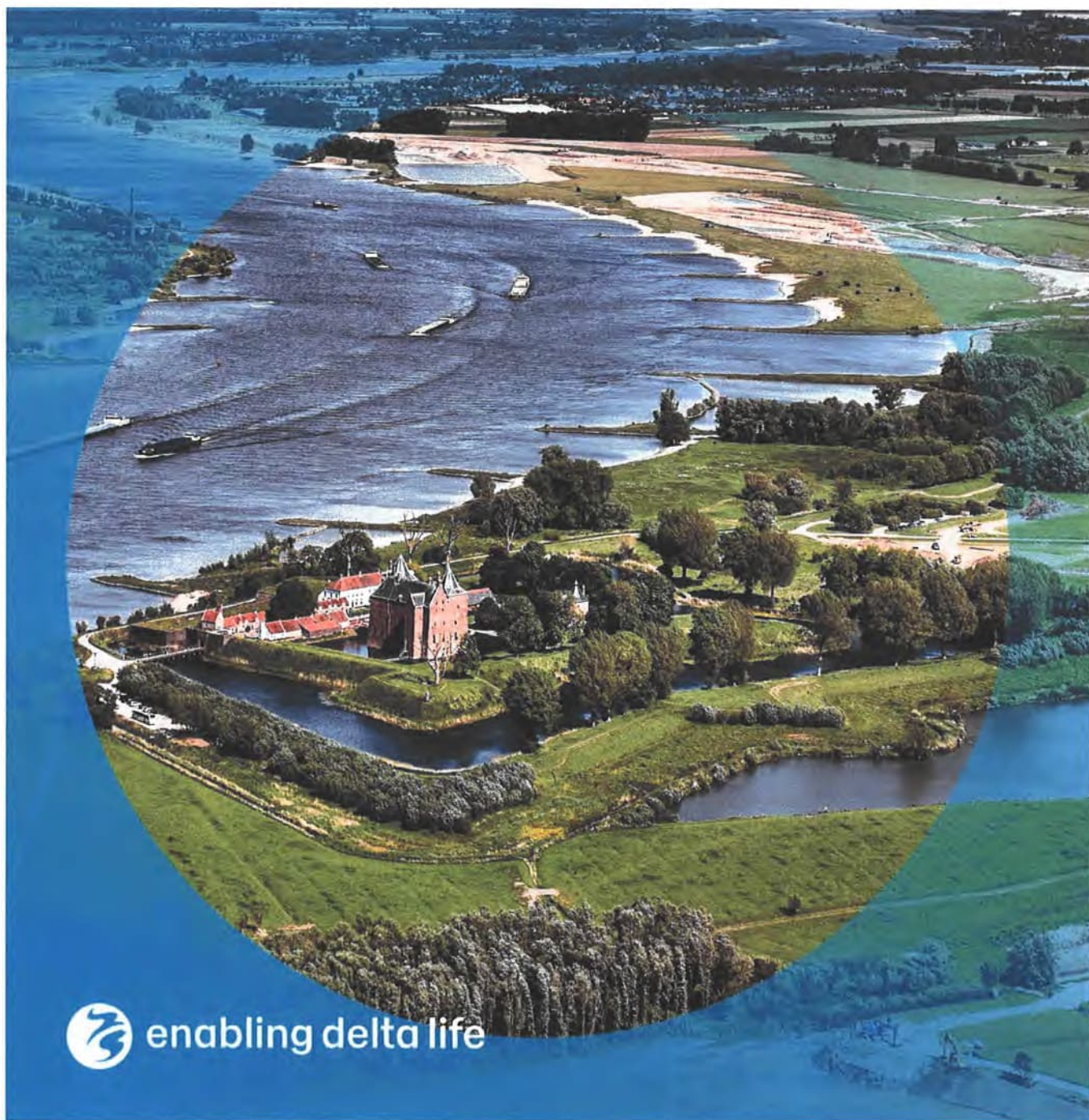


Bemalingsadvies herstel Prinses Margriettunnel



Bemalingsadvies herstel Prinses Margriettunnel

Bemalingsadvies herstel Prinses Margrietunnel

Opdrachtgever	-RWS
Contactpersoon	██████████ 5.1.2.e
Referenties	
Trefwoorden	Bemaling, zettingen

Documentgegevens

Versie	0.2
Datum	07-04-2023
Projectnummer	11209150-005
Document ID	11209150-005-GEO-0004
Pagina's	84
Classificatie	
Status	concept Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Auteur(s)

██████████ 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
0.2	██████████ ██████████	██████████	██████████ ██████████
	██████████ ██████████	██████████ ██████████	5.1.2.e

Managementsamenvatting

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 Margrietunnel. Moot 26 bleek opgedreven. Dit proces is het door plaatsen van ballast gestabiliseerd waarna op overige delen van de toeritten ook veiligheidsverhogende ballast is aangebracht.

Besloten is om voor het gehele tunneltracé de oude trekpalen te vervangen door nieuwe. Het tunneltracé bestaat uit moten van elk 18 meter in lengterichting van de weg. De moten zijn genummerd, beginnend aan Jourezijde met moot 1 en eindigend aan Sneekzijde met moot 48. De moten 22 aan de Jourezijde van het kanaal en 23 aan de Sneekzijde van het kanaal bevatten waterkelders. Deze moten liggen het diepst, met onderzijden op NAP -16.38 m aan Jourezijde en NAP -15.05 m aan Sneekzijde. De naastliggende moten 21 en 24 liggen met onderzijden op NAP -13.89 m en NAP -11.96 m enkele meters minder diep. Naarmate de afstand tot het kanaal toeneemt neemt de diepte van de moten verder af. De trekpalen die vervangen moeten worden bevinden zich onder moten 7 tot en met 22 aan Jourezijde en 23 tot en met 36 aan Sneekzijde.

Qua uitvoering zijn er twee methoden mogelijk voor het aanbrengen van de nieuwe funderingselementen: zonder waterdruk door middel van bemaling en tegen de waterdruk in met sluisystemen. Beide methoden hebben hun plussen en minnen die uiteindelijk tegen elkaar afgewogen zullen worden om tot een keuze te komen. Dit document beschrijft de methode waarbij door middel van bemaling de waterdruk onder de moten wordt weggenomen zodat de nieuwe funderingselementen veilig kunnen worden aangebracht.

Scenario's

Voor deze methode zijn 5 scenario's beschouwd:

- | | |
|--|--------------------|
| 1. 1 toerit per keer, 1 moot doorschuiven, 3 keer doorlopen. | Duur: 27 maanden |
| 2. 1 toerit per keer, 4 moten doorschuiven, 1 keer doorlopen. | Duur: 30 maanden |
| 3. 2 toeritten gelijktijdig, 1 moot doorschuiven, 3 keer doorlopen. | Duur: 15 maanden |
| 4. 2 toeritten gelijktijdig, 4 moten doorschuiven, 1 keer doorlopen. | Duur: 16,5 maanden |
| 5. Alles gelijktijdig en alle moten gelijktijdig bemalen | Duur: 8,5 maanden |

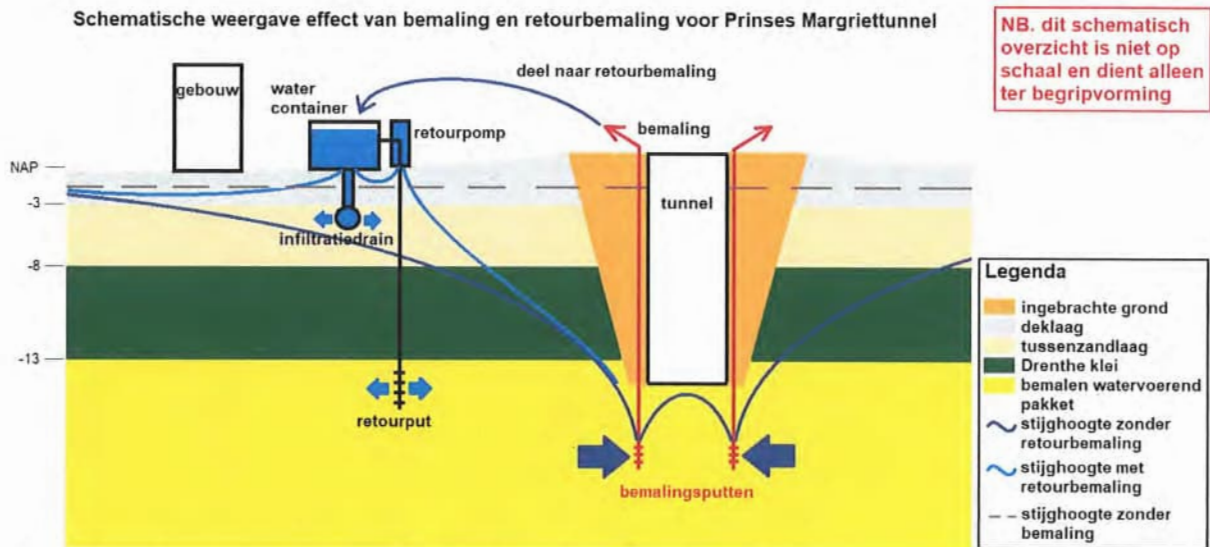
Op basis van de veel langer ingeschatte doorlooptijd zijn scenario's 1 en 2 op voorhand afgefallen. Scenario's 3, 4 en 5 zijn nader uitgewerkt. De precieze invulling van deze scenario's is te vinden in dit document.

Bemaling en retourbemaling

Essentieel bij een bemalingsscenario is dat er veel en op meerdere momenten in de tijd tot grote diepte moet worden bemalen. Dat resulteert in grote verlagingen van de grondwaterstijghoogten in het te bemalen watervoerend pakket. Dit leidt tot een verlagend effect op de stijghoogten in de ondiepere lagen en de grondwaterstand in de deklaag net onder maaiveld. De deklaag bestaat voornamelijk uit veen en klei en is daardoor gevoelig voor zettingen. Ten tijde van de aanleg van de tunnel in de zeventiger jaren van vorige eeuw is ook langdurig en veel bemalen. Dat heeft destijds geleid tot zettingsschade. Ondanks dat er nu ruimschoots minder bemaling noodzakelijk is, met een kortere tijdsduur en het grootste deel van de zettingen al in de zeventiger jaren zijn opgetreden, is het niet uit te sluiten dat er door deze herbelasting, veroorzaakt door de nieuwe bemaling, weer zettingen op gaan treden. Deze zettingen zullen een stuk minder groot zijn dan destijds, maar kunnen nog steeds relevant zijn en mogelijk tot schade leiden aan zettingsgevoelige objecten.

Alle doorgerekende scenario's zijn daarom reeds voorzien van beheersmaatregelen die de verlagingen van grondwaterstand en stijghoogten bij zettingsgevoelige objecten beperken in de vorm van retourbemaling. Het toepassen van een retourbemalingssysteem kan op twee

niveaus: in het ondiepe zandpakket direct onder de zettingsgevoelige deklaag, in het project en de rapportage aangeduid met de tussenzandlaag, en in het diepere watervoerend pakket waarin de bemaling plaatsvindt (zie Figuur 1). De vrij dunne tussenzandlaag heeft een relatief gering doorlaatvermogen, waardoor we voor infiltratie van water in de tussenzandlaag ervan zijn uitgegaan dat dit via infiltratiedrains zal gebeuren. Mogelijk dat, vanwege beperkte ruimte en aanwezigheid van kabel en leidingen, praktisch uitwijst dat infiltratie beter via infiltratieputten kan gebeuren. Voor de berekeningsresultaten maakt dat weinig verschil. Het bemalen watervoerend pakket is een stuk dikker en ligt te diep voor infiltratiedrains. Infiltratie in dit pakket zal daarom met retourputten worden bewerkstelligd. Figuur 1 geeft door middel van een schematisch overzicht de principewerking weer van bemaling en retourbemaling. Daarin is ook een globale diepteaanduiding van de verschillende lagen aangegeven.



Figuur 1 Schematische weergave van bemaling en retourbemaling.

De bemaling trekt de oorspronkelijke grondwaterstand (onderbroken paarse lijn) omlaag naar het voor de werkzaamheden vereiste niveau (donkerblauwe lijn). Daardoor gaat de grondwaterstand in de omgeving ook omlaag. Om dat te compenseren wordt retourbemaling toegepast, via ondiepe drains en of diepe putten, die de grondwaterstand lokaal weer omhoog doet gaan (lichtblauwe lijn). Dan resteert op sommige plekken nog een kleine verlaging en vlakbij de retourbemalingen een verhoging van de grondwaterstand. Recente grondwateranalyses, die voor dit onderzoek zijn verricht, hebben uitgewezen dat het grondwater ter plekke van de tunnel hoge concentraties ijzer bevat (tot 80000 µg/l) en ook methaan (tot 3500 µg/l). Daarom moet het bemalen water worden behandeld voordat het via retourbemaling terug de grond in kan worden gebracht. Dit is nodig om te voorkomen dat de retourbemaling dichtslaat. Ook het bemalen water dat geloosd wordt op het oppervlaktewater, zal conform de voorschriften deze behandeling moeten krijgen.

Bij het inrichten van de retourbemaling is rekening gehouden met zichtbare infrastructuur (wegen, sloten, e.d.) en met perceelgrenzen. Zo zijn de infiltratiedrains in het model zoveel mogelijk in groenstroken, randen van weilanden en langs wegen gelegd en zijn ze niet aangebracht op percelen van omwonenden. Met name voor het bedrijventerrein aan de Sneekzijde van het kanaal direct ten westen van de tunnel, waarop ook enkele woningen staan, is er in eerste instantie van uitgegaan dat er op dat terrein geen infiltratievoorzieningen kunnen worden aangelegd. Rondom dit terrein is voor de berekening een infiltratiedrain aangelegd, maar aan de zuidelijke rand, langs het kanaal, ligt daarom in de berekening geen infiltratievoorziening. Die is aangelegd aan de andere zijde van het kanaal, waar wel ruimte beschikbaar is. Overige kabels en leidingen die in de ondergrond aanwezig zijn kunnen het retourontwerp beïnvloeden bij de uitvoering. Enigszins schuiven (ordegrootte meters) met de retourputten en/of drains zal van verwaarloosbare invloed zijn op de omgevingseffecten.

De retourbemaling is in het model ingebracht via lijnelementen (modelrivieren) met een vaste drukhoogte (waterpeil). Als in praktijk blijkt dat infiltratieputten hier beter inpasbaar zijn, bv. door aanwezigheid van kabels en leidingen in de ondergrond, kunnen op de plek van de drains putten worden aangelegd. Dit zal tot vergelijkbare resultaten leiden als met drains.

Bij de aanleg van de uiteindelijke retourbemaling zullen de werkzaamheden leiden tot lokaal tijdelijk enige overlast in de vorm van verkeershinder door graafwerkzaamheden en obstakels als pomphuizen, containers, e.d. tijdens de periode van retourbemaling. De werkzaamheden vereisen daarom goede afstemming met de gebruikers van de directe omgeving van de plekken waar de retourbemaling geplaatst gaat worden.

Figuur 2 geeft een overzicht van de locaties van de retourbemaling, zoals die in het model zijn gebruikt. De onderbroken donkerblauwe lijnen geven de locaties van de infiltratiedrains weer. Het rood omringde gebied in het rechterplaatje van deze figuur toont de locatie van de infiltratieputten.



Figuur 2 Locatie meetpunten en ligging van de retourbemaling.

Effecten

In scenario's 3 en 4 wordt voor gedurende alle bemalingsfasen bij de bemalen moten de vereiste grondwaterverlaging gehaald. De daarvoor benodigde totale bemaling is voor beide scenario's ongeveer gelijk: 13,4 miljoen m³. Daarbij moet worden aangetekend dat bij scenario 3, dat bestaat uit 84 verschillende bemalingsfasen, waarschijnlijk wat meer overbemaling plaatsvindt dan bij scenario 4, dat bestaat uit 8 bemalingsfasen. Bij scenario 3 wordt ongeveer een zesde deel van het bemalen water via retourbemaling terug de grond in gebracht. Bij scenario 4 is dat ongeveer een vijfde deel.

In scenario 5, dat uit 2 bemalingsfasen bestaat, wordt is de totaal benodigde bemaling 11,2 miljoen m³. Hiervan wordt bijna een vijfde deel via retourbemaling weer terug de grond in gebracht.

Verder optimalisatie bemaling

Het lijkt kansrijk om de bemaling verder te optimaliseren, zodat de totale benodigde bemaling onder de MER grens van 10 miljoen m³ kan blijven. Bijvoorbeeld als de diepere moten (inclusief de pompkelders) binnen een half jaar hersteld kunnen worden, kan de bemaling gedurende de tijd nodig voor herstel van de minder diepe moten aanzienlijk verlaagd worden. Daardoor zal de totale bemaling minder dan 10 miljoen m³ bedragen. Het is aan RWS in overleg met de aannemer van de herstelwerkzaamheden ter beoordeling in hoeverre dit een reële mogelijkheid is.

De aangegeven retourbemaling kan bij scenario's 3 en 4 de verlagingen van de grondwaterstand bij bijna alle in de omgeving aanwezige gebouwen dusdanig beperken dat het gevaar op zelfs esthetische schade door zettingen verwaarloosbaar klein is. Alleen voor de gebouwen op de noordkant van het bedrijventerrein kan dat niet tijdens alle bemalingsfasen gerealiseerd worden. De grootste effecten van bemaling treden op als de beide moten met waterkelders worden bemalen. De afstand van de gebouwen, die daar het dichtstbij staan, tot de bemalingsbronnen is maar iets meer dan 50 m.

Bij scenario 5 zijn de resterende verlagingen nog wat groter en is ook het deel van het bedrijventerrein waar die verlagingen optreden groter.

Het blijkt dat de retourbemaling zoals die in het model is ingericht niet kan voorkomen dat er gedurende meerdere maanden grondwaterverlagingen zullen optreden die ter plekke van de bebouwing groter zijn dan op voorhand toelaatbaar worden geacht. Daardoor is zettingsschade op voorhand niet geheel uit te sluiten. Dit kan wel voorkomen worden als er retourbemaling op het bedrijventerrein kan worden toegepast.

Andere mogelijke mitigerende maatregelen, die de effecten in het algemeen en meer specifiek op het bedrijventerrein helpen beperken, kunnen zijn:

- Het tijdelijk opzetten van peilen van polderwatergangen in de directe omgeving. Omdat die watergangen niet dichterbij het bedrijventerrein ligt dan de retourdrain, is de verwachting dat het effect hiervan onvoldoende is om de bovenbeschreven verlagingen te voorkomen.
- Het baggeren van de bodem en wanden van het Prinses Margrietkanaal ter plekke van het bedrijventerrein, waardoor de weerstand tussen kanaal en tussenzandlaag sterk verlaagd wordt. De verwachting is dat het uitvoeren van deze werkzaamheden net voor en/of tijdens de zwaarste bemalingsfasen voldoende effect sorteren om samen met de beoogde retourbemaling de bovenbeschreven verlagingen te voorkomen. Door het grote peilverschil tussen kanaalwater en grondwater in de tussenzandlaag zal de bodem van het kanaal na baggeren weer vrij snel dichtslibben. Enerzijds betekent dit dat het baggeren afgestemd moet worden met de bemaling. Anderzijds dat na afloop van de bemaling de oude situatie zich door dit snelle dichtslibben weer relatief snel zal herstellen. Er zijn vele praktijkgevallen bekend die snel dichtslibben van sterk infiltrerende watergangen onderbouwen. Dat betekent dat baggeren tijdens de diepe bemalingsfasen waarschijnlijk een aantal herhalingen behoeft.
- Aanleg van infiltratieputten en/of infiltratiedrains op het bedrijventerrein. Dit vereist afstemming met bewoners en gebruikers van het bedrijventerrein.

Als er geen additionele maatregelen getroffen kunnen worden, moet worden onderzocht in hoeverre de panden op deze ene locatie (het bedrijventerrein) gevoelig zijn voor zettingsschade en of monitoring van grondwater en van zettingen op deze locatie vereist is. Bij de aanwezige bebouwing in de rest van het gebied, het overgrote deel, is met retourbemaling relevante daling van het grondwater wel goed te voorkomen.

Conclusies en aanbevelingen

Conclusies bemalingen

1. Er zijn drie bemalingsscenario's doorgerekend. Een bemalingsscenario (3) waarbij de bemaling steeds 1 moot wordt doorgeschoven en wat drie keer herhaald wordt, een bemalingsscenario (4) waarbij in een keer steeds 4 moten worden doorgeschoven en een bemalingsscenario (5) waarbij alle moten gelijktijdig bemalen worden totdat de herstelwerkzaamheden klaar zijn. De doorlooptijd van bemalingsscenario 3 is ingeschat op 1 jaar en 3 maanden, die van bemalingsscenario 4 op 1,5 maand langer. Beide scenario's resulteren in een totale bemaling van ongeveer 13,4 miljoen m³. Dat is ongeveer de helft van de hoeveelheid bemaling ten tijde van de aanleg van de tunnel. De doorlooptijd van scenario 5 is ingeschat op 8,5 maand en een totale bemaling van ongeveer 11,2 miljoen m³.

2. Middels retourbemaling zal ongeveer een zesde tot een vijfde van deze hoeveelheid bemalen water terug de grond in worden gebracht om ontoelaatbare grondwaterverlagingen te kunnen mitigeren. De rest van het bemalen water wordt geloosd op het oppervlaktewater. Retourbemaling zal voornamelijk via infiltratiedrains en/of infiltratieputten direct onder de deklaag geschieden. Alleen tijdens bemaling van de diepste moten aan Sneekzijde is extra retourbemaling via putten in het bemalen watervoerend pakket nodig. Voor scenario 5 is dat gedurende de gehele uitvoering.
3. Retourbemaling zal in scenario 5 gepaard gaan met grotere debieten dan in scenario's 3 en 4. De totale hoeveelheid retourbemaling zal door de veel kortere doorlooptijd wel lager zijn.
4. De samenstelling van het grondwater vereist behandeling van het water voordat het geschikt is om de retourbemaling in te gaan. Met name het hoge ijzergehalte en waarschijnlijk in het water aanwezig methaan kunnen anders leiden tot snelle verstopping van de filters van de retourbemalingen. Ook voor lozing van de rest van het bemalen water op oppervlaktewater is uit oogpunt van waterkwaliteit behandeling van het bemalen water nodig.
5. Retourbemaling op openbaar terrein kan verlagingen van grondwaterstand in de deklaag en stijghoogte in de tussenzandlaag bijna overal voldoende mitigeren om de kans op schade door zettingen bij in het gebied aanwezige bebouwing voldoende klein te houden. Alleen bij de gebouwen op het noordoostelijke deel van het bedrijventerrein kan dat niet tijdens alle bemalingsfasen gerealiseerd worden, waardoor de kans op schade door zettingen niet op voorhand uitgesloten kan worden. In scenario 5 is die kans groter dan in scenario's 3 en 4.
6. Aanvullende mitigerende maatregelen zijn nodig om in die gebieden tijdens bemaling van de diepe moten aan Sneekzijde de grondwaterverlagingen verder te beperken. Daarbij kan gedacht worden aan aanleg van retourbemaling op het bedrijventerrein, indien toegestaan, of baggeren van de wand en bodem van het kanaal tijdens de bemalingen van de diepere moten aan Sneekzijde.
7. In ieder geval is uitbreiding van de monitoring van grondwaterverlaging en zetting nodig ter plaatse van het meest noordoostelijke gebouw op het bedrijventerrein, zodat kan worden aangetoond hoeveel de grondwaterverlaging is en hoeveel zetting er daarbij optreedt.

Aanbevelingen bemalingen

1. Het gebruikte grondwatermodel is qua geohydrologische bodemopbouw over het gehele model uniform van opzet, gebaseerd op de gemiddelde laagopbouw in de omgeving van de tunnel. Alleen direct rondom de tunnel en het kanaal is daarvan afgeweken. Dit is een bewuste keuze geweest in overleg met RWS, veroorzaakt door de enorme tijdsdruk om snel met resultaten te komen. Het gebruikte model is vergeleken met de opgetreden verlagingen door de bemaling tijdens de aanleg van de tunnel en het model lijkt de verlagingen door de bemaling enigszins te overschatten. Inmiddels is de geologie in de regio rondom de tunnel gedetailleerd onderzocht en in kaart gebracht. Daarnaast zijn er monitoringspunten ingericht, die sinds eind januari 2023 data leveren. Het verdient aanbeveling de variabiliteit in de geologische laagopbouw in het model op te nemen en het model te kalibreren op gemeten stijghoogten en grondwaterstanden. Daarmee kan het grondwatermodel beter geschikt worden gemaakt om op detailniveau de effecten en de bemaling en retourbemaling te kwantificeren.
2. Het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket onder de Drenthe klei is gebaseerd op een pompproef van bijna 50 jaar geleden, voor de aanleg van de tunnel. Door de tunnel is de lokale situatie sterk veranderd. Het verdient daarom aanbeveling om, voordat met bemaling begonnen wordt, een nieuwe pompproef uit te voeren in een van de geplande putten bij de diepste moten. Monitoringspunten daarvoor zijn inmiddels al voldoende aanwezig en als voor bemaling gekozen wordt kan de proefput gebruikt worden als een van de pompputten. Op basis van de resultaten van de pompproef kan het model worden aangepast, waardoor de effecten van de bemaling beter kunnen worden bepaald. Daarmee kan de overschatting van de effecten van het huidige grondwatermodel worden verkleind en kan de putconfiguratie voor de bemaling en

retourbemaling worden geoptimaliseerd. Daardoor kan de totale hoeveelheid bemaling mogelijk kleiner worden.

Zettingen omgeving

Op basis van de uitgevoerde analyse en zettingsberekeningen blijkt, dat bij toepassing van de retourbemaling conform scenario 3 en/of 4 er ter plaatse van de geanalyseerde onderzoekpunten E17 t/m E25 geen schade wordt verwacht. Deze punten zijn representatief voor alle gebouwen in de omgeving, behalve de bebouwing aan de noordkant van het bedrijventerrein.

Voor de bebouwing aan de noordkant van het bedrijventerrein is voor scenario 3 en 4 geen zetting berekend, maar gebleken is dat de hier berekende grondwaterstandsverlagingen dusdanig groot zijn, dat zettingsschade hier niet uit te sluiten is. Of de schade optreedt hangt onder meer af van de funderingswijze van deze gebouwen.

Op basis van bemalingsscenario 5 zijn opnieuw de zettingen in de omgeving geanalyseerd en zijn er apart voor het bedrijventerrein, ten zuidwesten van de tunnel (langs het Prinses Margrietkanaal) zettingsberekeningen uitgevoerd. Uit de analyse en aanvullende zettingsberekeningen blijkt dat de zettingen ter plaatse van het bedrijventerrein, bij de dichtst bij de tunnelgelegen bebouwing beperkt blijven tot maximaal circa 4,5 cm tijdens de bemaling (scenario 5, maximaal ca. 260 dagen). Daarbij zijn de verschilzettingen over 5 m, als gevolg van verloop/verschil van de grondwaterstand en stijghoogten door de bemaling, niet groter dan 1 of 2 mm. Extra zettingsverschillen kunnen nog wel ontstaan door verschil in funderingswijze of verloop van de grondlagen. Dit zou mogelijk, voor de bebouwing die het dichtstbij de tunnel staat, tot esthetische schade kunnen leiden indien de fundering op staal is gefundeerd (lichte schade eenvoudig repareerbaar, zettingshelling ca. 1:400).

De berekende zettingen ter plaatse van het bedrijventerrein geven tevens een onderbouwing voor de zettingen en kans op schade in de omgeving, welke bij bemalingsscenario 5 geringer zijn dan in eerder beschouwde scenario's.

Met mitigerende maatregelen zoals een retourbemaling op het bedrijventerrein, het opzetten van peilen in polderwatergangen of het baggeren van de bodem en wanden van het Prinses Margrietkanaal kan de kans op zettingsschade worden verkleind.

Zettingen tunnelmoten

Door de bemaling zullen ook zettingen ontstaan onder tunnelmoten. Deze zijn bemalingsscenario 5 berekend voor een aantal representatieve tunnelmoten, die zowel op staal, drukpalen als op trekpalen zijn gefundeerd.

Voor de tunnelmoten op staal kunnen de zettingen aanleiding zijn tot het optreden van deformaties. Voor de tunnelmoten op druk- of trekpalen zal dit niet aan de orde zijn, maar kan er wel, bijvoorbeeld door negatieve kleeft, enige invloed zijn op de funderingsconstructie. De berekeningen zijn uitgevoerd voor de moten 3, 5, 12, 26, 36(38) en 45.

Uit de berekeningen blijkt, dat de optredende zettingen onder de tunnelmoten tijdens het bemalen (scenario 5), beperkt blijven en in de orde liggen van 2 tot 4 cm. De grootste zetting is berekend bij moot 12 (op trekpalen) en bedraagt 4,2 cm. Ter plaatse van de moten die op staal gefundeerd zijn (3 en 45) is een zetting berekend van respectievelijk 2,6 en 1,6 cm.

Opgemerkt wordt dat de naast de tunnelmoten de berekende zetting groter is dan onder de moten zelf. Dit betreft met name ook de aanvullingen langs de tunnelwanden van de in het verleden ontgraven (open)bouwkuip.

Inhoud

	Managementsamenvatting	4
1	Inleiding	12
1.1	Situatie	12
1.2	Aanpak	12
2	Grondwatermodel beschrijving	14
2.1	Gebruikte modelpakket en rekennetwerk	14
2.2	Modelschematisatie	14
2.3	Parameterwaarden	15
3	Model validatie	17
4	Scenario beschrijving	19
4.1	Uitgangspunten	19
4.2	Randvoorwaarden	19
4.3	Retourbemaling	20
4.4	Scenario's	22
4.4.1	Scenario 1	22
4.4.2	Scenario 2	23
4.4.3	Scenario 3	23
4.4.4	Scenario 4	24
4.4.5	Scenario 5	24
4.4.6	Scenariokeuze	24
4.5	Zettingsanalyse	24
5	Rekenresultaten	25
5.1	Scenario 3: 2 zijden gelijktijdig, 1 moot doorschuiven, 3 keer doorlopen	25
5.1.1	Bemaling	25
5.1.2	Verlaging stijghoogte bij moten	29
5.1.3	Verandering grondwaterstand en stijghoogte in tussenzandlaag bij gebouwen	31
5.2	Scenario 4: 2 zijden gelijktijdig, 4 moten doorschuiven, 1 keer doorlopen	32
5.2.1	Bemaling	32
5.2.2	Verlaging stijghoogte bij moten	33
5.2.3	Verandering grondwaterstand en stijghoogte in tussenzandlaag bij gebouwen	34
5.3	Scenario 5: alle moten gelijktijdig bemalen	35
5.3.1	Bemaling	36
5.3.2	Verlaging stijghoogte bij moten	36
5.3.3	Verandering grondwaterstand en stijghoogte in tussenzandlaag bij gebouwen	38
5.4	Retourbemaling	39
5.5	Aanvullende mitigerende maatregelen	40
5.6	Conclusies en aanbevelingen bemaling	43
5.6.1	Conclusies bemaling	43
5.6.2	Aanbevelingen bemaling	43

6	Zettingsanalyse	45
6.1	Vraagstelling	45
6.2	Situatie	45
6.3	Aanpak	46
6.4	Uitgangpunten berekeningen	48
6.4.1	Grondonderzoek rekenmodel en parameters	48
6.4.1.1	Grondonderzoek	48
6.4.2	Bebouwing	49
6.4.3	Rekenmodel en modelschematisaties	50
6.4.4	Gebruikte parameters	54
6.5	Bemalingsgegevens en grondwaterstand	56
6.5.1	Grondwaterstanden	56
6.5.2	Tunnelbemaling scenario 3	56
6.5.3	Tunnelbemaling scenario 4	59
6.5.4	Bemalingsscenario 5	61
6.6	Mogelijke schade door zettingen	63
6.6.1	Resultaat voorgaande berekeningen	63
7	Berekeningsresultaten Zettingen	64
7.1	Bemalingsscenario 3 en 4	64
7.1.1	Resultaten analyse optredende zettingen E17 tot en met E24	64
7.1.2	Resultaten zettingsberekeningen E25	64
7.1.3	Zettingen gebouwenterrein (bedrijventerrein)	64
7.2	Bemalingsscenario 5	65
7.2.1	Resultaten zettingen tunnelmoten	65
7.2.2	Resultaten zettingen omgeving (omgevingspunten E17 t/m E25)	67
7.2.3	Resultaten zettingen bedrijventerrein-zw	68
7.3	Conclusies	70
A	Bemalingsduur scenario's	71
B	Zettingsberekening bemaling (1^e)	75
B.1	Bemaling put (moot 26) tot NAP -10,3 m	75
B.1.1	Bemaling moot 26 (lokaal) tot NAP -10,3 m	75
B.1.2	Bemaling tunnelbak tot NAP -3 m	77
B.2	Bepaling zettingssituaties	78
B.2.1	Zettingen ten gevolge van (put)bemaling, moot 26 tot NAP -10,3 m	79
B.2.2	Zettingen ten gevolge van bemaling tunnelbak tot NAP -3,0 m	79
B.3	Berekeningsresultaten Zettingen	79
B.4	Resultaten zettingsberekeningen	79
B.5	Zettingsverloop in de tijd	80
B.6	Mogelijk optreden van schade aan bebouwing	80
B.6.1	Zettingsschade op staal gefundeerde bebouwing:	80
B.6.2	Analyse met mogelijke schade als gevolg van de berekende zettingen.	81
C	Grondonderzoek	82

1 Inleiding

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 Margrietunnel. Moot 26 bleek opgedreven, dit proces is het door plaatsen van ballast gestabiliseerd en waarna de overige delen van de toeritten ook veiligheidsverhogende ballast is aangebracht.

Rijkswaterstaat heeft Deltares gevraagd een bemalingsadvies uit te brengen voor 4 bemalingsscenario's. Uiteindelijk zijn 2 van de 4 bemalingsscenario's berekend. In het voorliggende advies wordt ingegaan op de verwachte geohydrologische effecten voor de 2 bemalingsscenario's. Aansluitend hierop wordt ingegaan op het effect op de omgeving qua zettingen.



Figuur 1-1 Prinses Margrietunnel.

1.1 Situatie

De onderzijde van diepste delen van de toe-ritten en de zinktunnel bevinden zich in het Pleistocene zand, hier direct boven bevindt zich over het geheel gezien een slecht doorlatende laag met die in dit advies zal worden aangeduid met "Drenthe klei". Hierboven bevindt zich een zandlaag met daarboven tot aan het maaiveld is over het geheel gezien slecht-doorlatende Holocene deklaag aanwezig. Direct naast de toe-ritten en zinktunnel is Antropogene grond aanwezig dit betreft de grondaanvulling van de bouwputten en zinksleuf.

1.2 Aanpak

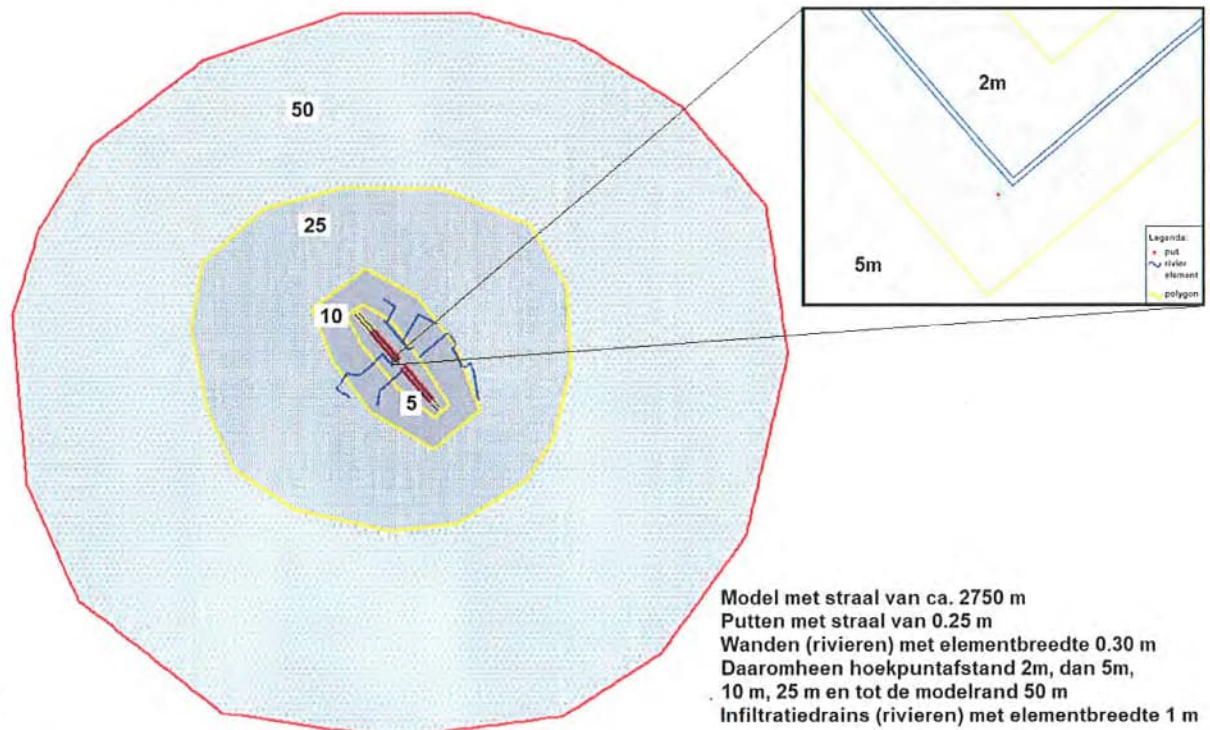
Op basis van geohydrologische parameters, afgeleid uit nationale ondergrondmodellen en grondwatermodellen (REGIS, GEOTOP en LHM) is een zeer gedetailleerd lokaal grondwatermodel opgesteld. Ter plekke van de tunnel is het model sterk verfijnd en is de geohydrologische situatie rondom de tunnel zeer gedetailleerd in het model aangebracht. Het model is vervolgens gevalideerd op de gemeten verlagingen bij de aanleg van de tunnel, toen er circa anderhalf jaar lang een bemaling van ongeveer 2400 m³/uur heeft gewerkt. In een beperkt aantal stappen zijn de modelparameters daarbij zodanig aangepast dat de destijds gemeten verlagingen bij benadering met het model nagebootst kunnen worden. Kanttekening daarbij is dat de huidige situatie anders is dan 50 jaar geleden. Daarom is ervoor gezorgd dat de modelresultaten de destijds gemeten verlagingen in ieder geval niet

onderschatten. Met dit model zijn de 3 scenarioberekeningen uitgevoerd. Op basis daarvan zijn analyses uitgevoerd naar mogelijk optredende zettingen ten gevolge van deze bemalingsscenario's. De resultaten van deze analyses worden in de document gepresenteerd.

