot is aan de oost pas echt terug gaan bewegen nadat de belasting naar de oostmuur is verplaatst, terwijl daarbij de westzijde nauwelijks bewoog. Dit geeft aan dat aan deze zijde een extra tegenwerkende kracht aanwezig is. Dit kan zijn de wand van de moot en/of een beperkt aantal geotechnisch bezwaken palen.

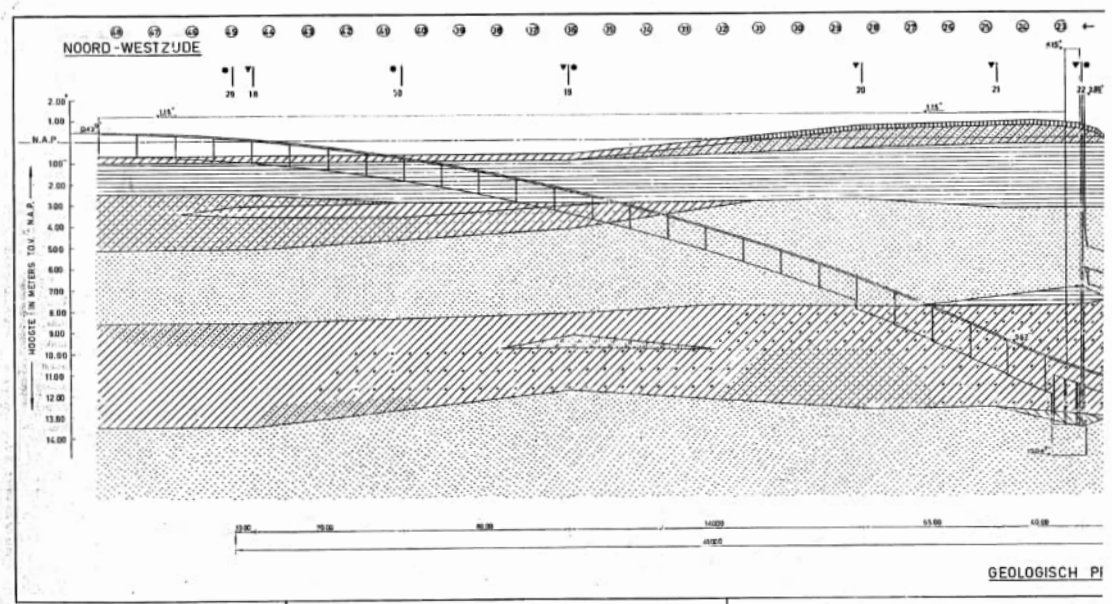
H Details van de fundering

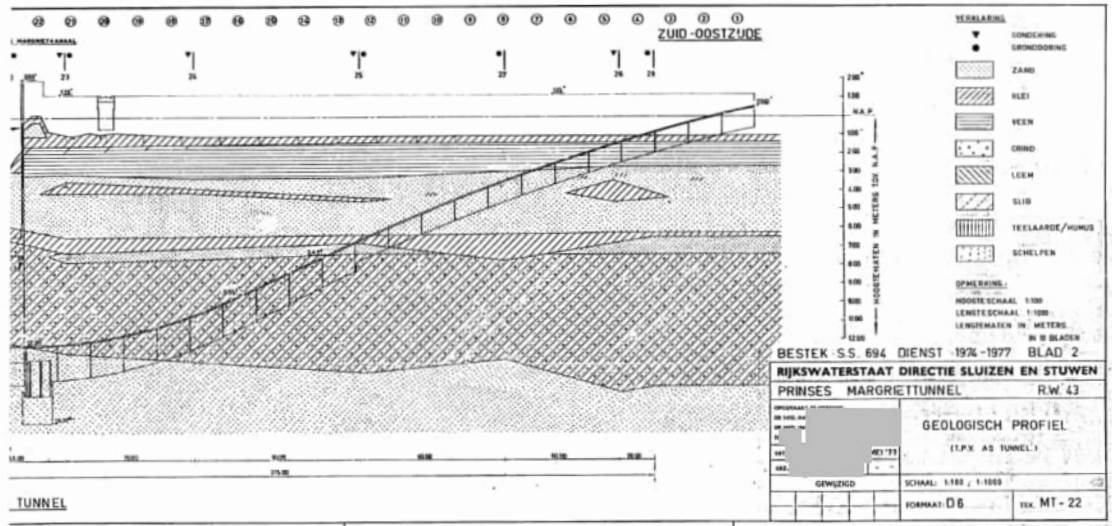
H.1 Tunnelmoten

| Moten noord (aantal) | Type fundering | Moten zuid (aantal) |
|----------------------|--|---------------------|
| 48-39 (10) | fundering op staal | 4-1 (4) |
| 38-37 (2) | drukpalen 45 cm | 6-5 (2) |
| 36-33 (4) | trekpaal 45 cm Dywidag 32 mm (hoge moten wand op drukpalen) | 11-7 (5) |
| 32-23 (12) | trekpaal 45 cm Dywidag 36 mm (hoge moten wand op 32 mm) | 22-12 (11) |

B-tabel H-1 Overzicht type fundering.