2 Grondwatermodel beschrijving

2.1 Gebruikte modelpakket en rekennetwerk

De berekeningen zijn uitgevoerd met het software pakket Triwaco, dat werkt met eindige elementen. Het pakket rekent met driehoekige elementen, waarbij de eigenschappen van een element worden bepaald door de parameterwaarden op de drie hoekpunten van een element. De rekenresultaten worden aan de drie hoekpunten van de elementen toegekend. Figuur 2-1 geeft een overzicht van het rekennetwerk.



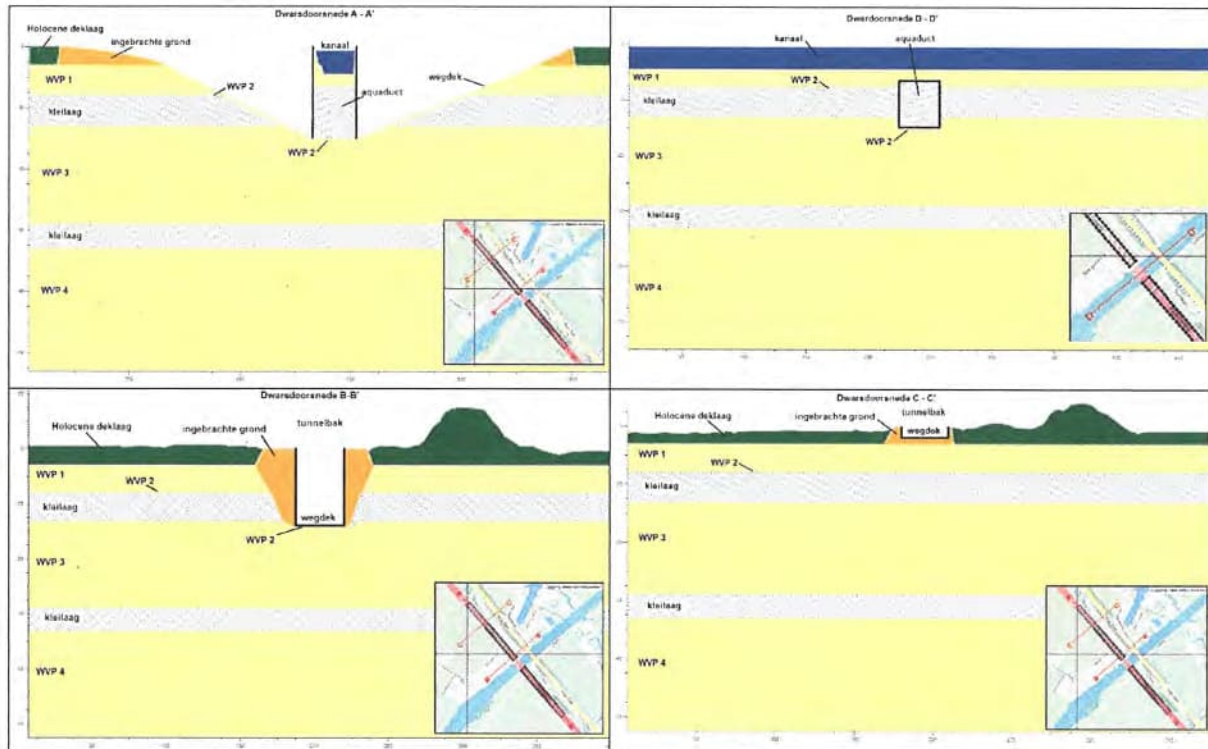
Figuur 2-1 Gebruikte rekennetwerk.

De grootste dichtheid van het rekennetwerk ligt rondom de Prinses Margrietunnel. De tunnelwanden zijn geschematiseerd door elementenrijen met een breedte van 0.3 m en een lengte van 1 m. Op 1 m afstand van de tunnelwanden zijn putten gelegd. De putten liggen tussen de moten 6 tot en met 37, in lengterichting van de tunnel overal precies op de scheiding van 2 moten. Rondom elke put zijn 6 gelijkzijdige driehoeken gelegd met een afstand van 0.25 m tussen de hoekpunten. Daarmee wordt in het model een putdiameter van 0.25 m gecreëerd. Voor retourbemaling zijn 6 infiltratiedrains in het model aangebracht met een elementbreedte van 1 m. Rondom de tunnelwanden en putten is een afstand tussen de hoekpunten van 2 m aangehouden. Rondom de gehele verdiepte ligging is die afstand 5 m. Daarbuiten wordt die afstand stapsgewijs vergroot naar 50 m aan de buitenrand van het model. De rand van het model ligt op circa 2750 m afstand van de Prinses Margrietunnel. Die afstand is bepaald door 3 keer de spreidingslengte van het pakket onder de Drenthe klei (globaal tussen NAP -13 en -29 m) te nemen: $3\lambda = 3\sqrt{(kD.c)}$. Daarbij is uitgegaan van een kD van $410 \text{ m}^2/\text{d}$ en een c van 1400 d , wat resulteert in een invloedsgebied (3λ) van 2273 m rondom de bemaling.

2.2 Modelschematisatie

Het model is geschematiseerd door 3 watervoerende pakketten met aan de bovenzijde een topsysteem en tussen de pakketten 2 slecht-doorlatende lagen. Het topsysteem bevat de gehandhaafde polderpeilen en de weerstand van de Holocene deklaag. Onder de verdiepte

ligging is een zandlaag van 0.5 m dikte aangebracht. Die laag doorsnijdt de bovenste scheidende laag. Omdat op een goede manier te kunnen modelleren is het watervoerend pakket boven deze scheidende laag verdeeld in 2 watervoerende pakketten, waarvan de onderste een dikte van 0.5 m heeft. Tussen beide watervoerende pakketten is een fictieve scheidende laag aangebracht van 0.01 m dikte. Daarmee krijgt het gebruikte model dus 4 watervoerende pakketten en 3 scheidende lagen. Figuur 2-2 geeft een overzicht van de gehanteerde schematisatie rondom de Prinses Margriettunnel.



Figuur 2-2 Dwarsdoorsneden model rond tunnel met: linksboven A – A' in lengterichting van de tunnel; rechtsboven D – D' in lengterichting van het kanaal; linksonder B – B' loodrecht op de tunnel vlakbij het kanaal; rechtsonder loodrecht op de tunnel vlakbij het kanaal waar de onderzijde van de grondaanvulling horizontaal begint te liggen.

Voor de berekeningen zijn in het model putten aangebracht aan weerszijden van de toeritten op de randen van de 18 m lange moten. Dat is gedaan tussen de moten 6 t/m 22 aan de zuidoostzijde van het kanaal en tussen de moten 23 t/m 37 aan de noordwestzijde van het kanaal. De putten staan circa 1 m uit de rand van de weg.

2.3 Parameterwaarden

De berekeningen van dit advies zijn oriënterend met als doel de verwachte grootte van het effect van grondwateronttrekking bij de tunnel op de omgeving te kunnen inschatten. Vanwege de beperkte beschikbare tijd (de tunnel moet zo snel mogelijk weer gedeeltelijk beschikbaar komen voor verkeer) is hierbij gewerkt met uniforme laagdiktes en conductiviteiten (ook wel aangeduid als doorlatendheden). Deze vereenvoudigde aanpak is voldoende voor het doel van dit advies. De laagdiktes zijn afgeleid van de laagdiktes rondom de Prinses Margriettunnel. De bijbehorende parameterwaarden zijn afgeleid uit de nationale ondergrondmodellen REGIS en GEOTOP. Alleen rondom de Prinses Margriettunnel is een gedetailleerdere schematisatie gehanteerd, zie Figuur 2-2. Voor het bij de aanleg bempotte watervoerend pakket (in het model geschematiseerd als watervoerend pakket 3) is het doorlaatvermogen aangehouden dat destijds door een pompproef bepaald is: 410 m²/d.

Voor het maaiveld is het meest recente Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN4) gebruikt en voor het topsysteem zijn beschikbare polderpeilen (uit circa 2015) gebruikt (indien verschillend, het gemiddelde van zomer- en winterpeil). De waterpartijen van de

Friese boezem zijn als zodanig in model gebracht. De tweede kolom uit Tabel 2-1 geeft een overzicht van de parameterwaarden, zoals die bij de bouw van het model zijn aangenomen. Het model is daarna gevalideerd en aangepast om de situatie van de bemaling ten tijde van de tunnelaanleg na te kunnen bootsen. De rechterkolom uit de tabel geeft de aangepaste parameterwaarden aan. De in deze kolom ontbrekende parameters zijn niet aangepast.

Op de modelranden zijn voor alle watervoerende pakketten vaste stijghoogten aangenomen. De waarden daarvan zijn afkomstig uit het nationale grondwatermodel LHM 4.2.

Tabel 2-1 Parameterwaarden voor en na modelvalidatie.

Model parameter	Waarde voor modelvalidatie	Waarde na modelvalidatie
Maaiveldhoogte	Op basis van AHN4	
Onderkant deklaag	NAP -3.0 m	
Weerstand deklaag	100 d per meter dikte	50 d/m dikte onder NAP -1.5 m
Bodemweerstand kanaal	50 d	30 d
Bodemweerstand waterplassen	150 d	50 d
Bodemweerstand tunnel	10 ²⁰ d (oneindig)	
Conductiviteit WVP 1	5 m/d	
Conductiviteit ingebrachte grond	2 m/d	
Weerstand tussen WVP 1 en WVP 2	1 d (schematisch)	
Dikte WVP 2	0.5 m (schematisch)	
Conductiviteit WVP 2	5 m/d	
Bovenkant ondiepe kleilaag	NAP -8.0 m	
Onderkant ondiepe kleilaag	NAP -13.0 m	
Onderkant aquaduct	NAP -15.0 m	
Weerstand ondiepe kleilaag	200 dagen per meter dikte	50 d/m dikte
Transmissiviteit WVP 3	410 m ² /d (pompproef voor aanleg)	
Bovenkant diepe kleilaag	NAP -29.0 m	
Onderkant diepe kleilaag	NAP -33.0 m	
Weerstand diepe kleilaag	100 d	25 d
Transmissiviteit WVP 4	3000 m ² /d	4000 m ² /d

3 Model validatie

Het model is niet gekalibreerd op een bestaande situatie, maar wel gevalideerd. Modelvalidatie is gedaan op de gemeten verlagingen bij de aanleg van de tunnel, toen er circa anderhalf jaar lang een bemaling van ongeveer 2400 m³/uur heeft gewerkt. Doel was om het grondwater bij de bouwput te verlagen tot circa NAP -17 m. Op basis van de toenmalige putconfiguratie en capaciteiten is deze bemaling gesimuleerd met de putten die voor de huidige berekeningen in het model zijn opgenomen, zie Figuur 3-1. Dat kwam neer op een onttrekking van 600 m³/uur met 8 putten ten noordwesten van het kanaal en 1600 m³/uur met 20 putten ten zuidoosten van het kanaal.

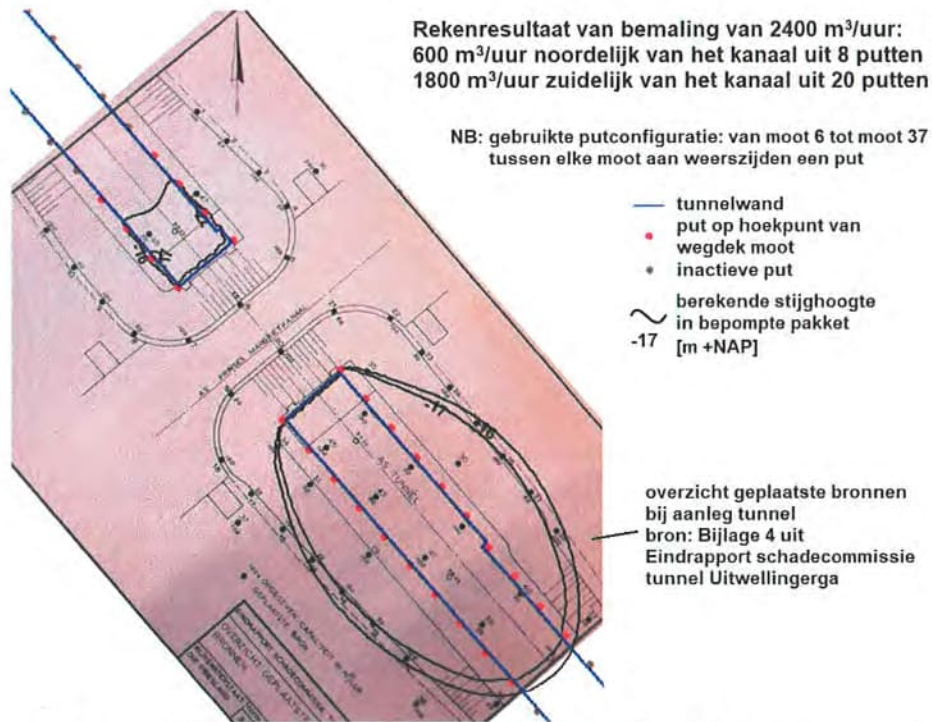
Voor de validatie van het model zijn de rekenresultaten hiervan vergeleken met de verlagingcontouren van 0.25 m, 0.5 m en 1 m van de stijghoogte in het pompde pakket en in het ondiepe pakket zoals die destijds door de schadecommissie tunnel Uitwellingerga op basis van metingen zijn gerapporteerd. Ook zijn de berekeningen ter plekke van de toenmalige meetpunten 37, 1 en I vergeleken met de meetreeksen van deze punten (voor locatie zie Figuur 3-2). Verder is gekeken naar de berekende verlaging bij de bouwput. Uit de validatie bleken de verschillen tussen model en de waarnemingen te groot en is overgegaan naar modelkalibratie.

Op basis van de waargenomen verschillen is een aantal parameterwaardes van het model gewijzigd (gekalibreerd) ten opzichte van de waarden zoals die gehanteerd worden in de nationale grondwatermodellen. Belangrijkste daarvan zijn:

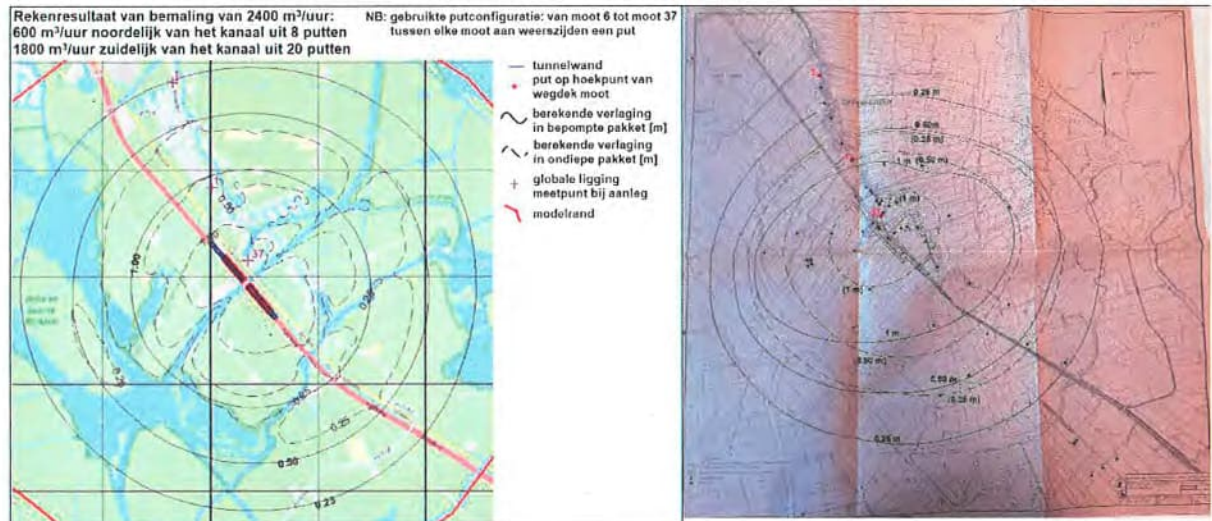
- De weerstand van de circa 5 m dikke ondiepe kleilaag is teruggebracht van 1000 naar 250 d.
- De weerstand van de circa 4 m dikke diepe kleilaag is teruggebracht van 100 naar 25 d.
- De weerstand van de deklaag is teruggebracht van circa 200 naar circa 75 d.
- De bodemweerstand van het kanaal is teruggebracht van 50 naar 30 d.
- De bodemweerstand van de grotere boezemwateren is teruggebracht van 150 naar 50 d.
- De transmissiviteit van het diepe watervoerend pakket (WVP 4) is verhoogd van 3000 naar 4000 m²/d.

Deze wijzigingen bleken nodig omdat de rekenresultaten in eerste instantie veel grotere verlagingen opleverden dan de metingen in de periode van aanleg vertoonden. De nieuwe waarden vallen in de range van fysische realistische waarden voor deze geohydrologische situatie.

Figuur 3-1 geeft de met het gekalibreerde model berekende stijghoogten in het pompde pakket rond de voormalige bouwputten. Deze liggen in de orde van NAP -16 / -17 m, de stijghoogte die bij aanleg in de bouwputten nagestreefd werd.



Figuur 3-1 Berekende stijghoogte rondom de bouwputten tijdens de aanleg.



Figuur 3-2 Verlaging bij een bemaling van 2400 m³/uur. Links: berekend met huidige model; Rechts: geïnterpreteerd op basis van metingen gedurende aanleg.

Figuur 3-2 geeft de berekende verlagingen in de omgeving (links in de figuur). Ter vergelijking staan in de rechterafbeelding de verlagingcontouren die door de schadecommissie tunnel Uitwellingerga zijn afgeleid uit gemeten waarden. De verlagingen zijn over het geheel ongeveer van dezelfde grootteorde, maar het huidige model berekent iets grotere verlagingen dan de destijds vastgestelde waarden. Uitgaande van de destijds vastgestelde waarden, overschat het model de verlagingen dus lichtelijk.

4 Scenario beschrijving

4.1 Uitgangspunten

Besproken op 9 februari 2023 zijn:

- 4 bemalingsscenario's doorrekenen met tijdsafhankelijk model.
- 2 bemalingsscenario's waarbij 4 opeenvolgende moten met trekankers tegelijk worden bemalen, de bemaling van 4 opeenvolgende moten elke keer moot voor moot opschuift, eerst het funderingsherstel in de middenberm wordt gedaan, dan de noordzijde van de weg en daarna de zuidzijde van de weg en dus alles 3 keer doorlopen wordt (zie de gekleurde tijdschema's in bijlage 1).
- 2 scenario's waarbij 4 moten tegelijk worden bemalen, de bemaling per 4 moten opschuift, de hele weg tegelijk wordt gedaan en dus alles 1 keer doorlopen wordt.
- 2 scenario's waarbij eerst aan de Sneek zijde van de tunnel wordt begonnen.
- 2 scenario's waarbij aan beide zijden van de tunnel gelijktijdig wordt begonnen.
- Hieruit zijn 2 combinaties gemaakt en doorgerekend (zie paragraaf 4.4).

Mede naar aanleiding van de resultaten van de doorgerekende scenario's is op 8 maart 2023 besloten om een 5^e scenario door te rekenen.

- Bij scenario 5 worden alle moten aan beide zijden van de tunnel gelijktijdig bemalen totdat de herstelwerkzaamheden aan die zijde van de tunnel klaar zijn. Uitgangspunt daarbij is dat er op meerdere plekken tegelijk gewerkt gaat worden, zodat de totale doorlooptijd aanzienlijk korter wordt.

4.2 Randvoorwaarden

De bemaling is in het grondwatermodel geschematiseerd in het watervoerend pakket onder de Drenthe klei. De putten staan aan weerszijde van de weg om de 18 meter in lengterichting van de weg, steeds ter plekke van de overgang van twee moten. De putten staan in het model op 1 meter afstand van de tunnelwand. Daarbij wordt er in het model van uitgegaan dat de putfilters over de gehele dikte van het pakket steken. Door de langs de tunnelwand ingebrachte grondlaag is er ter plekke van de putten contact met de bovenliggende tussenzandlaag. Met name bij de dieper gelegen moten zullen putfilters tot de onderkant van het watervoerend pakket (in het model geschematiseerd op NAP -29 m) nodig zijn, om de voorkomen dat de put droog getrokken wordt. Bij de ondiepere moten kunnen de putfilters in praktijk waarschijnlijk wat minder diep geplaatst worden, zolang daarbij maar rekening gehouden wordt met de afpompskegel in de put, die behoorlijk steil kan zijn.

Voor de scenario's is daarnaast onderstaande aangehouden:

- Bemaling nodig voor moten met trekankers, ofwel de moten 7 tot en met 36.
- Elk scenario begint met moot 24 tot en met 27 in afstemming met het uitvoeringsteam van VolkerWessels.
- Aan beide zijden van de tunnel worden de moten met de pompkelders (22 en 23) als laatste gedaan. Dan worden alleen de moten van de pompkelders bemalen.
- Doorlooptijden, gebaseerd op schema's in bijlage 1 en discussie met RWS en VolkerWessels, bij opschuiven per moot per fase (3x) is ingeschat op:

Zijde en fase	Doorlooptijden
Sneekzijde fase 1	12 weken
Sneekzijde fase 2	11 weken
Sneekzijde fase 3	11 weken

Jourezijde fase 1	15 weken
Jourezijde fase 2	16 weken
Jourezijde fase 3	16 weken

- Doorlooptijden, gebaseerd op schema's in bijlage 1 en discussie met RWS en VolkerWessels, bij opschuiven per 4 moten is ingeschat op:

Mootnummers	Doorlooptijden
24 tot en met 27	15 weken
28 tot en met 31	12 weken
32 tot en met 36	14 weken
18 tot en met 21	20 weken
14 tot en met 17	15 weken
10 tot en met 13	10 weken
7 tot en met 9	8 weken

- De duur van de pompkelder bemaling is gebaseerd op schema's in bijlage 1 en discussie met RWS en VolkerWessels en is aan beide zijden ingeschat op ongeveer 18 weken per pompkelder.
- Doorlooptijden, gebaseerd op discussie met RWS en VolkerWessels, bij bemaling van alle moten gelijktijdig:

Zijde	Doorlooptijden
Sneekzijde	29 weken
Jourezijde	37 weken

Bij deze bemalingsscenario's wordt vooralsnog uitgegaan van bemaling van het complete tracé van moot 7 tot en met moot 36. De resultaten van de doorgerekende scenario's kunnen ook worden gebruikt om te besluiten bemaling toe te passen voor een deel van de moten en voor de andere moten te werken met sluisystemen. Ten tijde van het schrijven van dit bemalingsadvies is de heersende mening dat de totale doorlooptijd van het continue bemalen met de uitgewerkte scenario's enigszins korter is dan de doorlooptijd van het werken met sluisystemen.

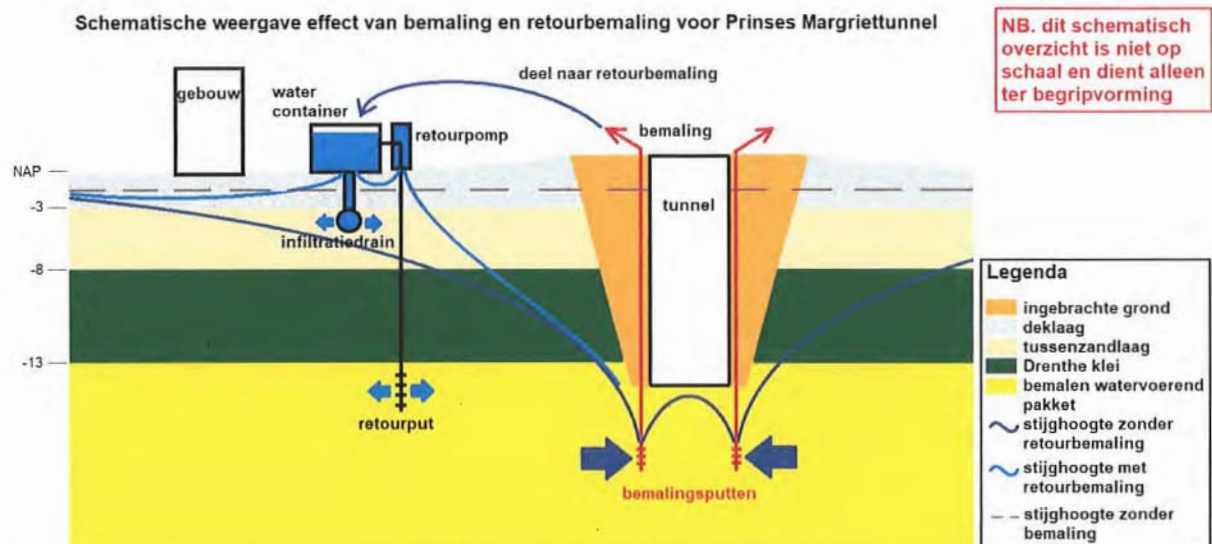
4.3 Retourbemaling

Belangrijkste zettingsgevoelige laag is de deklaag. Deze loopt van het maaiveld tot circa NAP -3 m. Met name als gevolg van de aangetroffen klei en veenlagen, is de deklaag gevoelig voor het optreden van zettingen. De Drenthe klei is een stijve laag die overgeconsolideerd zal zijn en derhalve weinig zettingsgevoelig is. Zetting in de deklaag wordt voornamelijk veroorzaakt door daling van de grondwaterstand in de deklaag en afhankelijk van de bemalingsduur ook (gedeeltelijk) van de stijghoogteverlaging in de tussenzandlaag. Eventuele zetting in de Drenthe klei wordt veroorzaakt door verlaging van de grondwaterstand en door stijghoogteverlagingen in de tussenzandlaag en het diepere pleistocene zand. Dit is afhankelijk van de bemalingsduur en de snelheid, waarmee de cohesieve lagen (zoals de Drenthe klei) zich aanpassen aan de lagere stijghoogten ten gevolge van de bemaling. Verlaging van de stijghoogte in het watervoerend pakket onder de Drenthe klei en in de tussenzandlaag boven de Drenthe klei leidt niet direct tot zettingen.

Eerst moeten door consolidatie, de waterspanningen zich in de deklaag en Drenthe klei laag aanpassen (omlaag gaan), daarna ontstaan zettingen.

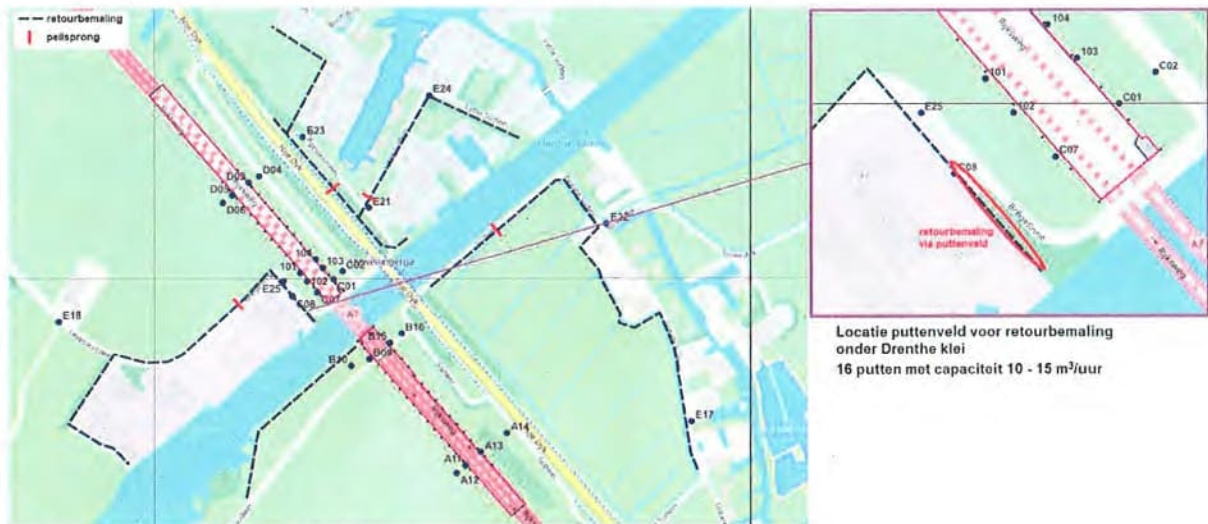
Uit eerdere zettingsanalyses (paragraaf 6.6) is gebleken dat de zetting van de deklaag beperkt blijft als de grondwaterstand in de deklaag niet meer dan 0.25 m omlaag gaat, gedurende meer dan 6 maanden. En dan zal dit waarschijnlijk niet tot schade aan gebouwen leiden. Iets vergelijkbaars geldt voor de tussenzandlaag als de stijghoogteverlaging daarin niet groter wordt dan 0.50 m.

Door het relatief geringe doorlaatvermogen (kD) van de tussenzandlaag lijkt retourbemaling met putten op voorhand niet de beste keuze. Daarom zijn we uitgegaan van retourbemaling via infiltratiebuizen/drainen die op 3 à 4 meter diepte onder maaiveld in de tussenzandlaag gelegd worden. Daarbij wordt water over de gehele lengte van de buis de zandlaag ingedrukt. Om te voorkomen dat er lokaal te hoge waterdrukken kunnen ontstaan waardoor wateroverlast zou kunnen optreden, zijn er in de drains enkele peilsprongen nodig. Dat is vooral nodig in perioden waarin de diepste moten bemalen worden, omdat dan de grondwaterstand dichterbij de tunnel veel verder omlaag getrokken wordt dan op grotere afstand van de tunnel. Figuur 4-1 geeft een schematisch overzicht van de situatie van bemaling en retourbemaling. Figuur 4-2 geeft een overzicht van de locatie van de retourbemaling, zoals die in de modelberekeningen is aangehouden. De locatie en de niveaus van de retourbemaling zijn middels een aantal eerder uitgevoerde oriënterende stationaire modelberekeningen bepaald.



Figuur 4-1 Schematische weergave van bemaling en retourbemaling.

De oriënterende berekeningen wezen uit dat, tijdens de bemaling van de diepste moten, deze retourbemaling in de tussenzandlaag onvoldoende bleek om relevante stijghoogteverlagingen in de tussenzandlaag te voorkomen. Voor die specifieke bemalingsfasen is lokaal aanvullende retourbemaling in het watervoerend pakket onder de Drenthe klei nodig. Door de diepte van dit pakket (ca. 13 meter onder maaiveld) zal deze retourbemaling niet met een drain worden uitgevoerd, maar met putten. Voor de retourbemaling via infiltratiedrainen is in het model een maximum peil van NAP +2 m aangehouden. Dat kan worden bereikt door het peil in de watercontainers op dit niveau te houden. Voor de drukhoogte in de infiltratieputten is NAP +6 m aangehouden. Om deze druk te bereiken is een pomp nodig, omdat een watercontainer van 6 m hoog geen reële optie lijkt. Water voor de retourbemaling is afkomstig uit de bemaling. Dit water behoeft nog wel enige behandeling voordat het geschikt is om via retourbemaling terug de grond in te worden gebracht. Ook voor de directe lozing op oppervlaktewater van de rest van het bemalen water is dat nodig. Hierop wordt verderop in dit rapport teruggekomen (paragraaf 5.4).



Locatie infiltratiedrains onder de Holocene deklaag
buizen met een natte omtrek van ruim 1 m

Locatie puttenveld voor retourbemaling
onder Dranthe klei
16 putten met capaciteit 10 - 15 m³/uur

Figuur 4-2 Locatie meetpunten en ligging van de retourbemaling (in het model).

De retourbemaling is in het model ingebracht via lijnelementen (modelrivieren) met een vaste drukhoogte (waterpeil). Als in praktijk blijkt dat infiltratieputten hier beter inpasbaar zijn, bv. door aanwezigheid van kabels en leidingen in de ondergrond, kunnen op de plek van de drains putten worden aangelegd. Dit zal tot vergelijkbare resultaten leiden als met drains.

4.4 Scenario's

De vijf door RWS gekozen scenario's zijn:

- Scenario 1. 1 zijde per keer, 1 moot doorschuiven, 3 keer doorlopen.
- Scenario 2. 1 zijde per keer, 4 moten doorschuiven, 1 keer doorlopen.
- Scenario 3. 2 zijden gelijktijdig, 1 moot doorschuiven, 3 keer doorlopen.
- Scenario 4. 2 zijden gelijktijdig, 4 moten doorschuiven, 1 keer doorlopen.
- Scenario 5. Alle moten gelijktijdig bemalen.

De door RWS en VolkerWessels ingeschatte benodigde tijd voor de wijzen van doorschuiven voor scenario's 1 tot en met 4 is voor beide zijden van de tunnel weergegeven in bijlage A.

4.4.1 Scenario 1

- Er wordt begonnen met de Sneekzijde, bemaling van moot 24 tot en met moot 27.
- De bemaling schuift daarna telkens 1 moot op tot moot 36 bereikt is.
- Bij de laatste 3 moten wordt de bemaling dus steeds 1 moot minder:
 - Bemaling voor moot 33, 34, 35 en 36.
 - Bemaling voor moot 34, 35 en 36.
 - Bemaling voor moot 35 en 36.
 - Bemaling voor moot 36.
- Dit traject wordt 3 keer doorlopen.
- Daarna wordt moot 23 (pompkelder Sneekzijde) bemalen.
- Dan wordt begonnen met de Jourezijde, bemaling van moot 21 tot en met moot 18.
- De bemaling schuift daarna telkens 1 moot op tot moot 7 bereikt is.
- Bij de laatste 3 moten wordt de bemaling dus steeds 1 moot minder:
 - Bemaling voor moot 10, 9, 8 en 7.
 - Bemaling voor moot 9, 8 en 7.
 - Bemaling voor moot 8 en 7.
 - Bemaling voor moot 7.
- Dit traject wordt 3 keer doorlopen.
- Daarna wordt moot 22 (pompkelder Jourezijde) bemalen.
- De bemaling aan de Sneekzijde duurt dan 34 weken plus de 18 weken die nodig zijn voor de pompkelder.

- De bemaling aan de Jourezijde duurt dan 47 weken plus de 18 weken die nodig zijn voor de pompkelder.
- Totale tijd komt daarmee op 117 weken = ongeveer 2 jaar en 3 maanden.

4.4.2 Scenario 2

- Er wordt begonnen met de Sneekzijde, bemaling van moot 24 tot en met moot 27.
- De bemaling schuift daarna telkens 4 moten op tot moot 36 bereikt is. Omdat moot 36 de geringste bemaling behoeft en deze bij doorschuiven per 4 moten als enige overblijft, wordt moot 36 bij de bemaling voor moten 32 tot en met 35 getrokken:
 - Bemaling voor moot 24 tot en met 27.
 - Bemaling voor moot 28 tot en met 31.
- Bemaling voor moot 32 tot en met 36.
- Dit traject wordt 1 keer doorlopen.
- Daarna wordt moot 23 (pompkelder Sneekzijde) bemalen.
- Dan wordt begonnen met de Jourezijde, bemaling van moot 21 tot en met moot 18.
- De bemaling schuift daarna telkens 4 moten op tot moot 7 bereikt is. Als laatste resteren dan 3 moten:
 - Bemaling voor moot 21 tot en met 18.
 - Bemaling voor moot 17 tot en met 14.
 - Bemaling voor moot 13 tot en met 10.
 - Bemaling voor moot 9 tot en met 7.
- Dit traject wordt 1 keer doorlopen.
- Daarna wordt moot 22 (pompkelder Jourezijde) bemalen.
- De bemaling aan de Sneekzijde duurt dan 41 weken plus de 18 weken die nodig zijn voor de pompkelder.
- De bemaling aan de Jourezijde duurt dan 53 weken plus de 18 weken die nodig zijn voor de pompkelder.
- Totale tijd komt daarmee op 130 weken = ongeveer 2 jaar en 6 maanden.

4.4.3 Scenario 3

- Er wordt begonnen aan beide zijden gelijk, met aan de Sneekzijde, bemaling van moot 24 tot en met moot 27 en aan de Jourezijde met moot 21 tot en met 18.
- De bemaling schuift daarna telkens 1 moot op tot moot 36 bereikt is aan de Sneek zijde en moot 7 aan de Jourezijde.
- Bij de laatste 3 moten aan beide zijden wordt de bemaling dus steeds 1 moot minder, zie scenario 1.
- Dit traject wordt 3 keer doorlopen.
- Als laatste worden moot 23 (pompkelder Sneekzijde) en moot 22 (pompkelder Jourezijde) bemalen. Omdat de doorlooptijd aan Sneekzijde korter is dan aan Jourezijde zal de bemaling van de pompkelder aan Sneekzijde eerder beginnen dan aan Jourezijde.
- De Sneekzijde heeft 2 moten minder dan de Jourezijde en de moten aan Jourezijde liggen dieper en vergen daarom net iets meer tijd per moot. Daardoor lopen de bemalingen al na de eerste serie niet meer synchroon. Per serie zal dit verschil toenemen:
 - Na 1 serie Sneekzijde, begint de bemaling aan deze zijde weer met moot 24 tot en met 27. Aan Jourezijde wordt dan:
 - Eerst nog moot 12 tot en met 9 bemalen, doorschuivend tot moot 7.
 - Als dat afgerond is, wordt aan ook deze zijde weer opnieuw begonnen, met moot 21 tot en met 18.
 - Na 2 series Sneekzijde, begint de bemaling aan deze zijde weer met moot 24 tot en met 27. Aan Jourezijde wordt dan:
 - Bemaling uitgevoerd voor moot 20 tot en met 17.
 - Na 3 series Sneekzijde, begint aan men hier aan de bemaling voor de pompkelder (moot 23). Aan Jourezijde wordt dan:
 - Eerst nog voor de derde keer de bemaling voor moot 21 tot en met 18, doorgeschoven tot moot 7.
 - Vervolgens ook hier met de bemaling voor de pompkelder (moot 22).

- Als de bemaling aan Sneekzijde klaar is, loopt de bemaling aan Jourezijde voor moot 22 nog een drietal maanden door.
- De bemaling duurt dan in totaal 65 weken (benodigde tijd Jourezijde) = ongeveer 1 jaar en 3 maanden.

4.4.4 Scenario 4

- Er wordt begonnen aan beide zijden gelijk, met aan de Sneekzijde, bemaling van moot 24 tot en met moot 27 en aan de Jourezijde met moot 21 tot en met 18.
- De bemaling schuift elke maand 4 moten op tot moot 36 bereikt is aan de Sneekzijde en moot 7 aan de Jourezijde, zie scenario 2.
- Bemaling pompkelders wordt aan beide zijden gelijk gestart.
- Als de bemaling aan Sneekzijde van moot 24 tot en met moot 36 klaar is, dan loopt de bemaling aan Jourezijde nog voor moot 13 tot en met 10, en aansluitend voor moot 9 tot en met 7. Aan Sneekzijde wordt dan tijdelijk niet bemalen.
- Aansluitend worden de bemalingen voor de pompkelders aan beide zijden (moot 23 en moot 22) gelijktijdig gestart.
- Dit traject wordt 1 keer doorlopen.
- De bemaling duurt dan in totaal 71 weken (benodigde tijd Jourezijde) = ongeveer 1 jaar en 4,5 maanden.

4.4.5 Scenario 5

- Er wordt begonnen aan beide zijden gelijk, met aan de Sneekzijde, bemaling van moot 23 tot en met moot 36 en aan de Jourezijde met moot 22 tot en met 7.
- De bemaling van alle moten aan de Sneekzijde loopt door tot deze zijde klaar is.
- De bemaling van alle moten aan de Jourezijde loopt door tot deze zijde klaar is.
- Als de bemaling aan Sneekzijde van moot 23 tot en met moot 36 klaar is, dan loopt de bemaling aan Jourezijde nog voor moot 22 tot en met 7 nog 8 weken door. Aan Sneekzijde wordt dan niet meer bemalen.
- De bemaling duurt dan in totaal 37 weken (benodigde tijd Jourezijde) = ongeveer 8,5 maanden.

4.4.6 Scenariokeuze

Vanwege de veel grotere doorlooptijden van scenario's 1 en 2, is in overleg met RWS en VolkerWessels besloten alleen bemaling voor scenario's 3 en 4 door te rekenen. Deze twee scenario's hebben een kortere doorlooptijd welke van invloed is op de doelstelling om de doorlooptijd van het hersteltraject zo realistisch en kort mogelijk te houden.

Op basis van de resultaten van scenario's 3 en 4 is besloten scenario 5 door te rekenen, omdat de ingeschatte doorlooptijd van het hersteltraject daarvan 4,5 tot 6 maanden korter is dan van beide andere scenario's.

4.5 Zettingsanalyse

Aansluitend zijn, op basis van de rekenresultaten van de bemalingsscenario's (hoofdstuk 5), zettingsanalyses uitgevoerd. Deze zettingsanalyses zijn gerapporteerd in de hoofdstukken aansluitend op de rekenresultaten van de bemaling (vanaf hoofdstuk 6).

5 Rekenresultaten

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de twee doorgerekende scenario's. Beide scenario's bestaan uit meerdere fasen. Scenario 3 heeft 84 bemalingsfasen, scenario 4 heeft er 8 en scenario 5 heeft er 2. Per fase worden de totale bemalingsdebieten gepresenteerd voor de Jourezijde en voor de Sneekzijde. Bij de retourbemaling wordt in het model onderscheid gemaakt tussen de infiltratie via onder de deklaag en infiltratie in het watervoerend pakket onder de Drenthe klei. Ook wordt de doorlooptijd van de bemalingen gepresenteerd.

Bij elke bemalingsfase is er een check of de vereiste ontwateringsdiepte onder de moten wordt bereikt. Dat is voor iedere bemalen moot in lengterichting van de weg aan beide zijden van de moot gedaan. Daarnaast worden voor de meetpunten E17 t/m E25 de verlaging van de grondwaterstand en de stijghoogte in de tussenzandlaag gepresenteerd. Deze meetpunten zijn bedoeld om de effecten van de bemaling op de omgeving te monitoren.

De grondwaterstanden en stijghoogten worden in het model alleen beïnvloed door bemaling en retourbemaling. Andere invloeden, zoals neerslag, verdamping, overgangen van zomerpeil naar winterpeil en omgekeerd, zijn in de berekeningen bewust niet meegenomen, zodat alle berekende veranderingen zijn toe te schrijven aan de combinatie van bemaling en retourbemaling.

5.1 Scenario 3: 2 zijden gelijktijdig, 1 moot doorschuiven, 3 keer doorlopen

In dit scenario wordt aan beide zijden gelijktijdig begonnen met de diepste vier moten, naast de beide pompkelders (moot 22 en 23). Dat zijn moot 21 t/m 18 aan Jourezijde en moot 24 t/m 27 aan Sneekzijde. Vervolgens wordt de bemaling telkens een moot opgeschoven tot moot 7 aan Jourezijde en moot 36 aan Sneekzijde zijn bereikt. Dat wordt drie keer herhaald, waarbij telkens een ander deel van de weg wordt hersteld. Als laatste worden beide pompkelders bemalen. Aan beide zijde wordt achter elkaar doorgeschoven en niet gewacht op de voortgang aan de andere zijde van het kanaal. Het aantal moten aan de Jourezijde is groter dan het aantal moten aan de Sneekzijde, en de moten aan de Jourezijde liggen wat dieper. Daarom zijn de doorlooptijden van beide zijden verschillend, treedt er een steeds groter wordende faseverschuiving op, wordt aan Sneekzijde uiteindelijk drie maanden eerder begonnen met de pompkelder dan aan Jourezijde en is de bemaling aan Sneekzijde ook drie maanden eerder klaar.

5.1.1 Bemaling

Tabel 5-1 geeft voor scenario 3 de berekende bemalingsdebieten weer voor elke bemalingsfase. Kolom 2 geeft de bemalen moten van de fase uit kolom 1. Kolom 3 geeft, gerekend vanaf de start van dit bemalingsscenario, de tijd in dagen waarop de fase eindigt en kolom 4 geeft het aantal dagen dat de fase duurt. Kolom 5 geeft de totale hoeveelheid retourbemaling die gedurende de fase via de infiltratiedrains de tussenzandlaag (TZL) onder de deklaag ingebracht wordt. Kolom 6 geeft de additionele hoeveelheid retourbemaling die gedurende de fase via de putten in het bemalen watervoerend pakket (WVP1) wordt geïnfiltreerd. De laatste drie kolommen geven per fase de bemalingsdebieten aan Sneekzijde, Jourezijde en de som van beiden.

Tabel 5-1 Berekende bemalings- en retourbemalingsdebieten voor scenario 3.

Fase	Bemalen moten Sneekzijde / Jourezijde	Tijd na start [dagen]	Lengte fase [dagen]	Retour drains (TZL) [m3/u]	Retour putten (WVP1) [m3/u]	Bemaling Sneekzijde [m3/u]	Bemaling Jourezijde [m3/u]	Bemaling Totaal [m3/u]
1	24-27 / 18-21	36	36	169	150	-653	-877	-1530
2	25-28 / 18-21	40	4	167	144	-599	-895	-1494
3	26-29 / 18-21	44	4	165	135	-541	-910	-1451
4	27-30 / 18-21	45	1	163	128	-493	-921	-1413
5	27-30 / 17-20	48	3	160	124	-506	-855	-1361
6	28-31 / 17-20	50	2	145	0	-414	-849	-1262
7	28-31 / 16-19	52	2	143	0	-421	-824	-1245
8	29-32 / 16-19	55	3	141	0	-382	-830	-1213
9	29-32 / 15-18	56	1	71	0	-387	-769	-1156
10	30-33 / 15-18	60	4	69	0	-344	-774	-1118
11	31-34 / 14-17	64	4	64	0	-305	-731	-1036
12	32-35 / 14-17	65	1	62	0	-274	-734	-1008
13	32-35 / 13-16	68	3	59	0	-279	-676	-955
14	33-36 / 13-16	69	1	56	0	-233	-679	-912
15	33-36 / 12-15	72	3	54	0	-238	-623	-861
16	34-36 / 12-15	73	1	51	0	-186	-626	-813
17	34-36 / 11-14	76	3	36	0	-190	-569	-759
18	35-36 / 11-14	77	1	36	0	-183	-570	-753
19	35-36 / 10-13	80	3	34	0	-186	-523	-709
20	36 / 10-13	81	1	32	0	-134	-526	-660
21	36 / 9-12	84	3	30	0	-137	-465	-603
22	24-27 / 9-12	85	1	151	140	-778	-429	-1207
23	24-27 / 8-11	89	4	151	139	-780	-396	-1176
24	24-27 / 7-10	93	4	150	139	-784	-351	-1135
25	24-27 / 7-9	97	4	148	138	-790	-264	-1055

26	24-27 / 7-8	101	4	147	138	-793	-232	-1025
27	24-27 / 7	105	4	145	137	-798	-160	-957
28	24-27 / 18-21	118	13	169	151	-663	-875	-1538
29	25-28 / 18-21	122	4	167	144	-599	-895	-1494
30	26-29 / 18-21	126	4	166	136	-555	-909	-1464
31	27-30 / 18-21	130	4	151	0	-444	-903	-1347
32	28-31 / 18-21	133	3	148	0	-391	-914	-1305
33	29-32 / 18-21	136	3	146	0	-354	-921	-1276
34	30-33 / 18-21	139	3	77	0	-310	-925	-1234
35	31-34 / 18-21	142	3	75	0	-281	-929	-1210
36	32-35 / 18-21	145	3	73	0	-239	-934	-1173
37	33-36 / 18-21	149	4	71	0	-209	-938	-1146
38	34-36 / 18-21	153	4	69	0	-173	-941	-1114
39	35-36 / 18-21	155	2	68	0	-145	-944	-1088
40	35-36 / 17-20	157	2	64	0	-149	-891	-1040
41	36 / 17- 20	161	4	63	0	-115	-894	-1009
42	24-27 / 17-20	162	1	166	148	-686	-816	-1502
43	24-27 / 16-19	168	6	165	146	-699	-780	-1480
44	24-27 / 15-18	173	5	163	145	-711	-748	-1459
45	24-27 / 14-17	178	5	161	143	-723	-690	-1414
46	24-27 / 13-16	182	4	159	142	-734	-635	-1369
47	24-27 / 12-15	186	4	157	142	-757	-580	-1337
48	24-27 / 11-14	190	4	155	141	-767	-496	-1263
49	24-27 / 10-13	194	4	153	140	-772	-452	-1224
50	24-27 / 9-12	195	1	152	140	-777	-407	-1184
51	25-28 / 9-12	198	3	149	129	-696	-415	-1111
52	25-28 / 8-11	199	1	148	129	-699	-383	-1083
53	26-29 / 8-11	202	3	133	0	-601	-382	-983

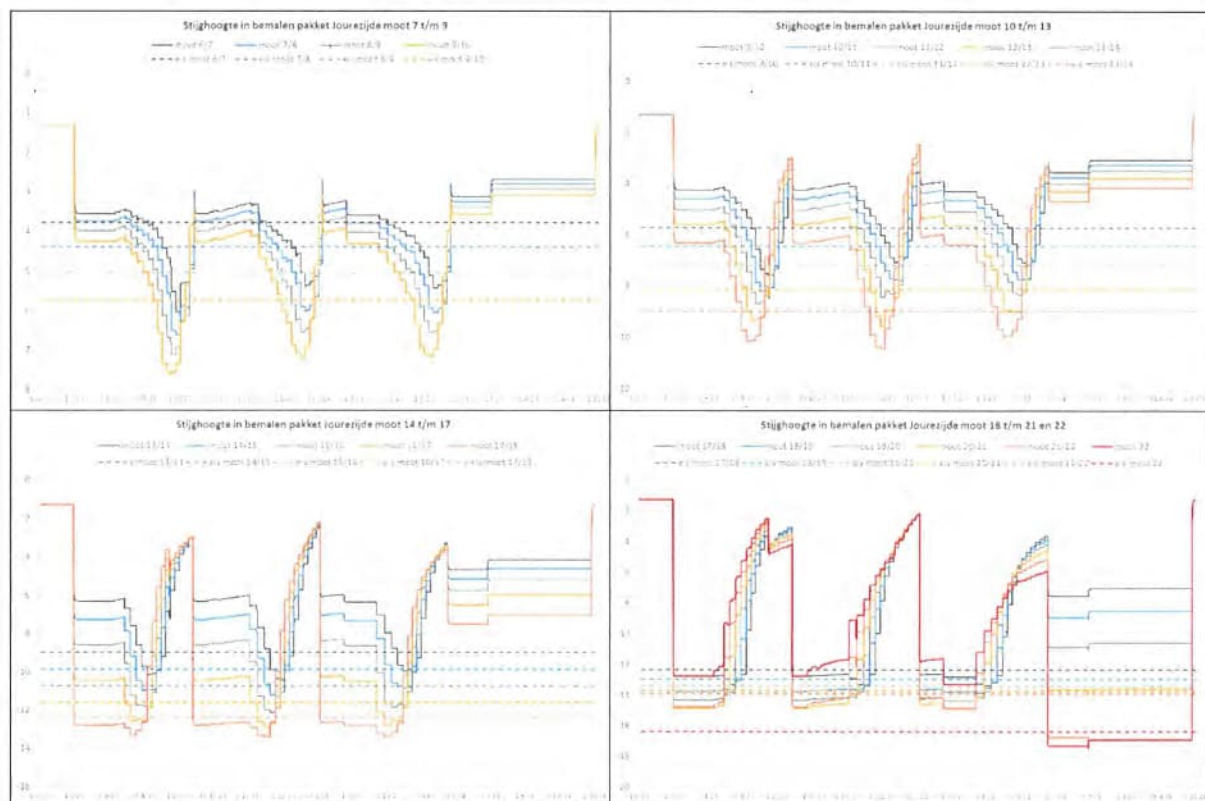
54	26-29 / 7-10	203	1	131	0	-606	-322	-928
55	27-30 / 7-10	206	3	128	0	-549	-328	-877
56	27-30 / 7-9	207	1	127	0	-553	-273	-825
57	28-31 / 7-9	210	3	123	0	-493	-277	-770
58	29-32 / 7-8	213	3	51	0	-436	-230	-666
59	30-33 / 7-8	214	1	49	0	-390	-232	-621
60	30-33 / 7	216	2	47	0	-393	-172	-565
61	31-34 / 7	217	1	45	0	-360	-173	-533
62	31-34 / 18-21	219	2	142	0	-295	-932	-1227
63	32-35 / 18-21	222	3	140	0	-242	-937	-1179
64	33-36 / 18-21	226	4	137	0	-198	-941	-1139
65	34-36 / 18-21	230	4	136	0	-175	-944	-1119
66	35-36 / 18-21	234	4	135	0	-147	-947	-1093
67	36 / 18-21	238	4	133	0	-113	-949	-1063
68	23 / 18-21	267	29	169	158	-732	-821	-1553
69	23 / 17-20	274	7	167	156	-750	-781	-1532
70	23 / 16-19	280	6	166	154	-764	-752	-1516
71	23 / 15-18	285	5	165	156	-813	-697	-1510
72	23 / 14-17	290	5	163	154	-823	-647	-1470
73	23 / 13-16	294	4	161	153	-831	-595	-1426
74	23 / 12-15	298	4	158	152	-839	-531	-1369
75	23 / 11-14	302	4	157	151	-845	-482	-1327
76	23 / 10-13	306	4	155	150	-850	-439	-1289
77	23 / 9-12	310	4	155	152	-892	-379	-1271
78	23 / 8-11	314	4	154	152	-894	-349	-1244
79	23 / 7-10	318	4	152	151	-897	-305	-1203
80	23 / 7-9	322	4	151	151	-900	-254	-1155
81	23 / 7-8	326	4	150	150	-903	-209	-1111
82	23 / 7	329	3	149	150	-905	-153	-1059
83	23 / 22	364	35	167	161	-700	-763	-1463
84	geen / 22	455	91	127	108	0	-960	-960

De totale benodigde bemaling voor scenario 3 bedraagt 13.4 miljoen m³, waarvan 5.2 miljoen aan Sneekzijde en 8.2 miljoen aan Jourezijde. Daarvan wordt ongeveer een vijfde deel via retourbemaling terug de grond in gebracht. De maximale retourbemaling via de putten is 161 m³/uur. Met 16 retourputten komt dat neer op maximaal 10 m³/uur. De maximaal gehanteerde drukhoogte in de retour drains bedraagt NAP + 2 m. Deze drukhoogte wordt alleen gebruikt tijdens de bemaling van de diepste moten aan de Sneekzijde (inclusief de pompkelder), en dan slechts in een deel van de infiltratiedrains rondom het industrieterrein. Voor de rest van de tijd en de rest van de drains varieert de drukhoogte tussen NAP -1 m en NAP +1 m.

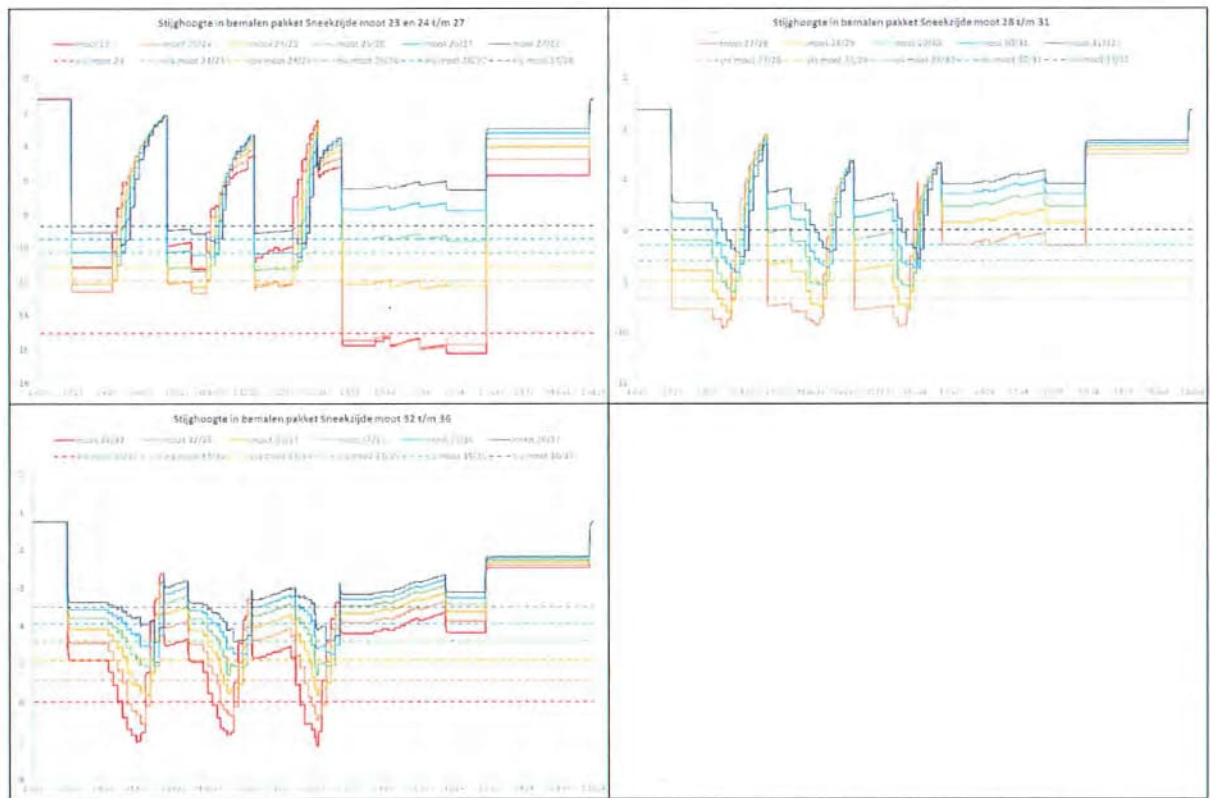
5.1.2 Verlaging stijghoogte bij moten

Figuur 5-1 geeft een overzicht van het stijghoogte verloop onder de moten aan de Jourezijde. Figuur 5-2 doet hetzelfde voor de moten aan de Sneekzijde. Er is een eis om de stijghoogte te verlagen tot een bepaald peil per moot (onderkant moot). Dat zijn de onderbroken lijnen. Zodra men onder de onderbroken lijn uitkomt is de stijghoogte bij die moot lager dan noodzakelijk en kan men veilig werken. Zodra de stijghoogte boven de ononderbroken lijn uitkomt is de stijghoogte hoger dan de onderzijde van de moot en zijn werkzaamheden aan die moot niet mogelijk (zonder waterdruk).

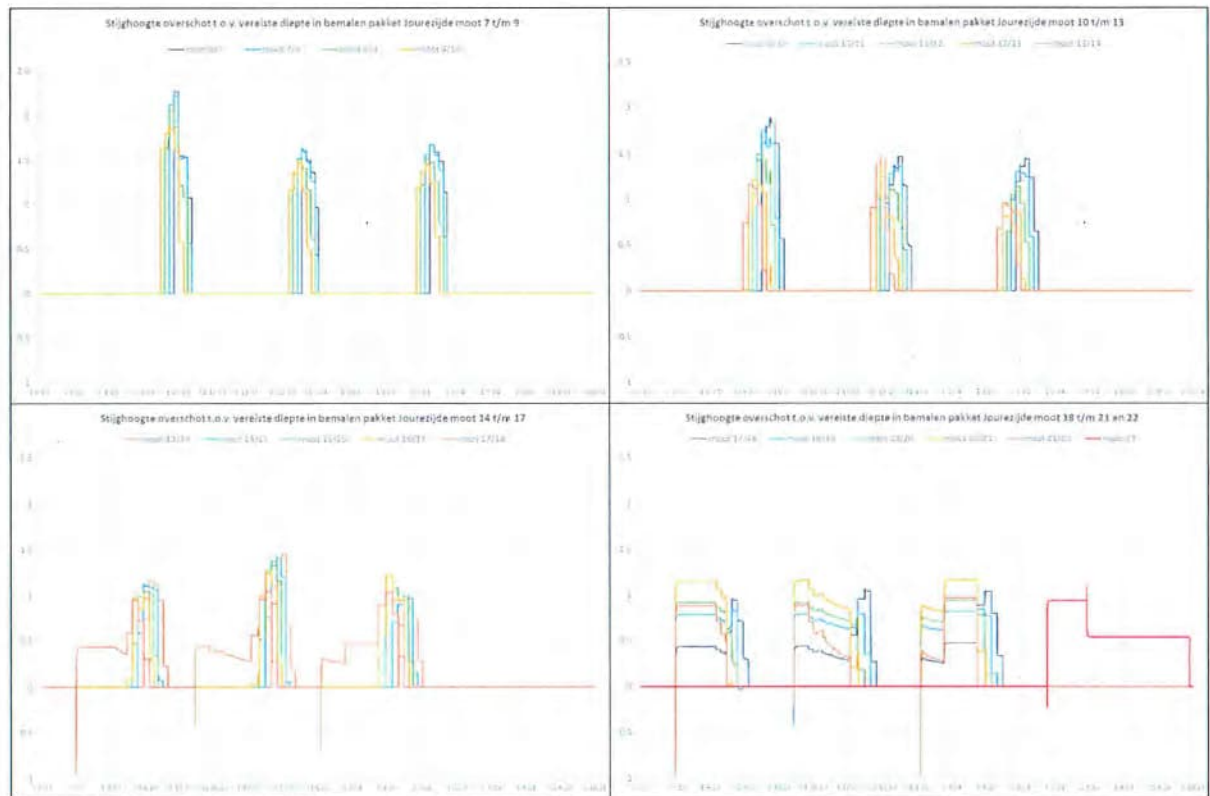
Door het opschuiven van de bemaling per moot is het niet heel duidelijk of de vereiste bemalingsstijghoogten in alle fasen bereikt worden. Daarom is in Figuur 5-3 voor de moten aan de Jourezijde en in Figuur 5-4 voor de moten aan de Sneekzijde aangegeven hoeveel meter stijghoogteoverschot er per moot gedurende de bemaling nog resteert. De nullijn duidt erop dat die moot gedurende die fase niet bemaling is. Negatieve waarden duiden erop dat de bemalingsdiepte ontoereikend is. Dat laatste is alleen heel kort na de aanvang van de bemaling van de diepere moten even het geval. Verder worden gedurende het gehele bemalingsscenario de vereiste stijghoogten onder bemalen moten bereikt.



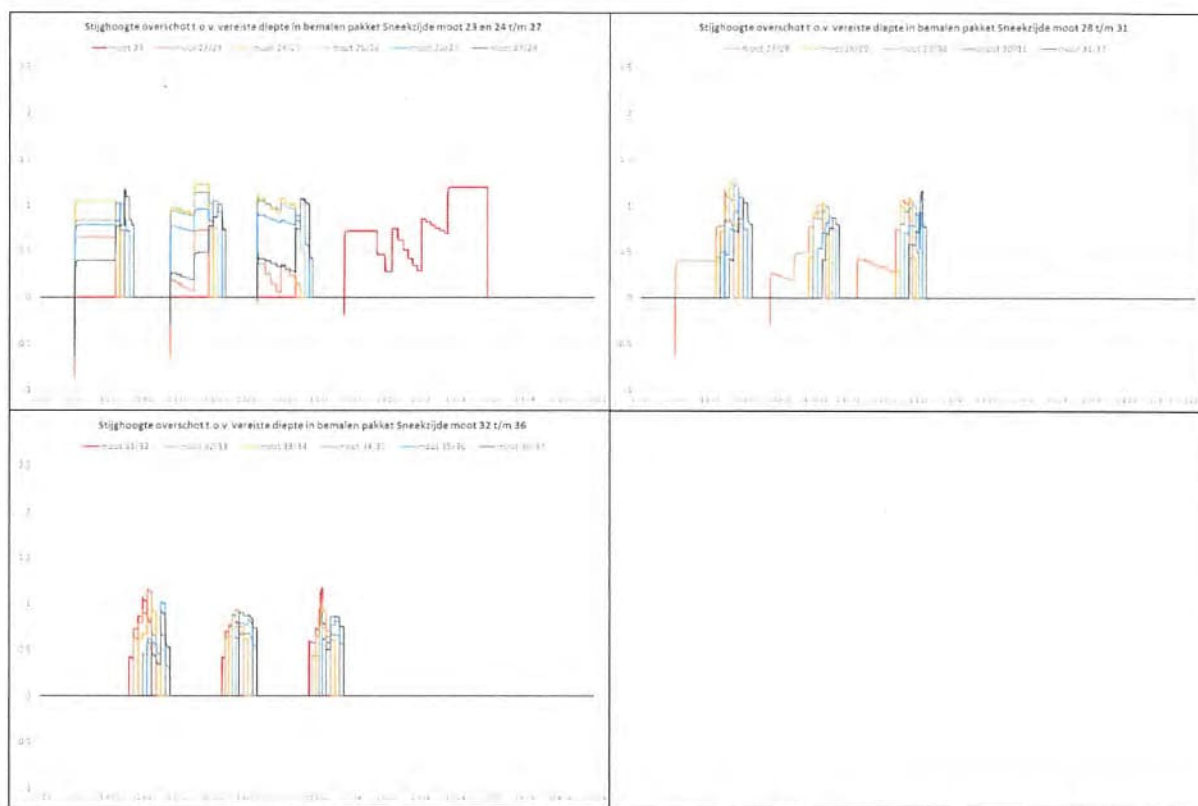
Figuur 5-1 Berekende stijghoogten [m +NAP] onder de moten aan de Jourezijde voor scenario 3. De streeplijnen geven de vereiste bemalingsstijghoogten weer.



Figuur 5-2 Berekende stijghoogten [m +NAP] onder de moten aan de Sneekzijde voor scenario 3. De streeplijnen geven de vereiste bemalingsstijghoogten weer.



Figuur 5-3 Berekende overschotten [m] t.o.v. vereiste stijghoogten onder de moten aan de Jourezijde voor scenario 3. De streeplijnen geven de vereiste bemalingsstijghoogten weer.



Figuur 5-4 Berekende overschotten [m] t.o.v. vereiste stijghoogten onder de moten aan de Sneekzijde voor scenario 3. De streeplijnen geven de vereiste bemalingsstijghoogten weer.

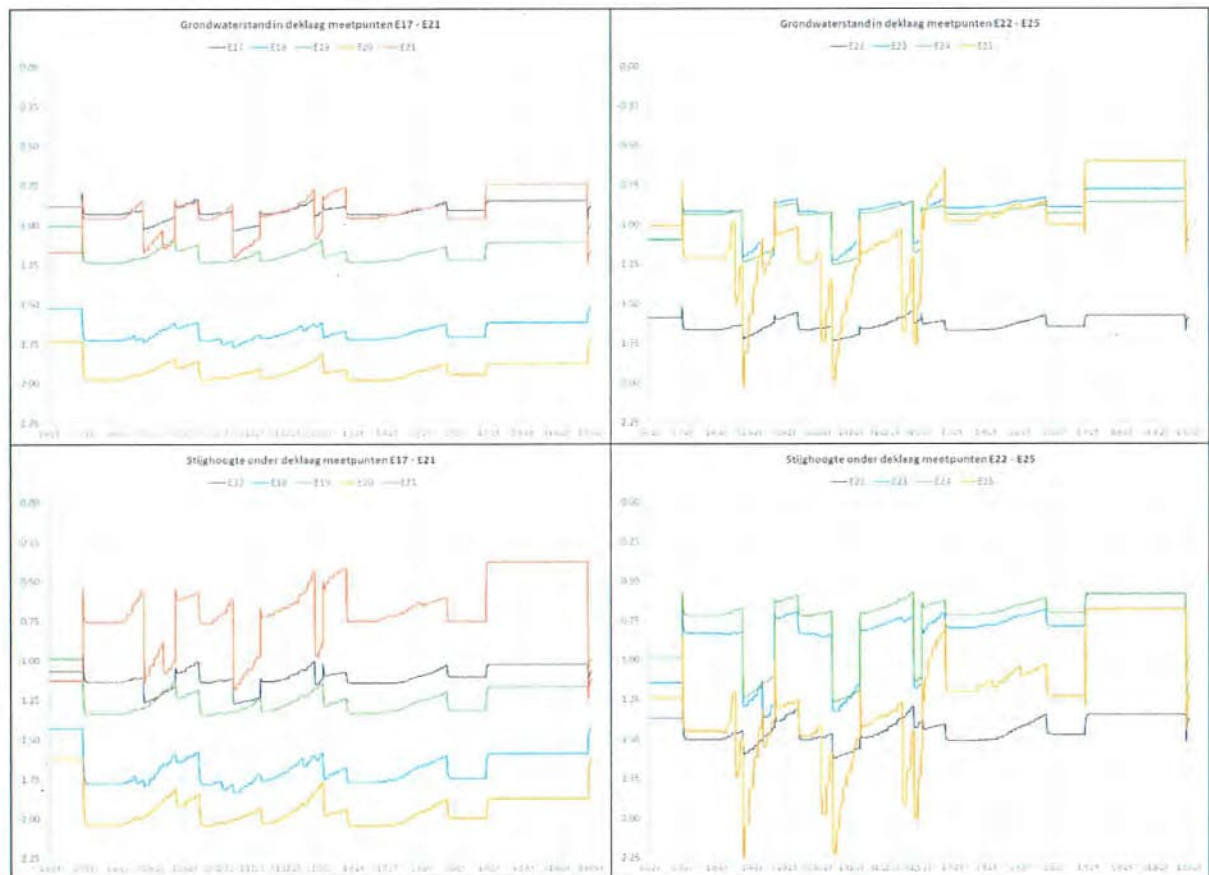
5.1.3 Verandering grondwaterstand en stijghoogte in tussenzandlaag bij gebouwen

Figuur 5-5 geeft voor de meetpunten E17 tot en met E25 het effect van de bemaling weer. De bovenste twee figuren doen dat voor de grondwaterstand in de deklaag. De onderste twee voor de stijghoogte in de tussenzandlaag direct onder de deklaag. De locatie van de meeste meetpunten is weergegeven in Figuur 4-2. Alleen meetpunten E19 (650 m ten noorden van de tunnel) en E20 (600 m ten zuiden van de tunnel) zijn niet in deze figuur weergegeven. Het horizontale deel van deze lijnen aan de linkerzijde van de deel-figuren geven de uitgangswaarden van de grondwaterstanden en stijghoogten weer.

De grondwaterstanden komen bijna nergens meer dan 0.25 m lager uit dan hun aanvangswaarden. Alleen bij meetpunt E25 worden de grondwaterstanden bij bemaling van de diepere moten tijdelijk beduidend verder omlaag getrokken. Dat wordt in het model veroorzaakt door het te vroegtijdig terugbrengen van de retourbemaling. Gedurende de eerste anderhalve maand en vier maanden voor het einde, waar de bemaling van de moten het grootst is, blijkt uit de grafiek dat de retourbemaling wel voldoende is om de verlagingen te beperken.

Hetzelfde geldt voor de verlagingen van de stijghoogte in de tussenzandlaag, die op perioden bij meetpunt E25 na overall minder dan 0.50 m bedraagt.

Het finetunen van de retourbemaling is door de grote tijdsdruk op dit onderzoek niet uitgevoerd. Dit zal leiden tot een wat grotere totale retourbemaling en daardoor mogelijk een daarmee samenhangende lichte toename van de totale bemaling. Figuur 5-3 en Figuur 5-4 laten zien dat de vereiste stijghoogten onder de moten in de meeste gevallen ruimschoots gehaald worden. Dat betekent dat wat extra retourbemaling niet bij voorbaat zal leiden tot het niet bereiken van de vereiste stijghoogten en er dus mogelijk geen toename van de bemaling nodig is.



Figuur 5-5 Berekende grondwaterstanden (boven) en stijghoogten (onder) [m +NAP] ter plaatse van de meetpunten E17 t/m E25 voor scenario 3.

5.2 Scenario 4: 2 zijden gelijktijdig, 4 moten doorschuiven, 1 keer doorlopen

In dit scenario wordt aan beide zijden gelijktijdig begonnen met de diepste vier moten, naast de beide pompkelders (moot 22 en 23). Dat zijn moot 21 t/m 18 aan Jourezijde en moot 24 t/m 27 aan Sneekzijde. Vervolgens wordt de bemaling telkens vier moten opgeschoven tot moot 7 aan Jourezijde en moot 36 aan Sneekzijde zijn bereikt. Daarbij wordt steeds de gehele weg hersteld, voordat doorgeschoven wordt naar de volgende vier moten. Als laatste worden beide pompkelders bemalen. Aan beide zijde wordt achter elkaar doorgeschoven en niet gewacht op de voortgang aan de andere zijde van het kanaal. Wel wordt in dit scenario gelijktijdig begonnen aan beide pompkelders. Het aantal moten aan de Jourezijde is groter dan het aantal moten aan de Sneekzijde, en de moten aan de Jourezijde liggen wat dieper. Daarom zijn de doorlooptijden van beide zijden verschillend en is de bemaling van de moten aan Sneekzijde uiteindelijk een kleine drie maanden eerder klaar dan de bemaling aan Jourezijde. De bemaling van beide pompkelders begint gelijktijdig en wordt pas gestopt als beide pompkelders klaar zijn. De verwachting is dat de pompkelder aan Sneekzijde enkele dagen eerder klaar is dan de pompkelder aan Jourezijde. Stoppen van de bemaling aan Sneekzijde zou een sterke toename van de bemaling aan Jourezijde betekenen. Daarom is er bij de berekening vanuit gegaan dat beide bemalingen doorlopen tot de pompkelder aan Jourezijde klaar is.

5.2.1 Bemaling

Tabel 5-2 geeft voor scenario 4 de berekende bemalingsdebiëten weer voor elke bemalingsfase. Kolom 2 geeft de bemalen moten van de fase uit kolom 1. Kolom 3 geeft, gerekend vanaf de start van dit bemalingsscenario, de tijd in dagen waarop de fase eindigt en kolom 4 geeft het aantal dagen dat de fase duurt. Kolom 5 geeft de totale hoeveelheid retourbemaling die gedurende de fase via de infiltratiedrains de tussenzandlaag (TZL) onder de deklaag ingebracht wordt. Kolom 6 geeft de additionele hoeveelheid retourbemaling die

gedurende de fase via de putten in het bemalen watervoerend pakket (WVP1) wordt geïnfiltreerd. De laatste drie kolommen geven per fase de bemalingsdebiëten aan Sneekzijde, Jourezijde en de som van beiden.

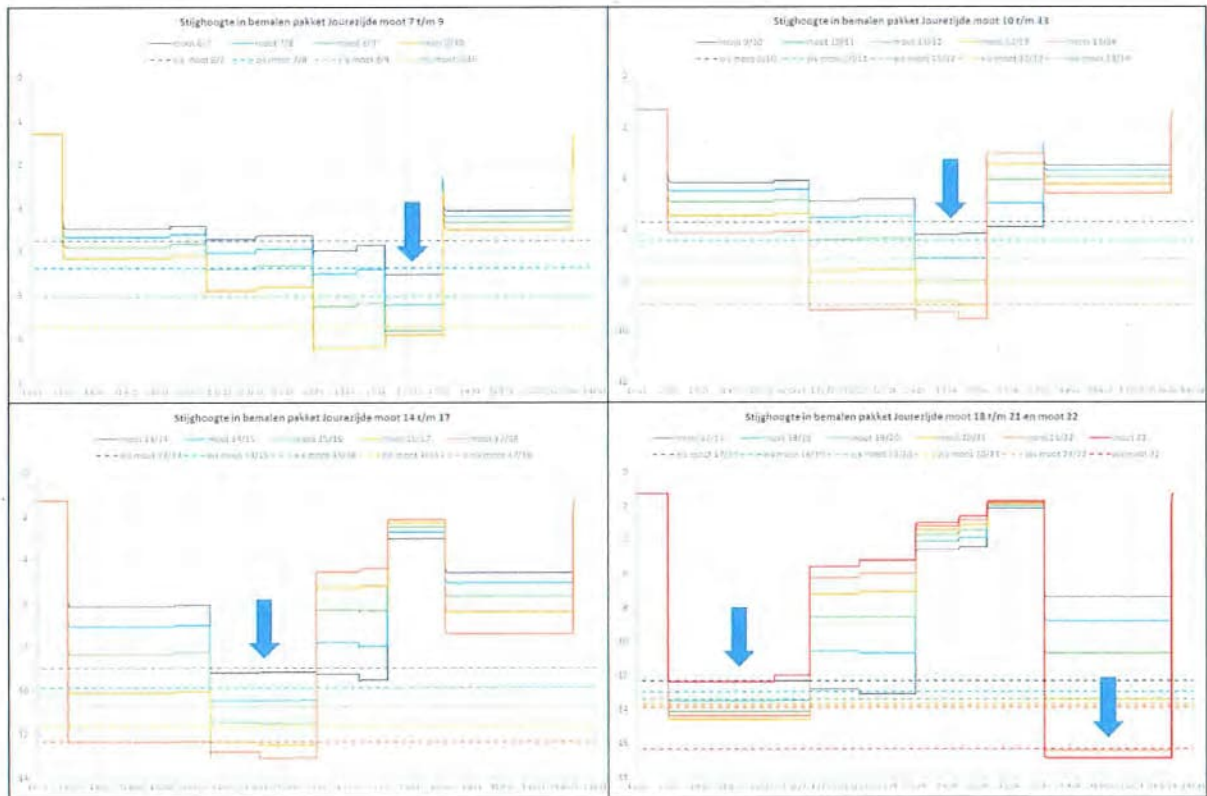
Tabel 5-2 Berekende bemalings- en retourbemalingsdebiëten voor scenario 4.

Fase	Bemalen moten Sneekzijde / Jourezijde	Tijd na start [dagen]	Lengte fase [dagen]	Retour drains (TZL) [m ³ /u]	Retour putten (WVP1) [m ³ /u]	Bemaling Sneekzijde [m ³ /u]	Bemaling Jourezijde [m ³ /u]	Bemaling Totaal [m ³ /u]
1 / 1	24- 27 / 18-21	105	105	168	149	-653	-850	-1503
2 / 1	28-31 / 18-21	140	35	148	0	-408	-900	-1308
2 / 2	28-31 / 14-17	189	49	138	0	-445	-700	-1145
3 / 2	32-36 / 14-17	245	56	62	0	-278	-728	-1006
3 / 3	32-36 / 10-13	287	42	51	0	-300	-473	-773
0 / 3	geen / 10-13	315	28	26	0	0	-459	-459
0 / 4	geen / 7-9	371	56	19	0	0	-275	-275
5 / 5	23 / 22	497	126	166	159	-685	-748	-1432
Totale watervolumes [miljoen m³]				1.388	0.858	-5.256	-8.117	-13.373

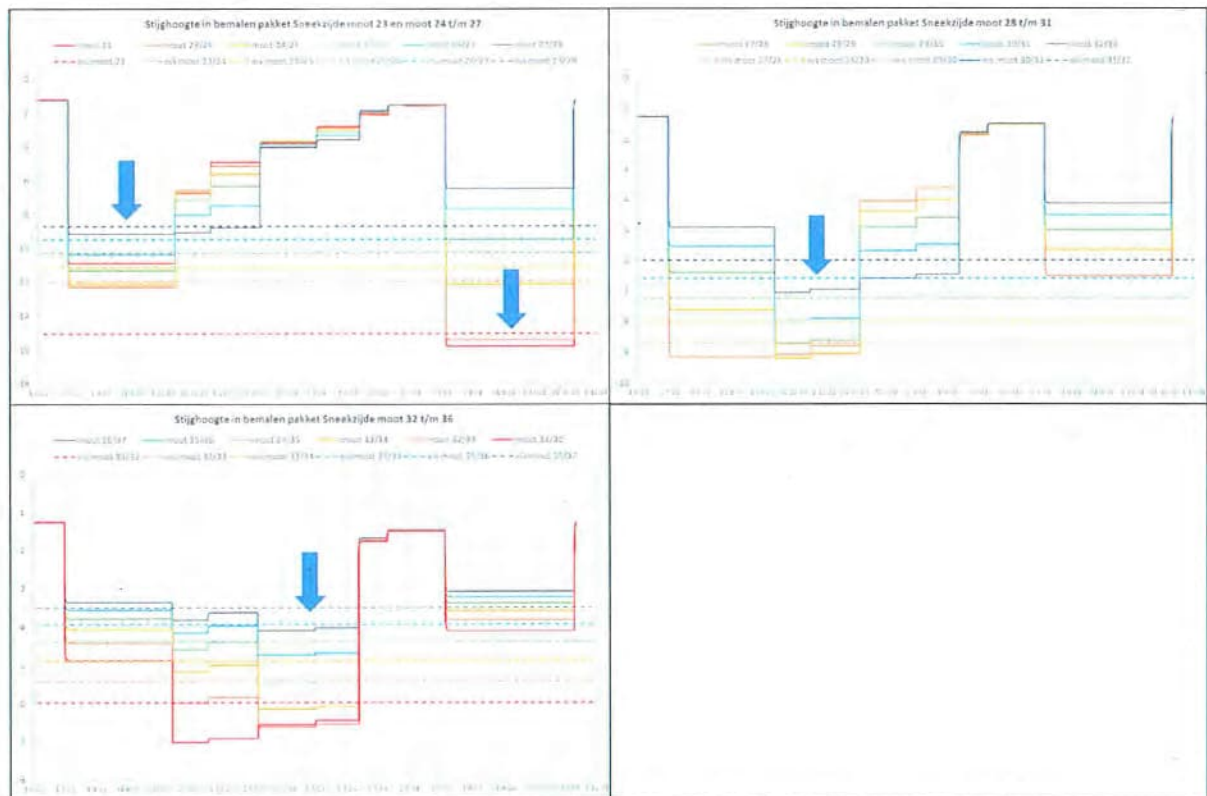
De totale benodigde bemaling voor scenario 4 bedraagt 13.4 miljoen m³, waarvan 5.3 miljoen aan Sneekzijde en 8.1 miljoen aan Jourezijde. Daarvan wordt ongeveer een zesde deel via retourbemaling terug de grond in gebracht. De maximale retourbemaling via de putten is 159 m³/uur. Met 16 retourputten komt dat neer op maximaal 10 m³/uur. De maximaal gehanteerde drukhoogte in de retour drains bedraagt NAP + 2 m. Deze drukhoogte wordt alleen gebruikt tijdens de bemaling van de diepste moten aan de Sneekzijde (inclusief de pompkelder), en dan slechts in een deel van de infiltratiedrains rondom het industrieterrein. Voor de rest van de tijd en de rest van de drains varieert de drukhoogte tussen NAP –1 m en NAP +1 m.

5.2.2 Verlaging stijghoogte bij moten

Figuur 5-6 geeft een overzicht van het stijghoogte verloop onder de moten aan de Jourezijde. Figuur 5-7 doet hetzelfde voor de moten aan de Sneekzijde. De onderbroken lijnen in deze figuur geven de vereiste bemalingsstijghoogten per moot weer en de blauwe pijlen geven de periode aan waarin de betreffende moten bemalen zijn. In de deel-figuren met twee blauwe pijlen geeft de tweede pijl de periode aan waarin de pompkelders bemalen zijn. Op een heel korte periode na, direct na de aanvang van de bemaling van de diepere moten worden gedurende het gehele bemalingsscenario de vereiste stijghoogten onder bemalen moten bereikt.



Figuur 5-6 Berekende stijghoogten [m +NAP] onder de moten aan de Jourezijde voor scenario 4. De streeplijnen geven de vereiste bemalingsstijghoogten weer.



Figuur 5-7 Berekende stijghoogten [m +NAP] onder de moten aan de Sneekzijde voor scenario 4. De streeplijnen geven de vereiste bemalingsstijghoogten weer.

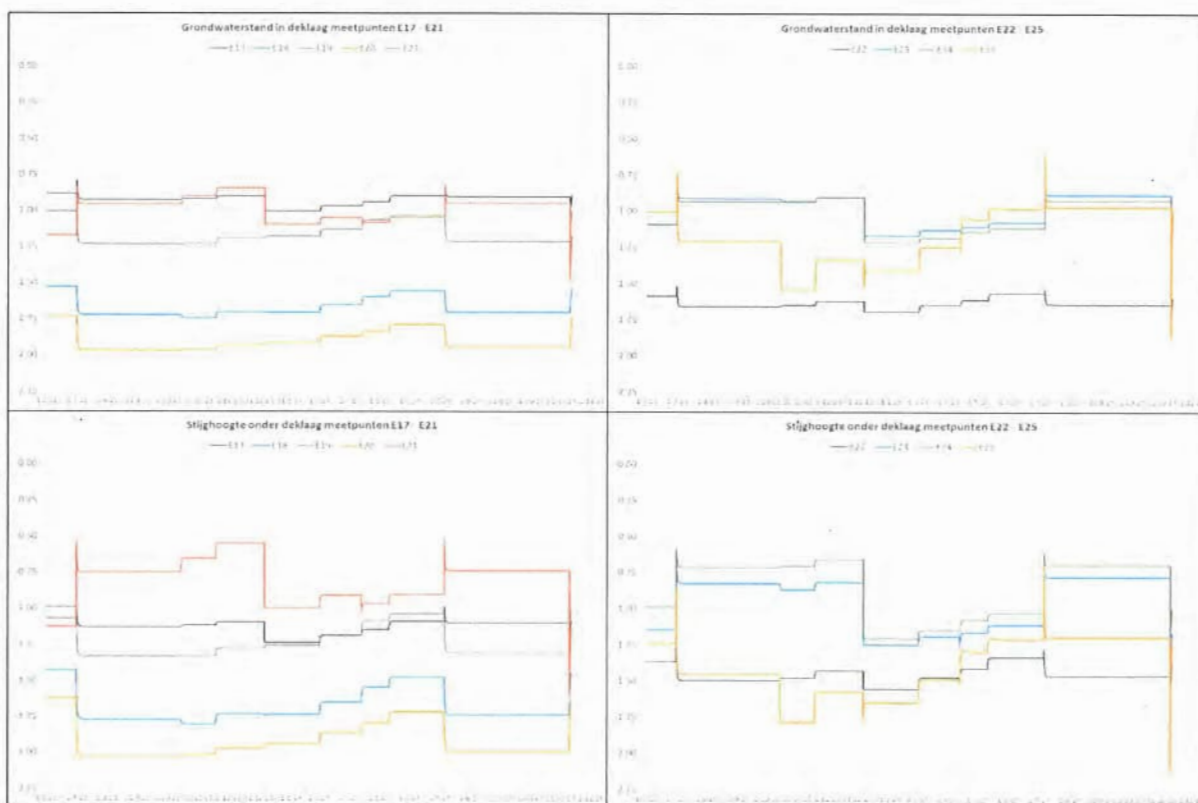
5.2.3 Verandering grondwaterstand en stijghoogte in tussenzandlaag bij gebouwen

Figuur 5-8 geeft voor de meetpunten E17 tot en met E25 het effect van de bemaling weer. De bovenste twee figuren doen dat voor de grondwaterstand in de deklaag. De onderste twee voor de stijghoogte in de tussenzandlaag direct onder de deklaag. Het horizontale deel van

deze lijnen aan de linkerkzijde van de deel-figuren geven de uitgangswaarden van de grondwaterstanden en stijghoogten weer. De grondwaterstanden en stijghoogten worden in het model alleen beïnvloed door bemaling en retourbemaling. De grondwaterstanden komen bijna nergens meer dan 0.25 m lager uit dan hun aanvangswaarden. Alleen bij meetpunt E25 worden de grondwaterstanden bij bemaling van de diepere moten tijdelijk verder omlaag getrokken, tot ongeveer 0.50 m. Dat wordt in het model veroorzaakt door het te vroegtijdig terugbrengen van de retourbemaling. Gedurende de eerste anderhalve maand en gedurende de laatste vier maanden, waar de bemaling van de moten het grootst is, blijkt uit de grafiek dat de retourbemaling wel voldoende is om de verlagingen te beperken.

Hetzelfde geldt voor de verlagingen van de stijghoogte in de tussenzandlaag, die ook bij meetpunt E25 tijdelijk slechts net iets meer dan 0.50 m bedraagt.

Het finetunen van de retourbemaling is door de grote tijdsdruk op dit onderzoek niet uitgevoerd. Dit zal leiden tot een wat grotere totale retourbemaling en daardoor mogelijk een daarmee samenhangende lichte toename van de totale bemaling. Figuur 5-6 en Figuur 5-7 laten zien dat de vereiste stijghoogten onder de moten in de meeste gevallen ruimschoots gehaald worden. Dat betekent dat wat extra retourbemaling niet bij voorbaat zal leiden tot het niet bereiken van de vereiste stijghoogten en er dus mogelijk geen toename van de bemaling nodig is.



Figuur 5-8 Berekende grondwaterstanden (boven) en stijghoogten (onder) [m +NAP] ter plaatse van de meetpunten E17 t/m E25 voor scenario 4.

5.3 Scenario 5: alle moten gelijktijdig bemalen

In dit scenario wordt aan beide zijden gelijktijdig begonnen met alle moten. Dat zijn moot 22 t/m 7 aan Jourezijde en moot 23 t/m 36 aan Sneekzijde. Het aantal moten aan de Jourezijde is groter dan het aantal moten aan de Sneekzijde, en de moten aan de Jourezijde liggen wat dieper. Daarom zijn de doorlooptijden van beide zijden verschillend en is de bemaling van de moten aan Sneekzijde uiteindelijk een kleine twee maanden eerder klaar dan de bemaling aan Jourezijde. Stoppen van de bemaling aan Sneekzijde resulteert in een sterke toename van de bemaling aan Jourezijde.

5.3.1 Bemaling

Tabel 5-3 geeft voor scenario 5 de berekende bemalingsdebieten weer voor elke bemalingsfase. Kolom 2 geeft de bemalen moten van de fase uit kolom 1. Kolom 3 geeft, gerekend vanaf de start van dit bemalingsscenario, de tijd in dagen waarop de fase eindigt en kolom 4 geeft het aantal dagen dat de fase duurt. Kolom 5 geeft de totale hoeveelheid retourbemaling die gedurende de fase via de infiltratiedrains de tussenzandlaag (TZL) onder de deklaag ingebracht wordt. Kolom 6 geeft de additionele hoeveelheid retourbemaling die gedurende de fase via de putten in het bemalen watervoerend pakket (WVP1) wordt geïnfiltrerd. De laatste drie kolommen geven per fase de bemalingsdebieten aan Sneekzijde, Jourezijde en de som van beiden.

Tabel 5-3 Berekende bemalings- en retourbemalingsdebieten voor scenario 5.

Fase	Bemalen moten Sneekzijde / Jourezijde	Tijd na start [dagen]	Lengte fase [dagen]	Retour drains (TZL) [m3/u]	Retour putten (WVP1) [m3/u]	Bemaling Sneekzijde [m3/u]	Bemaling Jourezijde [m3/u]	Bemaling Totaal [m3/u]
1	23-36 / 7-22	203	203	203	168	-835	-1094	-1929
2	geen / 7-22	259	56	165	112	0	-1337	-1337
Totale watervolumes [miljoen m3]				1.213	0.968	-4.069	-7.127	-11.196

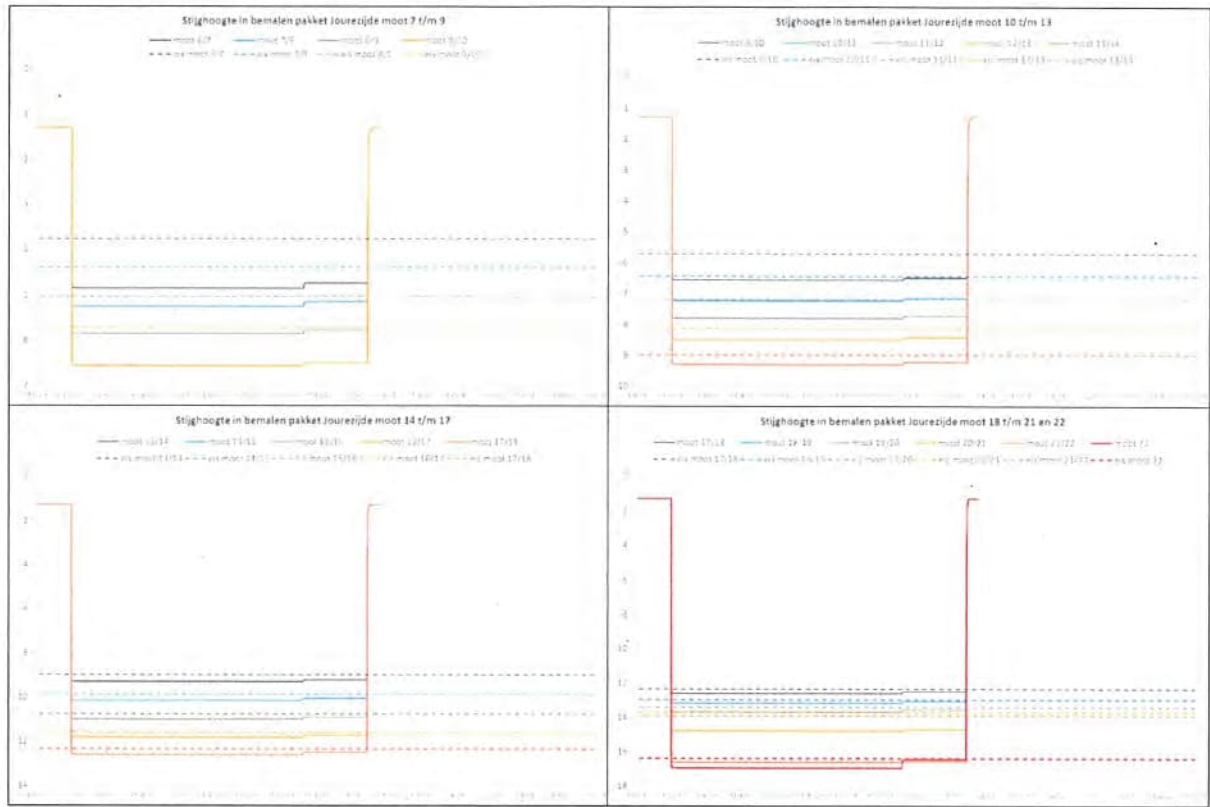
De totale benodigde bemaling voor scenario 5 bedraagt 11.2 miljoen m³, waarvan 4.1 miljoen aan Sneekzijde en 7.1 miljoen aan Jourezijde. Daarvan wordt ongeveer een vijfde deel via retourbemaling terug de grond in gebracht. De maximale retourbemaling via de putten is 168 m³/uur. Met 16 retourputten komt dat neer op ongeveer 10 m³/uur. De maximaal gehanteerde drukhoogte in de retourdrains bedraagt NAP + 2 m.

Verder optimalisatie bemaling

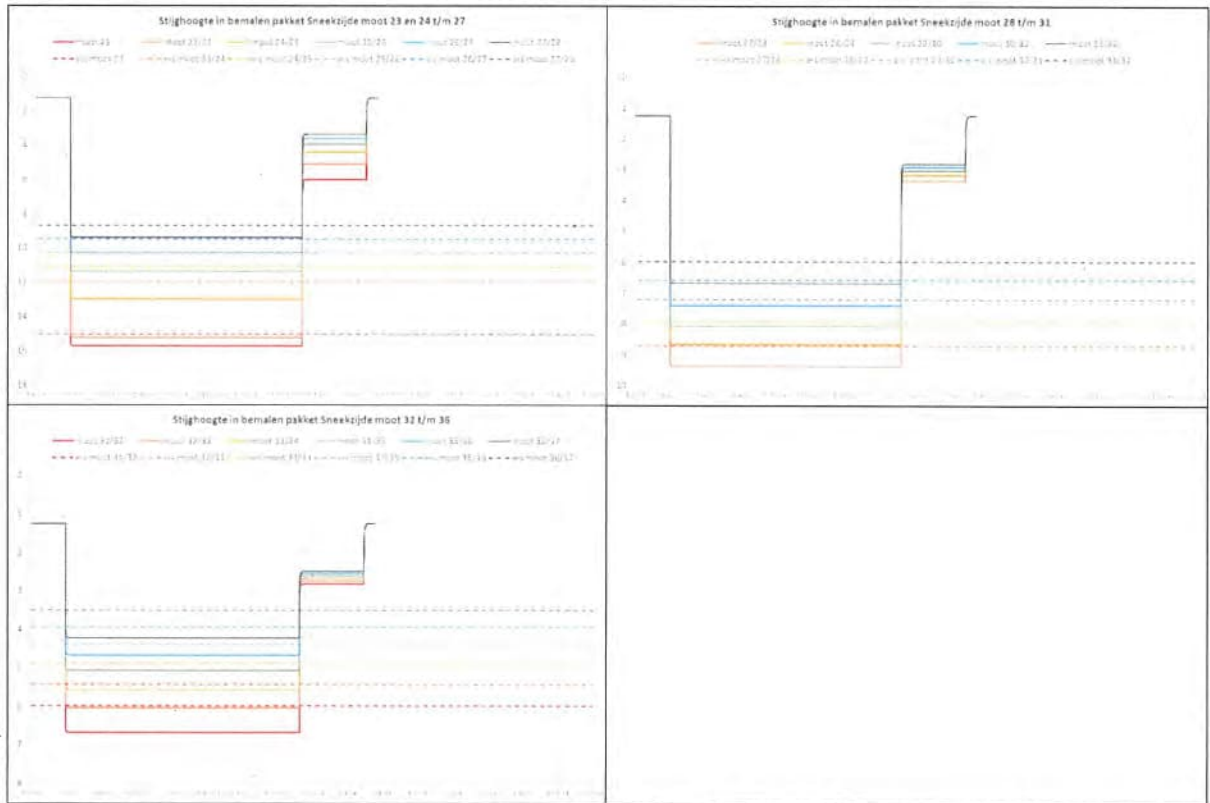
Het lijkt kansrijk om de bemaling verder te optimaliseren, zodat de totale benodigde bemaling onder de MER grens van 10 miljoen m³ kan blijven. Bijvoorbeeld als de diepere moten (inclusief de pompkelders) binnen een half jaar hersteld kunnen worden, kan de bemaling gedurende de tijd nodig voor herstel van de minder diepe moten aanzienlijk verlaagd worden. Daardoor zal de totale bemaling minder dan 10 miljoen m³ bedragen. Het is aan RWS in overleg met de aannemer van de herstelwerkzaamheden ter beoordeling in hoeverre dit een reële mogelijkheid is.

5.3.2 Verlaging stijghoogte bij moten

Figuur 5-9 geeft een overzicht van het stijghoogte verloop onder de moten aan de Jourezijde. Figuur 5-10 doet hetzelfde voor de moten aan de Sneekzijde. De onderbroken lijnen in deze figuur geven de vereiste bemalingsstijghoogten per moot weer. Op een heel korte periode na, direct na de aanvang van de bemaling worden gedurende het gehele bemalingsscenario de vereiste stijghoogten onder bemalen moten bereikt.



Figuur 5-9 Berekende stijghoogten [m +NAP] onder de moten aan de Jourezijde voor scenario 5. De streeplijnen geven de vereiste bemalingsstijghoogten weer.



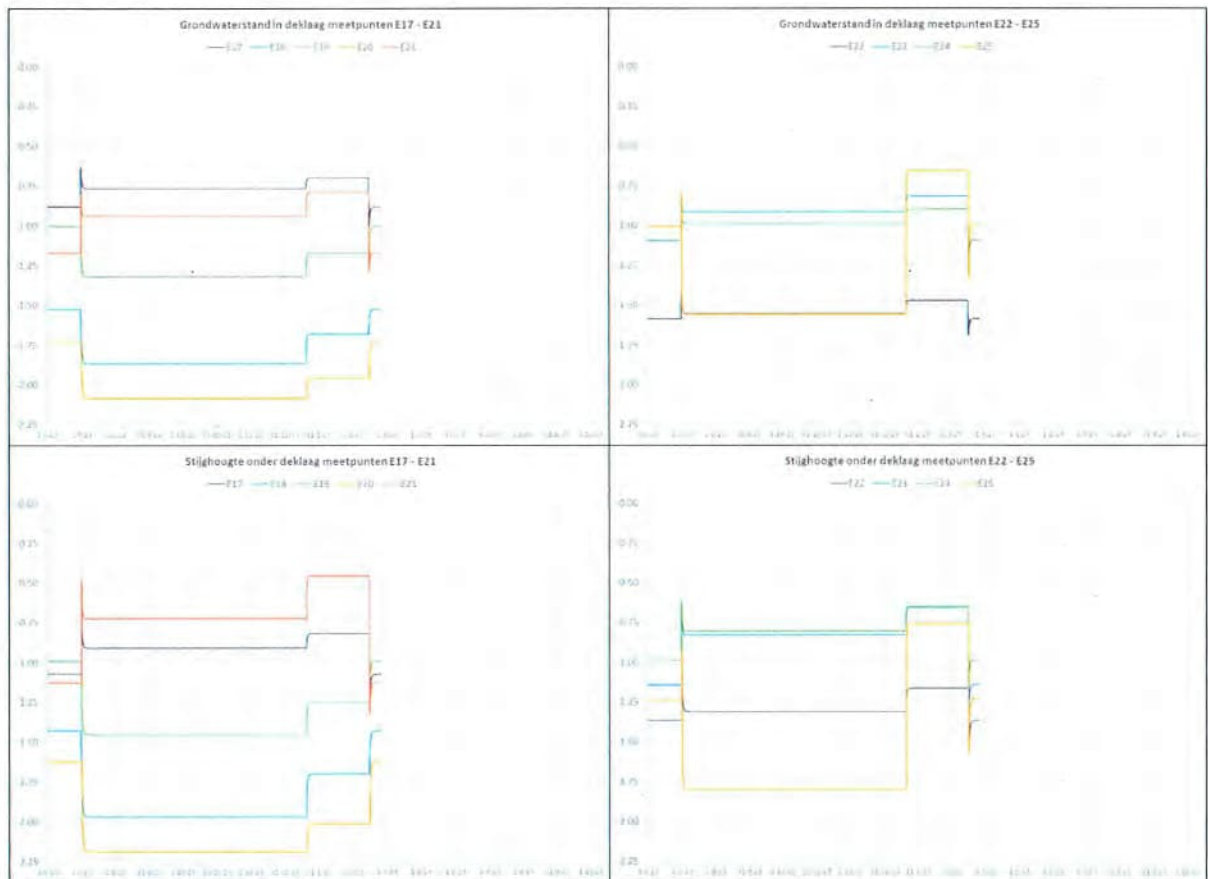
Figuur 5-10 Berekende stijghoogten [m +NAP] onder de moten aan de Sneekzijde voor scenario 5. De streeplijnen geven de vereiste bemalingsstijghoogten weer.

5.3.3 Verandering grondwaterstand en stijghoogte in tussenzandlaag bij gebouwen

Figuur 5-11 geeft voor de meetpunten E17 tot en met E25 het effect van de bemaling weer. De bovenste twee figuren doen dat voor de grondwaterstand in de deklaag. De onderste twee voor de stijghoogte in de tussenzandlaag direct onder de deklaag. Het horizontale deel van deze lijnen aan de linkerzijde van de deel-figuren geven de uitgangswaarden van de grondwaterstanden en stijghoogten weer. De grondwaterstanden en stijghoogten worden in het model alleen beïnvloed door bemaling en retourbemaling. De grondwaterstanden komen locaties E18, E19 en E20 enkele cm meer dan 0.25 m lager uit dan hun aanvangswaarden. Bij meetpunt E25 worden de grondwaterstanden verder omlaag getrokken, tot ruim 0.50 m. Dat duidt erop dat mogelijke aanvullende retourbemaling nodig is. Bij de andere meetlocaties blijkt uit de grafiek dat de retourbemaling wel voldoende is om de verlagingen te beperken. Bij E17 en E21 gaat de grondwaterstand omhoog. Dat betekent dat de retourbemaling hier wat minder kan worden.

Hetzelfde geldt voor de verlagingen van de stijghoogte in de tussenzandlaag, die bij meetpunten E18, E19 en E25 net iets meer dan 0.50 m bedragen.

Het finetunen van de retourbemaling is door de grote tijdsdruk op dit onderzoek nog niet uitgevoerd kunnen worden. Dit zal mogelijk leiden tot een wat grotere totale retourbemaling en daardoor mogelijk een daarmee samenhangende lichte toename van de totale bemaling. Figuur 5-9 en Figuur 5-10 laten zien dat de vereiste stijghoogten onder de moten in de meeste gevallen ruimschoots gehaald worden. Dat betekent dat wat extra retourbemaling niet bij voorbaat zal leiden tot het niet bereiken van de vereiste stijghoogten en er dus mogelijk geen toename van de bemaling nodig is.



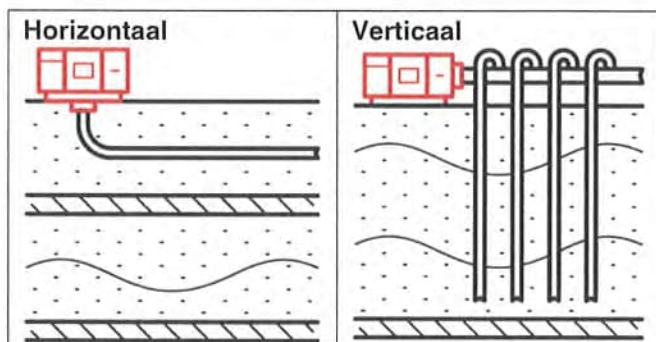
Figuur 5-11 Berekende grondwaterstanden (boven) en stijghoogten (onder) [m +NAP] ter plaatse van de meetpunten E17 t/m E25 voor scenario 5.

5.4 Retourbemaling

Waterkwantiteit

Retourbemaling kan zodanig ingericht worden dat verlagingen van grondwaterstand in de deklaag en van stijghoogte in de tussenzandlaag gemitigeerd kunnen worden. De resultaten, gepresenteerd in Figuur 5-8, laten zien dat tijdens de zwaarste bemalingsfasen na aanvang (gelijktijdig de vier diepste moten aan beide zijden) en aan het eind (gelijktijdig de beide pompkelders) in geen van de meetpunten de verlaging van de grondwaterstand in de deklaag meer dan 0.25 m en de verlaging van de stijghoogte in de tussenzandlaag meer dan 0.50 m bedraagt. De resultaten, gepresenteerd in Figuur 5-11, laten zien dat er in dit scenario nog wat neer retourbemaling nodig is.

Retourputten geïnstalleerd, bestaande uit PVC buizen met een diameter van bijvoorbeeld 160 mm die voldoende diep worden aangebracht en vervolgens omstort met filtergrind. Deze retourputten worden aangesloten op een ringleiding. Aan het einde van de ringleiding wordt een overstortinstallatie geplaatst waarin eventueel overtollig water wordt geloosd.



Figuur 5-12 Twee vormen van retourbemaling.

Waterkwaliteit

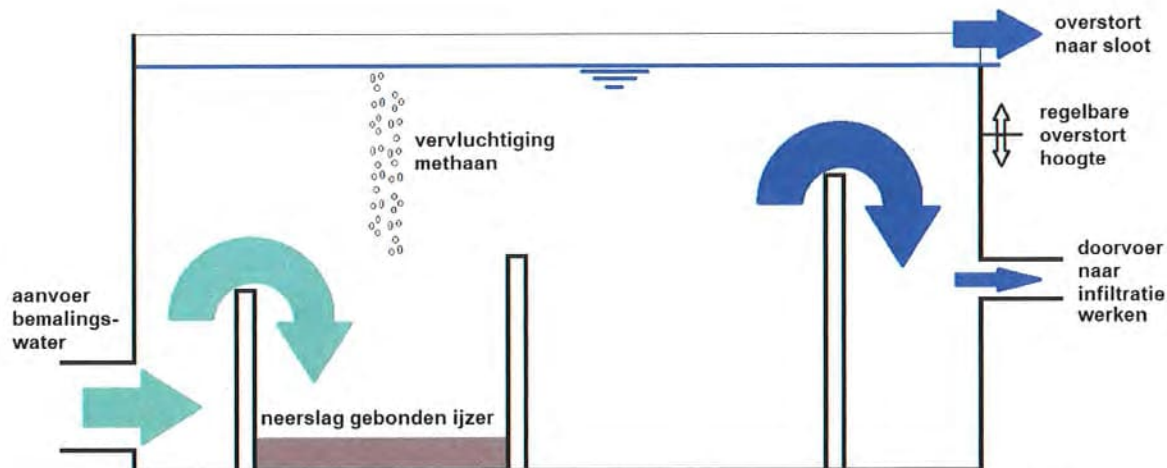
De metingen van de waterkwaliteit duiden op hoge ijzergehaltes (tot 80000 µg/l) en methaan (tot 3500 µg/l). Beide stoffen staan erom bekend dat ze filters van infiltratiedrains en putten kunnen doen dichtslaan.

Om het ijzer uit het bemalen grondwater te halen is een bezinkbassin nodig voor de ontijzering en de bezinking van gesuspendeerd materiaal. Voor het neerslaan van ijzer is nog wel een additief nodig.

IJzer kan op verschillende manieren geoxideerd en daarna verwijderd worden:

- Door middel van beluchting. Het beluchten van water kan op verschillende manieren gebeuren:
 - Gebruik maken van een groot bassin waarin het water verneveld wordt. Door deze verneveling komt het water met veel zuurstof in contact en kan het ijzer omgezet worden naar de bezinkbare vorm.
 - Aanbrengen van luchtcompressor op een tank of een vat waarin het ijzerhoudend water zit.
- Bij een chemisch systeem gebeurt de oxidatie door middel van chemicaliën kaliumpermanganaat, ozon of chloor in plaats van zuurstof afkomstig van de beluchting.

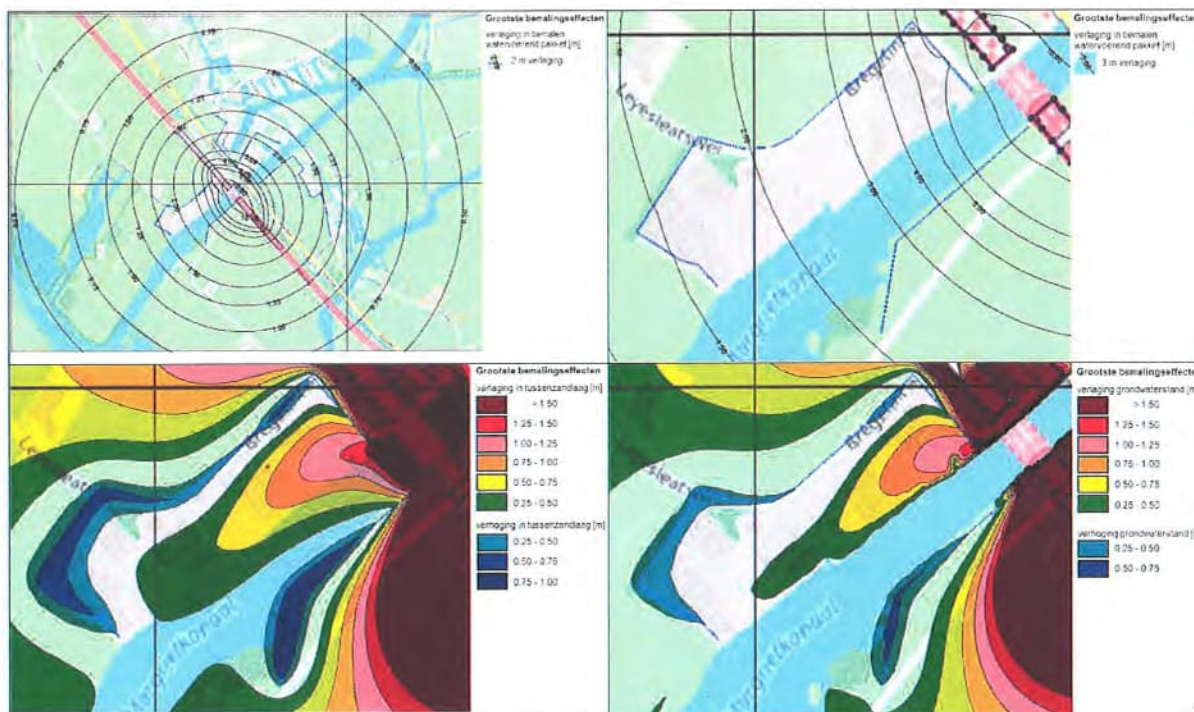
Als infiltratie van het onttrokken grondwater via een open bezinkbassin loopt, zal het eventueel aanwezige methaan vanzelf vervluchtigen.



Figuur 5-13 Schematisch overzicht van een mogelijke oplossing voor ontijzering van bemalingswater via een groot bassin.

5.5 Aanvullende mitigerende maatregelen

Bij het inrichten van de retourbemaling is rekening gehouden met zichtbare infrastructuur (wegen, sloten, e.d.) en met perceelgrenzen. Zo zijn de infiltratiedrains in het model zoveel mogelijk in groenstroken, randen van weilanden en langs wegen gelegd en zijn ze niet aangebracht op percelen van omwonenden. Met name voor het bedrijventerrein aan de Sneekzijde van het kanaal direct ten westen van de tunnel, waarop ook enkele woningen staan, is ervan uitgegaan dat er op dat terrein geen infiltratievoorzieningen kunnen worden aangelegd. Rondom dit terrein is in het model een infiltratiedrain aangelegd, maar aan de zuidelijke rand, langs het kanaal, ligt daarom in het model geen infiltratievoorziening. Die is aangelegd aan de andere zijde van het kanaal, waar wel ruimte beschikbaar is. De grootste bemaling vindt plaats direct naast de tunnel, waar de diepste moten liggen. De afstand van de gebouwen, die daar het dichtstbij staan, tot de bemalingsbronnen is maar iets meer dan 50 m. Figuur 5-14 laat het effect zien voor de zwaarste bemalingsfase (scenario 5).



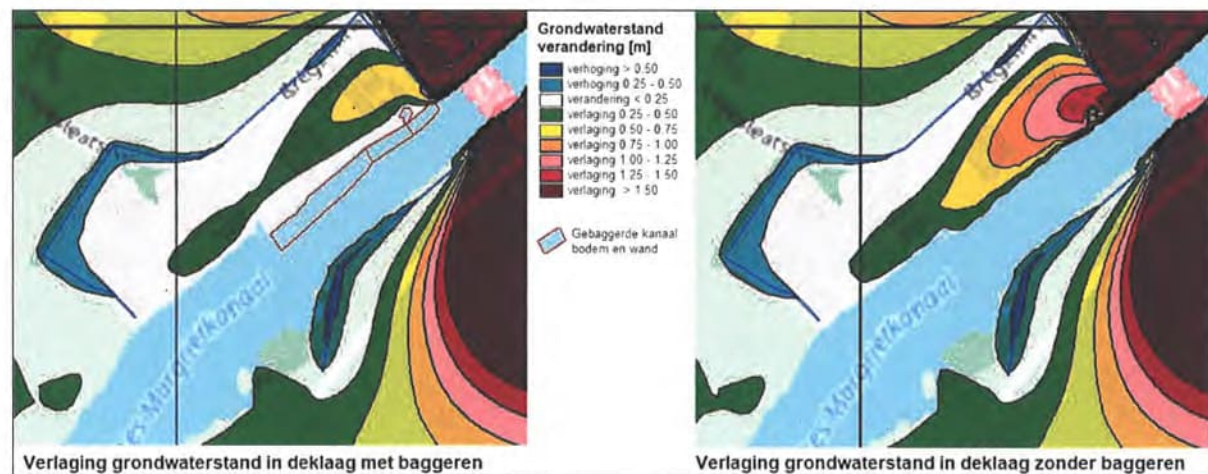
Figuur 5-14 Overzicht van de berekende verlagingen en verhogingen tijdens de zwaarste bemaling (scenario 5). Linksboven voor het bemalen watervoerend pakket. Rechtsboven ook, maar ingezoomd op het bedrijventerrein. Linksonder voor de tussenzandlaag. Rechtsonder voor de deklaag.

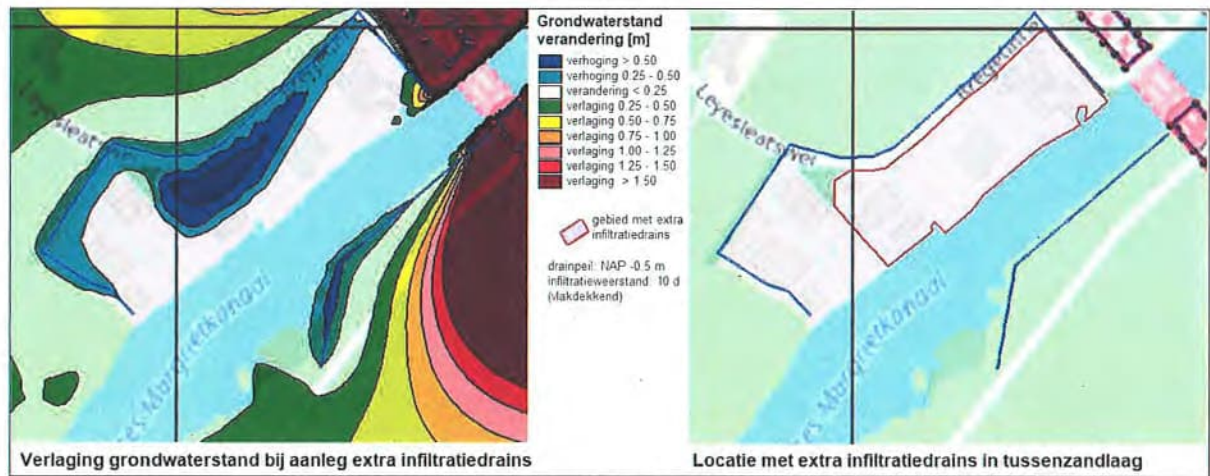
Uit deze figuur blijkt dat de retourbemaling zoals die nu is ingericht niet kan voorkomen dat er tijdelijk verlagingen van de grondwaterstand en van de stijghoogte in de tussenzandlaag zullen optreden die ter plekke van de bebouwing beduidend groter zijn dan 0,25 m (deklaag), respectievelijk 0,50 m (tussenzandlaag). Daardoor is zettingsschade niet op voorhand uit te sluiten. Dit kan wel voorkomen worden als er retourbemaling op het bedrijventerrein kan worden toegepast.

Andere mogelijke mitigerende maatregelen, die de effecten in het algemeen en meer specifiek op het bedrijventerrein helpen beperken, kunnen zijn:

- Het tijdelijk opzetten van peilen van polderwatergangen in de directe omgeving. De verwachting is dat het effect hiervan onvoldoende is om de bovenbeschreven verlagingen te voorkomen.
- Het baggeren van de bodem en wanden van het Prinses Margrietkanaal ter plekke van het bedrijventerrein, waardoor de weerstand tussen kanaal en tussenzandlaag sterk verlaagd wordt. De verwachting is dat het uitvoeren van deze werkzaamheden net voor en/of tijdens de zwaarste bemalingsfasen voldoende effect sorteren om de bovenbeschreven verlagingen te voorkomen. Door het grote peilverschil tussen kanaalwater en grondwater in de tussenzandlaag zal de bodem van het kanaal na baggeren weer vrij snel dichtslibben. Enerzijds betekent dit dat het baggeren afgestemd moet worden met de bemaling. Anderzijds dat na afloop van de bemaling de oude situatie zich door dit snelle dichtslibben weer relatief snel zal herstellen.
- Aanleg van infiltratieputten en/of infiltratiedrains op het bedrijventerrein. Dit vereist afstemming met bewoners en gebruikers van het bedrijventerrein.

Figuur 5-15 geeft het rekenresultaat van enkele oriënterende stationaire berekeningen naar twee van deze mogelijk additionele maatregelen. Hieruit blijkt dat met additionele mitigerende maatregelen de effecten van de bemaling op de verlagingen kunnen worden gecompenseerd.





Figuur 5-15 Effect van additionele maatregelen op de verlagingen van de grondwaterstand bij de zwaarste bemaling (scenario 5). Linksboven de resterende verlagingen na baggeren. Rechtsboven de stationair berekende verlagingen zonder additionele maatregelen. Linksonder de resterende verlagingen na additionele retourbemaling. Rechtsonder het gebied met additionele retourbemaling.

Als er in praktijk dergelijke additionele maatregelen niet getroffen kunnen worden, moet worden onderzocht in hoeverre de panden op deze locatie gevoelig zijn voor zettingsschade en monitoring van grondwater en van zettingen op deze locatie vereist.

5.6 Conclusies en aanbevelingen bemaling

5.6.1 Conclusies bemaling

1. Er zijn drie bemalingsscenario's doorgerekend. Een bemalingsscenario (3) waarbij de bemaling steeds 1 moot wordt doorgeschoven en wat drie keer herhaald wordt, een bemalingsscenario (4) waarbij in een keer steeds 4 moten worden doorgeschoven en een bemalingsscenario (5) waarbij alle moten gelijktijdig bemalen worden totdat de herstelwerkzaamheden klaar zijn. De doorlooptijd van bemalingsscenario 3 is ingeschat op 1 jaar en 3 maanden, die van bemalingsscenario 4 op 1,5 maand langer. Beide scenario's resulteren in een totale bemaling van ongeveer 13,4 miljoen m³. Dat is ongeveer de helft van de hoeveelheid bemaling ten tijde van de aanleg van de tunnel. De doorlooptijd van scenario 5 is ingeschat op 8,5 maand en een totale bemaling van ongeveer 11,2 miljoen m³.
2. Middels retourbemaling zal ongeveer een zesde tot een vijfde van deze hoeveelheid bemalen water terug de grond in worden gebracht om ontoelaatbare grondwaterverlagingen te kunnen mitigeren. De rest van het bemalen water wordt geloosd op het oppervlaktewater. Retourbemaling zal voornamelijk via infiltratiedrains en/of infiltratieputten direct onder de deklaag geschieden. Alleen tijdens bemaling van de diepste moten aan Sneekzijde is extra retourbemaling via putten in het bemalen watervoerend pakket nodig. Voor scenario 5 is dat gedurende de gehele uitvoering.
3. Retourbemaling zal in scenario 5 gepaard gaan met grotere debieten dan in scenario's 3 en 4. De totale hoeveelheid retourbemaling zal door de veel kortere doorlooptijd wel een lager zijn.
4. De samenstelling van het grondwater vereist behandeling van het water voordat het geschikt is om de retourbemaling in te gaan. Met name het hoge ijzergehalte en waarschijnlijk in het water aanwezig methaan kunnen anders leiden tot snelle verstopping van de filters van de retourbemalingen. Ook voor lozing van de rest van het bemalen water op oppervlaktewater is uit oogpunt van waterkwaliteit behandeling van het bemalen water nodig.
5. Retourbemaling op openbaar terrein kan verlagingen van grondwaterstand in de deklaag en stijghoogte in de tussenzandlaag bijna overal voldoende mitigeren om de kans op schade door zettingen bij in het gebied aanwezige bebouwing voldoende klein te houden. Alleen bij de gebouwen op het noordoostelijke deel van het bedrijventerrein kan dat niet tijdens alle bemalingsfasen gerealiseerd worden, waardoor de kans op schade door zettingen niet op voorhand uitgesloten kan worden. In scenario 5 is die kans groter dan in scenario's 3 en 4.
6. Aanvullende mitigerende maatregelen zijn nodig om in die gebieden tijdens bemaling van de diepe moten aan Sneekzijde de grondwaterverlagingen verder te beperken. Daarbij kan gedacht worden aan aanleg van retourbemaling op het bedrijventerrein, indien toegestaan, of baggeren van de wand en bodem van het kanaal tijdens de bemalingen van de diepere moten aan Sneekzijde.
7. In ieder geval is uitbreiding van de monitoring van grondwaterverlaging en zetting nodig ter plaatse van het meest noordoostelijke gebouw op het bedrijventerrein, zodat kan worden aangetoond hoeveel de grondwaterverlaging is en hoeveel zetting er daarbij optreedt.

5.6.2 Aanbevelingen bemaling

1. Het gebruikte grondwatermodel is qua geohydrologische bodemopbouw over het gehele model uniform van opzet, gebaseerd op de gemiddelde laagopbouw in de omgeving van de tunnel. Alleen direct rondom de tunnel en het kanaal is daarvan afgeweken. Dit is een bewuste keuze geweest in overleg met RWS, veroorzaakt door de enorme tijdsdruk om snel met resultaten te komen. Het gebruikte model is vergeleken met de opgetreden verlagingen door de bemaling tijdens de aanleg van de tunnel en het model lijkt de verlagingen door de bemaling enigszins te overschatten. Inmiddels is de geologie in de regio rondom de tunnel gedetailleerd onderzocht en in kaart gebracht. Daarnaast zijn er monitoringspunten ingericht, die sinds eind januari 2023 data leveren. Het verdient aanbeveling de variabiliteit in de geologische laagopbouw in het model op te nemen en het model te kalibreren op gemeten stijghoogten en grondwaterstanden. Daarmee kan

het grondwatermodel beter geschikt worden gemaakt om op detailniveau de effecten en de bemaling en retourbemaling te kwantificeren.

2. Het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket onder de Drenthe klei is gebaseerd op een pompproef van bijna 50 jaar geleden, voor de aanleg van de tunnel. Door de tunnel is de lokale situatie sterk veranderd. Het verdient daarom aanbeveling om, voordat met bemaling begonnen wordt, een nieuwe pompproef uit te voeren in een van de geplande putten bij de diepste moten. Monitoringspunten daarvoor zijn inmiddels al voldoende aanwezig en als voor bemaling gekozen wordt kan de proefput gebruikt worden als een van de pompputten. Op basis van de resultaten van de pompproef kan het model worden aangepast, waardoor de effecten van de bemaling beter kunnen worden bepaald. Daarmee kan de overschatting van de effecten van het huidige grondwatermodel worden verkleind en kan de putconfiguratie voor de bemaling en retourbemaling worden geoptimaliseerd. Daardoor kan de totale hoeveelheid bemaling mogelijk kleiner worden.

6 Zettingsanalyse

6.1 Vraagstelling

Door Rijkswaterstaat is de vraag gesteld, om op basis van een aan te leveren bemalingsadvies, waarbij uitgegaan wordt van een retourbemaling:

1. De zettingen in de omgeving (omgevingsinvloed) te bepalen inclusief eventuele schadeverwachting voor de aanwezige bebouwing.
2. De zettingen te bepalen ter plaatse van een aantal representatieve tunnelmotten, die op verschillende wijzen gefundeerd zijn. Het betreft moten op staal, op drukpalen en moten op trekpalen.

Daarbij wordt opgemerkt, dat de retourbemaling, op basis van eerdere bemalingsgegevens en uitgevoerde zettingsberekeningen, dusdanig is ingericht dat zoveel mogelijk rekening gehouden is met het voorkomen van zettingen die aanleiding kunnen zijn voor het optreden van schade in de omgeving van de bemaling.

Gezien de huidige fase van het onderzoek zijn conservatieve aannamen gedaan en is gerekend met in het verleden bepaalde samendrukkingsparameters.

In 2023 zijn nieuwe samendrukkingsproeven uitgevoerd. De resultaten van deze proeven geven geen aanleiding de aangehouden parameters en berekeningen aan te passen.

6.2 Situatie

De onderzijde van diepste delen van de toe-ritten en de zinktunnel bevinden zich in een zandlaag, die globaal vanaf NAP -12 m à -13,5 m begint. Direct hier boven bevindt zich over het geheel gezien een slecht doorlatende laag van circa 4 tot 6 m dik, die vaak aangeduid wordt met "Drenthe klei" of "Keileem laag". Boven deze Keileem laag bevindt zich een zandlaag van 3 tot 5 m dikte, met daar bovenop een circa 1,5 tot 3 m dikke veenlaag. Op deze veenlaag bevindt zich tot aan maaiveld een kleilaag en antropogene grond, deze varieert in dikte (0,5 – 1,5 m). In de directe omgeving van de tunnel is in beperkte mate bebouwing aanwezig (zie Figuur 6-1).

Conservatief uitgangspunt voor de berekeningen en de beoordeling van zettingsschade aan bebouwing is dat aanwezige bebouwing op staal gefundeerd is en bovendien direct op maaiveld.



Figuur 6-1: Situatie Prinses Margriettunnel, met aanwezige bebouwing in de directe omgeving.

6.3 Aanpak

Als eerste zijn historische gegevens, welke bij de bouw van de tunnel gebruikt zijn geanalyseerd. Op basis daarvan zijn keuzes gemaakt voor de te hanteren grondparameters en het te gebruiken zettingsmodel. Gekozen is om het computermodel D-Settlement v21.2 te gebruiken met het zettingsmodel Koppejan, in verband met de beschikbare parameters die in het verleden, bij aanleg van de tunnel, bepaald zijn. Op basis van het in het verleden (voor aanleg van de tunnel) uitgevoerde grondonderzoek is ook de bodemopbouw bepaald, welke is gecontroleerd en aangevuld met beschikbare gegevens uit Dino-loket en 2 recente sonderingen en boringen (2020) gemaakt ten behoeve van het gemaal Leijepolder te Oppenhuizen. Tevens is het recent uitgevoerde grondonderzoek, ten behoeve van de herstelwerkzaamheden, beschouwd. Dit betreft met name de voor zettingen representatieve locaties E17 tot en met E25 (zie Figuur 6-2 en paragraaf 6.4.3).

Voor wat betreft de grondwaterstanden en stijghoogten in de watervoerende pakketten is gebruik gemaakt van de gegevens uit hoofdstuk 2 van dit rapport. In de eerste rekensessie zijn zettingen berekend op basis van:

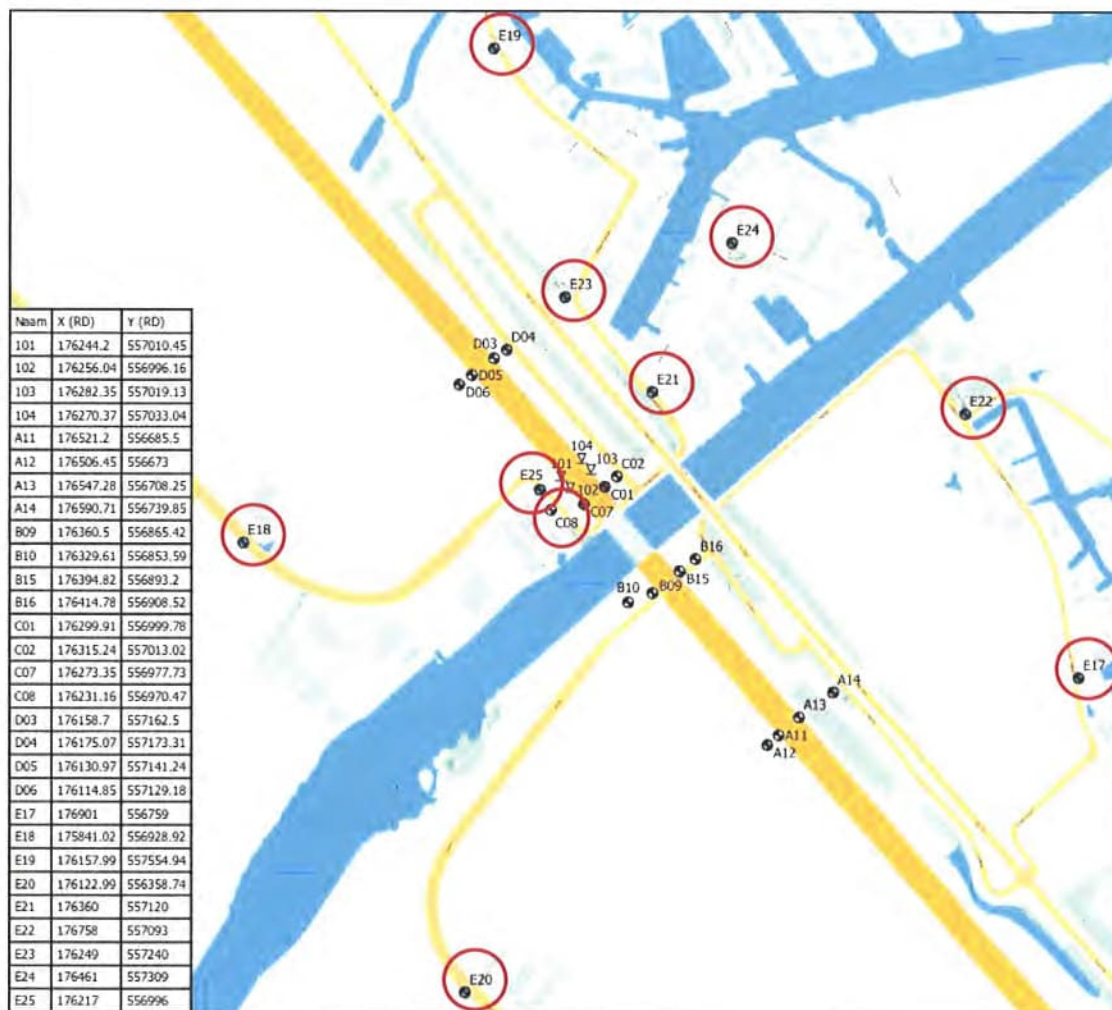
1. Een bemaling, waarbij de hoekpunten van moot 26 bemalen worden tot onderzijde vloerconstructie (NAP -10,3 m).
2. Een bemaling langs de gehele onderzijde van de tunnelbak met een stijghoogte verlaging van 1 à 2 m tot NAP -3 m.

De uitkomsten van deze berekeningen en de daarvoor gehanteerde uitgangspunten zijn gebruikt om voor de retourbemaling, scenario 3 en scenario 4, de mogelijk optredende zettingen te analyseren. Wanneer blijkt dat er mogelijk nog een risico aanwezig is op mogelijke schade door zettingen, is deze nader geanalyseerd met zettingsberekeningen. De zettingsberekeningen zijn uitgevoerd met de bij retourbemalingsscenario 3 en 4 behorende (grond)waterstandsdalingen.

In een later stadium is een optimalisatie doorgevoerd in de retourbemaling, waarbij er aan twee kanten van de tunnel tegelijkertijd wordt bemalen. Hiermee kan de uitvoerings- en bemalingsduur verkort worden (zie paragraaf 4.4.5 en 5.3). Met de uitkomsten van bemalingsscenario 5 (grondwaterstandsdalingen en stijghoogte dalingen) is zowel de omgevingsinvloed (zettingen) beschouwd, als de optredende zettingen onder de

tunnelmoten. Naast zettingsanalyses voor de tunnelmoten is ook specifiek gekeken naar optredende zettingen ter plaatse van het zuidwestelijke bedrijventerrein. Reden hiervoor is dat uit de bemalingsberekeningen blijkt dat hier de grondwaterstandsdeling en stijghoogte dalingen relatief groot zijn in combinatie met de aanwezige bebouwing.

Om de omgevings-analyse te kunnen uitvoeren zijn voor relevante punten in de omgeving van de tunnel, is, op basis van de retourbemalingsscenario's, het (grond)waterstandsverloop gedurende de bemaling bepaald. Op basis van dit verloop is geanalyseerd of er een risico op zettingsschade is. De punten waarvoor dit gedaan is zijn E17 tot en met E25.



Figuur 6-2: Situatie met onderzoekslocaties t.b.v. zetting bebouwing.

Daarnaast zijn voor het bepalen van de zettingen onder de tunnelmoten, ten behoeve van het bemalingsscenario 5, de moten 3, (5), 12, 26, 36(38) en 45 beschouwd.

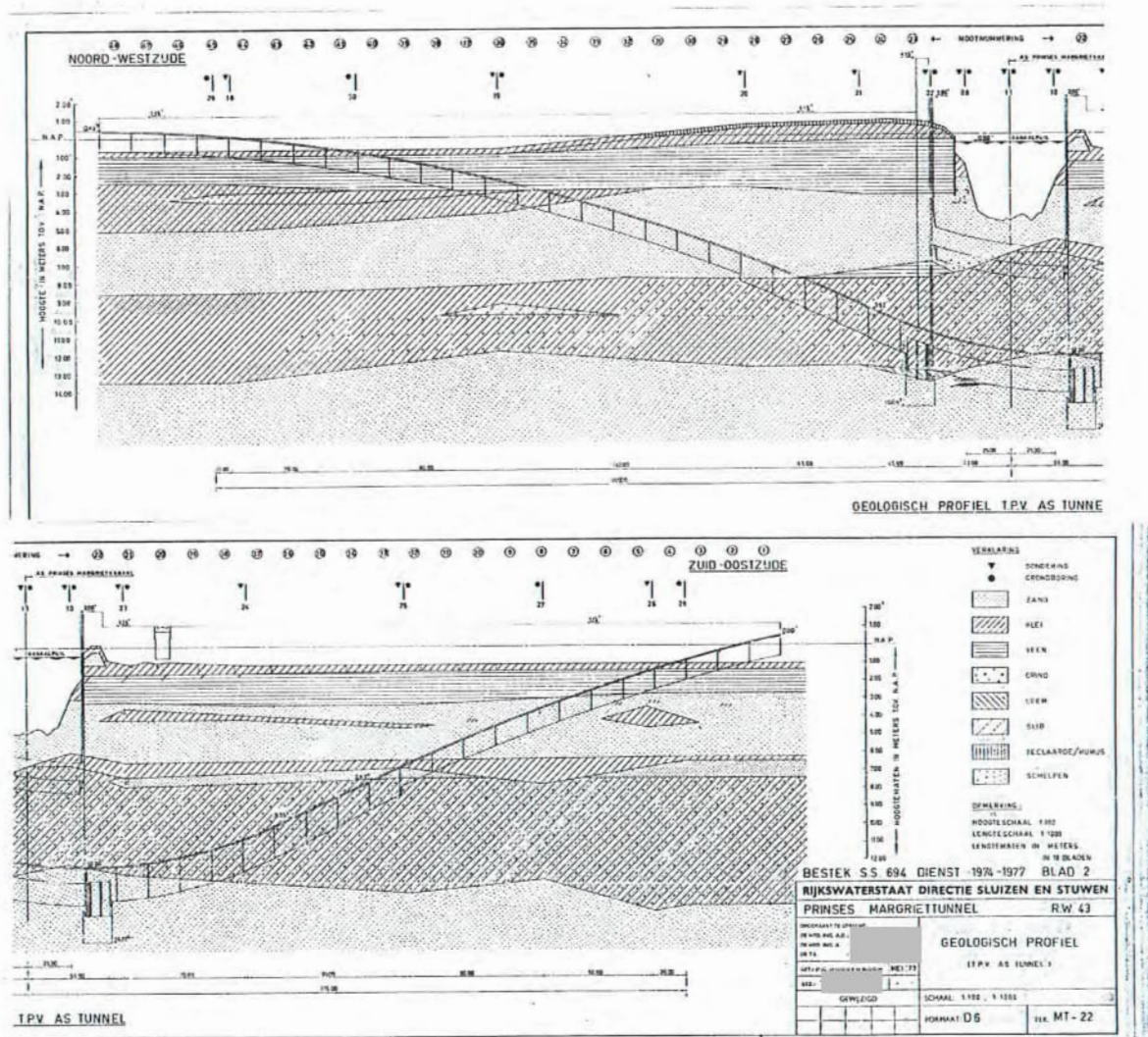
Bij de analyse is tevens het grondonderzoek, dat ter plaatse van de aangegeven punten E17 tot en met E25 is uitgevoerd, beschouwd. Ter informatie zijn de uitgevoerde boringen in de bijlage C opgenomen. Voor de analyse en berekeningen van het zuidwestelijke bedrijventerrein is tevens onderzoekspunt C08 beschouwd.

6.4 Uitgangpunten berekeningen

6.4.1 Grondonderzoek rekenmodel en parameters

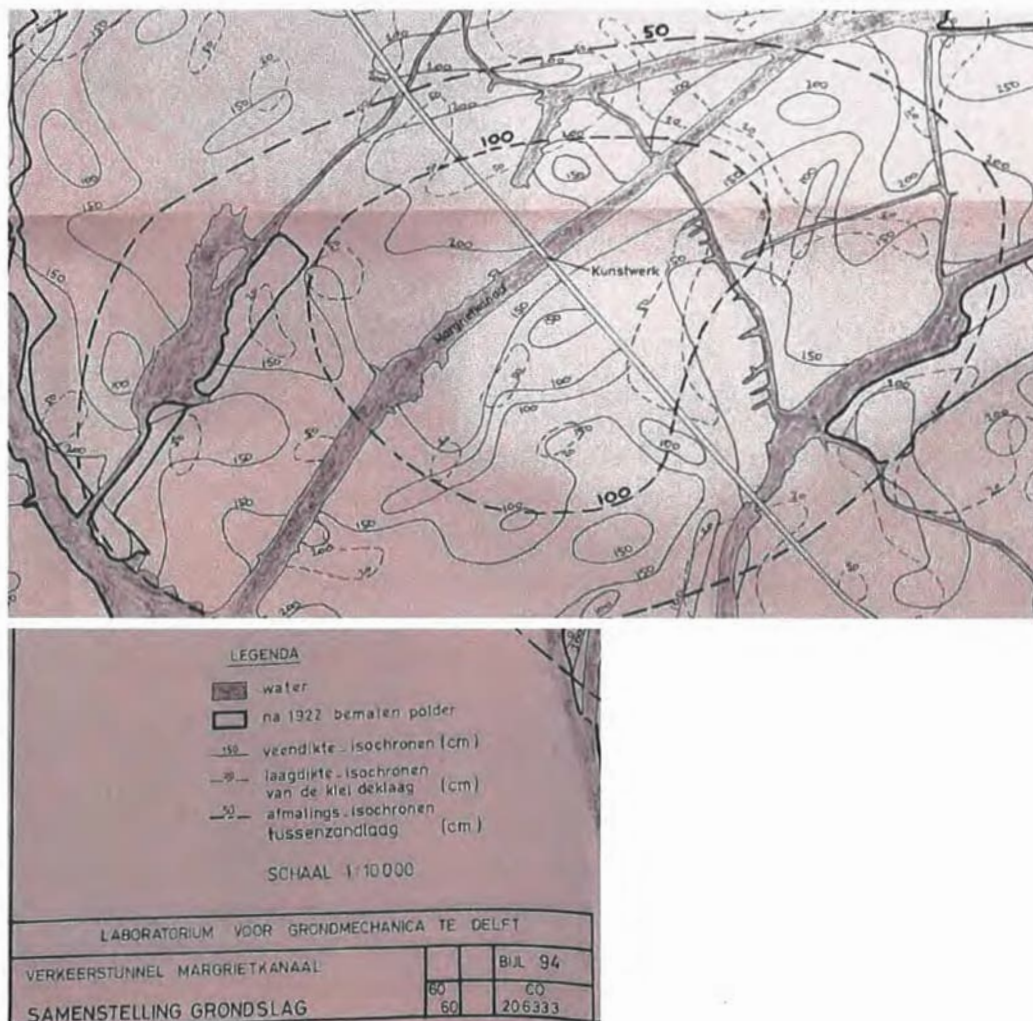
6.4.1.1 Grondonderzoek

Ten behoeve van de ondergrondschematisatie is in eerste instantie gebruik gemaakt van beschikbare gegevens uit de periode van aanleg van de Prinses Margrietunnel. Dit betrof onder andere het geotechnische lengteprofiel, dat in 1973, op basis van het toen uitgevoerde grondonderzoek, is opgesteld. Ook is uit die periode een kaart beschikbaar met laagdiktes van het veen en de klei-deklaag. Dit onderzoek is ook gebruikt ten behoeve van het berekenen van de zettingen onder de tunnelmoten.



Figuur 6-3: Geotechnisch lengteprofiel Prinses Margrietunnel 1973.

5.1.2.e

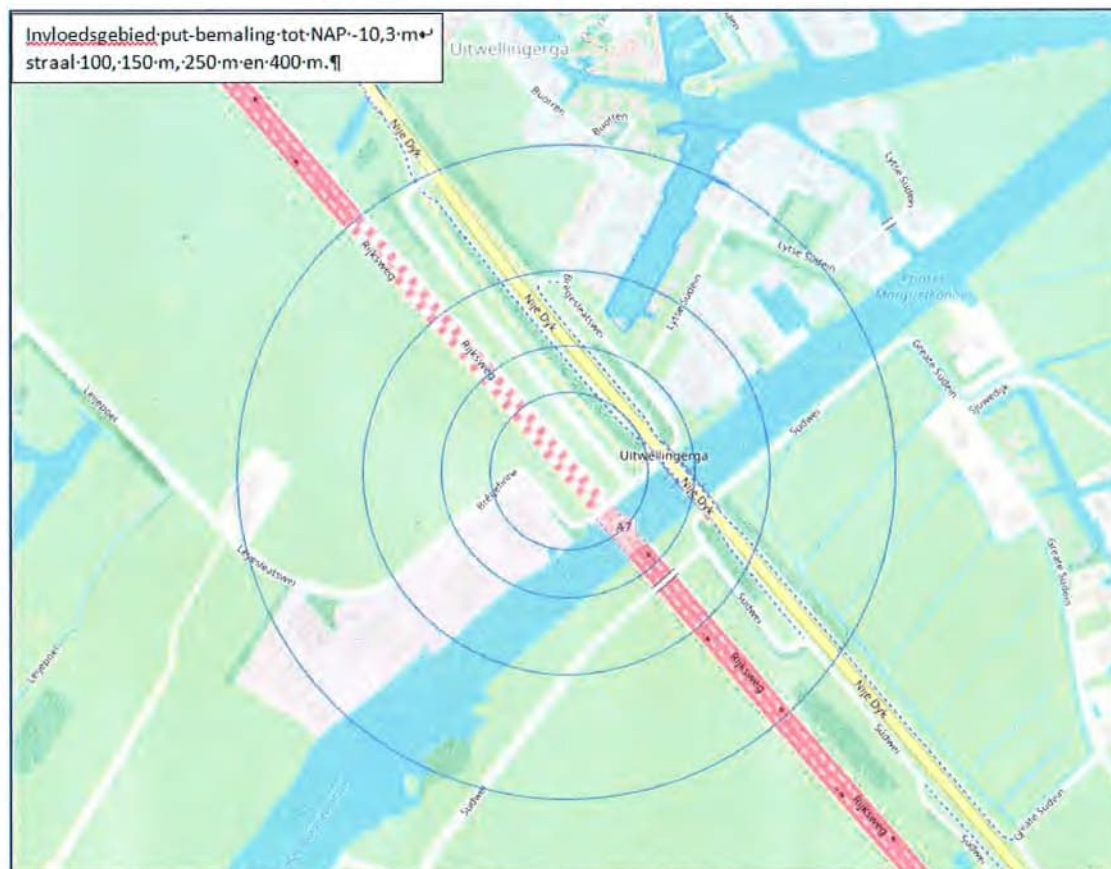


Figuur 6-4: Laagdiktes klei-deklaag en onderliggend veenpakket.

Naast de historische gegevens zijn de recentere sondeer- en boorgegevens vanuit dinoloket/BRO bekeken en is gebruik gemaakt van het grondonderzoek, dat in 2020 is uitgevoerd ten behoeve van de nieuwbouw van het gemaal Leijepolder te Opperhuizen, uitgevoerd door Wiertsema en Partners (VN-769381-1, d.d. 1 oktober 2020). Het gemaal bevindt zich op circa 400 m afstand van Rijksweg A7 en 600 m afstand van tunnelmoot 26 van de Prinses Margrietunnel. Dit onderzoek en de gebruikte boringen ter plaatse van de onderzochte locaties E17 tot en met E25 zijn in de bijlagen opgenomen.

6.4.2 Bebouwing

In de directe omgeving van de tunnel en de omhooggekomen moot 26 is in beperkte mate bebouwing aanwezig. In onderstaande figuur is de bebouwing weergegeven binnen een straal van 400 m vanaf tunnelmoot 26.



Figuur 6-5: Aanwezige bebouwing in de omgeving van tunnelmoot 26.

Voor de beoordeling van de kans op mogelijke zettingsschade, is als conservatief uitgangspunt gehanteerd, dat de betreffende bebouwing gefundeerd is op staal, en bovendien direct op maaiveld.

Uit de eerder uitgevoerde berekeningen (put bemaling moot 26 tot NAP -10,30 m) is gebleken, dat op een afstand van 250 m of meer van de bemaling van moot 26, geen zettingsschade aan de aanwezige bebouwing optreedt ten gevolge van de bemaling. De gehanteerde belastingsituatie voor die berekeningen (grondwater- en waterspanningsdalingen ten gevolge van de bemaling en de tijdsduur) zijn gebruikt voor de analyse van zettingen en zettingsschade als gevolg van de retourbemaling.

6.4.3 Rekenmodel en modelschematisaties

Voor het berekenen van zettingen is gebruik gemaakt van het computermodel D-Settlement v21.2. Daarbij is, in verband met de beschikbare parameters die in het verleden bepaald zijn, gebruik gemaakt van het zettingsmodel Koppejan en consolidatie conform de theorie van Terzaghi. In de berekeningen is er vanuit gegaan, dat de betreffende ondergrond in het verleden, bij de aanleg, reeds een grotere belasting heeft gehad als gevolg van de destijds langdurige en diepere bemaling dan nu voorzien is. Dit is verwerkt door het aanhouden van een grensspanning in de berekening. Bij belasting onder de grensspanning reageert de grond stijf, waardoor de optredende zettingen minder zullen zijn dan bij niet voorbelaste grond.

Omgevingsbeïnvloeding

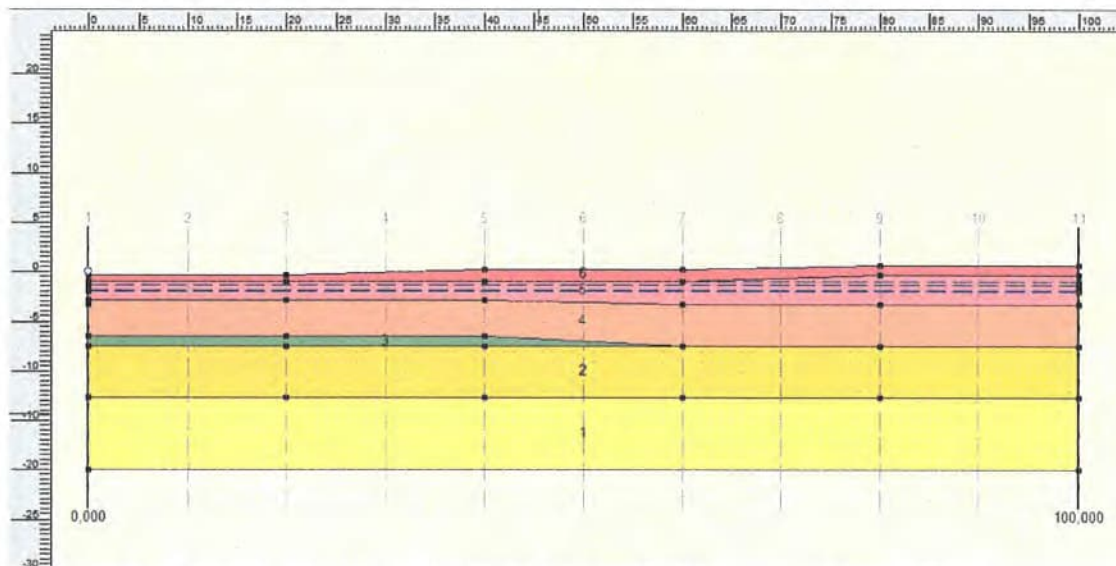
Op basis van het beschikbare en geanalyseerde grondonderzoek en de maaiveldhoogtes uit AHN is onderstaande in eerste instantie een modelschematisatie gemaakt ten behoeve van het berekenen van de zettingen als gevolg van de bemaling van moot 26. (zie bijlage B).

De betreffende schematisatie is aangepast ten behoeve van het berekenen van de zettingen op de maatgevend gebleken locatie E25. Hiertoe is de linkerzijde van het oorspronkelijk geschematiseerde profiel aangepast:

Aan de linkerzijde achtereenvolgend (in diepte):

- Maaiveld op NAP -0,3 m oplopend naar +0,3 m en +0,7 m aan de rechterzijde.
- Toplaag, antropogeen/klei tot NAP -1,0m, rechts NAP -0,30 m.
- Veenlaag tot NAP -2,8 m, rechts NAP -3,3 m.
- Tussenzandlaag tot NAP -6,5 m, rechts -7,5 m.
- Zandige kleilaag tot NAP -7,5 m, rechts ontbreekt deze laag.
- Keileem laag tot NAP -12,7 m.
- Onder de keileem het pleistocene vaste zand.

De rechterzijde van het profiel is grotendeels gelijk gehouden aan de eerdere schematisatie.



Figuur 6-6: Invoer, ondergrond schematisatie ten behoeve van D-Settlement v21.2, locatie E25.

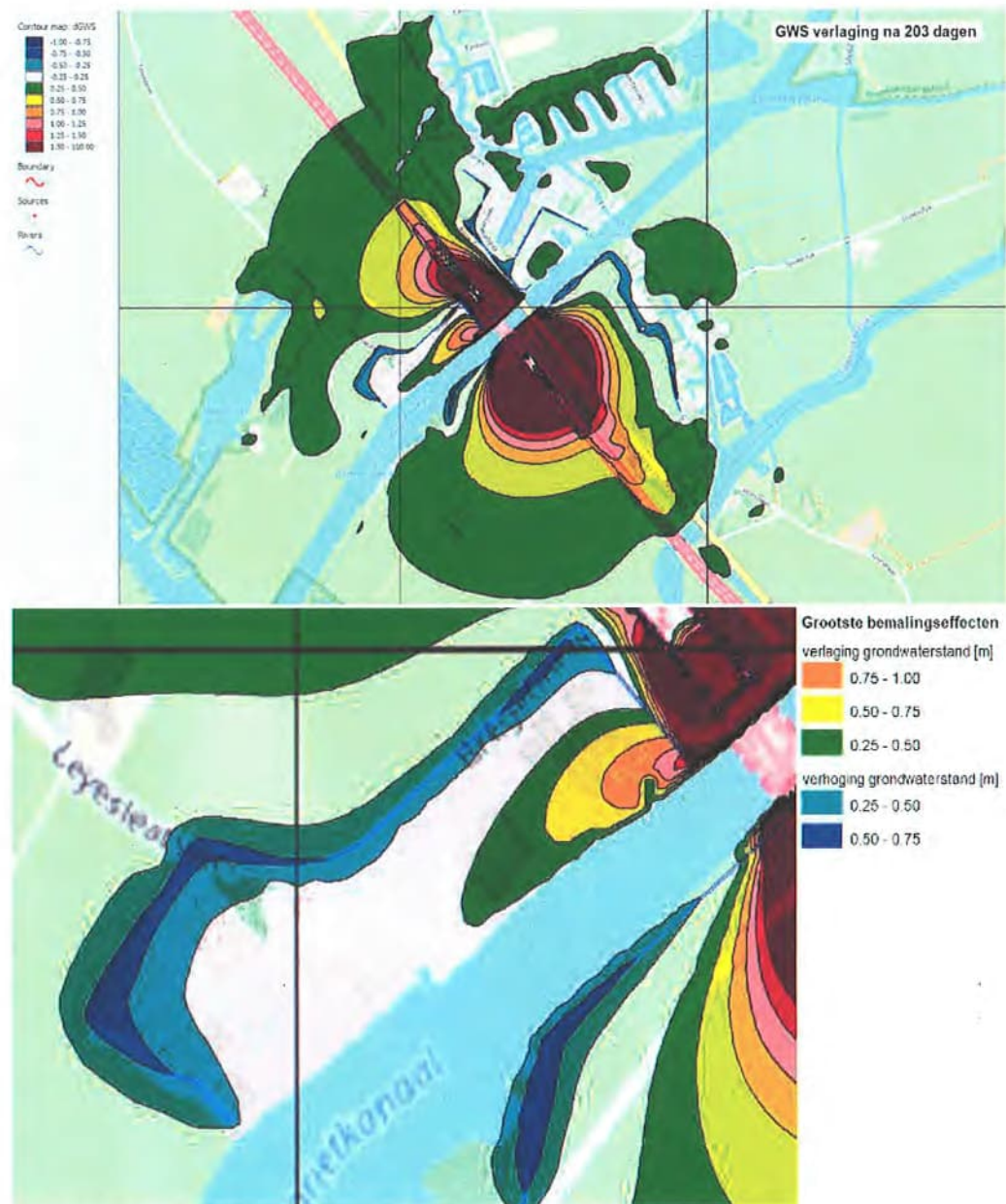
De maaiveldhoogte is oorspronkelijk afgeleid uit het AHN4 (Algemeen Hoogtebestand Nederland). Voor de berekening van de zettingen op de maatgevend gebleken locatie E25, is uitgegaan van de daar aanwezige maaiveldhoogte van NAP +0,30 m (rekenverticaal 5, 6 en 7).

Bedrijventerrein (zuidwest van tunnel)

Ten behoeve van het zuidwestelijke bedrijventerrein zijn separaat zettingsberekeningen uitgevoerd omdat dit op basis van de bemalingsberekeningen een mogelijk zettingsgevoelige locatie is gebleken. In onderstaande figuur is de omgevingsbeïnvloeding (grondwaterstands daling) weergegeven wat berekend is voor bemalingsscenario 5. Daarbij is tevens ingezoomd op het bedrijventerrein.

De maaiveldhoogte is afgeleid uit AHN4 en ten behoeve van de bebouwing en mogelijk optredende zetting zijn voor 5 representatieve punten in het gebied de grondwaterstand en stijghoogte lijnen tijdens bemalingsscenario 5 bepaald. Dit betreft met name de aanwezige bebouwing het dichtst bij de tunnel gelegen. De betreffende gegevens zijn in D-Settlement geschematiseerd ten behoeve van het berekenen van de zettingen ter plaatse en het kunnen inschatten van de kans op schade aan de aanwezige bebouwing. Hiertoe is tevens gebruik gemaakt van het beschikbare (lokaal aanwezige) grondonderzoek. Op basis van het grondonderzoek is gekozen voor een uniforme grondopbouw, waarmee met name de verschilzettingen berekend kunnen worden als gevolg van het (sterke) verloop van de grondwaterstand en de stijghoogten in het gebied. De zettingen zijn elke 5 m berekend. In de analyse dient er rekening mee gehouden te worden dat er ook verschilzetting op kan treden

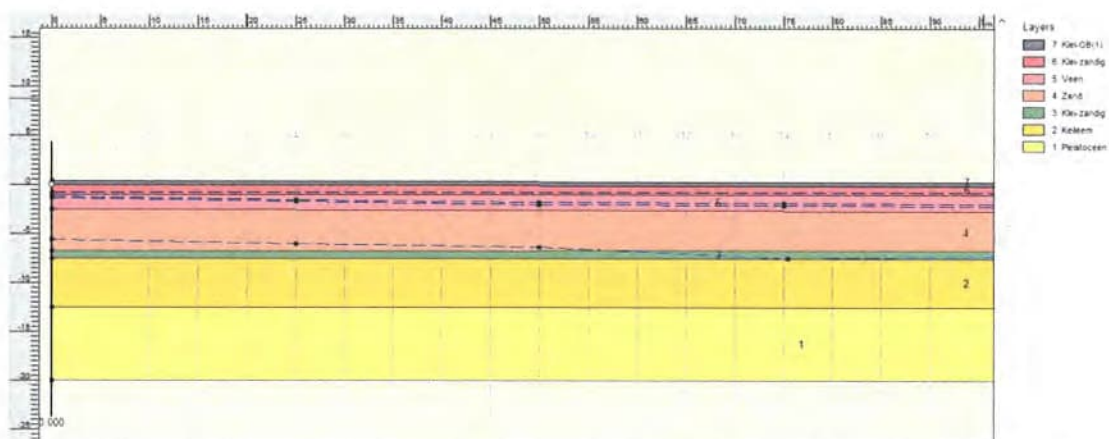
ten gevolge van verschil in grondopbouw over relatief korte afstand en/of verschil in funderingswijze.



Figuur 6-7: Omgevingsinvloed (grondwater bedrijventerrein ZW).



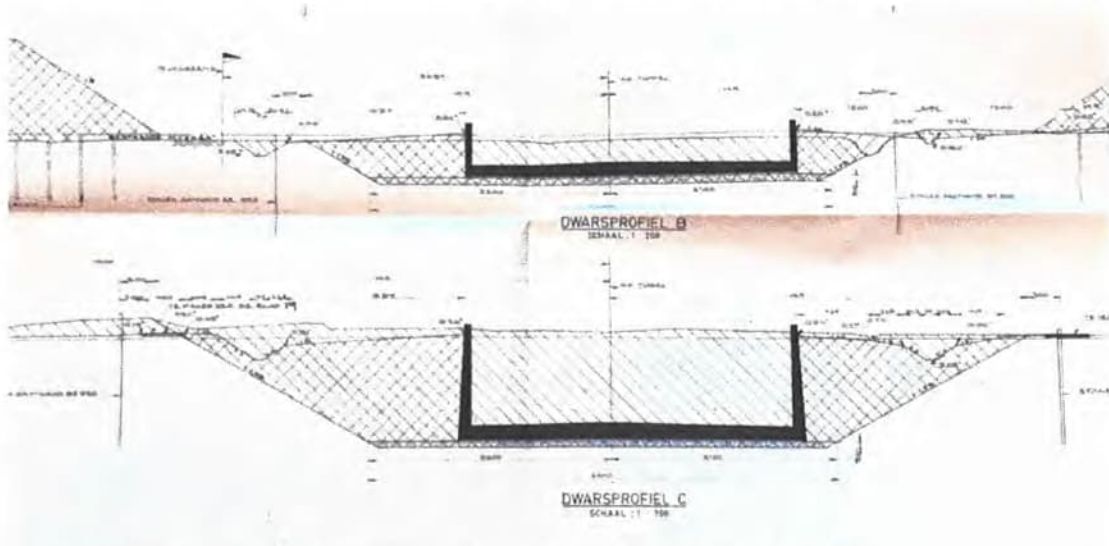
Figuur 6-8: Meetpunten waar grondwater en stijghoogte tijdens bemaling is bepaald voor scenario 5.



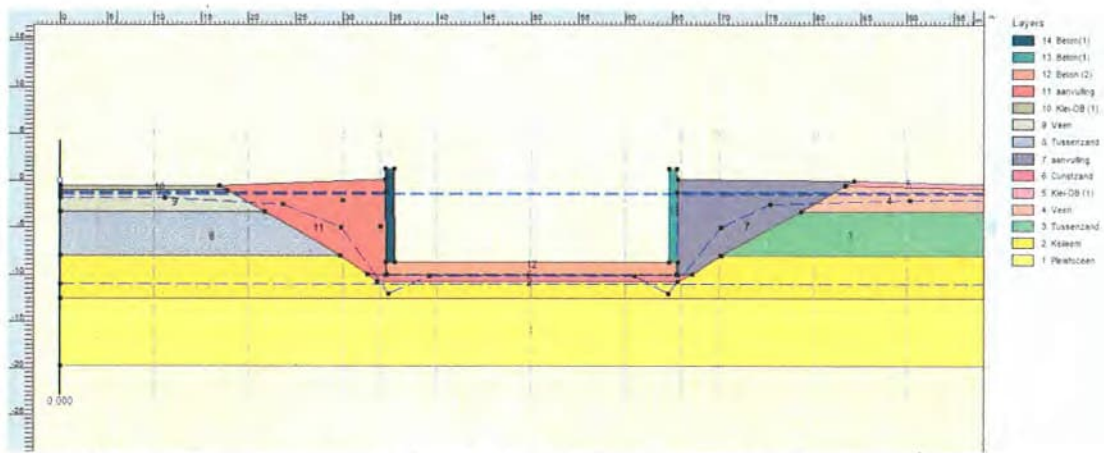
Figuur 6-9: Invoer, ondergrond schematisatie ten behoeve van D-Settlement v21.2, bedrijventerrein- ZW; dwarsprofiel over meetpunten 1 tot en met 3.

Tunnelmoten

De tunnelmoten zijn geschematiseerd conform de beschikbare bestekstekeningen uit 1973 van de aanleg van de tunnel. De grondopbouw is daarbij geschematiseerd conform het beschikbare geotechnische lengteprofiel, zie Figuur 6-3 en .Figuur 6-11.



Figuur 6-10: Bestekstekening tunnelmoten 36 (ongeveer DWP B) en moot 26 (DWP C).



Figuur 6-11: Invoer/schematisatie tunnelmoot 26 t.b.v. zettingsberekeningen (D-Settlement v21.2).

6.4.4 Gebruikte parameters

Voor het berekenen van de optredende zettingen als gevolg van de voorziene bemaling is gebruik gemaakt van de resultaten van de in het verleden (aanleg Prinses Margrietunnel) uitgevoerd laboratorium onderzoek, waarbij met name zettingsparameters bepaald zijn ten behoeve van de methode Koppejan.

De zettingsparameters zijn destijds met name bepaald voor de veenlaag en de laag Drenthe klei c.q. Keileem laag. Vanwege het ontbreken van gegevens/parameters betreffende het consolidatie verloop, waarmee het zettingsverloop in de tijd berekend kan worden (Cv-waarden; consolidatiecoëfficiënt), is, vanwege de beschikbaarheid, gebruik gemaakt van bij Deltares aanwezige gegevens/informatie uit proeven die destijds met name zijn uitgevoerd in de Krimpener- en Alblasserwaard. De consolidatie parameters voor het veen zullen vermoedelijk vergelijkbaar zijn, Voor de keileem-laag, zijn de parameters gebruikt die beschikbaar zijn voor de geologische laag Gorkum-zwaar, een zandige kleilaag met vermoedelijk vergelijkbare waarden als die van de keileem-laag.

LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA TE DELFT

OVERZICHT MONSTERONDERZOEK

LABORATORIUM VOOR GRONDMECHANICA TE DELFT

Figuur 6-12: Overzicht laboratoriumparameters, onderzoek 1973.

Op basis van de historische gegevens zijn de volgende (beschikbare) parameters bepaald en gebruikt voor het uitvoeren van de zettingsberekeningen. Zie Tabel 6-1. Voor de berekeningen zijn de (gemiddelde)waarden gebruikt van de "gekleurde grondlagen/-soorten.

Grondsoort/afzetting	vol. Gew (kN/m ²)	C _p	C _s	C' _p	C' _s	C ₁	C ₂	C _v (m ² /s)
Leem/klei (99+116)	20/20	60.3	343.9	39.8	1040.9	35.0	32.4	2.80E-07
Keileem (98+117+118)		110.9	433.3	64.6	418.7	54.5	38.4	
Keileem (97+98+117+118)	21/21	112.8	430.0	66.5	405.9	54.8	38.9	2.80E-07
Veen (94)		37.4	116.8	5.6	260.4	16.4	5.2	
Veen (93+94+111)		74.8	230.3	5.0	197.2	32.5	4.4	
Veen (94+111)	10,5/10,5	74.2	217.9	5.1	263.7	31.4	4.7	4.30E-07
klei/ob	16/16	70.5	167.1	10.7	50.1	26.2	5.8	4.76E-06
Zand	18/20	>>	>>	1000	4000			1.00E+00
Keileem (Alle)	20,5/20,5	109.54	503.82	62.38	426.24	53.76	37.70	2.80E-07

Tabel 6-1: Overzicht gebruikte parameters t.b.v. zettingsberekeningen.

In eerste instantie zijn voor de zettingsberekening uit februari 2023 (bijlage B) de parameters voor Keileem (97+98+117+118) aangehouden. Voor de huidige uitgevoerde berekeningen is dit aangepast naar de waarden voor Keileem (alle). De gehanteerde waarden zijn gebaseerd op het gemiddelde van de aangegeven proeven/monsters.

6.5 Bemalingsgegevens en grondwaterstand

De berekende en optredende zettingen worden veroorzaakt door daling van de grondwaterstand en waterspanningen in de ondergrond als gevolg van de bemaling. De daling van de waterspanningen veroorzaakt een toename van korrelspanning in de ondergrond, waardoor zettingsgevoelige lagen, conform de zettingstheorie samengedrukt worden. De uitkomsten van de uitgevoerde retourbemalingsberekeningen geven het waterspanningsverloop tijdens de bemaling voor de grondwaterstand in de deklaag en voor de stijghoogte in de zandlaag onder de deklaag.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor scenario 3 en scenario 4 van de tunnelbemaling en voor de representatieve locaties E17 tot en met E25 (zie Figuur 6-2).

6.5.1 Grondwaterstanden

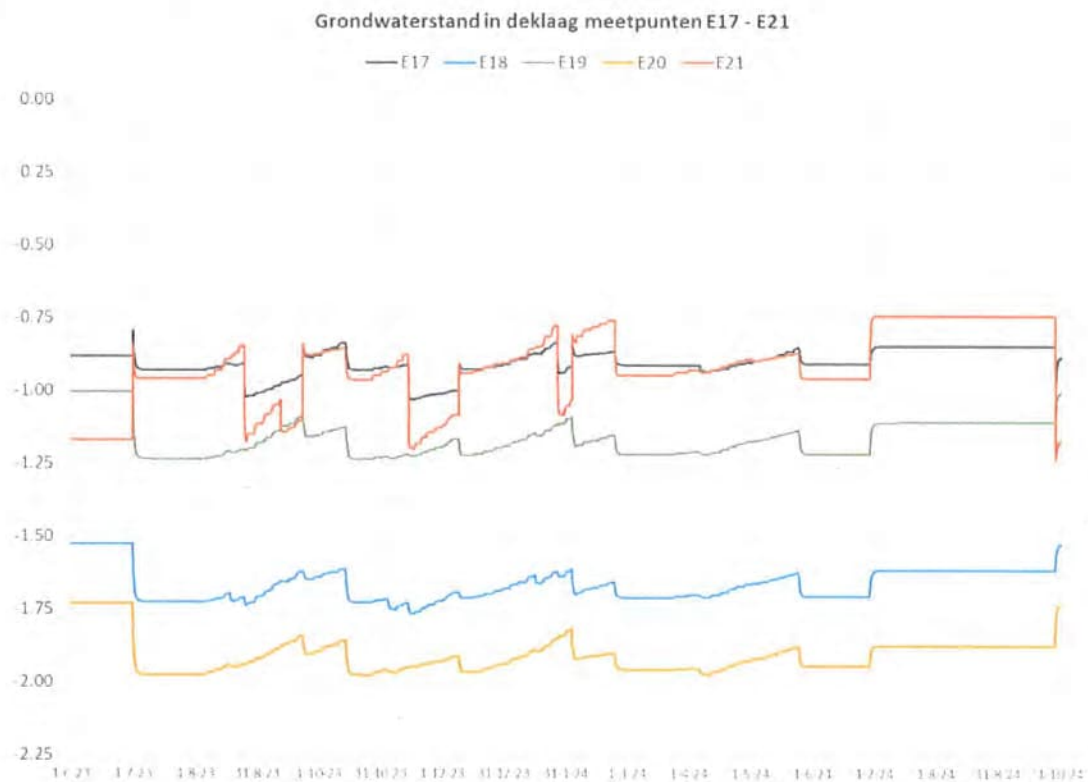
Uitgangspunt voor de gehanteerde grondwaterstanden zijn de berekeningen van de retourbemaling. Dit geldt ook ten aanzien van de stijghoogte in het zand onder de deklaag.

6.5.2 Tunnelbemaling scenario 3

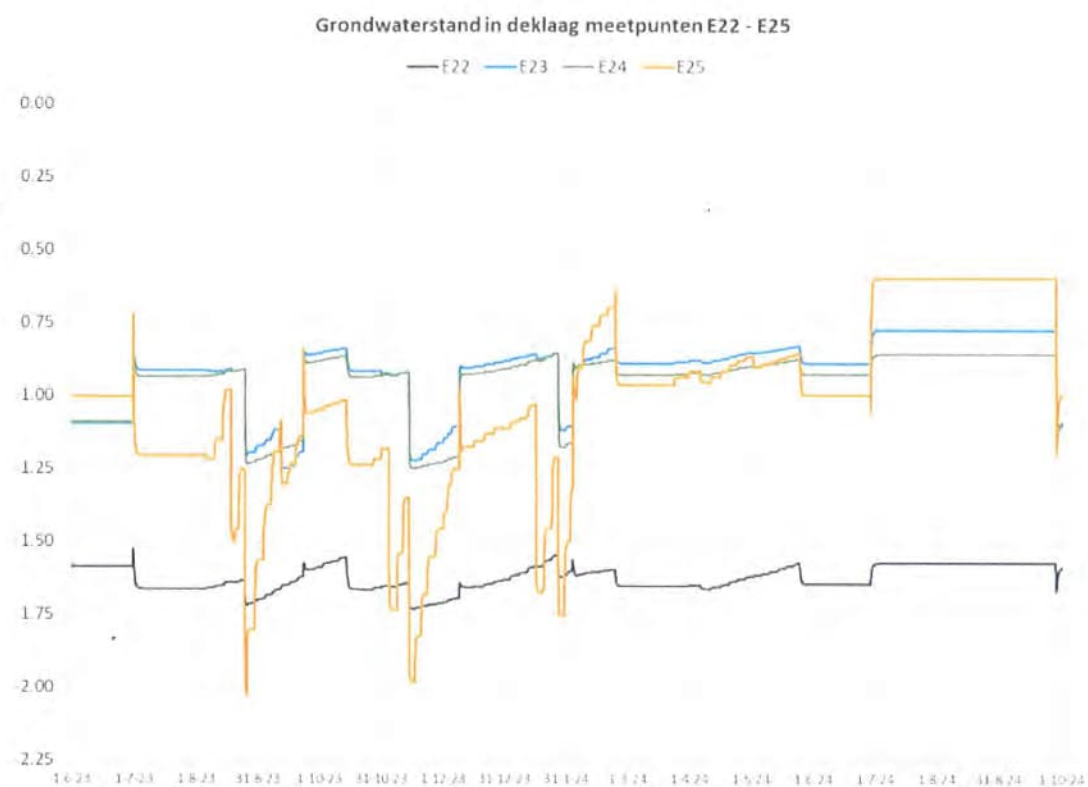
Scenario 3 betreft het 2 zijden gelijktijdig bemalen, telkens 1 moot doorschuiven, 3 keer doorlopen. Zie voor nadere details het Retourbemalingsadvies (maart 2023).

In de navolgende figuren zijn voor de locaties E17 tot en met E25 het verloop van het grondwater in de deklaag en het stijghoogteverloop in de onderliggende zandlaag weergegeven.

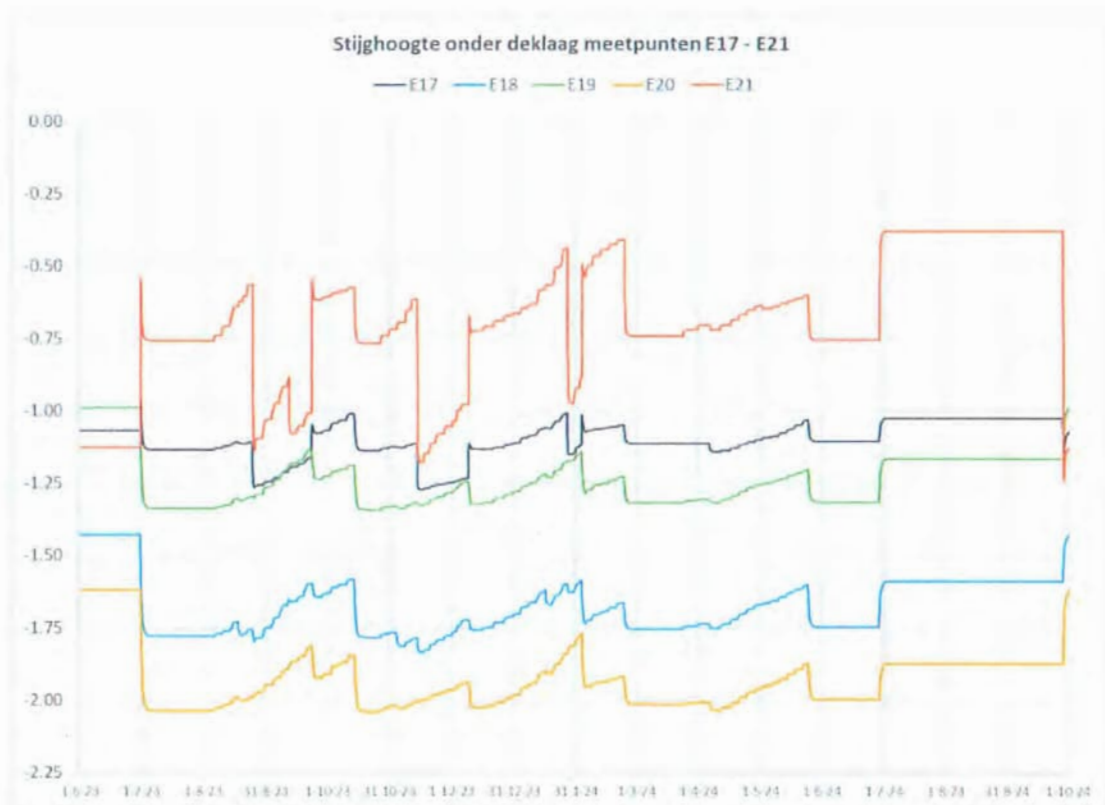
Dit verloop is gehanteerd voor de analyse van optredende zettingen ter plaatse van de punten E17 tot en met E25. Waar nodig is dit verloop gehanteerd voor het berekenen van optredende zettingen. Zie navolgende figuren.



Figuur 6-13: Bemalingsscenario 3; grondwaterstand in deklaag tijdens bemalen E17 t/m E21.



Figuur 6-14: Bemalingsscenario 3; grondwaterstand in deklaag tijdens bemalen E22 t/m E25.



Figuur 6-15: Bemalingsscenario 3; stijghoogte onder de deklaag tijdens bemalen E17 t/m E21.



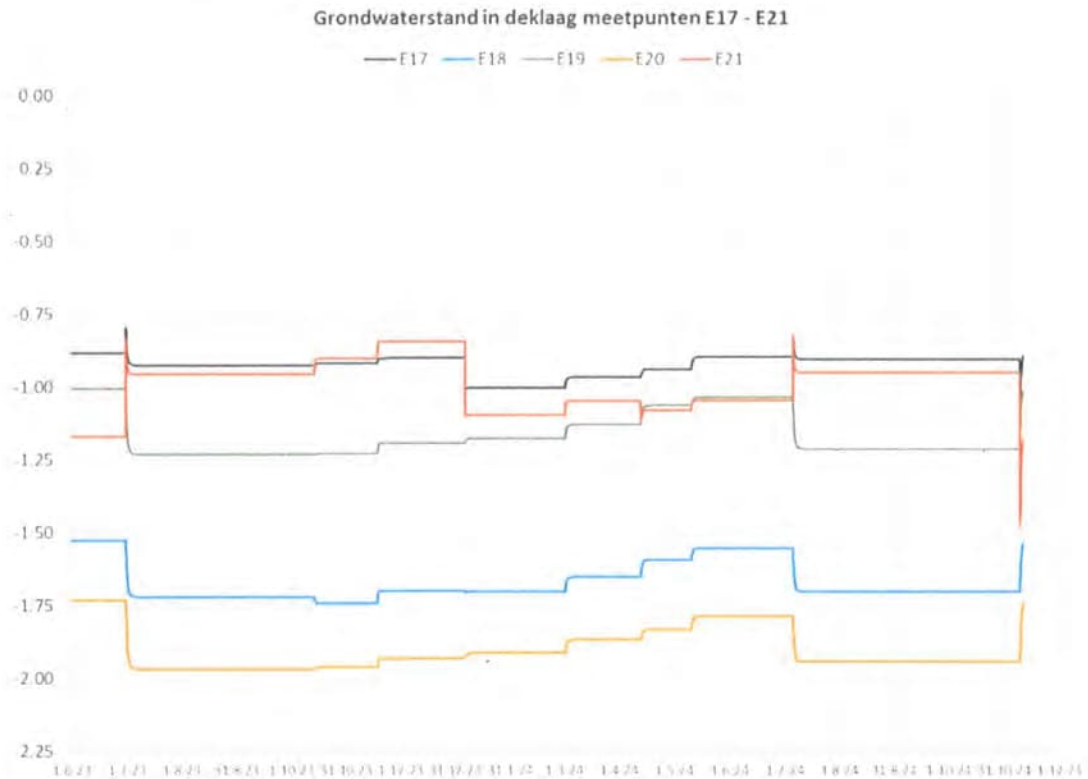
Figuur 6-16: Bemalingsscenario 3; stijghoogte onder de deklaag tijdens bemalen E22 t/m E25.

6.5.3 Tunnelbemaling scenario 4

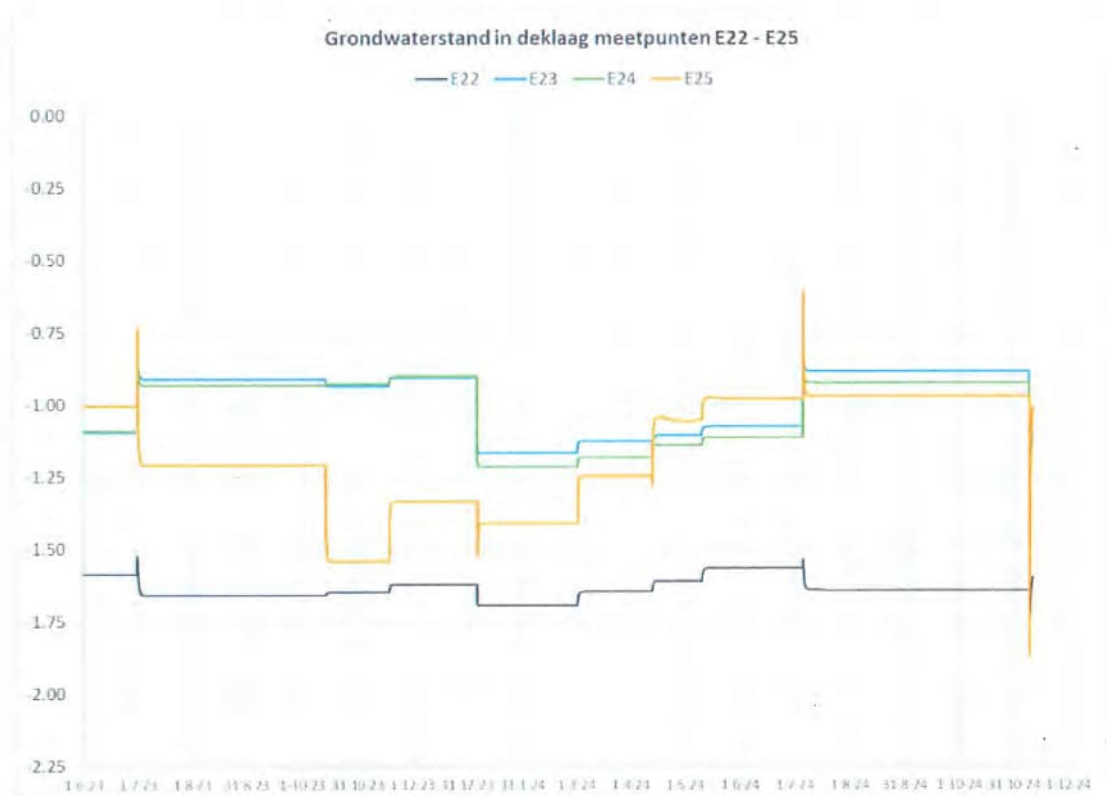
Scenario 4 betreft het 2-zijdig bemalen, 4 moten doorschuiven, 1 keer doorlopen. Zie voor nadere details het Retourbemalingsadvies (maart 2023).

In de navolgende figuren zijn voor de locaties E17 tot en met E25 het verloop van het grondwater in de deklaag en het stijghoogteverloop in de onderliggende zandlaag weergegeven.

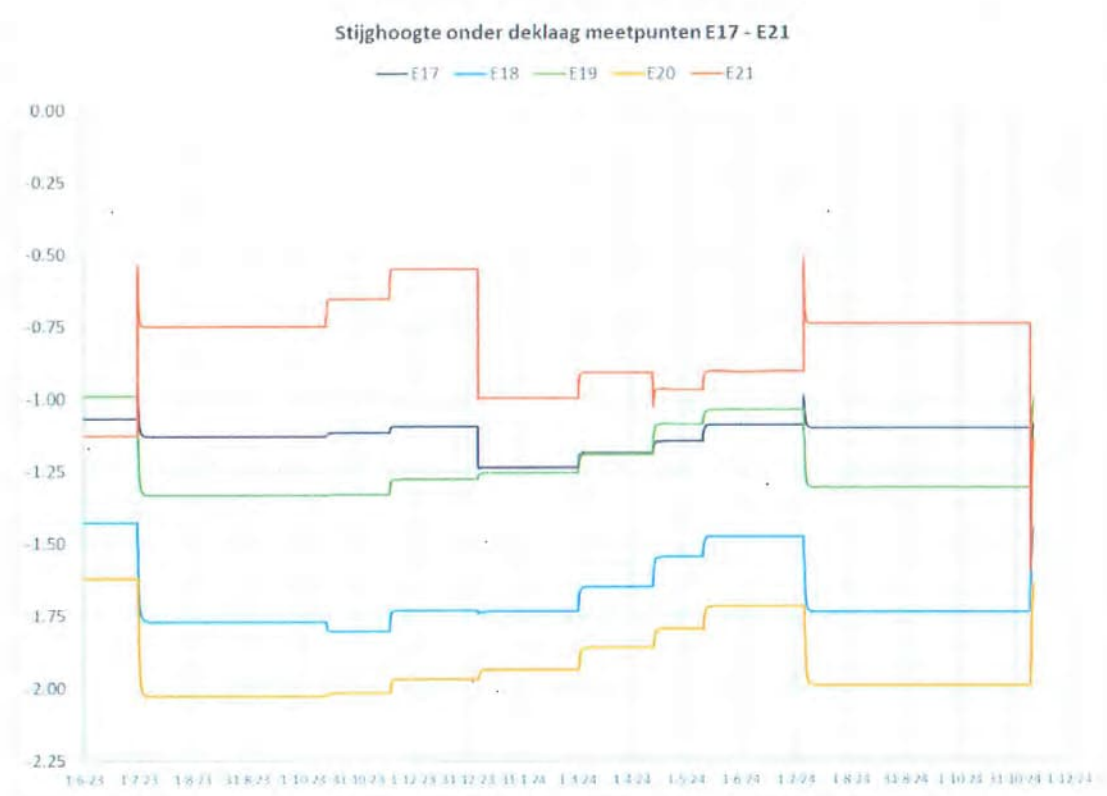
Dit verloop is gehanteerd voor de analyse van optredende zettingen ter plaatse van de punten E17 tot en met E25. Waar nodig is dit verloop gehanteerd voor het berekenen van optredende zettingen. Waar nodig is dit verloop gehanteerd voor het berekenen van optredende zettingen. Zie navolgende figuren.



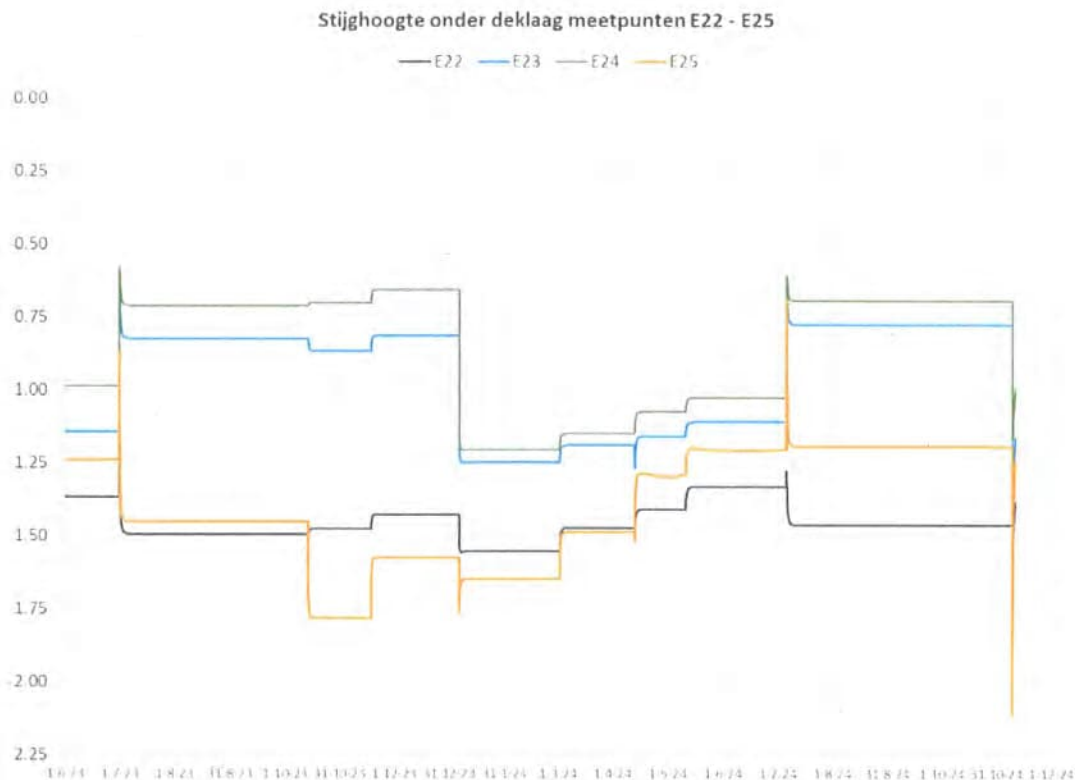
Figuur 6-17: Bemalingsscenario 4; grondwaterstand in deklaag tijdens bemalen E17 t/m E21.



Figuur 6-18: Bemalingsscenario 4; grondwaterstand in deklaag tijdens bemalen E22 t/m E25.



Figuur 6-19: Bemalingsscenario 4; stijghoogte onder de deklaag tijdens bemalen E17 t/m E21.



Figuur 6-20: Bemalingsscenario 4; stijghoogte onder de deklaag tijdens bemalen E22 t/m E25.

6.5.4

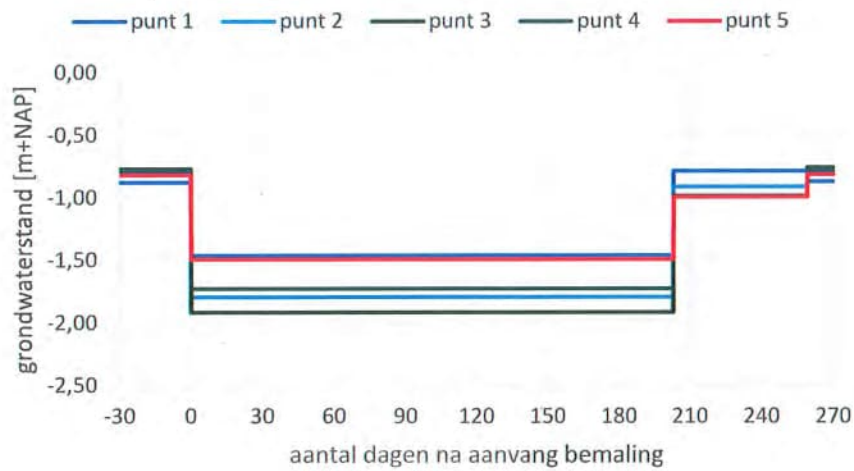
Bemalingsscenario 5

In dit scenario wordt aan beide zijden gelijktijdig begonnen met alle moten. Dat zijn moot 22 t/m 7 aan Jourezijde en moot 23 t/m 36 aan Sneekzijde. Het aantal moten aan de Jourezijde is groter dan het aantal moten aan de Sneekzijde, en de moten aan de Jourezijde liggen wat dieper. Daarom zijn de doorlooptijden van beide zijden verschillend en is de bemaling van de moten aan Sneekzijde uiteindelijk een kleine twee maanden eerder klaar dan de bemaling aan Jourezijde.

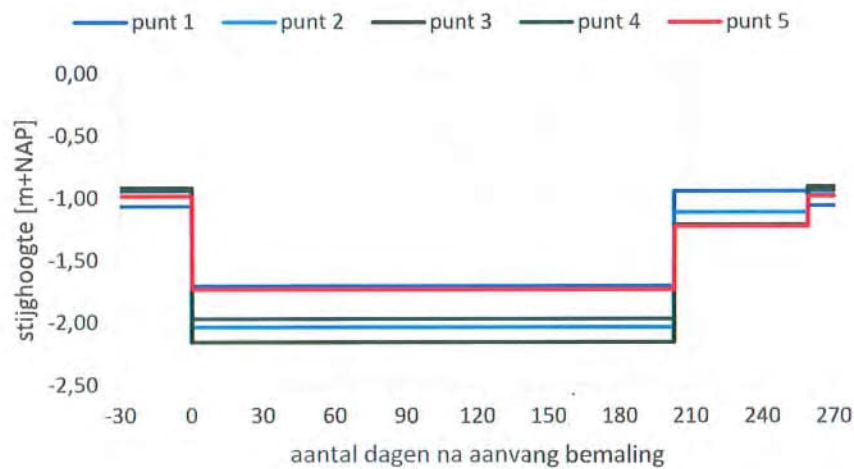
In Figuur 5-9 en Figuur 5-10 zijn voor bemalingsscenario 5 de stijghoogten weergegeven voor respectievelijk de bemalen moten aan de Jourezijde en de Sneekzijde. Figuur 5-11 geeft de berekende grondwaterstanden en stijghoogten voor de omgevingspunten E17 tot en met E25. De omgevingsbeïnvloeding (qua grondwaterstand) is ook weergegeven in Figuur 6-7

Voor de omgevingspunten ter plaatse van het bedrijventerrein-ZW zijn apart de grondwaterstands dalingen en stijghoogten tijdens de bemaling bepaald. Deze zijn in onderstaande weergegeven voor zowel de grondwaterstand de stijghoogte in de tussenzandlaag als in het diepere zand (bemalen pakket)

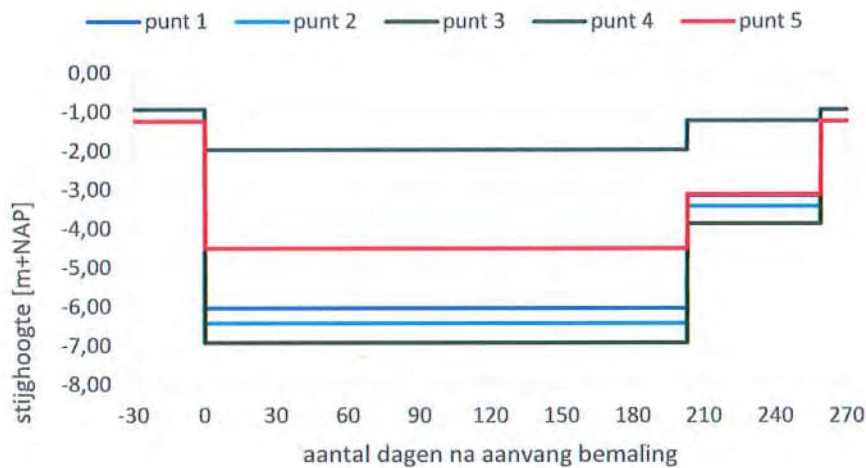
Grondwaterstand in deklaag



Stijghoogte in tussenzandlaag



Stijghoogte in watervoerend pakket



Figuur 6-21: grondwaterstand en stijghoogten tijdens bemaling (scenario 5) bedrijventerrein-ZW, punten 1 t/m 5, zie Figuur 6-8.

6.6 Mogelijke schade door zettingen

Een belangrijk aspect in het beoordelen van zettingsschade bij bebouwing is de funderingswijze. Funderingen op staal zijn gevoeliger voor zettingsverschillen dan funderingen op palen. Wij hebben in dit stadium geen overzicht van de funderingswijze van de bebouwing. Voor het beoordelen van schade door zettingen is als conservatief uitgangspunt aangenomen de bebouwing op staal is gefundeerd, waarbij de fundering op maaiveld is gesitueerd.

Conform de Handreiking voor het ontwerpen van rivierdijken, maar ook in CUR 162:2022; Construeren met grond, wordt op basis van zettingen en daaruit volgende zettingshellingen voor bebouwing op staal de volgende indeling in schade categorieën gehanteerd.

- Zettingshelling $> 1 : 100$, ernstige schade (AM), risico's voor bewoners niet uitgesloten, veelal moet worden overgegaan tot amoveren.
- Zettingshelling $1 : 100$ à $1 : 250$, constructieve schade (CS), kans op grotere repareerbare schade, geen risico voor de bewoners.
- Zettingshelling $1 : 250$ à $1 : 500$, esthetische schade (ES), kans op eenvoudig repareerbare schade.
- Zettingshelling $< 1 : 500$, geen schade (GS).

Het is daarbij gebruikelijk de zettingshelling te bepalen over een afstand van circa 5 m (globale afstand tussen 2 muren).

Voor de mogelijk optredende verschilzetting is uitgegaan van 25% van de maximale zetting. Deze 25% wordt vaak door ons gehanteerd. In dit geval zijn de resultaten van de onlangs uitgevoerde sonderingen en boringen bekeken. De zettingen worden vooral bepaald door de dikte van de veenlaag. Uit het grondonderzoek blijkt dat de dikte van de veenlaag, niet sterk varieert. Daarom is een verschilzetting van 25% over een afstand van 5 meter een redelijke schatting.

Een ander criterium, dat wel als grens van het aanvaardbare wordt gezien, in relatie tot het optreden van zettingsschade is een vervorming van 10 cm.

6.6.1 Resultaat berekeningen februari 2023

Uit eerdere (februari 2023) berekeningen (bijlage B) is gebleken, dat de berekende zettingen op een afstand van 250 m uit de bemaling (put bemaling moot 26 tot NAP -10,3 m) niet leiden tot schade aan de bebouwing (zettingshellingen $< 1:500$).

De daarbij behorende waterstandsdingen, gedurende de bemaling van maximaal 6 maanden (200 dagen) bedroegen:

- Een grondwaterstandsding van 0,25 m.
- Een stijghoogte ding in de tussenzandlaag van 0,50 m.
- Een stijghoogte ding in het diepere zand (pleistoceen) van 1,0 m.

7 Berekeningsresultaten Zettingen

Zoals aangegeven zijn na de zettingsanalyse/-berekeningen, de optredende zettingen geanalyseerd en/of berekend voor de twee bemalingsscenario's: scenario 3 en scenario 4 en in een later stadium is scenario 5 beschouwd.

7.1 Bemalingsscenario 3 en 4

In eerste instantie is daarbij ten behoeve van scenario 3 en 4, het waterstandsverloop, zoals aangegeven in paragraaf 6.5.2 en paragraaf 6.5.3, vergeleken met hetgeen is aangehouden in de eerdere (maatgevende) berekeningen (putbemaling moot 26), voor een afstand van 250 m.

Om de vergelijking goed te kunnen maken en te bepalen of bij de gehanteerde uitgangspunten geen zettingsschade optreedt is in eerste instantie, voor de oorspronkelijke berekening (bijlage 2), de bemalingsduur van 6 maanden verlengd naar 1 jaar en 3 of 4 maanden (500 dagen), zodat deze overeenkomt met scenario 3 en 4. Deze berekening wordt aangeduid als:

- "Putbemaling moot 26, NAP -10,3 m_250 m_500 dagen".

Uit deze berekening volgt dat het zettingspercentage van circa 75 % (0,03 m na 200 dagen) toeneemt tot 85 % na 500 dagen (1 jaar en 4 maanden). Daarmee komt de berekende zetting op 0,034 m. Hiermee valt betreffende bebouwing, uitgaande van een optredend zettingsverschil van 25% van de eindzetting over een afstand van 5 m volgt een zettingshelling van $0,034 \cdot 0,25 / 5 \text{ m} = 1:588$. Hiermee valt de zetting nog in de categorie : Geen schade.

7.1.1 Resultaten analyse optredende zettingen E17 tot en met E24

Uit een analyse van het verloop van de waterspanningen, zoals berekend voor de retourbemaling, scenario 3 en 4 (zie paragraaf 6.5.2 en 6.5.3), blijkt, dat voor de onderzoekspunten E17 tot en met E24 gemiddeld de waterstands dalingen geringer zijn dan bij de berekening voor de situatie "putbemaling moot 26, NAP -10,3 m_250 m_500 dagen".

Dat betekent dat bij al deze punten er dusdanig geringe zettingen optreden dat er, bij de berekende retourbemaling (scenario 3 en 4) geen schade verwacht wordt.

7.1.2 Resultaten zettingsberekeningen E25

Voor locatie E25 zijn grotere waterstands dalingen berekend, weliswaar gedurende kortdurende periodes, maar hierdoor kan niet met zekerheid gesteld worden dat voor deze locatie ook geen zettingsschade op kan treden. Derhalve zijn voor deze situatie nieuwe zettingsberekeningen uitgevoerd.

Uit uitgevoerde zettingsberekeningen, specifiek voor locatie E25 en het voor die locatie berekende grondwaterstands- en stijghoogteverloop voor (retour)bemalingsscenario's 3 en 4 blijkt een maximale zetting berekend van 0,033 m (3,3 cm) Deze zetting treedt op gedurende de bemalingsperiode van 1 jaar en 3 maanden bij scenario 3.

Uitgaande van een optredend zettingsverschil van 25% van de eindzetting valt dit in de schadecategorie "geen schade".

7.1.3 Zettingen gebouwenterrein (bedrijventerrein)

Voor de bebouwing op de noordkant van het bedrijventerrein ten zuiden van moot 26 is geen zetting berekend, maar de grondwaterstandsverlagingen zijn hier zo groot dat zettingsschade

hier niet uit te sluiten is. Of de schade optreedt hangt onder meer af van de funderingswijze van deze gebouwen.

Bij een fundering op staal is de kans op zettingsschade groot. Bij een fundering op palen is de kans een stuk kleiner.

7.2 Bemalingsscenario 5

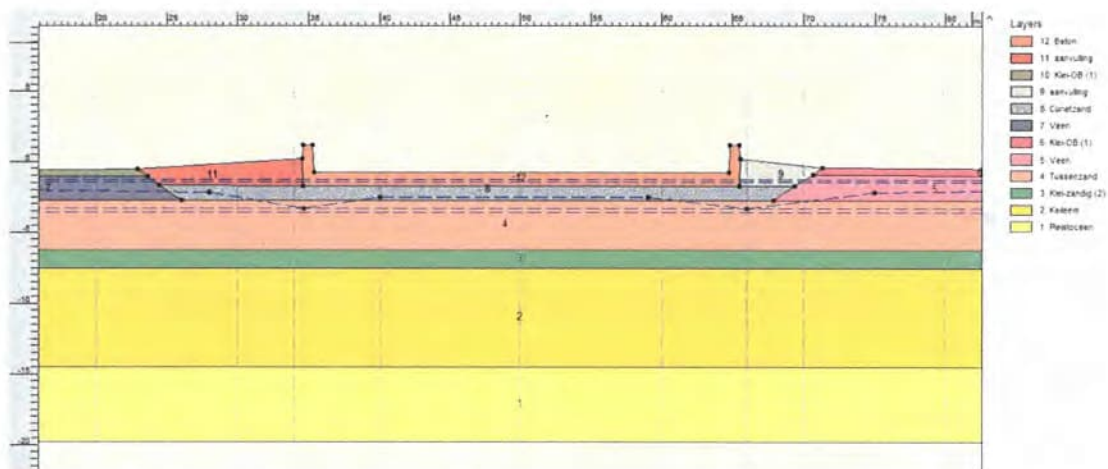
Omdat lopende de werkzaamheden en berekeningen bemalingsscenario 5 als mogelijk optimale oplossing zijn voor de volgende situaties de zettingen beschouwd en/of berekend:

- Zetting onder de tunnelmoten, berekend zijn tunnelmoot 3, 12, 26, 36 (38), en 45. Oorspronkelijk zou moot 5 ook berekend worden, maar de resultaten van de andere moten geven voldoende indicatie voor de zettingen ter plaatse van moot 5. In plaats van moot 38 is, wegens beschikbaarheid van het dwarsprofiel, moot 36 berekend.
- Zettingen in de omgeving, omgevingspunten E17 tot en met 25; deze zijn evenals voor scenario 3 en 4 geanalyseerd op basis van de berekende grondwaterstands- en stijghoogte veranderingen.
- Zettingen ter plaatse van het bedrijverterrein-ZW. Omdat uit bemalingsscenario 3 en 4 al bleek dat hier mogelijk nog een aanzienlijke invloed is, zijn ter plaatse aparte zettingsberekeningen uitgevoerd voor de aanwezige bebouwing. Zie ook paragraaf 6.4.3.

7.2.1 Resultaten zettingen tunnelmoten

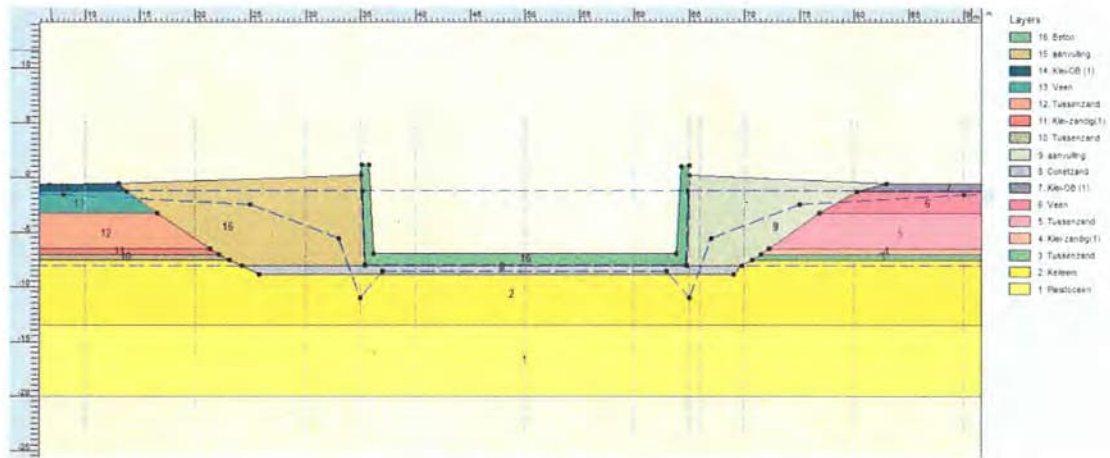
Navolgend zijn voor bemalingsscenario 5 de berekende zettingen onder de betreffende tunnelmoten weergegeven. Hierbij moet worden opgemerkt, dat dit de verwachte zettingen onder de vloerplaten betreft en dat naast de wanden de zettingen substantieel groter zullen zijn. Dit heeft mogelijk consequenties voor palen of ankers die aan de rand van de vloerplaten staan.

Moot 3 (op staal gefundeerd)



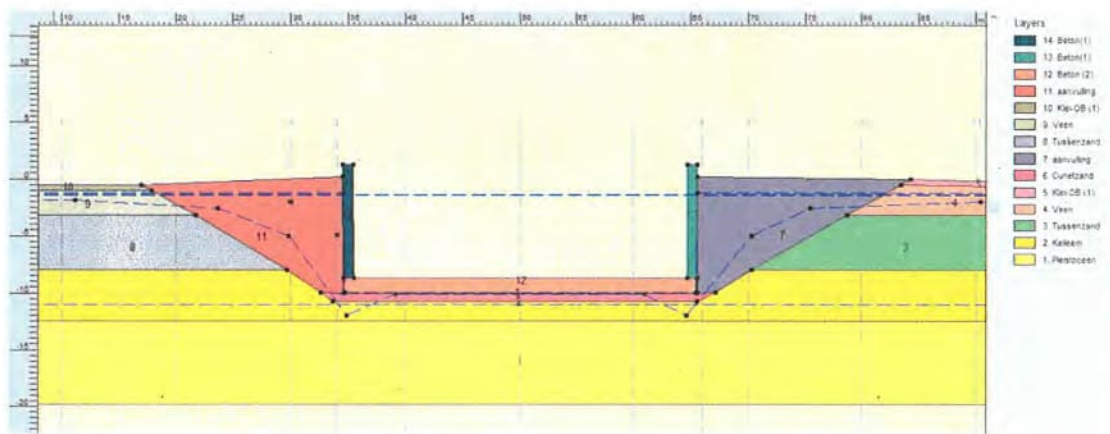
De berekende zetting onder moot 3 bedraagt 2,6 cm (verticaal 5, 6 en 7).

Moot 12 (op trekpalen/ankers gefundeerd)



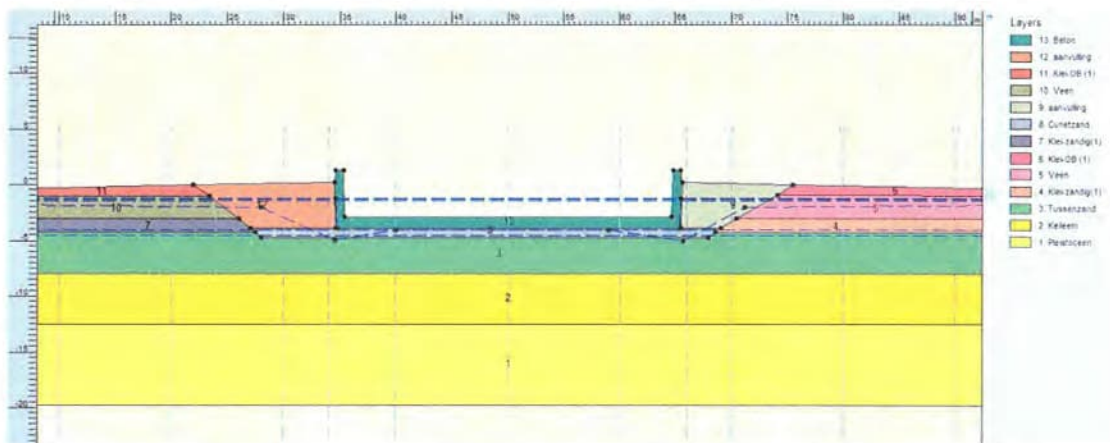
De berekende zetting onder moot 12 bedraagt 4,2 cm (verticaal 5, 6 en 7).

Moot 26 (op trekpalen/ankers gefundeerd)



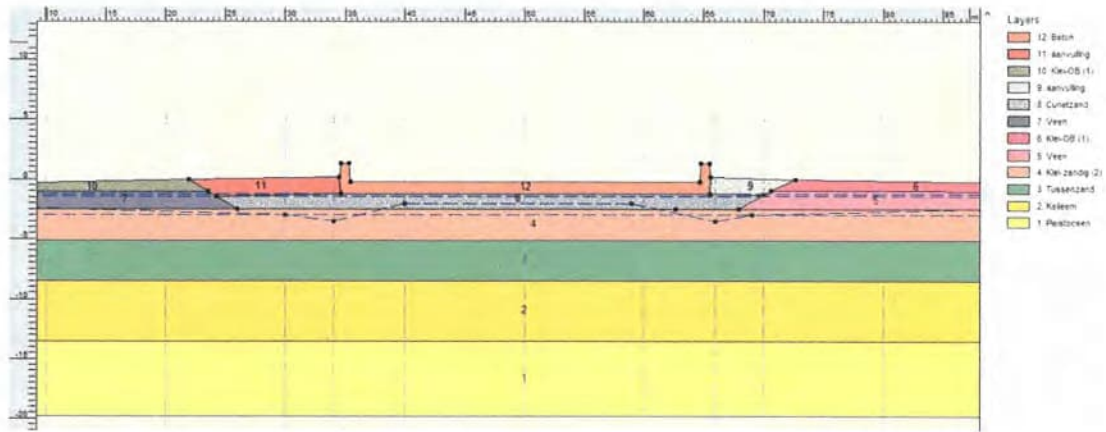
De berekende zetting onder moot 26 bedraagt 2,2 cm (verticaal 5, 6 en 7).

Moot 36 (op trekpalen/ankers gefundeerd, 38 op drukpalen)



De berekende zetting onder moot 36 bedraagt 2,2 cm (verticaal 5, 6 en 7).

Moot 45 (op staal gefundeerd)



De berekende zetting onder moot 45 bedraagt 1,6 cm (verticaal 5, 6 en 7).

In Tabel 7-1 zijn de zettingen onder de tunnelmoten nogmaals weergegeven:

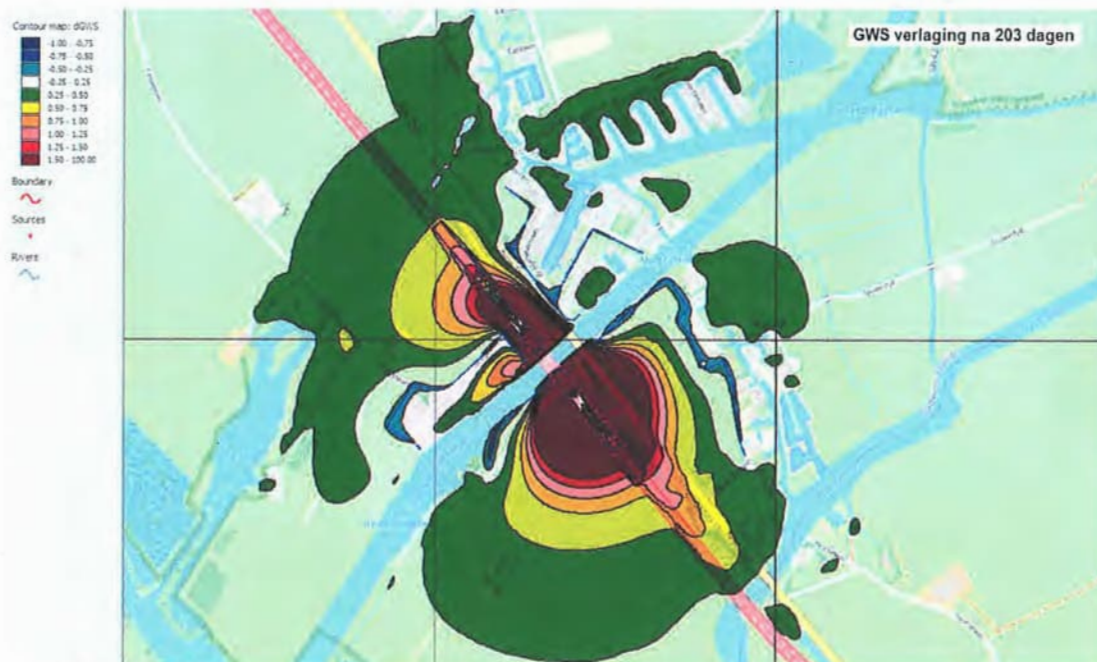
Moot nummer	Berekende zetting Bemalingsduur [m] (210 – 260 dagen)
3 (5)	0,026
12	0,042
26	0,022
36 (38)	0,022
45	0,016

Tabel 7-1: Berekende zettingen onder de tunneltoerit moten.

7.2.2 Resultaten zettingen omgeving (omgevingspunten E17 t/m E25)

De betreffende analyse is met name uitgevoerd met behulp van de resultaten zoals deze uit eerdere berekeningen zijn verkregen en aan de hand van Figuur 7-1.

Op basis van eerdere berekeningen mag verondersteld worden dat binnen het lichtgroene gebied (0,25 - 0,50 m) de optredende zettingen dusdanig gering zijn dat de kans op schade voor op staal gefundeerde gebouwen nihil is.



Figuur 7-1: Beïnvloeding grondwaterstand ten gevolge van bemalingsscenario 5.

De aangegeven grondwaterstands daling en stijghoogte dalingen zijn ter plaatse van de omgevingspunten E17 t/m E25 marginaal hoger dan respectievelijk 0,25 m (grondwaterstand), 0,50 m (stijghoogte tussenzand) en 1,0 m (stijghoogte bemalen pakket). Zie ook Figuur 5-11. Dat betekent, dat voor deze punten geen zetting verwacht wordt die mogelijk leidt tot schade aan op staal gefundeerde bebouwing.

Ter plaatse van de dichtst bij de tunnel gelegen bebouwing zou er mogelijk een kans op esthetische schade kunnen zijn (eenvoudig repareerbare schade) bij een mogelijk optredende zettingshelling van 1:250 à 1:500 (zie paragraaf 6.6). Dit betreft met name de dichtst bij de tunnel gelegen bebouwing, met name het bedrijventerrein ten zuidwesten van de tunnel (Sneekzijde) langs het Prinses Margrietkanaal. Op grotere afstand zal de grondwaterstands daling niet groter zijn dan 0,25 m.

Er zijn specifiek voor het bedrijventerrein zuidwest van de tunnel (Sneekzijde) zettingsberekeningen uitgevoerd. Zie paragraaf 7.2.3.

7.2.3

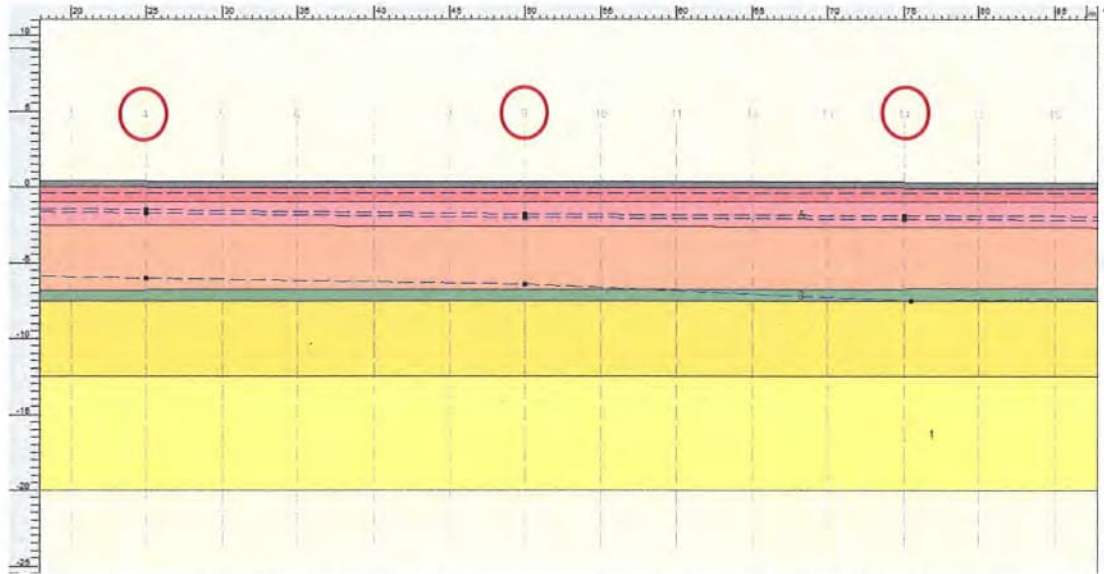
Resultaten zettingen bedrijventerrein-zw

Conform de in paragraaf 6.4.3 en 6.5.4 aangegeven uitgangspunten (schematisatie grondwater en stijghoogte verlagingen) zijn de volgende zettingen berekend voor de vertikalen 4, 9 en 14, die overeenkomen met de punten 1, 2 en 3 uit Figuur 6-8 ter plaatse van de noordelijke bebouwing. De punten bevinden zich ongeveer op een onderlinge afstand van 25 m.



Figuur 7-2: overzicht punten 1 t/m 5 op bedrijventerrein-zw.

Omdat de zettingshellingen in het algemeen bepaald worden over 5 m zijn ook de zettingen weergegeven ter plaatse van de naastliggende vertikalen op 5 m
 De zettingen zijn berekend voor een (maximale) bemalingsduur van 260 dagen. Door enige variatie in de grondparameters en de initiële grondwaterstand is tot een zettingsrange gekomen, welke in Tabel 7-2 is weergegeven.



Figuur 7-3: Overzicht berekend profiel met representatieve rekenvertikalen 4, 9 en 14 (punt 1, 2 en 3).

Verticaal / meetpunt	Berekende zetting [cm]	Schadeverwachting
4 (punt 1)	2,4 – 3,2	Geen schade
5 (punt 1)	2,5 – 3,3	Geen schade
9 (punt 2)	2,8 – 3,7	Geen schade
10 (punt 2)	2,9 – 3,8	Geen schade
14 (punt 3)	3,3 – 4,2	Geen schade
15 (punt 3)	3,3 – 4,2	Geen schade

Tabel 7-2: Overzicht berekende zettingen bedrijventerrein-zw.

Uit de resultaten blijkt dat de berekende zettingen beperkt blijven en in de orde liggen van 2 tot 4 cm. De berekende zettingen en zettingshellingen geven geen aanleiding te veronderstellen dat zettingsschade op zal treden als gevolg van de bemaling (scenario 5). De mogelijkheid bestaat wel dat er in het geval van een (lokaal) sterke variatie van de ondergrond over een korte afstand, of in het geval van verschillende funderingswijzen er door zettingen esthetische schade (lichte schade, eenvoudig repareerbaar) ontstaat. Dit risico wordt echter gering geacht.

De resultaten vormen tevens een onderbouwing voor de bepaalde omgevingsbeïnvloeding ter plaatse van de omgevingspunten E17 tot en met E25.

7.3 Conclusies

Tunnelmoten

Op basis van de uitgevoerde zettingsberekeningen voor de tunnelmoten blijkt dat de berekende zettingen, als gevolg van bemalingsscenario 5, beperkt blijven tot enkele centimeters. De maximale zetting is berekend bij moot 12 en bedraagt 4,2 cm. Bij moot 45 treedt de minste zetting op: 1,6 cm.

Opgemerkt wordt, dat de verwachte zettingen naast de wanden substantieel groter zullen zijn. Dit kan mogelijk consequenties hebben voor palen of ankers die langs de randen van de vloerplaten staan.

Omgevingspunten E17 t/m E25

Op basis van de uitgevoerde analyse en zettingsberekeningen blijkt, dat bij toepassing van de retourbemaling conform scenario 3 en/of 4 (zie bemalingsrapportage) er ter plaatse van de geanalyseerde onderzoekspunten, die representatief zijn voor de in de omgeving aanwezige bebouwing geen schade wordt verwacht.

Daarbij is als conservatief uitgangspunt aangenomen dat de bebouwing op staal en direct op maaiveld is gefundeerd.

Dit zelfde geldt voor bemalingsscenario 5. De grondwaterstand beïnvloeding is weliswaar (marginaal) groter, maar dit zal niet leiden tot een andere schade verwachting.

Bebouwing noordzijde bedrijventerrein-zw

Voor de bebouwing op de noordkant van het bedrijventerrein is de zetting berekend op basis van de berekende grondwaterstandsverlagingen en stijghoogte verlagingen voor bemalingsscenario 5.

Op basis van de berekeningen, en met name de verschilzettingen (maar ook de grootte van de berekende zettingen zelf), wordt geen schade verwacht mits de grondopbouw vrij uniform is en ook de funderingswijze van de panden en aanbouwen niet sterk verschillend is. Met name de combinatie "pand op palen en aanbouw op staal" vormt het grootste risico met betrekking tot zettingsschade.

In het algemeen is bij een fundering op staal is de kans op zettingsschade groter dan bij een fundering op palen. Met mitigerende maatregelen (retourbemaling op het bedrijventerrein – reeds deels voorzien) of het opzetten van peilen in polderwatergangen of het baggeren van de bodem en wanden van het Prinses Margrietkanaal kan de kans of zettingsschade verder worden verkleind.

A Bemalingsduur scenario's

Deze bijlage bevat inschattingen van de benodigde tijd voor de uitvoering van de herstelwerkzaamheden voor twee mogelijke wijzen van aanpak, kortweg gedefinieerd als "opschuiven per moot" en "4 moten gelijktijdig".

Deze inschatting is gedaan door VolkerWessels en gecheckt op consistentie door Deltares. Op basis van deze inschatting zijn de bemalingsfasen opgesteld, zoals die gerapporteerd zijn in voorliggend document. Daarbij is naar boven afgerond op hele dagen.

Opschuiven per moot

Deze aanpak bestaat uit 3 series, waarbij telkens vanaf de moten naast de pompkelders naar de ondiepste moten wordt gewerkt. In de grafische overzichten hieronder zijn deze series gerepresenteerd door de blauwe (serie 1), groene (serie 2) en rode (serie 3) balkjes. Per serie worden steeds 4 moten gelijktijdig bemalen om vervolgens telkens 1 moot op te schuiven.

Voorbeeld ter verduidelijking:

Aan de Sneekzijde wordt begonnen met moten 24, 25, 26 en 27 (kolom moot). In de eerste serie worden daarvan respectievelijk 16, 16, 16 en 14 palen vervangen (kolom palen, links van de blauwe arcering). De blauwe arcering in de kolommen daarnaast laat zien aan welke moten in die periode wordt gewerkt. De kop boven die kolom geeft aan na hoeveel weken die periode afgesloten wordt, gerekend vanaf de start van de werkzaamheden. De eerste periode wordt afgesloten na 4.6 weken. De tweede periode, waarin de bemaling doorschuift naar moot 25, 26, 27 en 28 wordt afgesloten na 5.1 weken en is qua doorlooptijd dus ingeschat op een halve week. Dit loopt zo door tot moot 36 is bereikt, waarvan is ingeschat dat die na 10.1 weken afgerond kan worden. In de laatste 3 perioden wordt steeds 1 moot minder bemalen, om te eindigen met alleen bemaling voor moot 36. Als de eerste serie (blauw) klaar is, gaat de tweede serie (groen) beginnen. Die is ingeschat te beginnen na 12 weken. Het verschil tussen het ingeschatte einde van de eerste serie (10.1 weken) en het begin van de tweede serie (12 weken) geeft enige ruimte voor onvoorziene uitloop. Bij het samenstellen van de bemalingsscenario's is ervan uitgegaan dat de eerste serie 12 weken duurt en de tweede serie direct aansluitend begint. De duur van de afzonderlijke periodes is daarbij naar boven afgerond op hele dagen en evenredig met de inschatting verlengd tot een totale duur van 12 weken (= 84 dagen).

Sneekzijde: opschuiven per moot.



Jourezijde: opschuiven per moot.



4 moten gelijktijdig

Bij deze aanpak worden steeds 4 moten in zijn geheel hersteld om daarna aan de volgende 4 moten te beginnen. Er worden dus steeds 4 moten gelijktijdig bemalen om vervolgens telkens 4 moten op te schuiven. Daarbij wordt vanaf de moten naast de pompkelders naar de ondiepste moten toe gewerkt. Aan Sneekzijde wordt daarbij de laatste moot, moot 36, meegenomen met de moten 32 tot en met 35. Aan de Jourezijde wordt geëindigd met 3 moten, moot 9 tot en met 7.

In de grafische overzichten hieronder is deze aanpak gerepresenteerd. De gele vlakken geven de voor die fase maatgevende doorlooptijden in dagen aan. De drie kolommen daarnaast geven de maatgevende doorlooptijden in werkweken (van 5 dagen) aan. In de aangeleverde planning zaten in de omzetting van dagen naar weken nog enige inconsistenties. Die inconsistenties zijn aangepast in onderstaande schema's.

Bij de vaststelling van de bemalingsperioden is rekening gehouden met enige uitloop ten opzichte van deze doorlooptijden.

Sneekzijde: 4 moten gelijktijdig.

Moot	aantal	Doorlooptijd per 4 moten compleet (dgn)							[WKN]		TOTAAL	
		Zijde Sneek (NW)	palen	Vrijmaken	Kernboren	Palen	Uitharden	Afwerken	Verkeer			
24	16		5	1.3	2.1	5	2	1	0.42	0.52	0.52	
	21		3	1.8	2.6	5	2.3	1				
	21		3	1.8	2.6	5	2.3	1				
25	16		7	1.3	2.1	5	2	1	0.42	0.46	0.46	
	18		3	1.5	2.3	5	2.1	1				
	18		3	1.5	2.3	5	2.1	1				
26	16		8	1.3	2.1	5	2	1	2.28	1.72	1.72	
	17		5	1.4	2.2	5	2.1	1				
	17		5	1.4	2.2	5	2.1	1				
27	14		6	1.2	1.9	5	1.9	2	2.16	2.12	2.12	
	13		3	1.1	1.8	5	1.8	2				
	13		3	1.1	1.8	5	1.8	2				
									5.28	4.82	4.82	14.92
28	12		5	1	1.7	5	1.8	1	1.54	1.1	1.1	
	11		3	0.9	1.6	5	1.7	1				
	11		3	0.9	1.6	5	1.7	1				
29	14		3	1.2	1.9	5	1.9	1	0.38	0.34	0.34	
	12		3	1	1.7	5	1.8	1				
	12		3	1	1.7	5	1.8	1				
30	12		3	1	1.7	5	1.8	1	0.34	0.32	0.32	
	11		3	0.9	1.6	5	1.7	1				
	11		3	0.9	1.6	5	1.7	1				
31	10		3	0.8	1.5	5	1.6	1	1.82	1.8	1.8	
	9		3	0.8	1.4	5	1.6	1				
	9		3	0.8	1.4	5	1.6	1				
									4.08	3.56	3.56	11.2
32	10		5	0.8	1.5	5	1.6	1	1.46	1.04	1.04	
	9		3	0.8	1.4	5	1.6	1				
	9		3	0.8	1.4	5	1.6	1				
33	10		3	0.8	1.5	5	1.6	1	0.3	0.28	0.28	
	9		3	0.8	1.4	5	1.6	1				
	9		3	0.8	1.4	5	1.6	1				
34	8		3	0.7	1.3	5	1.5	1	0.26	0.26	0.26	
	8		3	0.7	1.3	5	1.5	1				
	8		3	0.7	1.3	5	1.5	1				
35	8		3	0.7	1.3	5	1.5	1	0.26	0.26	0.26	
	8		3	0.7	1.3	5	1.5	1				
	8		3	0.7	1.3	5	1.5	1				
36	8		3	0.7	1.3	5	1.5	1	1.76	1.76	1.76	
	8		3	0.7	1.3	5	1.5	1				
	8		3	0.7	1.3	5	1.5	1				
									4.04	3.6	3.6	11.24
												37.36

Jourezijde: 4 moten gelijktijdig.

Moot Zijde Joure (ZO)	aantal palen	Doorlooptijd per 4 moten compleet (dgn)							[WKN]			TOTAAL
		Vrijmaken	Kernboren	Palen	Uitharden	Afwerken	Verkeer					
21	24	5	2	2.9	5	2.5	1	0.58				
	29	3	2.4	3.4	5	2.8	1		0.68			
	29	3	2.4	3.4	5	2.8	1			0.68		
20	24	7	2	2.9	5	2.5	1	0.58				
	31	3	2.6	3.6	5	2.9	1		0.72			
	31	3	2.6	3.6	5	2.9	1			0.72		
19	24	8	2	2.9	5	2.5	1	2.58				
	28	5	2.3	3.3	5	2.8	1		2.12			
	28	5	2.3	3.3	5	2.8	1			2.12		
18	24	6	2	2.9	5	2.5	1	2.28				
	27	3	2.3	3.2	5	2.7	1		2.38			
	27	3	2.3	3.2	5	2.7	1			2.38		
								6.02	5.9	5.9	17.82	
17	18	5	1.5	2.3	5	2.1	1	1.76				
	27.5	3	2.3	3.3	5	2.7	1		1.72			
	27.5	3	2.3	3.3	5	2.7	1			1.72		
16	16	3	1.3	2.1	5	2	1	0.42				
	20	3	1.7	2.5	5	2.3	1		0.5			
	20	3	1.7	2.5	5	2.3	1			0.5		
15	16	3	1.3	2.1	5	2	1	0.42				
	19	3	1.6	2.4	5	2.2	1		0.48			
	19	3	1.6	2.4	5	2.2	1			0.48		
14	16	3	1.3	2.1	5	2	1	2.02				
	17	3	1.4	2.2	5	2.1	1		2.06			
	17	3	1.4	2.2	5	2.1	1			2.06		
								4.62	4.76	4.76	14.14	
13	12	5	1	1.7	5	1.8	1	1.54				
	12	3	1	1.7	5	1.8	1		1.14			
	12	3	1	1.7	5	1.8	1			1.14		
12	12	3	1	1.7	5	1.8	1	0.34				
	12	3	1	1.7	5	1.8	1		0.34			
	12	3	1	1.7	5	1.8	1			0.34		
11	12	3	1	1.7	5	1.8	1	0.34				
	12	3	1	1.7	5	1.8	1		0.34			
	12	3	1	1.7	5	1.8	1			0.34		
10	12	3	1	1.7	5	1.8	1	0.34				
	10	3	0.8	1.5	5	1.6	1		0.3			
	10	3	0.8	1.5	5	1.6	1			0.3		
								2.56	2.12	2.12	6.8	
9	12	3	1	1.7	5	1.8	1	1.9				
	10	3	0.8	1.5	5	1.6	1		1.82			
	10	3	0.8	1.5	5	1.6	1			1.82		
8	8	3	0.7	1.3	5	1.5	1	0.26				
	4	3	0.3	0.9	5	1.3	1		0.18			
	4	3	0.3	0.9	5	1.3	1			0.18		
7	8	3	0.7	1.3	5	1.5	1	0.26				
	4	3	0.3	0.9	5	1.3	1		0.18			
	4	3	0.3	0.9	5	1.3	1			0.18		
								2.42	2.18	2.18	6.78	
	1225										45.54	

Pompkelders

Voor de doorlooptijden van de werkzaamheden aan de pompkelders moot 22 aan Jourezijde en moot 23 aan Sneekzijde is op vergelijkbare wijze onderstaande inschatting aangehouden.

Pompkelders.

waterkelders		Doorlooptijd per 4 moten compleet (dgn)							[WKN]			TOTAAL
		Vrijmaken	Kernboren	Palen	Uitharden	Afwerken	Verkeer					
22	33	5	2.8	8.8	5	7.8	1	6.08				
	31.5	5	2.6	8.4	5	7.6	1		5.92			
	31.5	5	2.6	8.4	5	7.6	1			5.92		
23	33	5	2.8	8.8	5	7.8	1	6.08				
	29	5	2.4	7.8	5	7.4	1		5.72			
	29	5	2.4	7.8	5	7.4	1			5.72		

B Zettingsberekening bemaling (februari 2023)

In eerste instantie is een zettingsberekening gemaakt waarbij een bemaling voor moot 26 is voorzien. Hierbij is geen retourbemaling toegepast. De resultaten van deze zettingsberekening zijn hier opgenomen.

B.1 Bemaling put (moot 26) tot NAP -10,3 m

De berekende en optredende zettingen worden veroorzaakt door daling van de grondwaterstand en waterspanningen in de ondergrond als gevolg van de bemaling. De daling van de waterspanningen veroorzaakt een toename van korrelspanning in de ondergrond, waardoor zettingsgevoelige lagen, conform de zettingstheorie samengedrukt worden. De uitkomsten van de uitgevoerde bemalingsberekeningen geven contourlijnen met verlaging van grondwaterstanden c.q. -spanningen voor de volgende situaties:

- De freatische grondwaterstand.
- Verlaging in de zandlaag boven de pleistocene klei (NAP -3/-8m).
- Verlaging in de zandlaag onder de pleistocene klei (NAP -13/-29 m).
- Verlaging in de diepere zandlaag (NAP < -33 m).

De bemaling is voor 2 situaties berekend:

1. Bemaling lokaal bij moot 26 bemalen wordt tot onderzijde van de tunnelvloer op NAP -10,3 m.
2. Bemaling tot een waterdrukverlaging langs de gehele onderzijde van de tunnelbak van tenminste 1 à 2 m (tot circa NAP -3 m).

De optredende zettingen zijn afhankelijk van de mate van grondwaterstands- en waterspanningsdalingen. Derhalve zullen de zettingen bij een uniforme ondergrond globaal de contourlijnen volgen van de waterstandsdalingen uit het bemalingsadvies. Voor de 2 berekende situaties zijn die navolgend weergegeven.

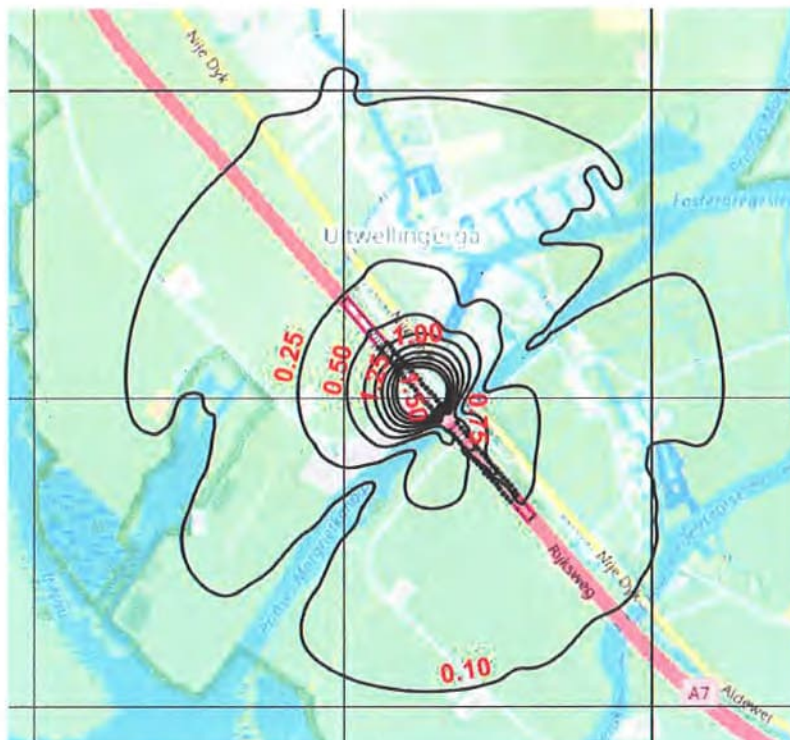
B.1.1 Bemaling moot 26 (lokaal) tot NAP -10,3 m

Omdat de bemaling lokaal plaatsvindt (putbemaling) zijn de contourlijnen met gelijke waterstandsdaling in het algemeen vrij cirkelvormig.

In de navolgende figuren zijn de contourlijnen weergegeven van de waterstandsdalingen als gevolg van een lokale (put)bemaling ter plaatse van de omhoog gekomen moot 26. De bemaling betreft een onttrekking tot onderzijde van de tunnelvloer op NAP -10,3 m.



Figuur B.1: Daling grondwaterstand als gevolg van bemaling moot 26 tot NAP -10,3 m.



Figuur B.2: Daling waterspanning in tussenzandlaag (boven Keileem) als gevolg van bemaling moot 26 tot NAP -10,3 m.

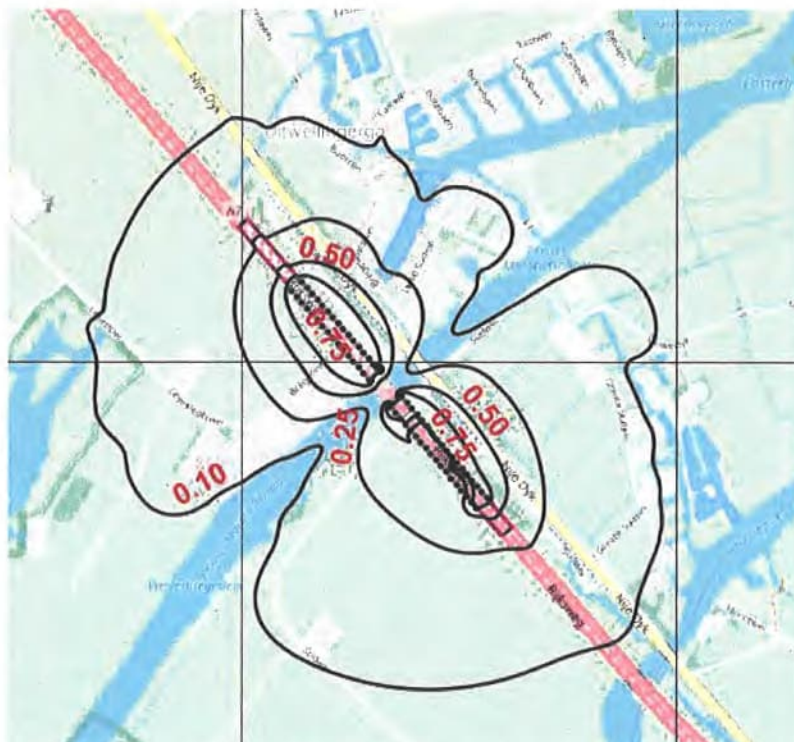


Figuur B.3: Daling waterspanning in pleistocene zand tot circa NAP -30 m als gevolg van bemaling moot 26 tot NAP -10,3 m.

B.1.2 Bemaling tunnelbak tot NAP -3 m

Omdat de bemaling over een grotere lengte plaatsvindt zijn de contourlijnen van gelijke waterstands daling meer langgerekt en ovaalvormig.

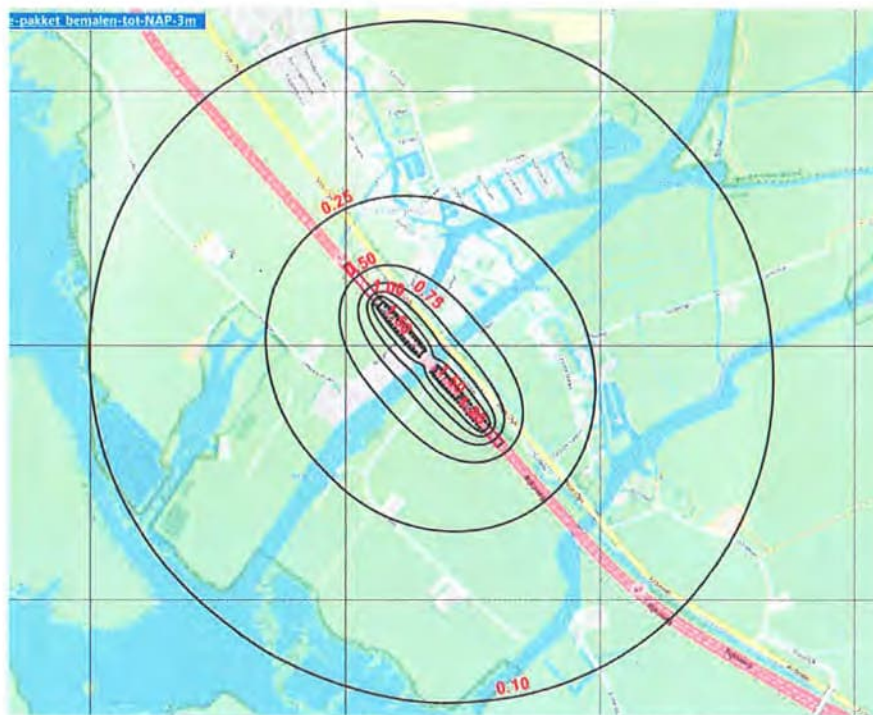
In de navolgende figuren zijn de contourlijnen weergegeven van de waterstands dalingen als gevolg van een bemaling van de tunnelbak tot circa NAP -3 m.



Figuur B.4: Daling grondwaterstand als gevolg van bemaling tunnelbak tot NAP -3 m.



Figuur B.5: Daling waterspanning in tussenzandlaag (boven Keileem) als gevolg van bemaling tunnelbak tot NAP -3 m.



Figuur B.6: Daling waterspanning in pleistocene zand tot circa NAP -30 m als gevolg van bemaling tunnelbak tot NAP -3 m.

B.2 Bepaling zettingsituaties

Op basis van voorgaande, berekende grondwaterstands- en waterspanningsverlagingen in de verschillende relevante lagen zijn de volgende situaties bepaald op basis waarvan de zettingsberekeningen zijn uitgevoerd. Deze situaties betreffen in principe een aantal globale afstanden vanaf de bemaling waar zettingen ten gevolge van de waterstandsดาลiningen optreden.

B.2.1 Zettingen ten gevolge van (put)bemaling, moot 26 tot NAP -10,3 m

De zettingen zijn berekend voor de volgende situaties, c.q. afstanden vanaf de putbemaling:

- A. Zettingen op globaal 400 m afstand, met een grondwaterstandsdeling van 0,10 m, een waterspanningsdeling in de tussenzandlaag van 0,20 m en in het diepere zand (pleistoceen) 0,40 m.
- B. Zettingen op globaal 250 m afstand, met een grondwaterstandsdeling van 0,25 m, een waterspanningsdeling in de tussenzandlaag van 0,50 m en in het diepere zand (pleistoceen) 1,0 m.
- C. Zettingen op globaal 150 m afstand, met een grondwaterstandsdeling van 0,50 m, een waterspanningsdeling in de tussenzandlaag van 1,0 m en in het diepere zand (pleistoceen) 1,5 m.
- D. Zettingen op globaal 100 m afstand, met een grondwaterstandsdeling van 1,25 m, een waterspanningsdeling in de tussenzandlaag van 1,5 m en in het diepere zand (pleistoceen) 2,0 m.

B.2.2 Zettingen ten gevolge van bemaling tunnelbak tot NAP -3,0 m

Omdat de bemaling van de tunnelbak over een grotere lengte plaatsvindt zijn de contourlijnen meer langgerekt en ovaalvormig. De aangegeven afstanden betreffen dan ook de afstanden meet loodrecht op de toeritten en de tunnelbak.

De zettingen zijn berekend voor de volgende situaties, c.q. afstanden vanaf de bemaling van de tunnelbak.

- A. Zettingen op globaal 300 m afstand, met een grondwaterstandsdeling van 0,10 m, een waterspanningsdeling in de tussenzandlaag van 0,20 m en in het diepere zand (pleistoceen) 0,40 m.
- B. Zettingen op globaal 150 m afstand, met een grondwaterstandsdeling van 0,25 m, een waterspanningsdeling in de tussenzandlaag van 0,25 m en in het diepere zand (pleistoceen) 0,75 m.
- C. Zettingen op globaal 50 m afstand, met een grondwaterstandsdeling van 0,50 m, een waterspanningsdeling in de tussenzandlaag van 0,75 m en in het diepere zand (pleistoceen) 1,25 m.

B.3 Berekeningsresultaten Zettingen

Zoals aangegeven zijn de optredende zettingen berekend voor de twee aangegeven bemalingssituaties en voor een tijdsduur van zowel 3 maanden bemalen (100 dagen) als 6 maanden bemalen (200 dagen).

Afhankelijk van de opbouw en samenstelling van de ondergrond zal er meer of minder zetting optreden. Op basis van de opgestelde modelschematisatie is in het overzicht met de berekende zettingen onderscheid gemaakt in de grondopbouw/verticaal waar de meeste zetting optreedt en waar de minste zetting optreedt.

B.4 Resultaten zettingsberekeningen

In onderstaande tabel zijn de berekende zettingen weergegeven voor de verschillende afstanden vanaf de bemaling en voor bemalingsperioden van 100 en 200 dagen (3 en 6 maanden).

Berekende situatie bemaling Afstanden vanaf de bemaling	Maximale Zetting [m] na 3 mnd.	Minimale Zetting [m] na 3 mnd.	Maximale Zetting [m] na 6 mnd.	Minimale Zetting [m] na 6 mnd.
Putbemaling NAP -10,3 m 400 m	0,012	0,040	0,013	0,005
Putbemaling NAP -10,3 m 250 m	0,026	0,010	0,030	0,011
Putbemaling NAP -10,3 m 150 m	0,044	0,017	0,050	0,019

Putbemaling NAP -10,3 m 100 m	0,062	0,023	0,072	0,026
Bemaling tunnelbak NAP -3 m 300 m	0,012	0,004	0,013	0,005
Bemaling tunnelbak NAP -3 m 150 m	0,023	0,008	0,026	0,009
Bemaling tunnelbak NAP -3 m 50 m	0,038	0,014	0,044	0,016

Tabel B.7-3: Overzicht berekende zettingen.

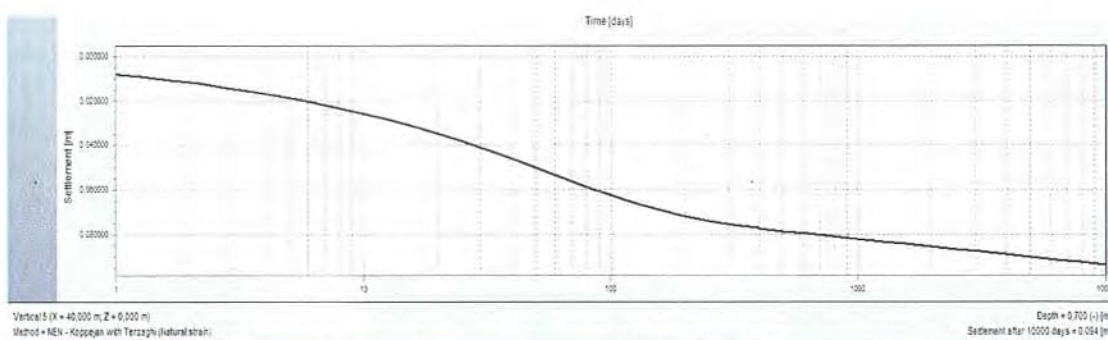
B.5 Zettingsverloop in de tijd

In de berekeningen is rekening gehouden met het zettingsverloop in de tijd. Mede als gevolg van de aanwezigheid van een tussenzand laag en de relatief dunne samendrukbare lagen, zal het consolidatie proces vrij snel verlopen en zullen de zettingen relatief snel in de tijd optreden.

Uit de berekeningen blijkt, dat:

- Na 3 maanden bemaling (100 dagen) zettingen optreden die in de orde liggen van 65 % van de totale berekende eindzetting na 10.000 dagen (circa 30 jaar).
- Na 6 maanden bemalen bedraagt de opgetreden zetting ongeveer 75 % van de totale berekende eindzetting.

In onderstaande figuur is het tijdzettingsverloop weergegeven voor de maximaal berekende zetting bij de (put)bemaling (tot NAP -10,3 m) van moot 26, op een afstand van circa 100 m. Dit beeld van het zettingsverloop in de tijd is voor alle uitgevoerde berekeningen ongeveer gelijk.



Figuur B.7: Zettingsverloop in de tijd voor putbemaling moot 26 op circa 100 m afstand.

B.6 Mogelijk optreden van schade aan bebouwing

B.6.1 Zettingsschade op staal gefundeerde bebouwing:

Als gevolg van grondophogingen bestaat er kans op schade aan belendingen. Voor panden, die op staal gefundeerd zijn, zal dit mogelijk zettingsschade zijn. In de Handreiking voor het ontwerpen van rivierdijken, maar ook in CUR 162:2022; Construeren met grond is, op basis van zettingen en daaruit volgende zettingshellingen, een indeling gemaakt in schade categorieën:

- Zettingshelling $> 1 : 100$, ernstige schade (AM), risico's voor bewoners niet uitgesloten, veelal moet worden overgegaan tot amoveren.
- Zettingshelling $1 : 100$ à $1 : 250$, constructieve schade (CS), kans op grotere repareerbare schade, geen risico voor de bewoners.
- Zettingshelling $1 : 250$ à $1 : 500$, esthetische schade (ES), kans op eenvoudig repareerbare schade.
- Zettingshelling $< 1 : 500$, geen schade (GS).

Om de zettingshelling te kunnen bepalen wordt normaal gesproken de zetting ter plaatse van de dichtst bij de ophoging gelegen gevel berekend, en vervolgens in een verticaal 5 m

daarachter. De zettingshelling wordt vervolgens bepaald uit de berekende verschil-zetting over 5 m.

B.6.2 **Analyse met mogelijke schade als gevolg van de berekende zettingen.**

Een belangrijk aspect in het beoordelen van zettingsschade bij bebouwing is de funderingswijze.

Funderingen op staal zijn gevoeliger voor zettingsverschillen dan funderingen op palen. Wij hebben geen overzicht van de funderingswijze van de bebouwing.

Daarom gaan we er in deze analyse conservatief van uit dat de bebouwing op staal is gefundeerd.

Vershil in maaiveld zetting ter plaatse van de aanwezige bebouwing kan leiden tot een rotatie over verschilrotatie in het gebouw. Een verschil in maaiveldzetting kan komen door een verschil in grondopbouw over een relatief korte afstand ter plaatse van de woning.

De meeste bebouwing is gelegen op 150 m of meer van de tunnel. Bij de zwaarste bemaling (bemaling van moot 26) is de maximale zetting op 150 m 5 cm.

Voor de mogelijke verschilzetting gaan wij normaliter uit van 25% van de maximale zetting.

Dit is $25\% \cdot 5 \text{ cm} = 1,25 \text{ cm}$.

Bij een afstand van 5 m is dit een rotatie van 1:400.

In de Handreiking voor het ontwerpen van rivierdijken, maar ook in CUR 162:2022; Construeren met grond, is op basis van zettingen en daaruit volgende zettingshellingen een indeling gemaakt in schade categorieën:

- Zettingshelling $> 1 : 100$, ernstige schade (AM), risico's voor bewoners niet uitgesloten, veelal moet worden overgegaan tot amoveren.
- Zettingshelling $1 : 100$ à $1 : 250$, constructieve schade (CS), kans op grotere repareerbare schade, geen risico voor de bewoners.
- Zettingshelling $1 : 250$ à $1 : 500$, esthetische schade (ES), kans op eenvoudig repareerbare schade.
- Zettingshelling $< 1 : 500$, geen schade (GS).

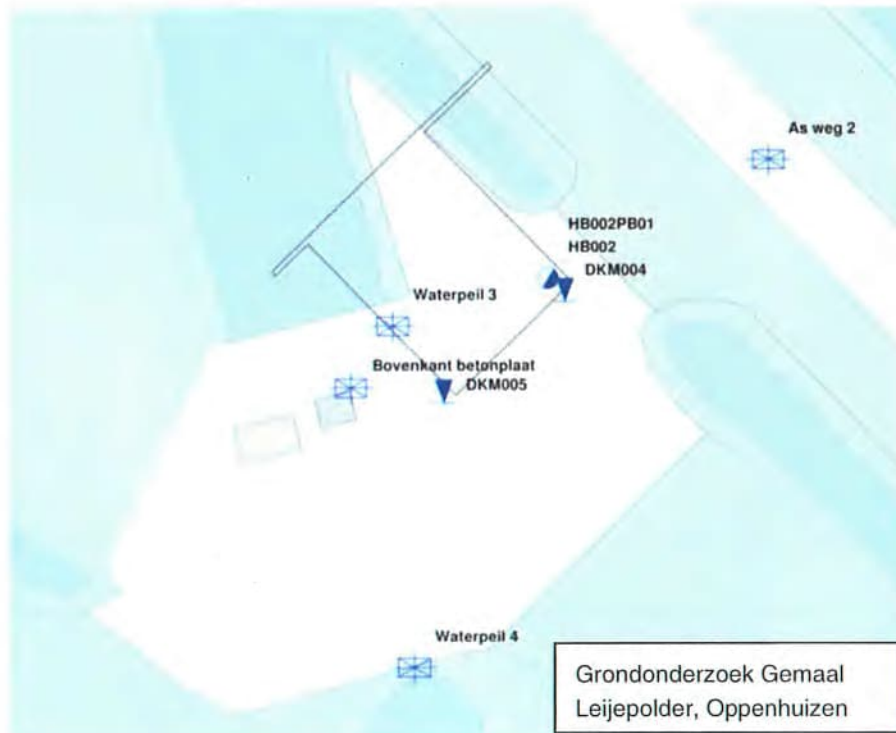
Volgens deze inschatting kan er bij de bebouwing op 150 m afstand esthetische schade ontstaan. Gedacht moet worden aan kleine scheuren. Deze is eenvoudig te repareren.

Op 100 meter ten zuiden van de tunnel staat een schuur. Deze stond er in 1975 ook en had toen schade. De schade is niet apart beschreven in het destijds gemaakte rapport, dus het zal waarschijnlijk om esthetische schade gaan. In deze schuur kan dit nu ook weer optreden. De kans is schade is wel kleiner dan in 1975/1976 omdat de grond is voorbelast en de bemaling minder lang duurt.

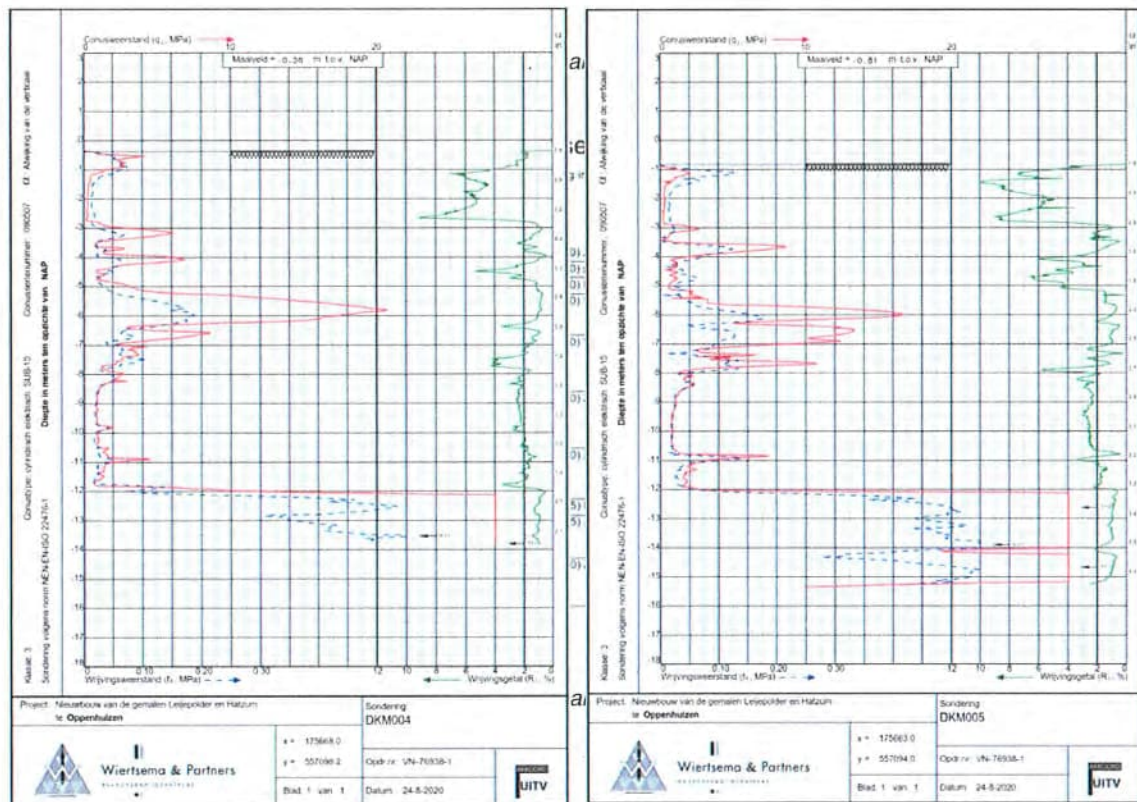
Constructieve schades aan bebouwing zijn niet te verwachten, daarvoor moeten de zettingsverschillen veel groter zijn.

Op 150 meter ten noorden van de tunnel is een gasleiding aanwezig. Onze inschatting is dat deze leiding de berekende zettingen kan volgen. Het is wel mogelijk dat er problemen ontstaan bij de aansluiting op de zinker onder het Prinses Margrietkanaal. Dit moeten we nog onderzoeken.

C Grondonderzoek

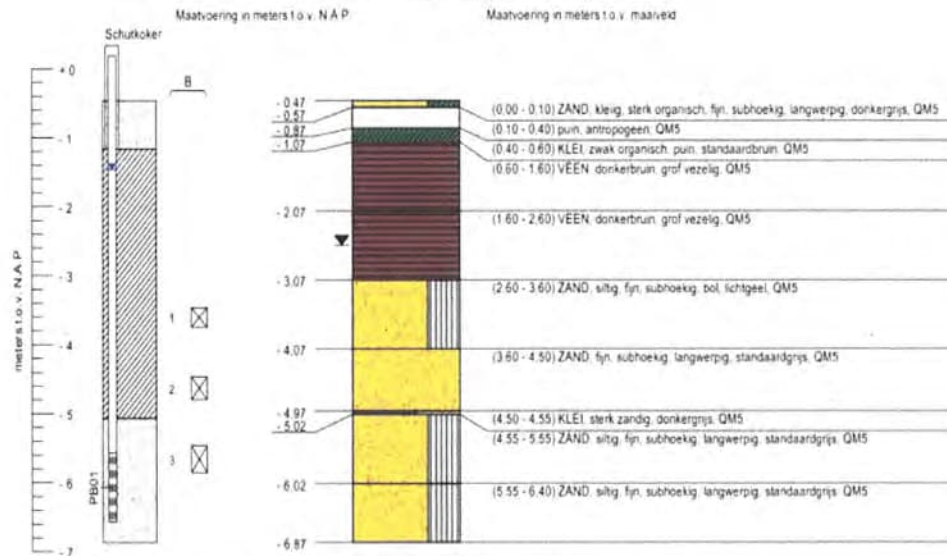


Figuur C1: Situatie grondonderzoek Gemaal Leijepolder, oktober 2020.



Figuur C2: Sondelingen bij Gemaal Leijepolder.

Veldboorbeschrijving (klasse 2)



Figuur C3: Handboring HB002 bij Gemaal Leijepolder.

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