H.2 Grondonderzoek 1974





5.1.2.e

I Beschrijving enkele meetmethodes

I.1 Impedantiemetingen voorspanstaven

(bewerkt concept aangeleverd door C-Cube per e-mail 10 februari 2023).

Het doel van de impedantiemetingen is na te gaan of de voorspanstaven contact maken met het grondwater. Deze meting differentieert tussen een mechanische en een corrosie oorzaak.

De meting wordt uitgevoerd voordat er voorspanstaven worden getrokken. Het is noodzakelijk dat er metallisch contact te maken is met de kop van de voorspanstaf.

De metingen worden uitgevoerd met een handheld meter die kan kwantificeren hoe goed de beton nog tegen corrosie beschermt, en hoe *groot (PH)* de corrosiesnelheid dan wel *hoe groot (PH)* het corroderend oppervlak is.

Om dit te meten wordt gebruik gemaakt van de volgende methoden:

- Iedere meting tussen twee voorspanstaven; hierbij wordt met behulp van een statistische meetopzet de voorspanstaaf met de laagste weerstand opgezocht.
- Tussen elke voorspanstaaf en een externe elektrode welke in een peilbuis naast de tunnel in het grondwater hangt.

Uit de resultaten kan een mapping worden gemaakt van de beschermwaarden voor ieder van de voorspanstaven.

J Vervallen onderzoeken

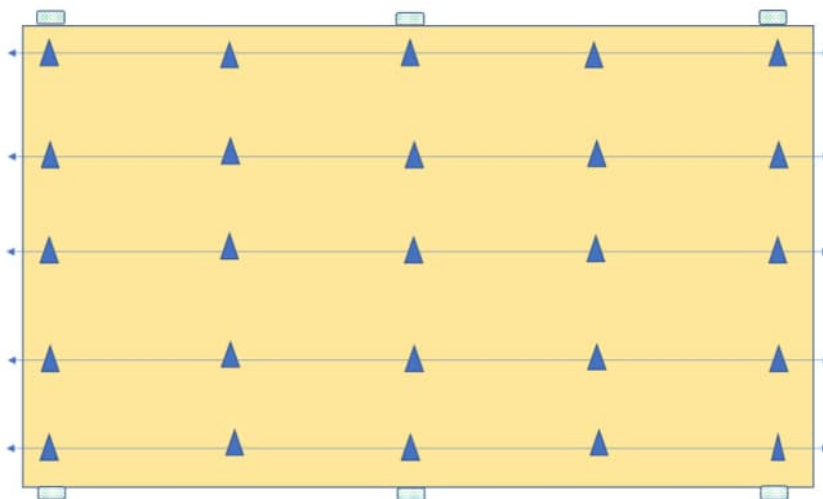
Tijdens de ontwikkeling van het plan van aanpak zijn een verschillende onderzoeksvoorstellen uitgewerkt en beoordeeld op verwacht nut, verwachte kosten en praktische haalbaarheid. Deze bijlage bevat een overzicht van een aantal verworpen voorstellen.

J.1 Inmeten verplaatsingen tunnelmooten

De verplaatsingen van de tunnelconstructie moeten in dwarsrichting en lengterichting worden vastgesteld:

- Het betreft het waterpassen van de vloer op 25 punten.
- Het opmeten van de stand van de wand op 4 hoogtes, 0%(*), 50%, 70 en 90% van de wand en bovenzijde van de wand. De 0% hoogte is zo dicht mogelijk bij bovenzijde vloer. Het betreft twee lijnen aan de uiteinden van de moot en één in het midden van de moot, dus per moot 6 verticalen.

Zie ook Figuur 7.1. Om een eerste beeld van de verplaatsingen te krijgen is minimaal een kwadratische interpolatie nodig, waardoor minimaal 6 meetpunten nodig zijn. De beschouwing veronderstelt dat de vloer oorspronkelijk vlak is geweest. Om de invloed van deze aanname op verplaatsingen en de invloed van eventuele (meet)onzekerheden te verminderen, is een groter aantal wenselijk.



Figuur 7.1 Overzicht meetpunten voor deformatie bepaling (driehoeken) en voor het vaststellen van holle ruimten onder de vloer (rechthoeken). De pijlpunten links en rechts geven de posities aan waar langs een verticaal op vier hoogtes de verplaatsing (de uitwijking van of naar de weg) van de wand wordt gemeten.

De verplaatsing van de tunnelvloer en de (mogelijk aanwezige) opening onder de tunnelvloer geven een zicht op de grondverplaatsingen die de afgelopen tijd zijn opgetreden. De afwezigheid van een spleet onder de tunnel kan wijzen op een extra belasting van de bodem door het zwellen van de ondergrond. Een aanwezige opening onder de tunnel kan wijzen op een opwaartse verplaatsing van de tunnel of op zettingen in de grond onder de tunnel. wat kan wijzen op extra verticale of horizontale belasting op de trekpalen.

J.2 Onderzoek palen onder de wand

Het onderzoeken van de randpalen wordt uitgevoerd in moot 25, 26 en 30. Aan de oostwand kunnen twee conussen worden vrijgemaakt, zodat het onderzoek naar de staat van deze palen kan worden uitgevoerd zoals hiervoor beschreven. De uitvoering is in beginsel gelijk aan het onderzoek dat in paragraaf 5.4 is beschreven.

Dit onderzoek is lastig omdat de wand op de conussen staat, maar anderzijds belangrijk omdat het falen mogelijk bij deze palen begonnen is. Daarom is het wenselijk in enkele moten de staat van de randpalen wel te onderzoeken. Dit is een complexe operatie, waarvoor het nut en de omvang nog tegen elkaar moet worden afgewogen. Opgemerkt wordt dat randpalen die schoor naar buiten staan hoogstwaarschijnlijk eenvoudiger te benaderen en te onderzoeken zijn dan palen die schoor naar binnen staan.

K Specificatie veldonderzoek

Het veldonderzoek is op maandag 13 februari 2023 met de aannemer van Hattum en Blankevoort besproken. In dat overleg is de taakverdeling afgesproken. Deze afspraken staan vermeld in deze bijlage.

| beproeving | opmerking / voorwaardes | uitvoering | |
|--|--|------------|---|
| vervormingen tunnel | | | |
| rioolinspectie | | VHB | assetinsight gevraagd camera |
| inspectie holle ruimtes | sluis voor sonderingen aanwezig | VHB | assetinsight gevraagd camera beweegbare kop?, mechanische tool meten ??? Uitzoeken |
| vervormingen tunnelwanden | 3 verticalen langs de wand, onderzoeksmoten 9 stuks waar trekproeven gedaan worden, opgave volgt, vloer is vervallen | VHB | assetinsight / maatvoerder, actuele kromming en scheefstand meten, opnemen met uitvoering / maatvoerder hoe |
| vervormingen voegen | bespreken of dit wel/niet te doen, monitoring, voegen breder tunnel langer? Seizoensinvloed? | VHB | opnemen met uitvoering hoe en waar |
| moten | | | |
| conus openen | risico spanning op de staaf, afstand houden | VHB | foto's vlaketunnel opsturen |
| visuele inspectie | | Deltares | TNO |
| opmeten voerspanstaaf | actuele afmetingen diameter en lengte boven de kop | Deltares | TNO |
| weerstand | | Deltares | c-cube |
| geluid aanslaan | | Deltares | TNO |
| helling van de voerspanstaaf | | Deltares | TNO |
| omhoog tillen voerspanstaaf | | VHB | |
| gebroken | | | |
| voerspanstaaf eruit halen | risico: waterlekkage - wel/geen sluis meenemen? | VHB | |
| opmeten lengte & fotograferen | | Deltares | TNO |
| <u>droog</u> opslaan voor lab onderzoek | navraag ivm zuurstof? | Deltares | TNO |
| reinigen van het kanaal | | VHB | |
| inspectie van het voerspankanaal | met camera | VHB | assetinsight gevraagd camera, werkinstructie opnemen wat willen we zien iom Deltares |
| monstername densoband in het kanaal | | Deltares | methode ntb iom VHB qua bereikbaarheid wel/geen sluis |
| kernboring diep | één paal met gebroken staaf, niet te diep | Deltares | |
| doorzetten kernboring tot niveau breuk voerspanstaaf | | VHB | |
| kern markeren, opslaan voor lab onderzoek | | Deltares | TNO |
| voerspanstaaf niet gebroken | | | |
| trekstelling installeren | | VHB | |
| trekken en noteren | veiligheidsmaatregelen | VHB | Deltares, afstemmen trekprotocol VHB/Deltares - navraag vlaketunnel? |
| keuze kernboring | | Deltares | keuze palen Deltares |
| kernboring ondiep 80mm | diepte afstemmen | VHB | |
| kernboring tot de plaat | | VHB | |
| doorboren plaat | | VHB | |
| inspectie van de situatie onder de plaat | paal wel/niet aan vloer vast? Wel/geen sluis - water wel niet | VHB | 15 meter waterdruk, beweegbare kop op de camera? |
| doorzetten kernboring voor monstername | | VHB | |
| beproeven kernboring monstername | welke onderzoeken? Sterkte/chloride? | Deltares | |
| tweede visuele inspectie na kernboring 50mm | | Vhb | camera inspectie |
| afsluiten conus | hoe lang mogen deze open staan voor definitief sluiten? | VHB | |

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl