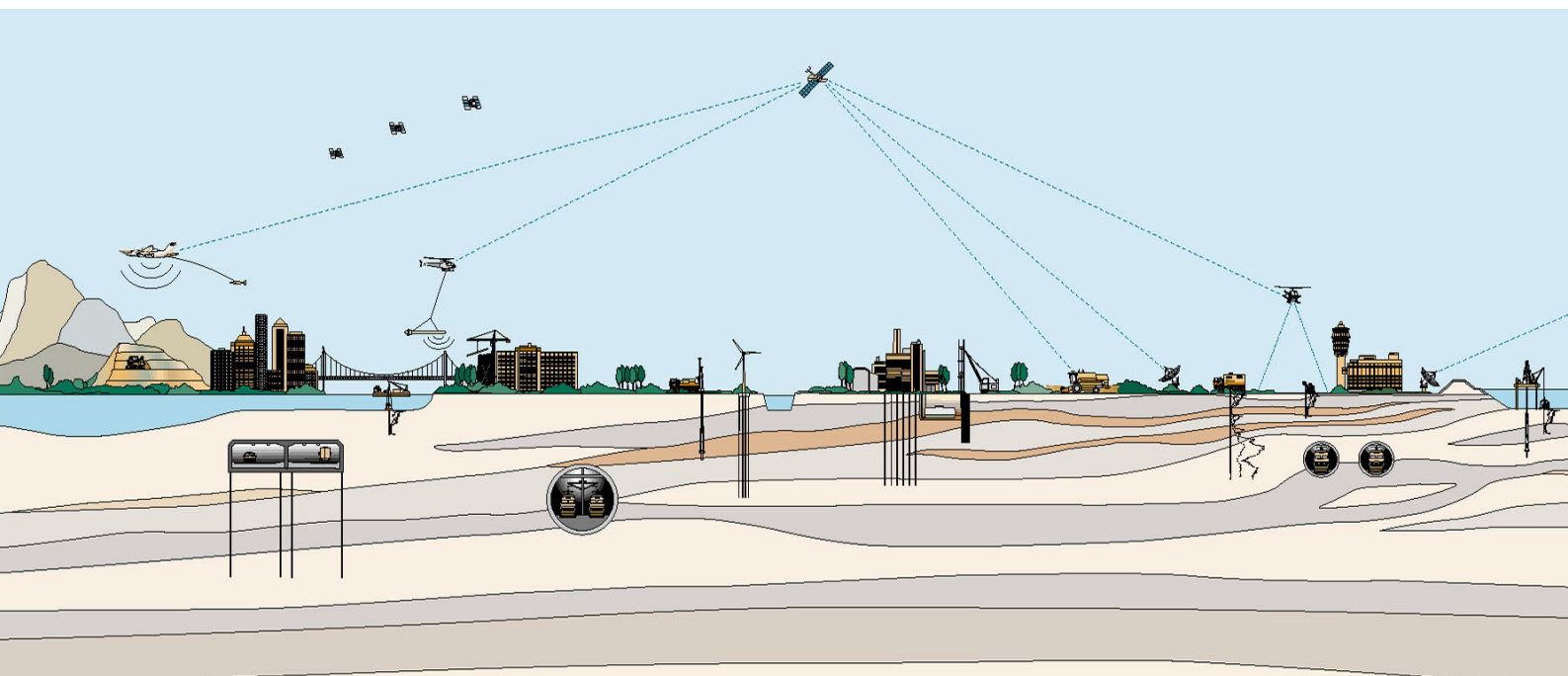


RAPPORT
betreffende

**EINDEVALUATIE ZETTINGSMODELLEN
PROJECT BLOEMENDALERPOLDER TE
WEESP**

Opdrachtnummer: 3009-0261-000



RAPPORT
betreffende

**EINDEVALUATIE ZETTINGSMODELLEN
PROJECT BLOEMENDALERPOLDER TE
WEESP**

Opdrachtnummer: 3009-0261-000

Opdrachtgever : Bloemendalerpolder
Postbus 147
1380 AC Weesp

Projectleider : ir. F.J.M. Hoefsloot

Opgesteld door : ir. F.J.M. Hoefsloot, Principal Consultant
ir. L.W. Schadee, Adviseur Geotechniek

| VERSIE | DATUM | OMSCHRIJVING WIJZIGING | PARAAF PROJECTLEIDER |
|--------|------------------|------------------------|-------------------------|
| 1 | 24 Februari 2014 | Definitief | |
| | | | |
| | | | |

FILE: 3009-0261-000.R06 v1.doc Op deze rapportage zijn de algemene leveringsvoorwaarden 2011 van toepassing die een aansprakelijkheidsbeperking bevatten

Kantoor: Veurse Achterweg 10, 2264 SG Leidschendam, Tel.: 070-3111271, Email: info@fugro.nl, www.fugro.nl
Handelsreg. 27114147. BTW-nr NL005621409B08. Fugro GeoServices maakt deel uit van Fugro N.V.

| <u>INHOUDSOPGAVE</u> | <u>Blz.</u> |
|---|----------------|
| 1. INLEIDING | 2 |
| 2. PROJECTOMSCHRIJVING | 3 |
| 2.1. Proefproject | 3 |
| 2.2. Grond- en laboratoriumonderzoek | 3 |
| 2.3. Planning proefterpen | 4 |
| 3. BODEMSCHEMATISATIE EN PARAMETERBEPALING | 5 |
| 3.1. Bodemschematisatie | 5 |
| 3.2. Grondwaterstand | 5 |
| 3.3. Afleiding geotechnische parameters | 6 |
| 3.4. Samenvatting parameterkeuze | 13 |
| 3.5. Overige uitgangspunten | 13 |
| 4. METINGEN | 15 |
| 4.1. Zakbaakmetingen | 15 |
| 5. POSTDICTIES ZETTINGSGEDRAG EN EVALUATIE MODELLEN | 18 |
| 5.1. Uitgangspunten | 18 |
| 5.2. Metingen vs. predicties | 19 |
| 5.3. Conclusies postdicties | 21 |
| <u>BIJLAGEN</u> | <u>Nr.</u> |
| - Inrichting proefterrein | 1 |
| - Gecombineerde sonderingen | 2 |
| - Zakbaakmetingen | 3 |
| - Zettingmeetslangen | 4 t/m 9 |
| - Hellingmeetbuizen | 10 t/m 17 |
| - Waterspanningsmetingen | 18 |
| - Waterspanningsmetingen midden veenlaag | 19 |
| - Waterspanningsmetingen terp 1 | 20 |
| - Waterspanningsmetingen terp 2 | 21 |
| - Overzicht postdicties terp 1 | 22 t/m 27 |
| - Overzicht postdicties terp 2 | 28 t/m 33 |

1. INLEIDING

Tussen Muiden en Weesp ligt de Bloemendalerpolder. Anno 2007 bestaat de Bloemendalerpolder nog vooral uit cultuurlandschap met langgerekte kavels veenweidegrond. In de toekomst wordt hier een gebied ontwikkeld waarin natuur, recreëren en wonen fijnmazig op elkaar zijn afgestemd. Op het totale grondgebied van Muiden en Weesp komen 4.500 woningen. Tenminste 2.350 daarvan worden er gebouwd in een nieuw woongebied met veel oog voor het traditionele karakter van de Vechtstreek. Natuur en recreatie nemen de meeste plek in beslag.

Probleemstelling

In een uitgevoerd geotechnisch onderzoek zijn de verwachte zetting en de doorlooptijd beschouwd van de ophogingen die noodzakelijk zijn voor het bouwrijp maken van het terrein. De berekeningen en de prognose zijn vergeleken met de ervaringen van opgetreden zetting bij een tweetal bouwrijpmaakprojecten in de omgeving. Hieruit bleek dat het zettingsverloop sterk kan afwijken van de zettingsprognose ten aanzien van de consolidatiesnelheid en eindzetting. Kleine variaties in de consolidatiecoëfficiënt van het veen hebben grote gevolgen voor de doorlooptijd en zodoende voor de benodigde voorbelastingstijd. Geconcludeerd wordt dat het gedrag van het veen een risico is in tijd en geld.

Project

Projectbureau Bloemendalerpolder heeft besloten een praktijkproef uit te voeren. De proef bestaat uit het aanbrengen van meerdere proefophogingen met een gedegen monitoring. Hiermee kan het gedrag van het veen en daarmee het zettingsproces beter worden voorspeld.

Geo-impulsprogramma

Het project wordt mede ondersteund door Geo-impuls. Dit onderzoeksprogramma richt zich op het lange-termijngedrag van geotechnische constructies. Met name het verticale en horizontale vervormingsgedrag van grond op de lange termijn zijn interessante onderzoeksobjecten.

Voorgaande rapportages

In het kader van het onderzoek zijn reeds de volgende rapporten verschenen:

- Projectplan; rapport 3009-0261-000.R01_v3 van 27 augustus 2010;
- Grond- en laboratoriumonderzoek en instrumentatierapport; rapport 3009-0261-000.R02_v3 van 31 mei 2012;
- Zettingspredicties; rapport 3009-0261-000.R03v1 van 16 november 2011;
- Deltares: Factual report: Aanvullend grondonderzoek; project 1202415-020 mei 2012;
- Deltares: Factual report: Installatie meetapparatuur en monitoring 1^e jaar; project 1202415-020 okt. 2011;
- Evaluatie zettingsmodellen; rapport 3009-0261-000.R04 c1 van 24 januari 2012;
- Meetresultaten Proefterpen; rapport 3009-0261-000.R05_v2 van 15 maart 2013.

Doelstelling rapport

In dit rapport is op basis van de zakbaakmetingen over de periode oktober 2010 tot en met januari 2014 een evaluatie gemaakt van de predicties voor de terpen en zijn voor relevante modellen aangepaste parameters opgesteld.

2. PROJECTOMSCHRIJVING

2.1. Proefproject

Het proefproject is gelegen aan de Papelaan te Weesp. In figuur 2-1 is een bovenaanzicht van de onderzoekslocatie gepresenteerd.



Figuur 2-1 Onderzoekslocatie aan de Papelaan te Weesp (bron: Google Maps)

Voor het project is een tweetal proefophogingen aangebracht. Deze ophogingen hebben de volgende eigenschappen:

- Een terp zonder zettingsversnellende maatregelen;
- Een terp met verticale drainage;
- Afmeting grondoppervlak 36 x 26 m;
- Hoogte 3,0 m; talud 1:2;
- Locatie met dikke slappe lagen ca. 4,0 à 5,8 m;
- Monitoring ophoogslagen, waterspanning op diverse diepten en zakking maaiveld;
- Monitoringperiode ca. 5 jaar.

Het proefproject bestaat uit:

- Uitvoeren grondonderzoek
- Opstellen zettingsprognose
- Aanbrengen instrumentatie
- Aanbrengen ophogingen
- Aanbrengen stalen palen
- Uitvoeren, verwerken en evaluatie van de metingen en de zettingsprognose.

2.2. Grond- en laboratoriumonderzoek

Het grond- en laboratoriumonderzoek is deels uitgevoerd door Fugro en deels door Deltares.

Het grondonderzoek uitgevoerd door Fugro heeft bestaan uit:

1. Uitzetten en waterpassen van de onderzoekslocaties ten opzichte van RD en NAP;
2. 17 Sonderingen met kleef- en waterspanningsmeting tot in het zandpakket;
3. 11 Vanetesten op 4 locaties;
4. 4 Bolconussonderingen;
5. 8 CPM testen op 2 locaties;
6. Laboratoriumonderzoek, bestaande uit o.m. triaxiaalproeven en samendrukkingsproeven.

Het grondonderzoek uitgevoerd door Deltares heeft bestaan uit:

1. 2 Begemann boringen ter plaatse van de terpen en één boring op de referentielocatie;
2. Laboratoriumonderzoek, bestaande uit o.a. K_0 -CRS testen.

Voor de resultaten van het grondonderzoek wordt verwezen naar rapport 3009-0261-000.R02_v3 van 31 mei 2012.

2.3. Planning proefterpen

De aanlegfasering is in tabel 2-1 gegeven. De ophoogslagen zijn reeds aangebracht. Ruim een jaar na de start van de ophoging van de terpen is 0,5 m extra overhoogte verwijderd van de helft van de terpen. Dit heeft op 19 december 2011 plaatsgevonden.

Tabel 2-1 Fasering aanleg terpen

| | | | Terp 1 | Terp 2 |
|---|-----|------|-----------------------|-------------------------------|
| Afmeting grondoppervlak | | | 36 x 26 m | 36 x 26 m |
| hoogte | | | 3,0 m | 3,0 m |
| talud | | | 1:2 | 1:2 |
| verticale drainage | | | geen | h.o.h. 1,0 m driehoekstramien |
| Fasering | wk | dgn | | |
| 1 ^e slag, 28 oktober 2010 | 1 | 0 | 1,0 m | 1,0 m |
| aanbrengen drainage | 2 | 5 | n.v.t. | h.o.h. 1,0 m |
| 2 ^e slag, 22 november 2010 | 4 | 25 | 0,5 m | 0,5 m |
| 3 ^e slag, 14 december 2010 | 7 | 47 | 0,5 m | 0,5 m |
| 4 ^e slag, 25 januari 2011 | 13 | 89 | 0,5 m | 0,5 m |
| 5 ^e slag, 17 februari 2011 | 16 | 111 | 0,5 m | 0,5 m |
| verwijderen extra over- hoogte; 19 december 2011 | 60 | 416 | 0,5 m (over de helft) | 0,5 m (over de helft) |
| laatste beschikbare meting van 20 januari 2014 | 169 | 1182 | | |
| einde proef | 260 | | | |

3. BODEMSCHEMATISATIE EN PARAMETERBEPALING

3.1. Bodemschematisatie

Voor beide terpen is een bodemschematisatie gemaakt, op basis van de beschikbare sonderingen en boringen en ook mede op basis van classificatie en proeven uit het lab.

Terp 1

Op basis van het grondonderzoek kan de bodemgesteldheid bij terp 1 globaal worden geschematiseerd zoals in tabel 3-1 is weergegeven. De dikte van het slappe lagenpakket is onder terp 1 ca. 4,0 m.

Tabel 3-1 Globale bodemgesteldheid Terp 1

| Diepte bovenkant laag in m t.o.v. NAP | Bodembeschrijving |
|--|-------------------------------|
| -1,73 | Maaiveld |
| -1,73 tot -2,0 | KLEI zwak humeus, uitgedroogd |
| -2,0 tot -5,7 | VEEN slap |
| -5,7 tot -10,5 | ZAND los tot matig gepakt |
| -10,5 | Maximaal verkende diepte |

Terp 2

Op basis van het grondonderzoek kan de bodemgesteldheid bij terp 2 globaal worden geschematiseerd zoals in tabel 3-2 is weergegeven. Het slappe lagenpakket is onder terp 2 ca. 5,8 m dik.

Tabel 3-2 Globale bodemgesteldheid Terp 2

| Diepte bovenkant laag in m t.o.v. NAP | Bodembeschrijving |
|--|-------------------------------|
| -1,75 | Maaiveld |
| -1,75 tot -2,0 | KLEI zwak humeus, uitgedroogd |
| -2,0 tot -7,5 | VEEN slap |
| -7,5 tot -11,0 | ZAND los tot matig gepakt |
| -11,0 | Maximaal verkende diepte |

Opvallend is het relatief grote verschil in dikte slappe lagen tussen terp 1 en 2. Bij beide terpen is de variatie in dikte gering zoals blijkt uit de sonderingen (bijlage 1).

3.2. Grondwaterstand

Tijdens de uitvoering van het onderzoek is de grondwaterstand niet gepeild.

Witteveen en Bos en Grontmij hebben in juni 2007 een rapport uitgebracht "Bodem- en Grondonderzoek Bloemendalerpolder" (referentie: WP48-2/marr2/018), waarin aan de hand van metingen en berekeningen de freatische grondwaterstand in de Bloemendalerpolder is bepaald. Voor de projectlocatie van de proefferpen volgt uit dat rapport een grondwaterstand

van NAP -2,1 tot NAP -2,2 m. Voor de berekening van de zettingen is op basis daarvan uitgegaan van een grondwaterstand van NAP -2,1 m.

3.3. Afleiding geotechnische parameters

Op basis van de beschikbare sonderingen, boringen en laboratoriumproeven zijn de parameters vastgesteld voor de zettingsberekeningen. Daar het een predictie betreft en geen ontwerp, is gekozen om de gemiddelde waarden van de resultaten te gebruiken en geen statistisch afgeleide conservatieve waarden, zoals bij een ontwerp gebruikelijk is. Daar waar een proef sterk afwijkt van de andere proeven en als niet realistisch wordt ervaren is deze buiten beschouwing gelaten. Dit is dan vermeld.

Een overzicht van de voor de zettingsberekeningen relevante resultaten van de labproeven is opgenomen in bijlage 2.

Volumieke gewichten

Op basis van de gemiddelde waarden van de gemeten volumieke gewichten in het lab zijn de volgende volumieke gewichten gebruikt in de zettingspredicties:

| | Droog volumegewicht (γ_d) | Nat volumegewicht (γ_s) |
|-------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Klei: | 14,0 kN/m ³ | 14,0 kN/m ³ |
| Veen: | n.v.t. kN/m ³ | 10,3 kN/m ³ |
| Zand, diep: | 16,0 kN/m ³ | 20,0 kN/m ³ |
| Ophoogzand: | 17,0 kN/m ³ | 19,0 kN/m ³ |

Voor de bepaling van het volumegewicht van het veen is monster BT2 liner 12 niet meegenomen, daar deze een sterk afwijkend volumegewicht heeft. Zie bijlage 2 voor de afleiding.

Samendrukkingsparameters

Veen:

Op basis van de samendrukkingsproeven en K_0 -CRS proeven worden de volgende samendrukkingsparameters voor het veen toegepast in de predicties:

| Koppejan: | a,b,c-isotachen: | NEN-Bjerrum: |
|--------------|------------------|--------------------|
| $C'_p = 6$ | a = 0,040 | RR = 0,061 |
| $C_p = 10$ | b = 0,327 | CR = 0,493 |
| $C'_s = 102$ | c = 0,014 | $C_\alpha = 0,020$ |
| $C_s = 102$ | | |

Dit is bij alle parameters het gemiddelde volgend uit de labproeven (zie rapport 3009-0261-000.R02v2, bijlage 3c en de K_0 -CRS proeven). Voor de bepaling van de c-parameter zijn alleen de samendrukkingsproeven gebruikt, daar deze proeven een betrouwbaardere c-parameter geven dan de K_0 -CRS proeven.

De samendrukkingsproef op het monster BT2 L12 geeft een afwijkend beeld van de andere samendrukkingsproeven. Dit monster reageert stijver en heeft ook een hoger volumiek gewicht dan de andere monsters. Dit monster is wellicht kleiiger dan de andere veenmonsters. De resultaten van dit monster zijn daarom niet meegenomen in de bepaling van de parameters en zijn schuingedrukt in de tabel weergegeven.

Tabel 3-3 Resultaten samendrukkingsproef, parameters Koppejan

| Boring | Monster | Diepte van [m tov NAP] | classificatie | subclassificatie | proef | γ_{nat} [kN/m ³] | γ_{droog} [kN/m ³] | Koppejan | | | | |
|------------|---------|---------------------------|---------------|------------------|---------------|--|--|----------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | | | | | | | | σ'_p [kPa] | C _p | C' _p | C _s | C' _s |
| BT1 | 3 | -4.14 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.4 | 1 | 14.1 | 15.3 | 5.2 | 98.8 | 77 |
| BT1 | 4 | -5.14 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.4 | 0.8 | 3.4 | 7.4 | 5.7 | 128.2 | 126.2 |
| BT2 | 10 | -4.9 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.8 | 0.9 | 8.4 | 8.3 | 5.9 | 52.6 | 102 |
| BT2 | 11 | -6.19 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.6 | 0.9 | 16.7 | 9.2 | | 127.4 | |
| BT2 | 12 | -7.34 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 13.2 | 6.3 | 30.5 | 35.4 | 11.8 | 230.8 | 138.4 |
| Gemiddelde | | | | | | | | | 10 | 6 | 102 | 102 |

Tabel 3-4 A,b,c-isotachenparameters uit samendrukkingsproeven en K₀-CRS proeven

| Boring | Monster | Diepte van [m tov NAP] | classificatie | subclassificatie | proef | γ_{nat} [kN/m ³] | σ'_p [kPa] | Isotachen | | | | | | | |
|------------|---------|---------------------------|---------------|------------------|---------------|--|----------------------|-----------|-------|----------|----------|----------|-----|----------|----|
| | | | | | | | | a | b | c trap 3 | c trap 4 | c trap 5 | b/a | b/c(gem) | |
| BT1 | 3 | -4.14 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.4 | 19 | 0.055 | 0.315 | 0.010 | 0.013 | 0.015 | 6 | 25 | |
| BT1 | 4 | -5.14 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.4 | 15 | 0.065 | 0.356 | 0.014 | 0.016 | 0.017 | 5 | 23 | |
| BT2 | 10 | -4.9 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.8 | 17 | 0.052 | 0.319 | 0.015 | 0.016 | 0.017 | 6 | 20 | |
| BT2 | 11 | -6.19 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.6 | 20 | 0.010 | 0.354 | 0.010 | 0.017 | | 35 | 27 | |
| BT2 | 12 | -7.34 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 13.2 | 36 | 0.012 | 0.119 | 0.002 | 0.003 | 0.005 | 10 | 36 | |
| BT1 | 2B | -3 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 10 | 13.2 | 0.045 | 0.294 | 0.024 | | | 7 | 12 | |
| BT1 | 3D | -4.3 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 9.9 | 10 | 0.038 | 0.308 | 0.025 | | | 8 | 12 | |
| BT1 | 4D | -5.3 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 9.6 | 9.8 | 0.044 | 0.410 | 0.036 | | | 9 | 11 | |
| BT2 | 8B | -2.6 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 10.1 | 15 | 0.033 | 0.287 | 0.023 | | | 9 | 13 | |
| BT2 | 11B | -6.3 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 10 | 12.9 | 0.026 | 0.308 | 0.025 | | | 12 | 13 | |
| BT2 | 12B | -6.85 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 9.9 | 14.2 | 0.034 | 0.322 | 0.021 | | | 9 | 15 | |
| Gemiddelde | | | | | | | | | 0.040 | 0.327 | | 0.014 | | 11 | 17 |

Tabel 3-5 NEN-Bjerrum isotachenparameters uit samendrukkingsproeven en K₀-CRS proeven

| Boring | Monster | Diepte van [m tov NAP] | classificatie | subclassificatie | proef | γ_{nat} [kN/m ³] | σ'_p [kPa] | NEN Bjerrum | | | |
|------------|---------|---------------------------|---------------|------------------|---------------|--|----------------------|-------------|-------|----------------|-------|
| | | | | | | | | RR | CR | C _α | |
| BT1 | 3 | -4.14 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.4 | 15.8 | | 0.089 | 0.496 | 0.019 |
| BT1 | 4 | -5.14 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.4 | 8.1 | | 0.068 | 0.487 | 0.019 |
| BT2 | 10 | -4.9 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.8 | 12.9 | | 0.063 | 0.469 | 0.021 |
| BT2 | 11 | -6.19 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.6 | 21.3 | | 0.050 | 0.562 | 0.021 |
| BT2 | 12 | -7.34 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 13.2 | 38.6 | | 0.030 | 0.228 | 0.007 |
| BT1 | 2B | -3 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 10 | 11.4 | | 0.076 | 0.497 | |
| BT1 | 3D | -4.3 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 9.9 | 7.5 | | 0.057 | 0.490 | |
| BT1 | 4D | -5.3 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 9.6 | 8.1 | | 0.057 | 0.633 | |
| BT2 | 8B | -2.6 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 10.1 | 12.0 | | 0.058 | 0.465 | |
| BT2 | 11B | -6.3 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 10 | 7.9 | | 0.040 | 0.421 | |
| BT2 | 12B | -6.85 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 9.9 | 7.5 | | 0.054 | 0.408 | |
| Gemiddelde | | | | | | | | | 0.061 | 0.493 | 0.020 |

Klei:

Koppejan:

C'_p = 7
C_p = 28
C'_s = 80
C_s = 320

a,b,c-isotachen:

a = 0,013
b = 0,160
c = 0,008

NEN-Bjerrum:

RR = 0,100
CR = 0,310
C_α = 0,014

De Koppejan en NEN-Bjerrum zettingsparameters voor de (zwak humeuze) klei zijn bepaald op basis van de NEN9997-1, voor klei schoon / klei organisch slap.

NEN9997-1 geeft geen indicatieve waarden voor de a, b en c van het a,b,c-isotachenmodel. Deze zijn gebaseerd op handreikingen die gegeven zijn in artikelen van het blad Geotechniek [5] [7] en opgenomen zijn in de DSettlement handleiding [4]. De volgende formule wordt daarin gegeven voor het globaal bepalen van de b-parameter.

$$b = 0,326(\gamma_{nat} / \gamma_w)^{-2,11}$$

Daarnaast zijn voor een eerste schatting de volgende verhoudingen uit bovenstaande bronnen gebruikt ter bepaling van de a- en c-parameter voor humeuze klei:

b/a ≈ 12 en b/c ≈ 20

Zand:

Van zand is bekend dat dit (vrijwel) onsamendrukbaar is. De volgende parameters zijn, op basis van de NEN9997-1 en het gegeven onsamendrukbaar gehanteerd voor de predicties:

| Koppejan: | a,b,c-isotachen: | NEN-Bjerrum: |
|-----------------|------------------|-------------------------------|
| $C'_p = \infty$ | a = 0,001 | RR = 1×10^{-6} |
| $C_p = \infty$ | b = 0,004 | CR = 2×10^{-6} |
| $C'_s = \infty$ | c = 0 | $C_\alpha = 1 \times 10^{-6}$ |
| $C_s = \infty$ | | |

Grensspanning en POP/OCR

De grensspanning van een laag en diepte is afgeleid uit de laboratoriumresultaten (zie bijlage 1). Op basis van deze grensspanning en de in-situ spanning, berekend uit de volumieke gewichten en laagdiktes die voor de lagen bepaald zijn (zie voorgaande paragrafen), is de OCR (Over Consolidation Ratio) en POP (Pre-Overburden Pressure) te bepalen, waarmee de grensspanning van een grondlaag in DSettlement ingevoerd kan worden. Er geldt:

$$\sigma'_p = \sigma'_0 + \text{POP}$$

$$\sigma'_p = \sigma'_0 \times \text{OCR}$$

waarbij:

σ'_p = grensspanning

σ'_0 = terreinspanning (in-situ spanning)

De OCR die berekend is uit de in het laboratorium bepaalde grensspanning is 2,25. De berekende POP is 7,6. Wanneer bij berekening van het gemiddelde de irreële waarden worden weggelaten (negatieve waarden of waarden > 25 bij POP en > 5 bij OCR), resulteert dit in een gemiddelde POP van 7,3 en een gemiddelde OCR van 2,2 (zie bijlage 2).

Reële waarden voor POP en OCR in Nederland zijn (Bron: CUR rapport 2003-7, Bepaling geotechnische parameters):

POP: 5 à 10 kPa

OCR: 1,0 tot 1,5

De POP-waarde die volgt uit de labresultaten is derhalve reëler dan de OCR-waarde.

Er is daarom gekozen om in de zettingspredicties een POP toe te passen, met een waarde van 7 kPa.

Intrinsieke tijd / Equivalente leeftijd

In plaats van het toepassen van een POP of OCR kan voor het a,b,c-isotachenmodel en het NEN-Bjerrum isotachenmodel ook gewerkt worden met een intrinsieke tijd of equivalente leeftijd. Dit is op te vatten als de tijd die de grond na sedimentatie zonder verdere spanningsverandering nodig zou hebben gehad om tot de actuele reksnelheid te komen. Hierbij is de kruipreksnelheid omgekeerd evenredig met de intrinsieke tijd τ of equivalente leeftijd θ :

$$\frac{\partial \varepsilon_s^H}{\partial t} = \frac{c}{\tau_0} \text{ voor a,b,c-isotachen en } \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{C_\alpha}{\ln 10 \cdot \theta} \text{ voor NEN-Bjerrum isotachen}$$

De intrinsieke tijd τ_0 of initiële equivalente leeftijd θ_0 wordt berekend door het verschil tussen de grensspanning σ_p en de initiële spanning σ_0 op te vatten als een bij het referentietijdstip (meestal 1 dag) weggenomen voorbelasting op een tijdstip net voor $t=t_0$. Er geldt [5]:

$$\tau_0 = \tau_1 \cdot \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} \right)^{\frac{b-a}{c}} \text{ voor a,b,c-isotachen en}$$

$$\theta_0 = t_{ref} \cdot \left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} \right)^{\frac{CR-RR}{C_\alpha}} \text{ voor NEN-Bjerrum isotachen}$$

waarbij:

τ_0 = intrinsieke tijd

θ_0 = equivalente leeftijd

t_{ref} of τ_1 = referentietijd (meestal 1 dag)

σ'_p = grensspanning

σ'_0 = terreinspanning (in-situ spanning)

De intrinsieke tijd en equivalente leeftijd zijn berekend vanuit de laboratoriumproeven. Dit levert de resultaten op als in onderstaande tabel gepresenteerd.

Tabel 3-6 Berekende intrinsieke tijd en equivalente leeftijd

| Boring | Monster | Diepte van [m tov NAP] | classificatie | subclassificatie | proef | γ_{nat} [kN/m ³] | σ'_p [kPa] | Equivalente leeftijd | | Intrinsieke tijd | | | | |
|--------|---------|---------------------------|---------------|------------------|---------------|--|----------------------|-------------------------|------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------|--------|
| | | | | | | | | σ'_p / σ'_0 | CR-RR/C α | θ_0 dagen | σ'_p / σ'_0 | (b-a)/c | τ_0 dagen | |
| [1] | [1] | | | | | | | | | | | | | |
| BT1 | 3 | -4.14 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.4 | 15.8 | 2.7 | | 21.0 | 1.E+09 | 3.3 | 21.0 | 7.E+10 |
| BT1 | 4 | -5.14 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.4 | 8.1 | 1.3 | | 22.6 | 6.E+02 | 2.5 | 18.8 | 2.E+07 |
| BT2 | 10 | -4.9 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.8 | 12.9 | 2.4 | | 19.4 | 2.E+07 | 3.2 | 16.8 | 3.E+08 |
| BT2 | 11 | -6.19 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 9.6 | 21.3 | 3.7 | | 24.3 | 6.E+13 | 3.5 | 25.8 | 9.E+13 |
| BT2 | 12 | -7.34 | veen | mineraalarm | samendr.proef | 13.2 | 38.6 | 6.3 | | 29.1 | 2.E+23 | 5.9 | 32.8 | 2.E+25 |
| BT1 | 2B | -3 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 10 | 11.4 | 2.1 | | 21.1 | 6.E+06 | 2.4 | 10.4 | 1.E+04 |
| BT1 | 3D | -4.3 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 9.9 | 7.5 | 1.3 | | 21.7 | 2.E+02 | 1.7 | 10.8 | 3.E+02 |
| BT1 | 4D | -5.3 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 9.6 | 8.1 | 1.3 | | 28.9 | 3.E+03 | 1.6 | 10.1 | 1.E+02 |
| BT2 | 8B | -2.6 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 10.1 | 12.0 | 2.6 | | 20.4 | 2.E+08 | 3.2 | 11.3 | 5.E+05 |
| BT2 | 11B | -6.3 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 10 | 7.9 | 1.4 | | 19.1 | 4.E+02 | 2.2 | 11.5 | 1.E+04 |
| BT2 | 12B | -6.85 | veen | mineraalarm | K0-CRS | 9.9 | 7.5 | 1.3 | | 17.7 | 6.E+01 | 2.4 | 13.8 | 2.E+05 |

Daar deze parameters een wisselend beeld geven, is ervoor gekozen om in dit stadium hier niet mee te rekenen en in eerste instantie uit te gaan van het gebruik van een POP.

Consolidatiesnelheid

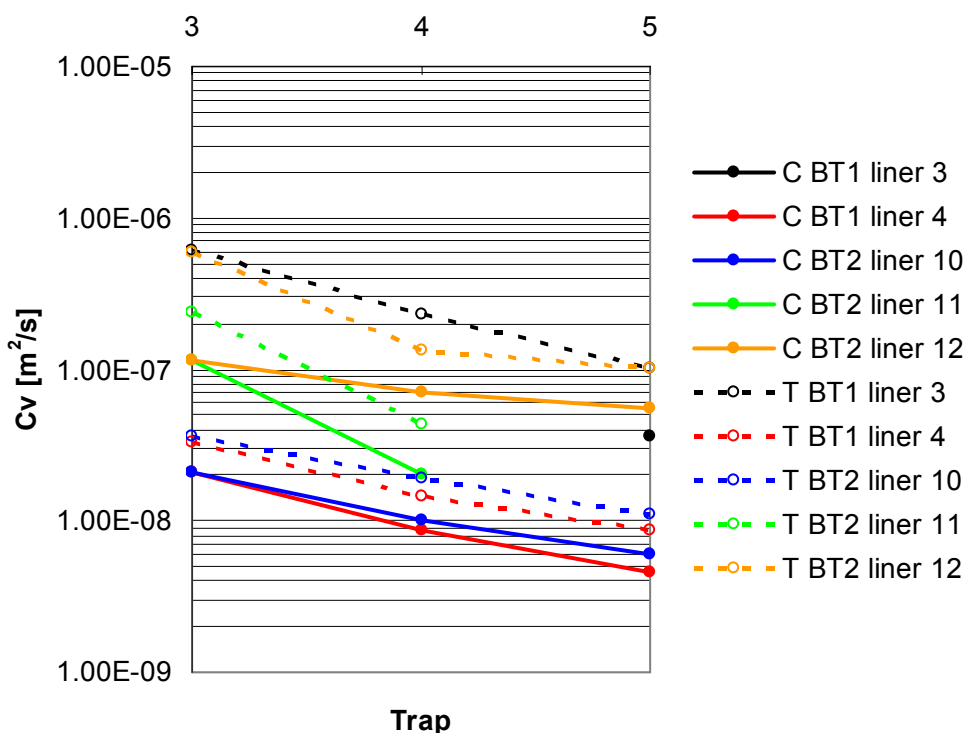
In DSettlement bestaat de mogelijkheid om met diverse modellen en parameters de consolidatiesnelheid te berekenen. Dit zijn:

- Terzaghi, met een constante (verticale) consolidatiecoëfficiënt
- Darcy, met een constante (verticale) consolidatiecoëfficiënt
- Darcy, met een constante doorlatendheid
- Darcy, met een rek-afhankelijke consolidatiecoëfficiënt.

Om de snelheid waarin de zettingen optreden te bepalen, worden berekeningen gemaakt met Terzaghi en Darcy met een constante consolidatiecoëfficiënt c_v en met Darcy met een rek afhankelijke doorlatendheid.

Constante consolidatiecoëfficiënt

De c_v voor de veenlaag is bepaald door het meetkundig gemiddelde te nemen voor de c_v als bepaald met Taylor, voor de belastingtrap die het meest overeenkomt met de gemiddelde belastingtoename als gevolg van de aanleg van de terp. Bij een in-situ spanning van 6 kPa, een POP van 7 kPa en een belastingtoename van ca. 50 kPa (3 m zand, waar 0,5 m van onderwater zakt), komt dit neer op een belastingtoename van trap 2 naar trap 4 in de samendrukkingsproeven. De gekozen c_v -waarde is daarom gebaseerd op trap 3 en bedraagt ca. $1,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Hierbij is de samendrukkingsproef op BT2 liner 12 buiten beschouwing gelaten.



Figuur 3-1 Resultaten c_v bepaling met Casagrande (C) en Taylor (T) (bron: Fugro rapport 3009-0261-000.R02_v2)

De CUR 162 “construeren met grond” [1] geeft voor veen een c_v van $3,17 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. De waarde die in het lab bepaald is wijkt hier niet veel vanaf en kan dus wel als reëel beschouwd worden.

Voor de dunne toplaag van (zwak humeuze) klei, wordt uitgegaan van de c_v voor klei uit de CUR 162 “construeren met grond” [1] van klei: $7,9 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Drains

Bij toepassing van drains wordt de horizontale doorlatendheid van een laag van belang. Vaak wordt verondersteld dat de verticale en horizontale doorlatendheid van een laag gelijk zijn en daarmee de verticale en horizontale consolidatiecoëfficiënt. Veen is echter vaak opgebouwd uit laagjes waardoor, afhankelijk van het type veen, het een grotere horizontale doorlatendheid heeft dan de verticale. Voor veen wordt daarom een verhouding c_h/c_v van 1 à 3 aangehouden. In de predicties is in eerste instantie uitgegaan van $c_h/c_v = 2$.

Rek-afhankelijke doorlatendheid

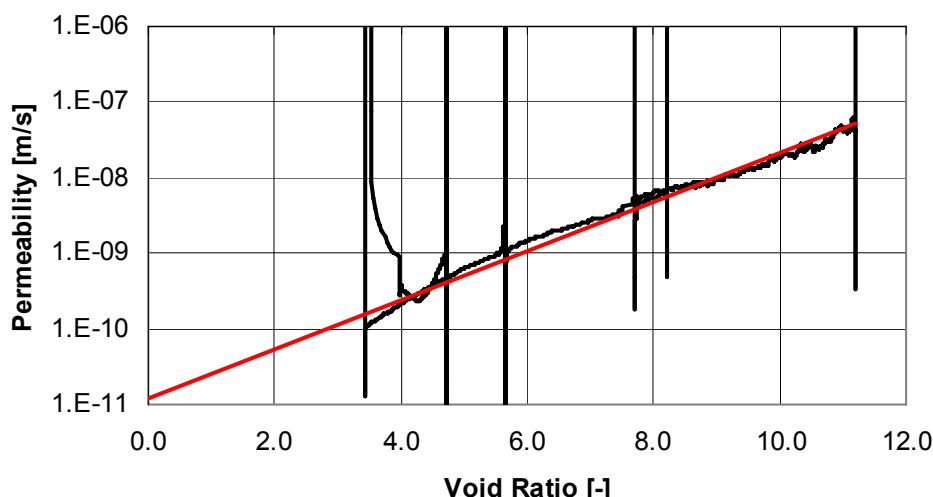
De doorlatendheid als functie van de rek of van het poriëngetal is afgeleid uit de samendrukkingsproeven en K_0 -CRS proeven. Hierbij is van het volgende verband uitgegaan: [4]

$$k = k_0 10^{\frac{1+e_0}{C_k} \varepsilon} = k_0 10^{\frac{e-e_0}{C_k}}$$

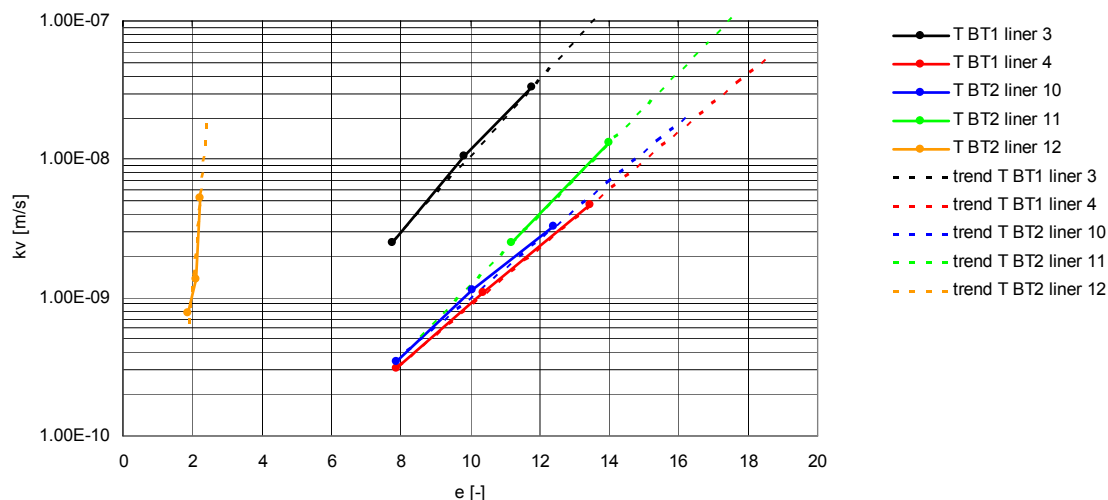
Waarbij:

- k = doorlatendheid
- k_0 = initiële doorlatendheid
- e = poriëngetal
- e_0 = initieel poriëngetal
- ε = verticale rek
- C_k = doorlatendheid-rek factor

De K_0 -CRS testen geven, op 1 test na (zie figuur 3-2) geen bruikbaar resultaat voor de doorlatendheid als functie van poriëngetal, conform bovenstaande functie. Uit de samendrukkingsproeven volgt een redelijk gelijkmatig beeld (figuur 3-3). Deze figuur is tot stand gekomen door de gemiddelde doorlatendheid, bepaald uit de consolidatiecurve volgens Taylor, uit te zetten tegen het gemiddeld poriëngetal van de betreffende trap. Dit is gedaan voor trap 3, 4 en 5. Vervolgens is de trendlijn geëxtrapoleerd naar het poriëngetal aan het begin van de proef (e_0). De bijbehorende waarde van k_0 volgt uit de extrapolatie. De resultaten uit de samendrukkingsproeven zijn samengevat in tabel 3-7.



Figuur 3-2 Doorlatendheid als functie van poriëngetal, K_0 -CRS test, BT1 2B



Figuur 3-3 Resultaat afleiding doorlatendheid als functie van poriëngetal, samendrukkingsproeven

Tabel 3-7 Doorlatendheid als functie van e uit samendrukkingsproeven en K_0 -CRS testen

| | e_0 | k_0 | k | | | $C_k/(1+e_0)$ |
|----------------------------------|-------|----------|----------|----------|----------|---------------|
| | | | trap3 | trap4 | trap5 | |
| Samendrukkingsproeven | | | | | | |
| T BT1 liner 3 | 13.89 | 1.29E-07 | 3.32E-08 | 9.65E-09 | 2.60E-09 | 0.242 |
| T BT1 liner 4 | 18.47 | 5.27E-08 | 4.64E-09 | 1.05E-09 | 3.15E-10 | 0.245 |
| T BT2 liner 10 | 16.19 | 2.02E-08 | 3.25E-09 | 1.03E-09 | 3.62E-10 | 0.277 |
| T BT2 liner 11 | 18.18 | 1.57E-07 | 1.32E-08 | 2.52E-09 | 4.81E-10 | 0.203 |
| T BT2 liner 12 | 2.43 | 1.80E-08 | 5.20E-09 | 2.11E-09 | 5.67E-10 | 0.106 |
| K_0-CRS test | | | | | | |
| BT1 2B | 11.20 | 5.13E-08 | | | | 0.253 |

Op basis van de K_0 -CRS test van BT1 2B en de samendrukkingsproeven voor BT1, 3 en 4 en BT2, 10 en 11 zijn de volgende parameters bepaald voor de rekafhankelijke doorlatendheid van veen:

Initiële verticale doorlatendheid $k_0 = 5 \times 10^{-8}$ m/s
 Doorlatendheid-rek modulus $C_k/(1+e_0) = 0,25$

Schatting consolidatieperiode

Op basis van de theorie van Terzaghi kan een schatting worden gemaakt voor de tijdsduur t_e waarbij praktisch het einde van het consolidatieproces is bereikt. Hierbij wordt vaak een consolidatiegraad van $U = 0,994$ genomen, waarbij tijdfactor $T = 2,0$ (Zie [1] CUR162, blz. 177-178). Deze consolidatieperiode t_e kan berekend worden met behulp van de volgende

formule:
$$t_e = \frac{2 \cdot (a \cdot h)^2}{c_v}$$

Waarbij: a = afstromingsconstante (tweezijdige afstroming $a = 0,5$)
 h = dikte van de laag [m]
 c_v = verticale consolidatiecoëfficiënt [m^2/s], bij meer lagen wordt een equivalente c_v gebruikt

De consolidatieperiode die met behulp van deze formule voor terp 1 en 2 is geschat bedraagt:

Terp 1: 2,5 jaar / 930 dagen
 Terp 2: 5,3 jaar / 1930 dagen
 Terp 2 met drains: 0,2 jaar / 80 dagen

3.4. Samenvatting parameterkeuze

In onderstaande tabel is de parameterset voor de zettingspredicties samengevat.

Tabel 3-8 Samenvatting parameterkeuze zettingspredicties

| Parameter | Eenheid | Klei, zwak humeus | Veen | Zand |
|------------------|-------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| γ_{nat} | kN/m ³ | 14 | 10,3 | 16 |
| γ_{droog} | kN/m ³ | 14 | n.v.t. | 20 |
| C_p | - | 28 | 10 | ∞ |
| C'_p | - | 7 | 6 | ∞ |
| C_s | - | 320 | 102 | ∞ |
| C'_s | - | 80 | 102 | ∞ |
| RR | - | 0,10 | 0,061 | 1×10^{-6} |
| CR | - | 0,31 | 0,493 | 2×10^{-6} |
| C_α | - | 0,014 | 0,020 | 1×10^{-6} |
| a | - | 0,013 | 0,04 | 0,001 |
| b | - | 0,16 | 0,327 | 0,004 |
| c | - | 0,008 | 0,014 | 0 |
| POP | kPa | 7 | 7 | 7 |
| c_v | m ² /s | $7,9 \times 10^{-8}$ | $1,0 \times 10^{-7}$ | - |
| c_h/c_v | - | 1 | 2 | 1 |
| k_0 | m/s | - | 5×10^{-8} | - |
| $C_k/(1+e_0)$ | - | - | 0,25 | - |

3.5. Overige uitgangspunten

Terp in lengte/breedte:

De terpen zijn 36 m lang en 26 m breed. Voor de predicties is gekozen om de as van de 2D berekening over de lengte te nemen: in het model is de terp dus 36 m breed. Deze keuze is gemaakt vanwege de positie van de zakbaken: 2 zakbaken vallen direct in deze doorsnede en de positie van de zettingsmeetslangen, waarvan er één ook samenvalt met deze doorsnede. In de situatietekening in bijlage 1 zijn de terpen en locaties van het grondonderzoek en de meetinstrumenten opgenomen.

Verticale drains

In terp 2 zijn drains geïnstalleerd. Het betreft stripdrains met een breedte van ca. 0,10 m en een dikte van 0,003 m, hart op hart 1,0 m, die geplaatst zijn in een driehoeksstramien (stripdrains worden vaak gemodelleerd op basis een equivalente omtrek van een drain met diameter 0,064 m) De onderkant van de drains is in het model op NAP 6,5 m aangehouden, ongeveer 1,0 m boven de bovenkant van het zandpakket.

4. METINGEN

4.1. Zakbaakmetingen

Er zijn totaal 12 zakbaken geplaatst: 6 in terp 1 en 6 in terp 2. De locaties van de zakbaken zijn gegeven in het "Grond- en laboratoriumonderzoek en instrumentatierapport". Daarnaast zijn door Deltares 4 stuks 5-punts extensometers geplaatst, twee in iedere terp.

De resultaten van de zakbaakmetingen zijn gegeven in bijlage 3. De resultaten zien er uitstekend uit waarbij enkele karakteristieken worden opgemerkt:

Bij terp 1 is het zettingsverloop van alle zakbaken binnen een geringe bandbreedte gelijk. Na verwijderen van de extra overhoogte bij T1-1, T1-4 en T1-7 op dag 416 is de zakkingsnelheid sterk afgenomen. Er lijkt weinig verschil te zitten tussen de zakbaken nabij de hoekpunten en meer in het midden van de terp; T1-1, T1-4 en T1-7 vertonen een gelijk beeld net als T1-3, T1-6 en T1-8. De zettingmeetslangen (bijlagen 4 t/m 9) geven aan dat de zetting aan de oostzijde wat groter is dan aan de westzijde; dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door een geringe toename van west naar oost van het slappelagenpakket ondanks dat dit niet duidelijk blijkt uit de sonderingen.

Bij terp 2 is het zettingsverloop van alle zakbaken binnen een geringe bandbreedte gelijk tot aan het aanbrengen van de laatste ophoogslag. Vanaf dit moment neemt de zakking bij de T2-7 en T2-8, die meer in het midden van de terp staan, sterker toe dan de zakbaken nabij de hoekpunten. Na verwijderen van de extra overhoogte bij T2-1, T2-4 en T2-7 op dag 416 is de zakkingsnelheid sterk afgenomen. Er is een relatief groot verschil tussen de zakbaken nabij de hoekpunten en meer in het midden van de terp. De perfecte overeenkomst tussen zakbaak T2-7 en T2-8 berust gedeeltelijk op toeval zoals ook blijkt uit zettingmeetslang T2-2 (bijlage 8) waarin het verloop van de zakking tussen beide zakbaken is gegeven.

Het verschil in gedrag tussen terp 1 en 2 van de zakbaken in het midden van de terp en die meer bij de hoekpunten kan niet verklaard worden op basis van lokale laagdikte van het slappelagenpakket. Geconstateerd wordt dat bij terp 2 de zakking in het midden groter is dan nabij de hoekpunten en bij terp 1 is de zakking in het midden wat kleiner dan nabij de hoekpunten. De oorzaak moet worden gezocht in de verschillende mate van horizontale opsluiting van het grondmassief zonder (terp 1) en met (terp 2) verticale drainage en/of in de mate van onderwaterzakken van de ophoging. Aangezien de zetting bij terp 2 groter is dan bij terp 1 en beide ophogingen 3,0 m bedragen, zakt bij terp 2 een groter deel van de belasting onder water hetgeen resulteert in een relatieve belastingafname.

Het eerste argument wordt bevestigd door het gedrag van de hellingmeetbuizen. De buizen aan de teen van de terp en 4 meter uit de teen zijn voor de eerste ophoogslag geplaatst terwijl de hellingmeetbuizen in de kruin na de laatste ophoogslag zijn geïnstalleerd. In Tabel 4-1 is de horizontale vervorming ter plaatse van de hellingmeetbuizen gegeven evenals de genormaliseerde waarde (horizontale vervorming gedeeld door laagdikte).

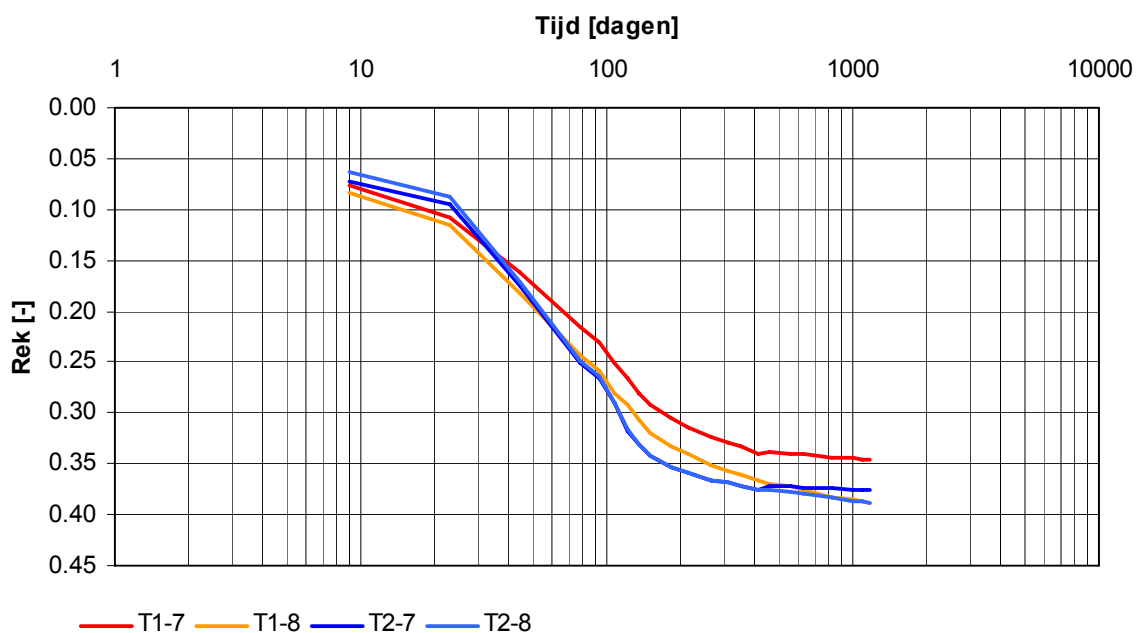
Tabel 4-1; Maximale horizontale vervorming hellingmeetbuizen

| | Absolute vervorming [m] | | Genormaliseerde vervorming | |
|----|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | Terp 1 bijlage 10 t/m 13 | Terp 2 bijlage 14 t/m 17 | Terp 1 laagdikte 3,95 m | Terp 2 laagdikte 5,75 m |
| H1 | 0,023 | 0,014 | 0,0058 | 0,0024 |
| H2 | 0,036 | 0,035 | 0,0091 | 0,0061 |
| H3 | 0,17 | 0,28 | 0,043 | 0,049 |
| H4 | 0,05 | 0,10 | 0,013 | 0,017 |

De hellingmeetbuizen 3 en 4 laten zien dat de horizontale grondvervorming bij terp 2 relatief groter is dan bij terp 1.

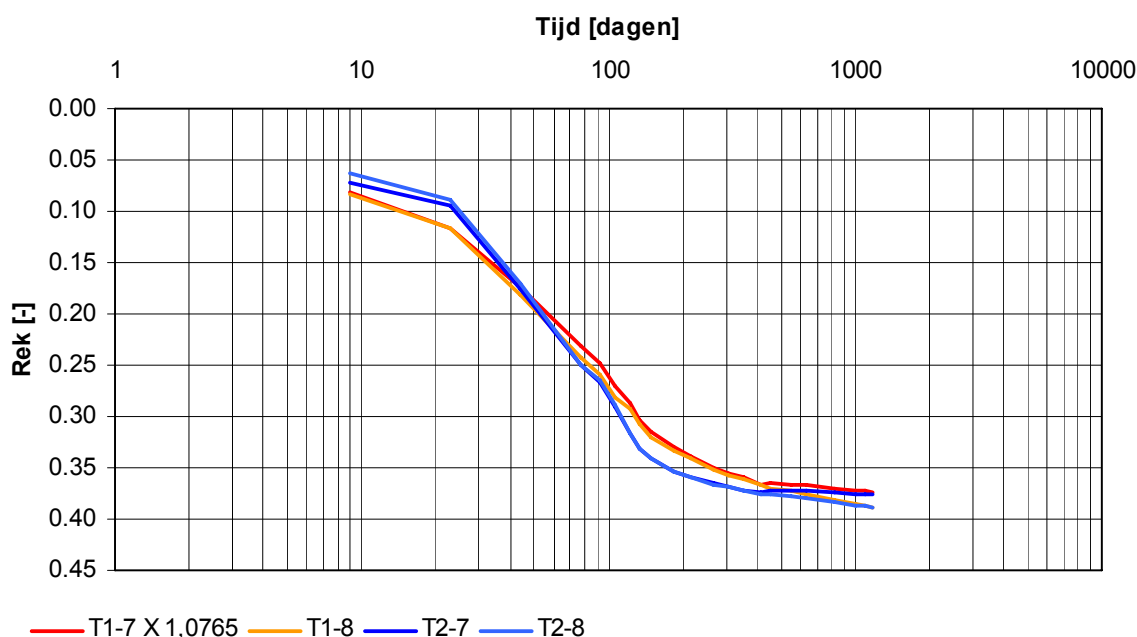
Het oppervlak van de terpen is tevens niet zodanig groot dat er met betrekking tot spanningspreiding sprake is van een eendimensionale situatie. Bij terp 2, met een grotere dikte van het slappelagenpakket (5,75 m), zou verwacht mogen worden dat de spanningstoename onderin de veenlaag achterblijft in vergelijking tot terp 1 (3,95 m). Op grond van dit argument zou juist verwacht worden dat de zetting bij terp 2 relatief geringer zou zijn dan bij terp 1 en dus geen verklaring vormen voor de constatering dat de zetting bij terp 2 relatief groter is dan bij terp 1.

Om de zakkings bij terp 1 en 2 met elkaar te vergelijken is de rek in de slappe lagen bepaald door de zakking te delen door de laagdikte. Voor de laagdikte is het totale pakket van klei- en veenlagen gehanteerd. Het resultaat voor zakkings 7 en 8 is gegeven in Figuur 4-1.



Figuur 4-1 Rekmetingen terp 1 en 2

Gezien de uitstekende overeenkomst tussen de rek bij zakbaak T1-8 en T2-8 met betrekking tot de rek na 1182 dagen wordt deze zakbaak voor de evaluatie gehanteerd. Om de invloed van het verwijderen van de extra overhoogte te beschouwen wordt de zakking/rek bij zakbaak T1-7 met een factor 1,0765 vermenigvuldigd zodanig dat deze tot aan verwijderen van extra overhoogte gelijk reageert aan zakbaak T1-8. De gehanteerde rekmetingen voor de evaluatie zijn gegeven in Figuur 4-2.



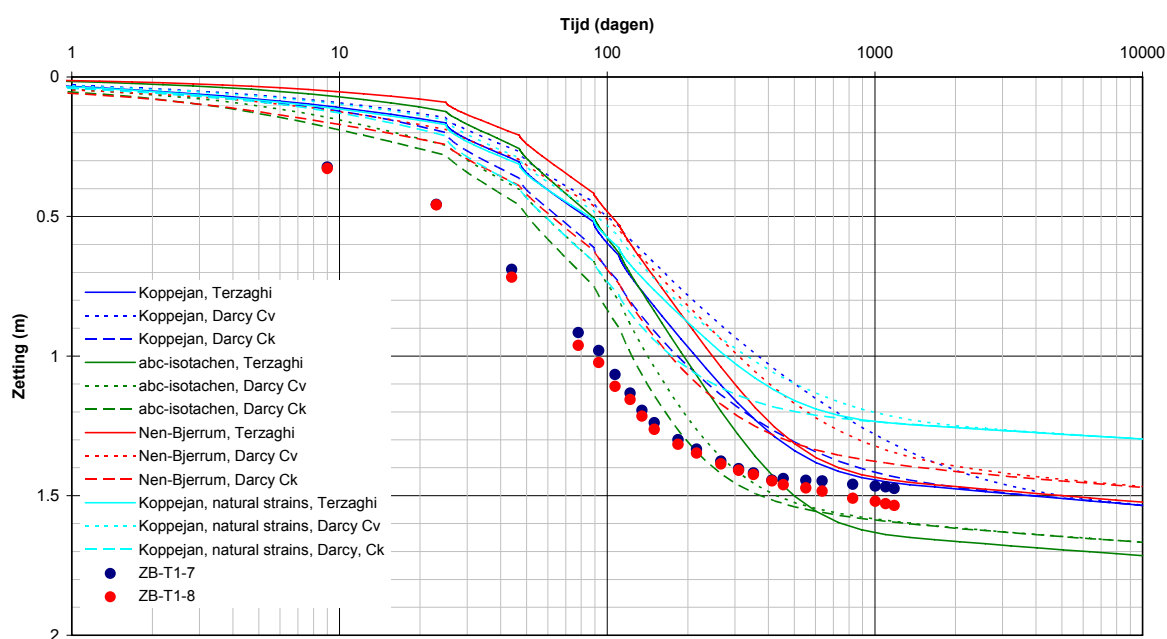
Figuur 4-2 Rekmetingen terp 1 en 2

Indien postdicties worden uitgevoerd op basis van de rekmetingen van Figuur 4-2 resulteert dit voor de beschouwde zettingsmodellen in verschillende eigenschappen voor terp 1 en 2. In de eerste evaluatie werd reeds gevonden dat de primaire samendrukbaarheid bij terp 2 ca. 15 à 20 % groter was dan bij terp 1. In principe is dit mogelijk, tenslotte is de laagdikte van het veenpakket bij terp 2 sterk afwijkend van de laagdikte bij terp 1, echter het eerder beschreven verschillend gedrag van de zettingmeetslangen en hellingmeetbuizen geeft aanleiding om aan te nemen dat de zetting bij terp 2 ten opzichte van de eendimensionale situatie vergroot is door horizontale grondvervorming. Voor de verdere evaluatie wordt daarom de zetting/rek bij terp 2 vermenigvuldigd met een factor 0,90.

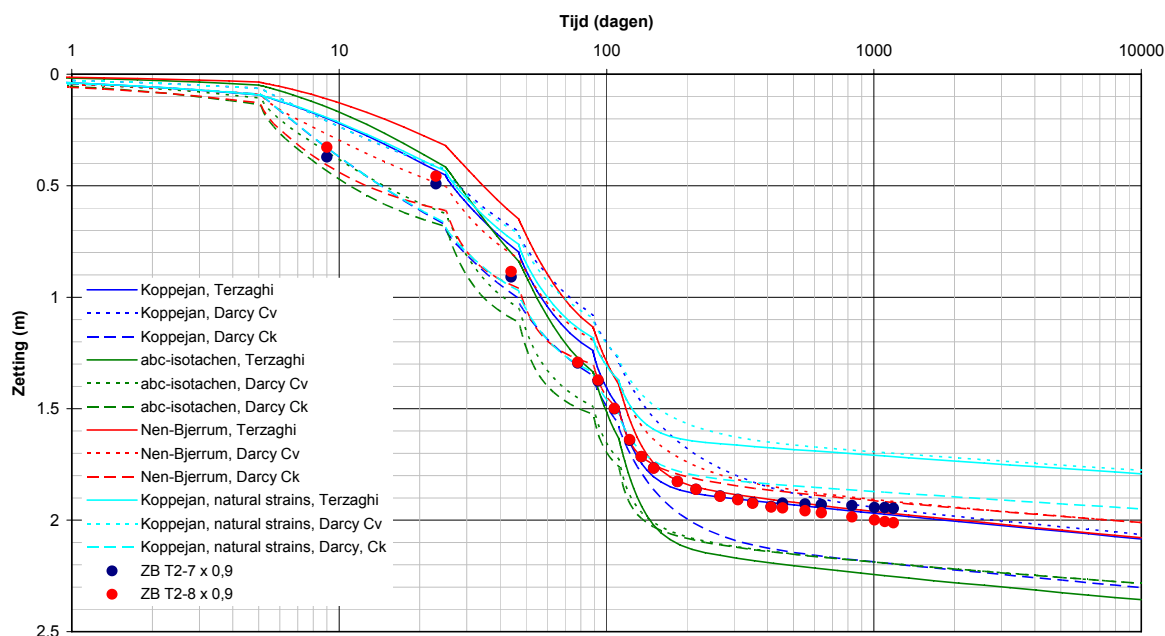
5. POSTDICTIES ZETTINGSGEDRAG EN EVALUATIE MODELLEN

5.1. Uitgangspunten

Voor de predicties is uitgegaan van het midden van de terpen. In beide terpen zijn zakbaak nr. 7 en zakbaak nr. 8 op locaties geplaatst die overeenkomen met de locaties van de predicties. In onderstaande figuren zijn voor zowel terp 1 als terp 2 de metingen van zakbaak nr. 7 en 8 in één figuur geplaatst met de resultaten van de predicties. Bij terp 1 is de zinking van zakbaak T1-7 vermenigvuldigd met een factor 1,0765 en bij terp 2 zijn beide zakbaakresultaten van T2-7 en T2-8 vermenigvuldigd met een factor 0,90 zoals toegelicht in het vorige hoofdstuk.



Figuur 5-1 Zakbaakmetingen en predicties terp 1 (T1-7 x 1,0765)



Figuur 5-2 Zakbaakmetingen en predicties terp 2 (T2-7 en T2-8 x 0,90)

5.2. Metingen vs. predicties

Er zijn predicties uitgevoerd met een viertal zettingsmodellen:

- Koppejan, lineaire rek
- Koppejan, natuurlijke rek
- A,b,c-isotachen
- NEN-Bjerrum isotachen

Bij ieder model is gebruik gemaakt van een drietal varianten voor het consolidatiemodel:

- Terzaghi met constante c_v
- Darcy-model met doorlatendheid op basis van een constante c_v
- Darcy-model met poriëngetalafhankelijke doorlatendheid

In eerste instantie is getracht met het programma DSettlement en de module "Fit for Settlement plate" de modelparameters zodanig te fitten dat een goede overeenkomst met de metingen is. Gebleken is dat de module niet naar behoren functioneert.

Daarna is een handmatige fit uitgevoerd waarbij parameters zodanig zijn aangepast dat het berekende zettingsverloop overeenkomt met de metingen. De handmatige fit is zodanig uitgevoerd dat aan drie belangrijke eigenschappen van de gemeten zakkingslijn wordt voldaan:

- De absolute waarde van de zetting na 1182 dagen (dag van de laatste meting)
- De vorm van de zettingscurve; hierbij spelen 2 aspecten een rol: de snelheid van zetting bij start ophogen en na de laatste ophoogslag
- De helling van de zetting over de laatste meetperiode.

Fitberekeningen zijn uitgevoerd voor alle zettingsmodellen met uitzondering van het Koppejanmodel op basis van natuurlijke rek. Aan dit laatste model wordt weinig waarde gehecht in verband met de zeer beperkte ervaring en het feit dat de samendrukkingsparameters zijn afgeleid op basis van een lineaire rek en het dus niet logisch is om een zettingsberekening op basis van natuurlijke rek uit te voeren. Verder is bij ieder model een fit uitgevoerd voor de drie verschillende consolidatiemodellen.

Bij de postdicties zijn ten aanzien van de doorlatendheid, de kruiptak en werking van de drains algemene trends gevonden die hierna zijn toegelicht.

Doorlatendheid en drains

De doorlatendheid moet, met name bij terp 1, in het begin aanzienlijk groter zijn dan na de laatste ophoogslag. Direct na aanbrenge ophoging treedt de zakking aanzienlijk sneller op dan volgens de predictie. Na de laatste ophoogslag verloopt de zetting aanzienlijk trager hetgeen duidt op een rek- of poriëngetalafhankelijke doorlatendheid. Berekeningen met een constante c_v kunnen dit gedrag niet beschrijven.

Bij beide ophogingen is het waterspanningsverloop op verschillende diepte in de veenlaag uitgebreid gemeten. De resultaten van alle waterspanningssensoren zijn gegeven in bijlage 18. In bijlage 19 zijn de resultaten gegeven van de sensoren die zich midden in de veenlaag bevinden.

Met name bij de laatste belastingverhoging is te zien dat terp 2, met verticale drainage, aanzienlijk sneller consolideert dan terp 1 ondanks de 1,5 x zo dikke veenlaag. Op bijlagen 20 en 21 is de verandering van de waterspanning gedeeld door de tijdstap uitgezet (in feite de consolidatiesnelheid) als functie van de start van de betreffende ophoogslag. Bij de eerste ophoogslag van 1,0 m is de consolidatiesnelheid bij terp 1 aanzienlijk groter dan bij terp 2. De drains zijn pas ca. 5 dagen na start ophogen van terp 2 aangebracht; vandaar de piek op dag 5 ten gevolge van de draineermachine en de grote consolidatiesnelheid vanaf dag 6. De snelle terugval in waterspanning binnen één dag die van toepassing is bij terp 2 komt niet tot uitdrukking in deze figuren omdat de schaal pas bij één dag na ophogen start. Verder valt op dat de werking van de drains constant blijft naarmate de ophoging vordert. Er is gedurende deze periode dus nog geen sprake van verzanding/dichtslibben van de drains.

Kruiptak

Bij de metingen (zie bijlage 3) wordt ogenschijnlijk op logaritmische schaal een constante helling gevonden bij de laatste drie metingen voor het verwijderen van de extra overhoogte over de helft van de terp. Nauwkeurige interpretatie van

$\frac{\Delta z}{\Delta \log t}$ of $\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \log t}$ laat zien dat deze waarde fluctueert en dat er op basis van de metingen

niet gesteld kan worden dat deze waarde constant is. Dit geldt zowel voor terp 1 als terp 2. Het is dus onduidelijk of consolidatie volledig bereikt is en slechts alleen kruip wordt gemeten. De kruipmetingen na het verwijderen van de extra overhoogte geeft een vertekend beeld. De zakbaakresultaten T1-7 en T2-7 worden natuurlijk beïnvloed door het verwijderen van de overhoogte. Dit geldt echter ook voor T1-8 en T2-8 in verband met spanningspreiding. Feitelijk liggen deze zakbaken te dicht bij het gedeelte waar de extra overhoogte is verwijderd. In verband met de grotere dikte van de slappe lagen geldt dit bij terp 2 in belangrijker mate dan bij terp 1.

Figuur 4-2 geeft aan dat de helling aan het eind van de curve bij terp 1 groter is dan bij terp 2. Wordt ervan uitgegaan dat de grondparameters bij terp 1 en 2 gelijk zijn dan volgt hieruit dat bij terp 1 in ieder geval volledige consolidatie nog niet is bereikt.

5.3. Conclusies postdicties

Voor het uitvoeren van de postdicties zijn de metingen gecorrigeerd om een consistent beeld te schetsen van de bijbehorende eendimensionale zetting.

Bij terp 1 is geen verticale drainage toegepast en volgt uit de postdicties een sterk afnemende doorlatendheid met afnemend poriëngetal of toenemende rek. Een dergelijk gedrag kan goed beschreven worden met DSettlement. Bij terp 2 is verticale drainage toegepast en blijkt de doorlatendheid nauwelijks te veranderen bij de opvolgende ophoogslagen. De meer gebruikelijke consolidatiemodellen van Terzaghi of Darcy met constante c_v presteren bij terp 2 redelijk goed.

In alle gevallen is een aanzienlijk grotere kruipparameter benodigd dan gebruikt bij de predicties. De kruipparameter moet met een factor van ca. 2,1 worden vergroot. Een dergelijke grote kruipparameter is niet in het labonderzoek gevonden. Mogelijk wordt de extra kruip veroorzaakt door gasontwikkeling in het veen en leidt dit tot extra tijdsafhankelijke zetting.

Op basis van de postdicties zijn parametersets afgeleid die het gemeten gedrag in grote lijnen goed beschrijven voor de drie zettingsmodellen (Tabel 5-1). De gewijzigde parameterset heeft alleen betrekking op de veenlaag. De afdekkende kleilaag levert een te geringe bijdrage aan de totale zetting. Voor de volledigheid zijn de gehanteerde parameters van de klei- en zandlaag tevens in Tabel 5-1 gegeven. In Tabel 5-2 is een overzicht gegeven van de consolidatieparameters die gehanteerd zijn voor de drie verschillende consolidatiemodellen.

Met de voorgestelde parameters van Tabel 5-1 en Tabel 5-2 zijn postdicties gemaakt voor de drie zettingsmodellen en consolidatiemodellen, zowel voor terp 1 als terp 2. De resultaten zijn gegeven in bijlage 22 t/m 33. De volgende conclusies ten aanzien van zettings- en consolidatiemodellen kunnen worden getrokken:

- Het Terzaghi-consolidatiemodel met constante c_v presteert bij terp 1 slecht, eenvoudigweg omdat de consolidatiesnelheid absoluut niet constant is bij de opvolgende ophoogslagen. Bij terp 2 is door toepassing van verticale drainage meer sprake van een constante consolidatiesnelheid zodat het Terzaghi-model wel goed presteert behalve bij het Koppejanmodel.
- Het Darcy-consolidatiemodel met constante c_v presteert bij terp 1 zeer slecht. Dit geldt met name voor het Koppejan en NEN-Bjerrum-isotachenmodel. Waarom deze laatste twee modellen aanzienlijk slechter presteren dan bij het Terzaghi-consolidatiemodel is niet duidelijk. Bij terp 2 presteert het model net als het Terzaghi-consolidatiemodel redelijk tot goed.
- Toepassing van een constante consolidatiecoëfficiënt bij een gefaseerde ophoging is gevaarlijk en werkt alleen, met betrekking tot de eindzetting en het verloop op lange termijn indien de consolidatiecoëfficiënt betrokken wordt op het spanningsniveau van de laatste ophoogslag.
- Het Darcy-model met de poriëngetalafhankelijke doorlatendheid werkt bij beide terpen aardig goed.
- Er zit relatief weinig verschil in de resultaten van de zettingsmodellen. Er wordt wel op gewezen dat voor de beschrijving van het ontlastgedrag, bij het wegnemen van extra overhoogte, het Koppejanmodel ongeschikt is.

Koppejanmodel

Voor de postdicties zijn de parameters voor de grensspanning 6 x zo groot gekozen als de waarden na de grensspanning. Een dergelijke trend werd ook gevonden in de ontlasttakken bij de uitwerking volgens NEN-Bjerrum en A,b,c-Isotachen.

De invloed van C_p' en de POP zijn enigszins uitwisselbaar, dat wil zeggen dat bij een range van waarden voor C_p' een POP gevonden kan worden die een nagenoeg gelijk zettingsverloop geeft. Gekozen is om de POP te bepalen uitgaande van de in het lab gevonden waarde voor C_p' .

De kruipparameter, $C_s' = 46$, is aanzienlijk kleiner dan uit het labonderzoek volgt om aan te sluiten bij de gemeten helling van de kruiptak.

NEN-Bjerrum isotachen

De primaire samendrukkingsparameter $CR = 0,45$ is iets kleiner dan uit het labonderzoek volgt (0,493).

De kruipparameter, $C_\alpha = 0,042$, is aanzienlijk groter dan uit het labonderzoek volgt (0,020) om aan te sluiten bij de gemeten helling van de kruiptak.

A,b,c-isotachen

De primaire samendrukkingsparameter $b = 0,22$ is aanzienlijk kleiner dan uit het labonderzoek volgt (0,327).

De kruipparameter, $c = 0,029$, is aanzienlijk groter dan uit het labonderzoek volgt (0,014) om aan te sluiten bij de gemeten helling van de kruiptak.

Tabel 5-1 Samenvatting parameterkeuze postdicties

| Parameter | Eenheid | Klei, zwak humeus | Zand | Veen | Veen |
|------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|------------|
| | | Predictie en postdictie | Predictie en postdictie | Predictie | Postdictie |
| γ_{droog} | kN/m ³ | 14 | 16 | n.v.t. | n.v.t. |
| $\gamma_{verz.}$ | kN/m ³ | 14 | 20 | 10,3 | 10,3 |
| Koppejan | | | | | |
| C_p | - | 28 | ∞ | 10 | 36 |
| C'_p | - | 7 | ∞ | 6 | 6 |
| C_s | - | 320 | ∞ | 102 | 276 |
| C'_s | - | 80 | ∞ | 102 | 46 |
| POP | kPa | 7 | 7 | 7 | 4 |
| NEN-Bjerrum isotachen | | | | | |
| RR | - | 0,10 | 1×10^{-6} | 0,061 | 0,061 |
| CR | - | 0,31 | 2×10^{-6} | 0,493 | 0,45 |
| C_α | - | 0,014 | 1×10^{-6} | 0,020 | 0,042 |
| POP | kPa | 7 | 7 | 7 | 7 |
| A,b,c-isotachen | | | | | |
| a | - | 0,013 | 1×10^{-6} | 0,04 | 0,04 |
| b | - | 0,16 | 2×10^{-6} | 0,327 | 0,22 |
| c | - | 0,008 | 1×10^{-6} | 0,014 | 0,029 |
| POP | kPa | 7 | 7 | 7 | 7 |

Tabel 5-2 Samenvatting consolidatieparameters postdicties als functie van consolidatiemodel

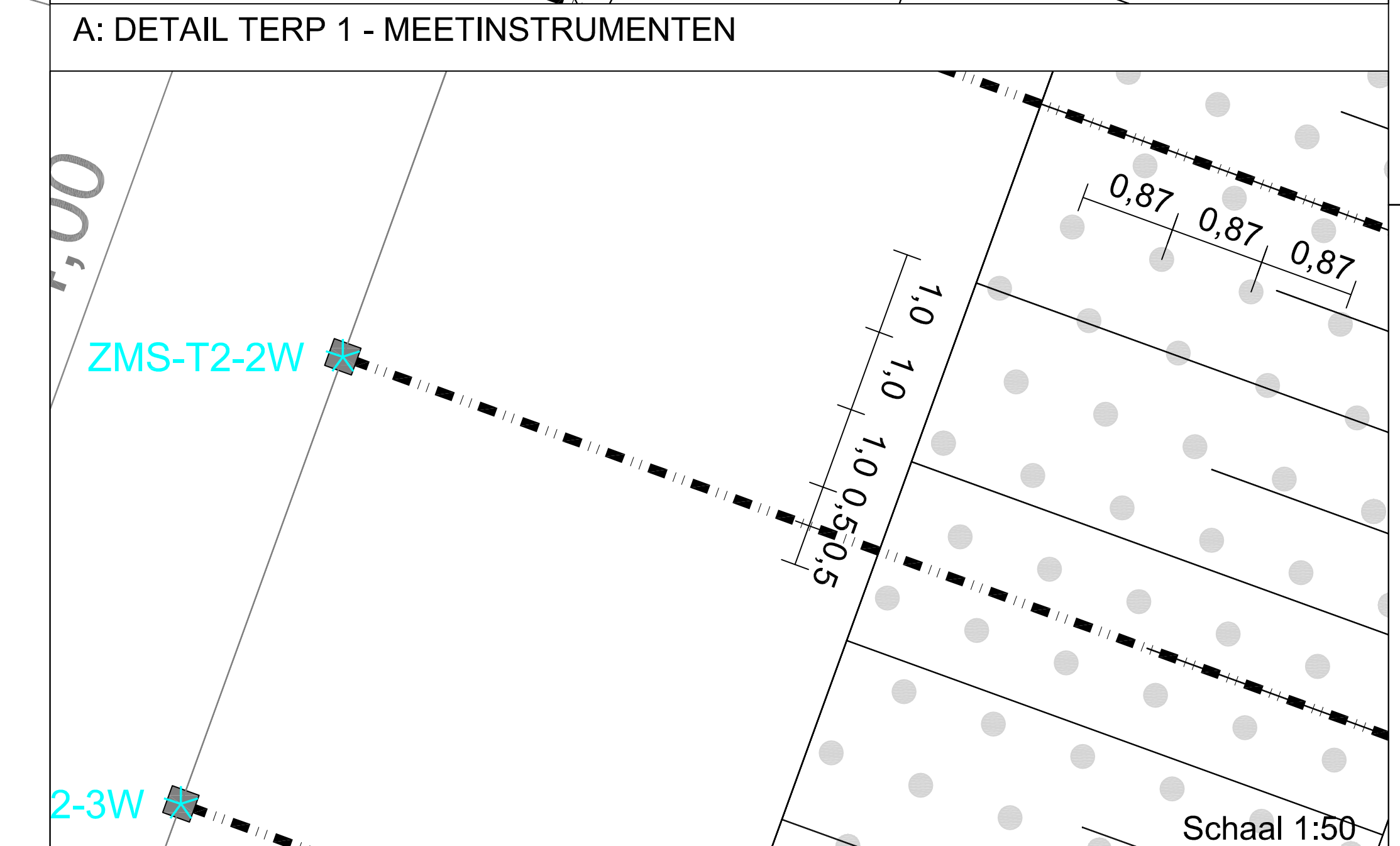
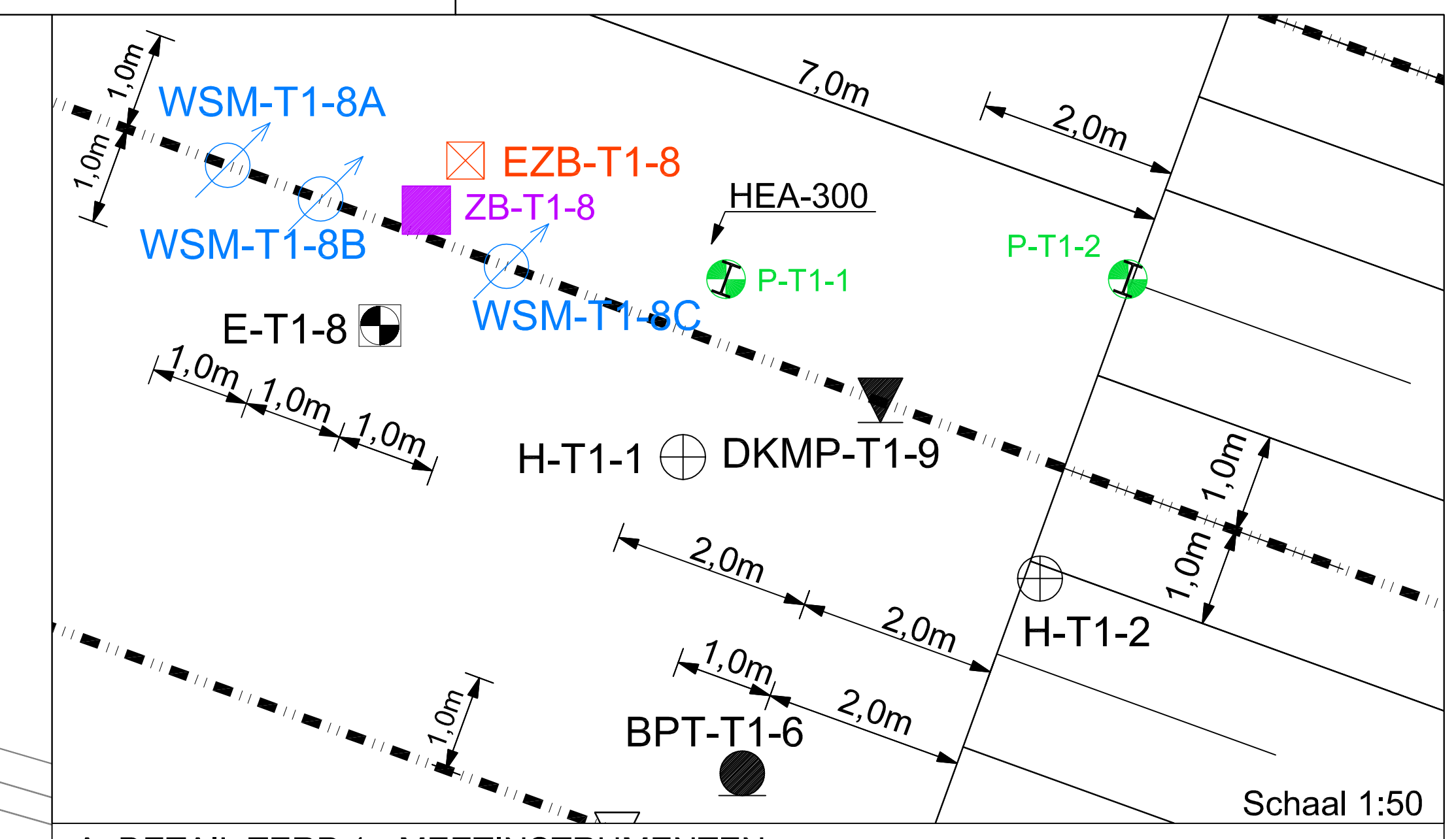
| Parameter | Eenheid | Klei, zwak humeus | Zand | Veen | Veen |
|--|---------|-------------------------|-------------------------|---|--|
| | | Predictie en postdictie | Predictie en postdictie | Postdictie (Predictie) Zonder verticale drainage | Postdictie (Predictie) Met verticale drainage |
| Terzaghi met constante c_v | | | | | |
| c_v | m^2/s | $7,9 \times 10^{-8}$ | - | $5,0 \times 10^{-7}$ ($1,0 \times 10^{-7}$) | $5,0 \times 10^{-7}$ ($1,0 \times 10^{-7}$) |
| c_h/c_v | - | 1 | 1 | n.v.t. | 1 (2) |
| Darcy met constante c_v | | | | | |
| c_v | m^2/s | $7,9 \times 10^{-8}$ | - | $5,0 \times 10^{-7}$ ($1,0 \times 10^{-7}$) | $5,0 \times 10^{-7}$ ($1,0 \times 10^{-7}$) |
| c_h/c_v | - | 1 | 1 | n.v.t. | 1 (2) |
| Darcy met poriëngetalafhankelijke doorlatendheid | | | | | |
| k_0 | m/s | - | - | $1,0 \times 10^{-6}$ (5×10^{-8}) | $1,0 \times 10^{-7}$ (5×10^{-8}) |
| $C_k/(1+e_0)$ | - | - | - | 0,11 (0,25) | 0,25 (0,25) |
| c_h/c_v | - | 1 | 1 | n.v.t. | 1 (2) |

Terp 1:
zonder verticale drainage

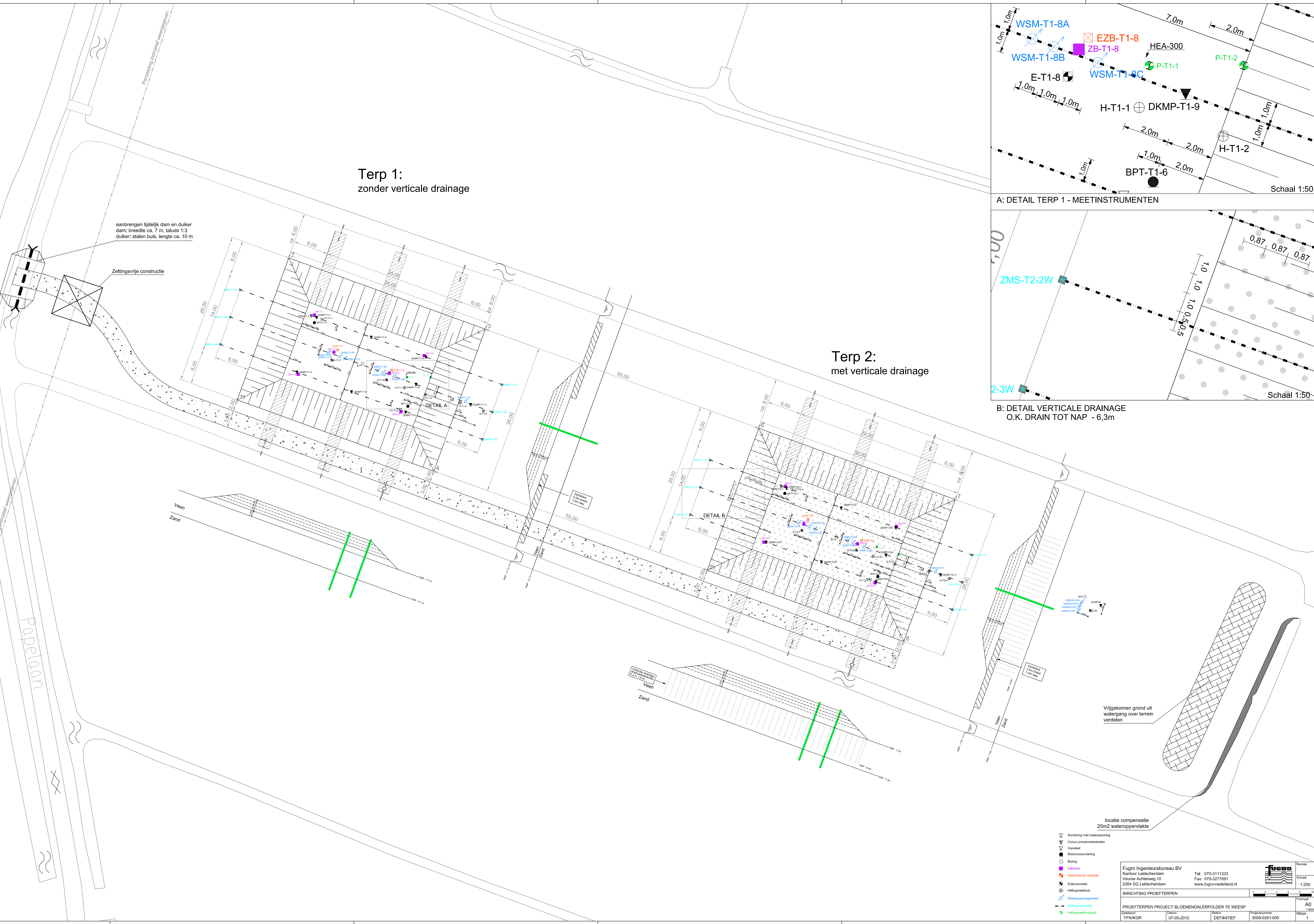
aanbrengen tijdelijk dam en duiker
dam: breedte ca. 7 m, taluds 1:3
duiker: stalen buis, lengte ca. 10 m

Zettingsvrije constructie

Terp 2:
met verticale drainage

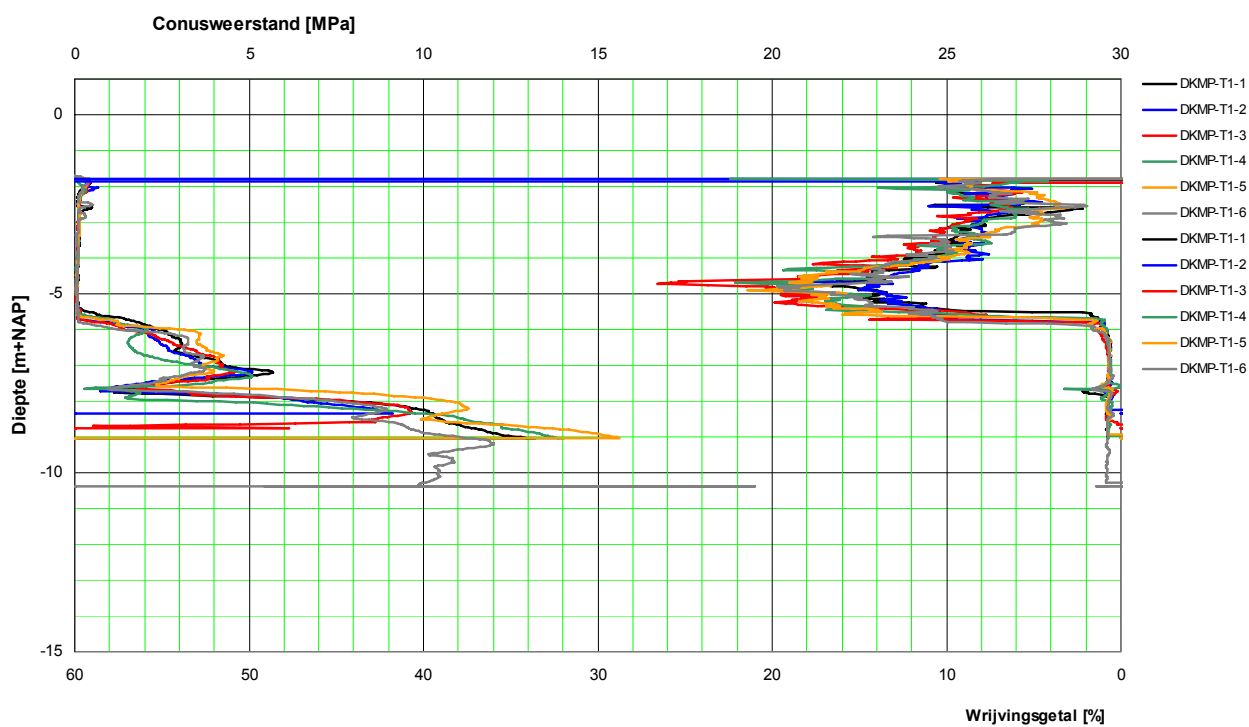


B: DETAIL VERTICALE DRAINAGE
O.K. DRAIN TOT NAP - 6.3m

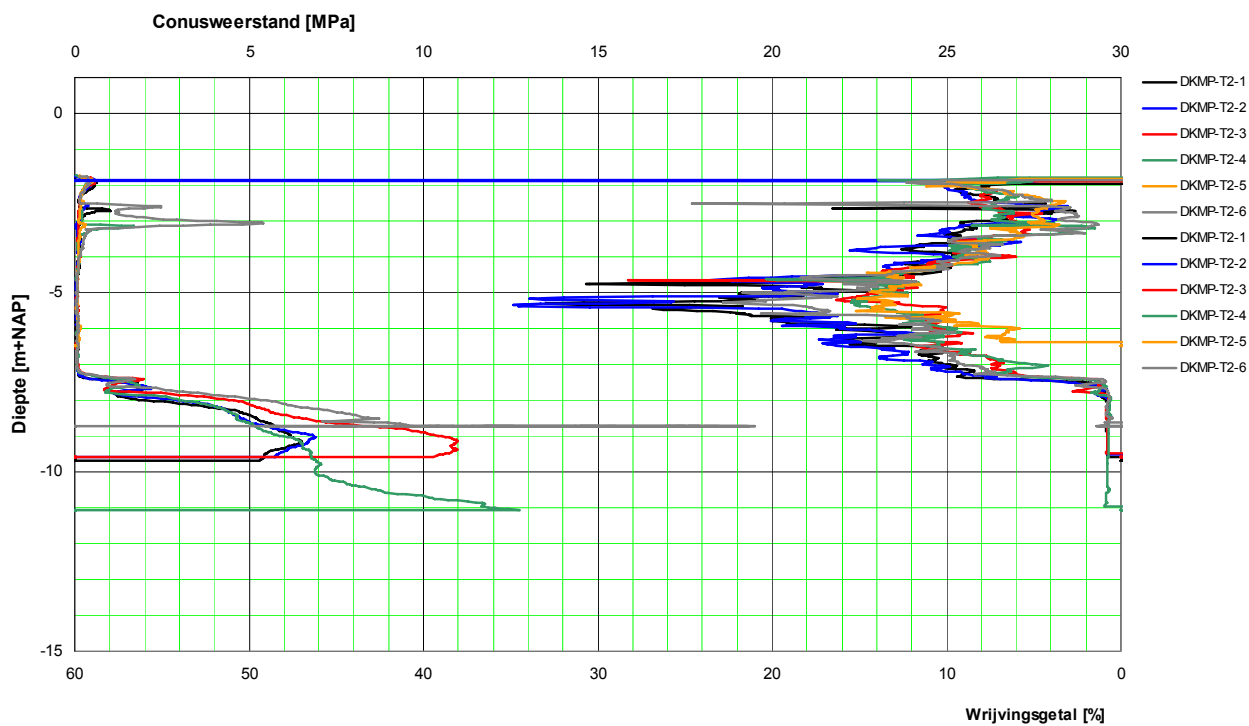


| | | | |
|---|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ◻ Sondering met waterspanning ◻ Conus pressometerstanden ◻ Vaststel ◻ Botsomsondering ○ Boring ■ Zakbaak ■ Elektronische zakbaak ■ Extensometer ○ Heffingmeetbuis ○ Waterspanningsmeter ○ Zettingmeting ○ Heffingmeetbuispat | <p>Fugro Ingenieursbureau BV Kantoor Leidschendam Voorse Achterweg 10 2264 SG Leidschendam www.fugro-nederland.nl</p> <p>Tel: 070-3111333 Fax: 070-3277091</p> <p>INRICHTING PROEFTERPEN</p> <p>PROEFTERPEN PROJECT BLOEMENDALERPOLDER TE WEESP</p> <p>07-05-2012</p> | <p>locatie compensatie 25m² wateroppervlakte</p> <p>Vrijgekomen grond uit watergang over terrein verdelen</p> | <p>FUGRO</p> <p>Revisie Schaal 1:200</p> <p>Formaat A0</p> <p>Bijlage 1</p> |
|---|--|--|--|

Terp 1



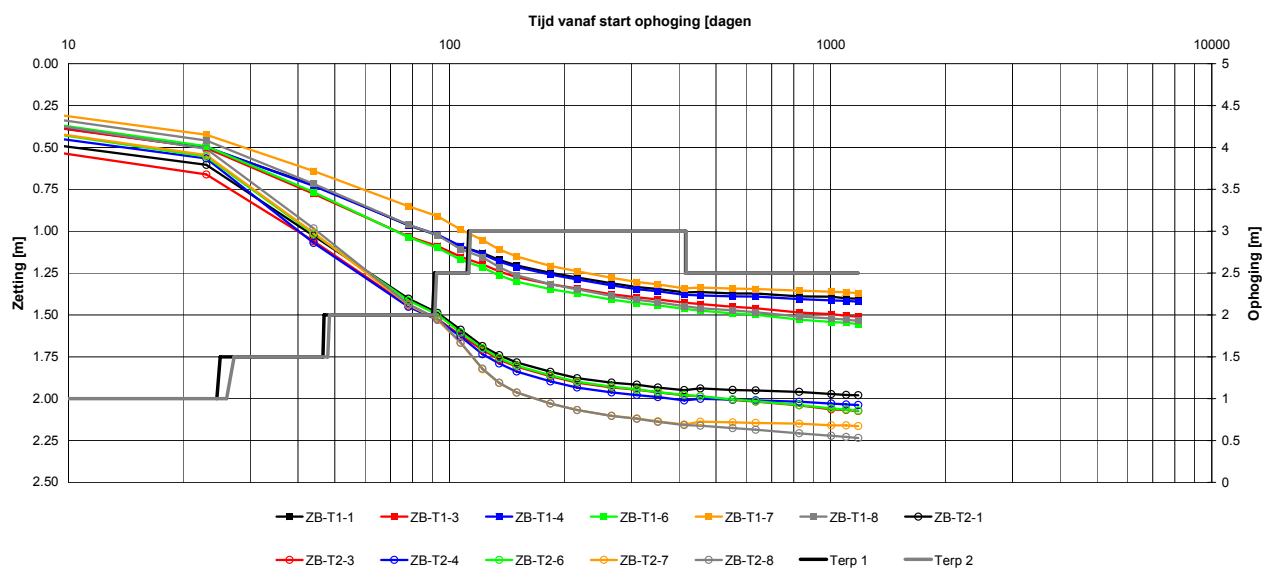
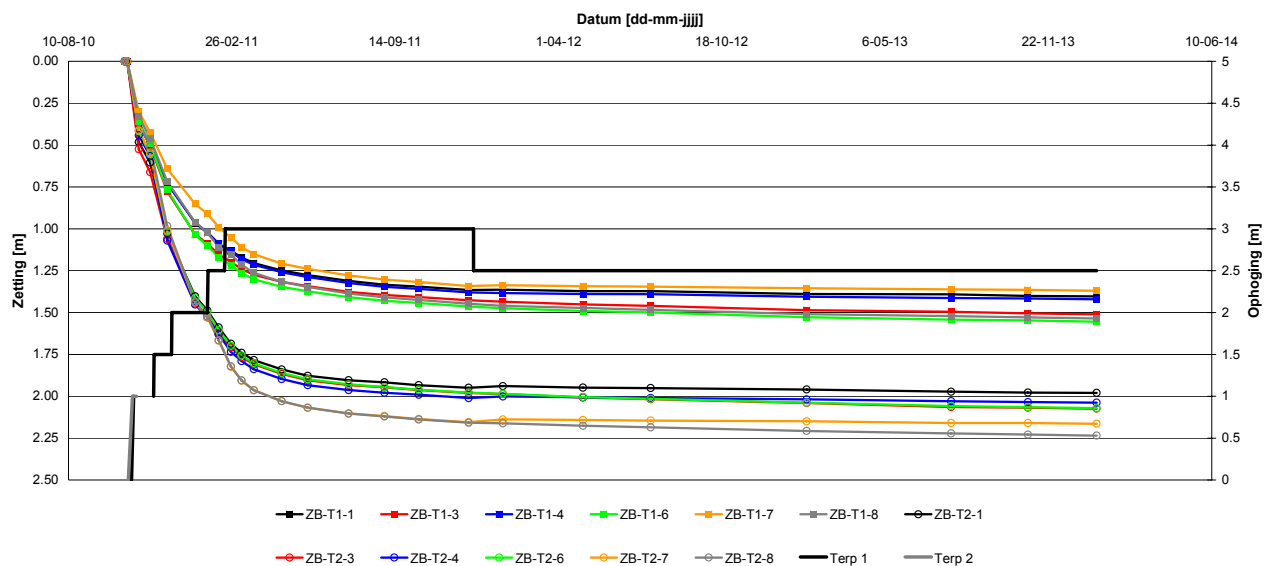
Terp 2



GECOMBINEERDE SONDERINGEN

EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

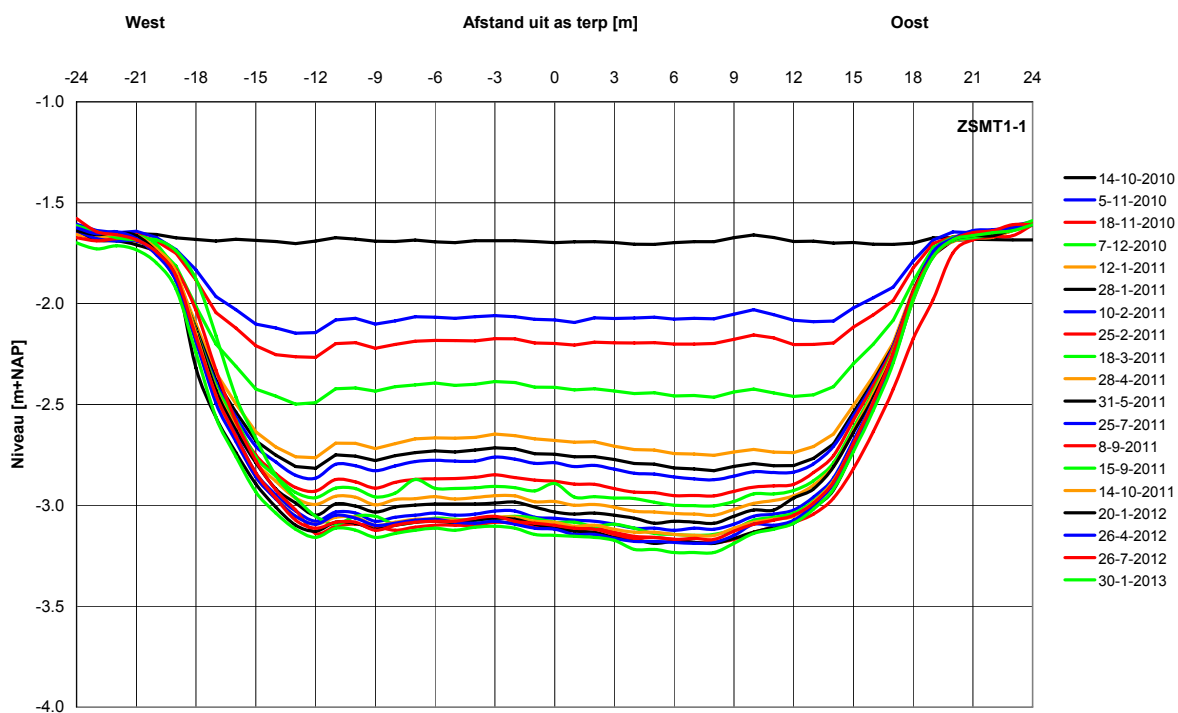
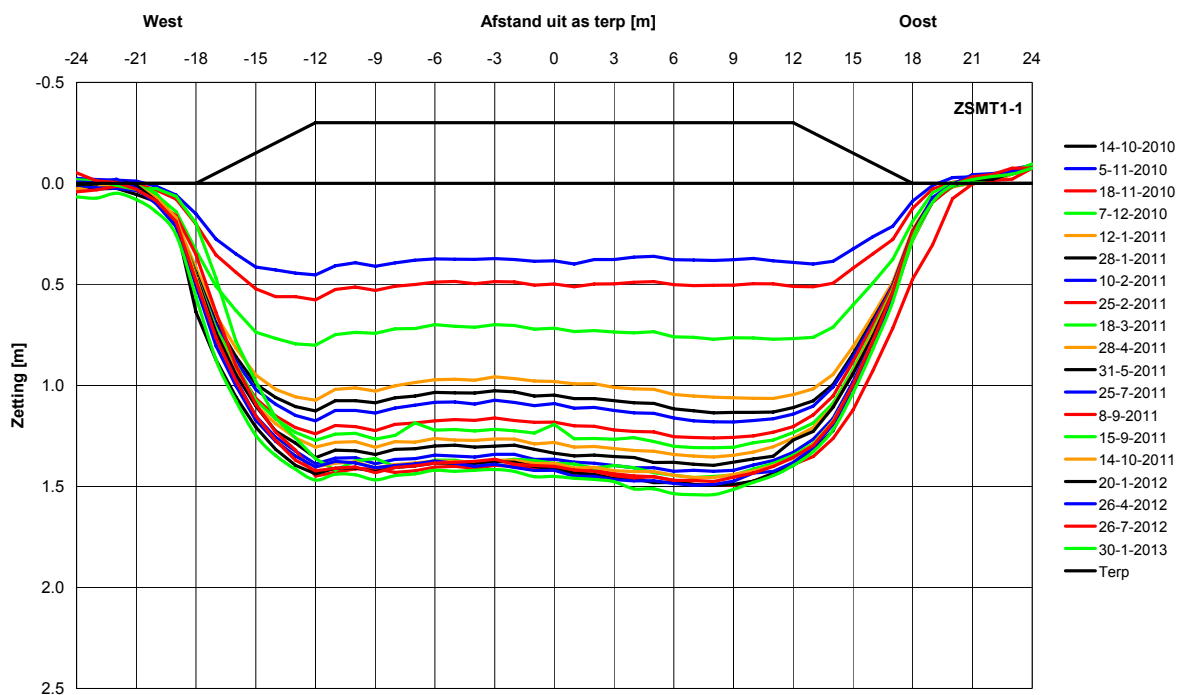
Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 2



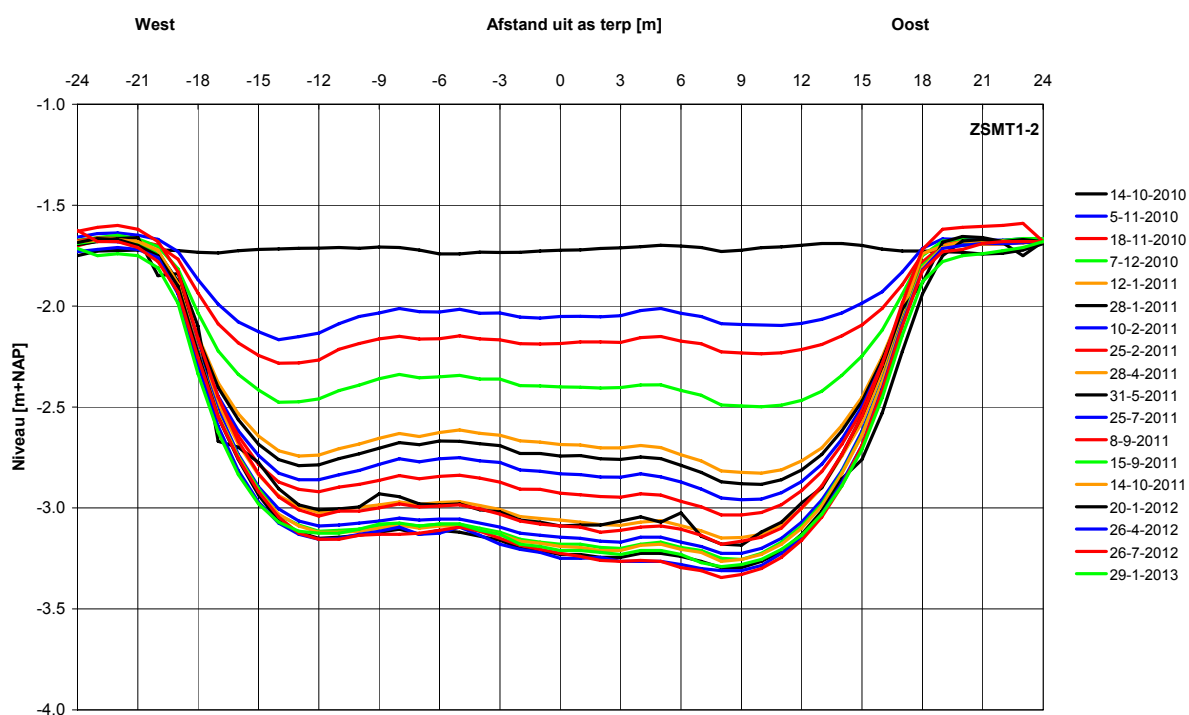
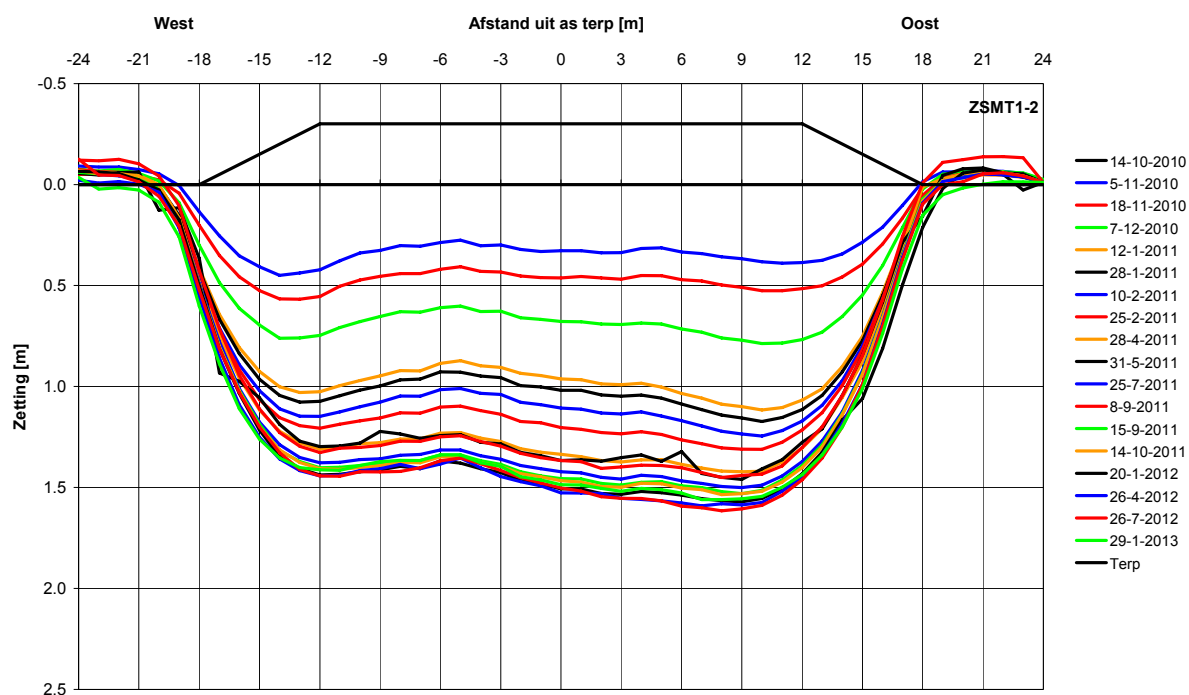
ZAKBAAKMETINGEN

EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 3



ZETTINGMEETSLANG

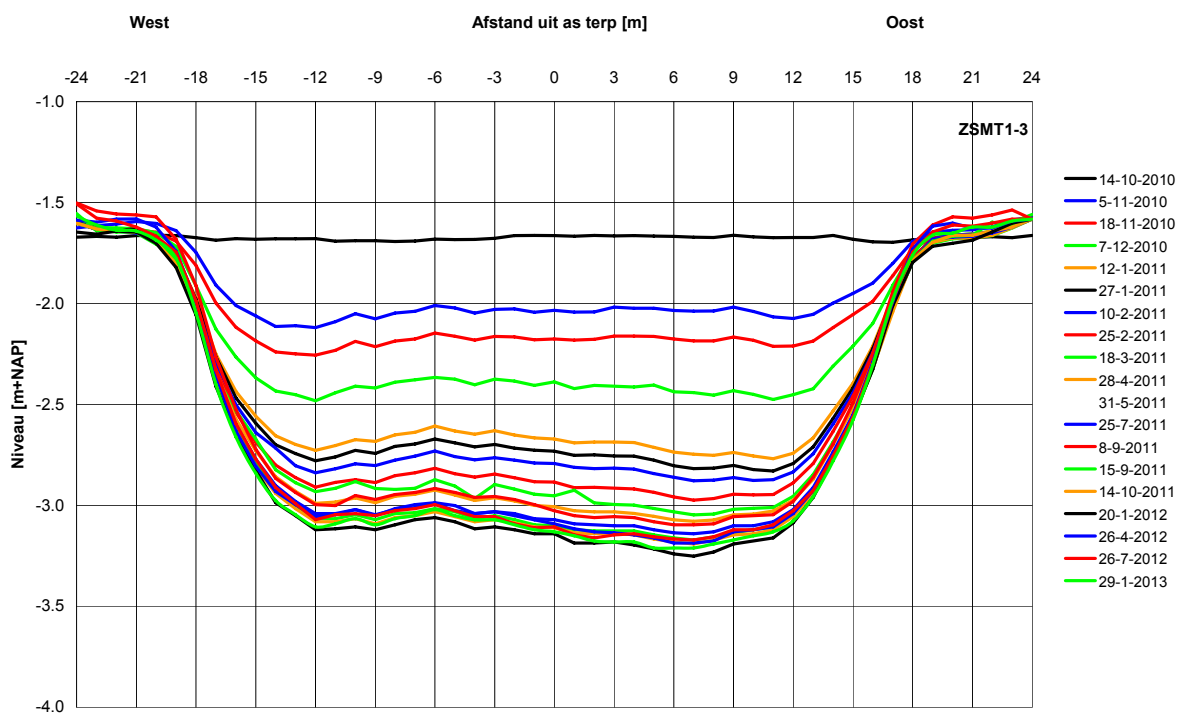
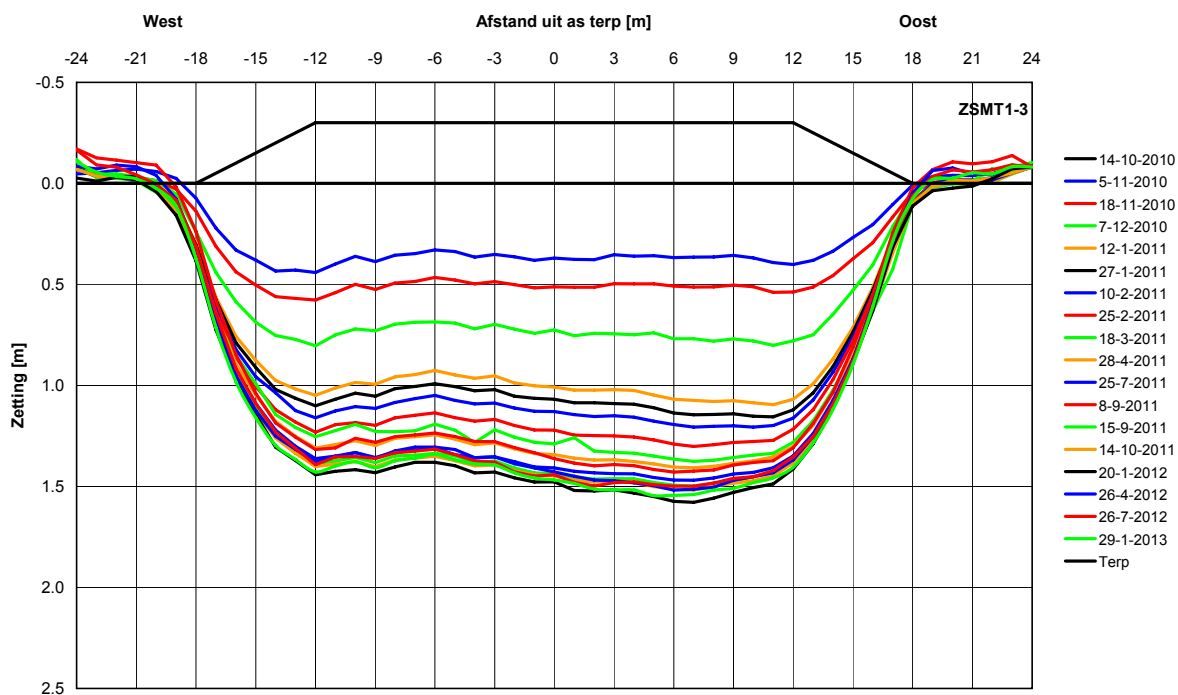


ZETTINGMEETSLANG

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 5

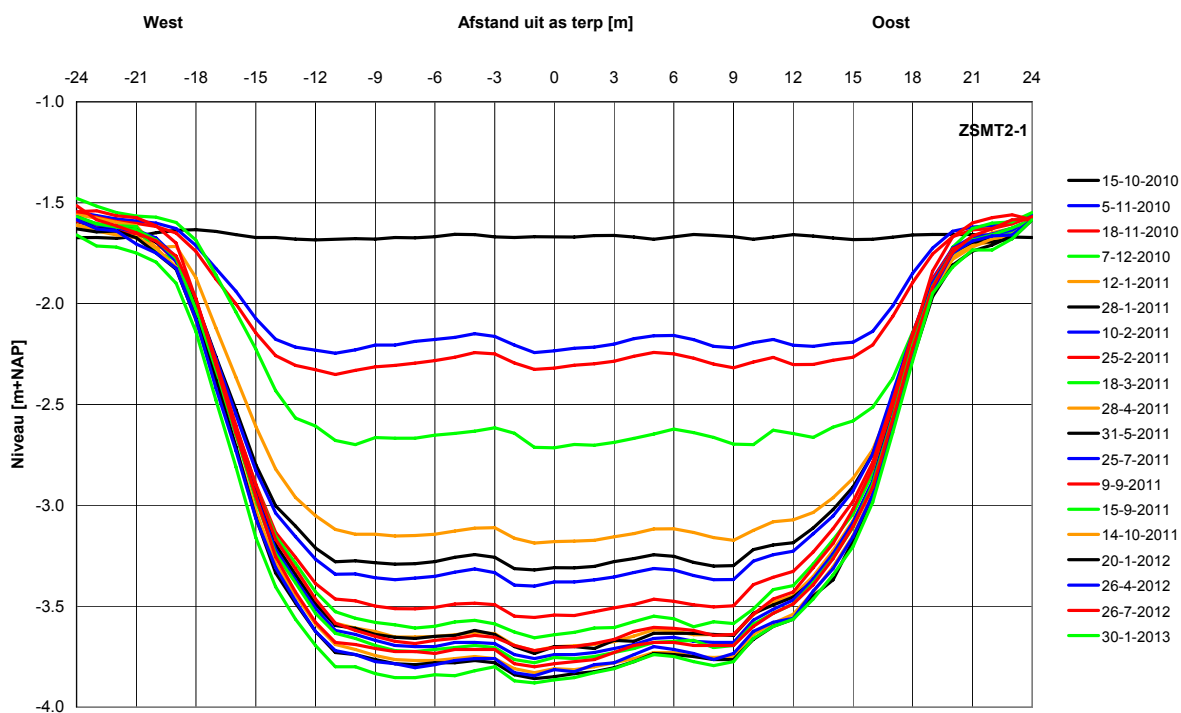
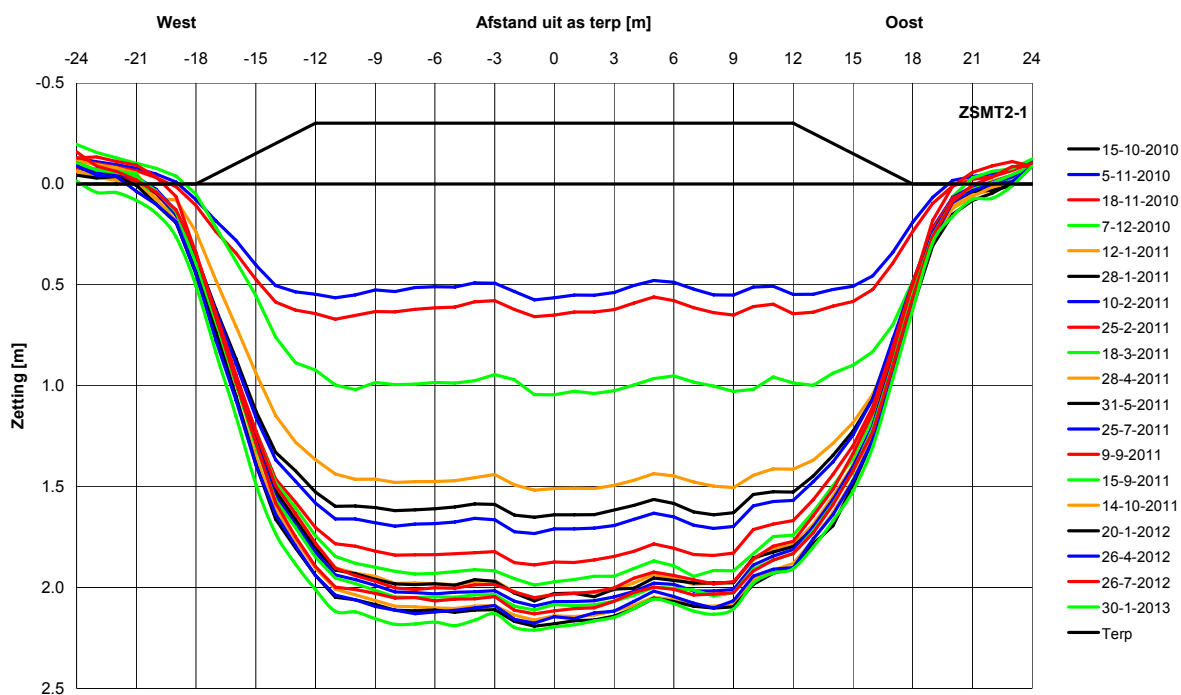


ZETTINGMEETSLANG

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 6

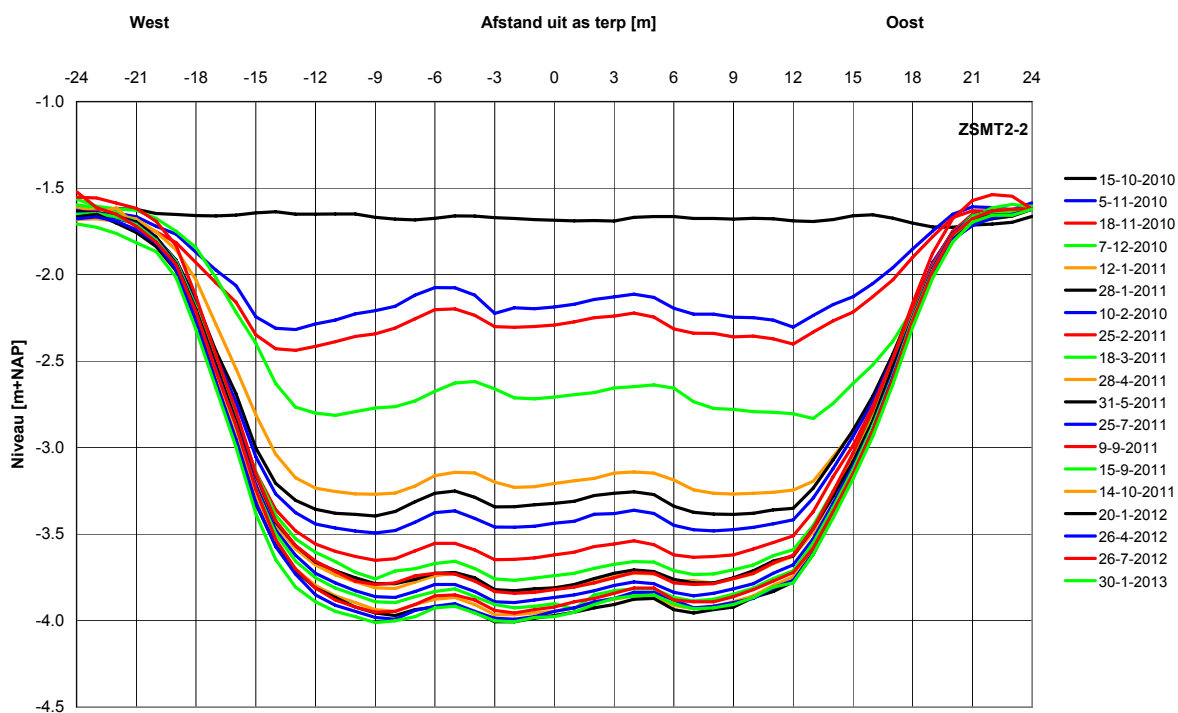
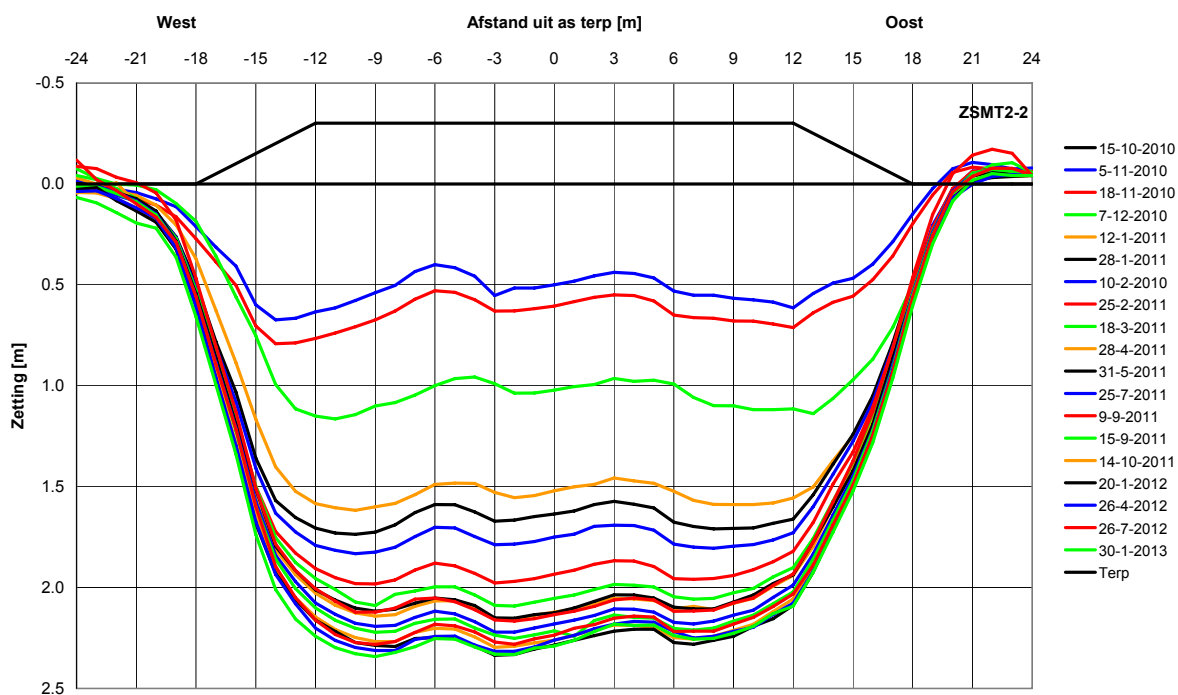


ZETTINGMEETSLANG

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 7

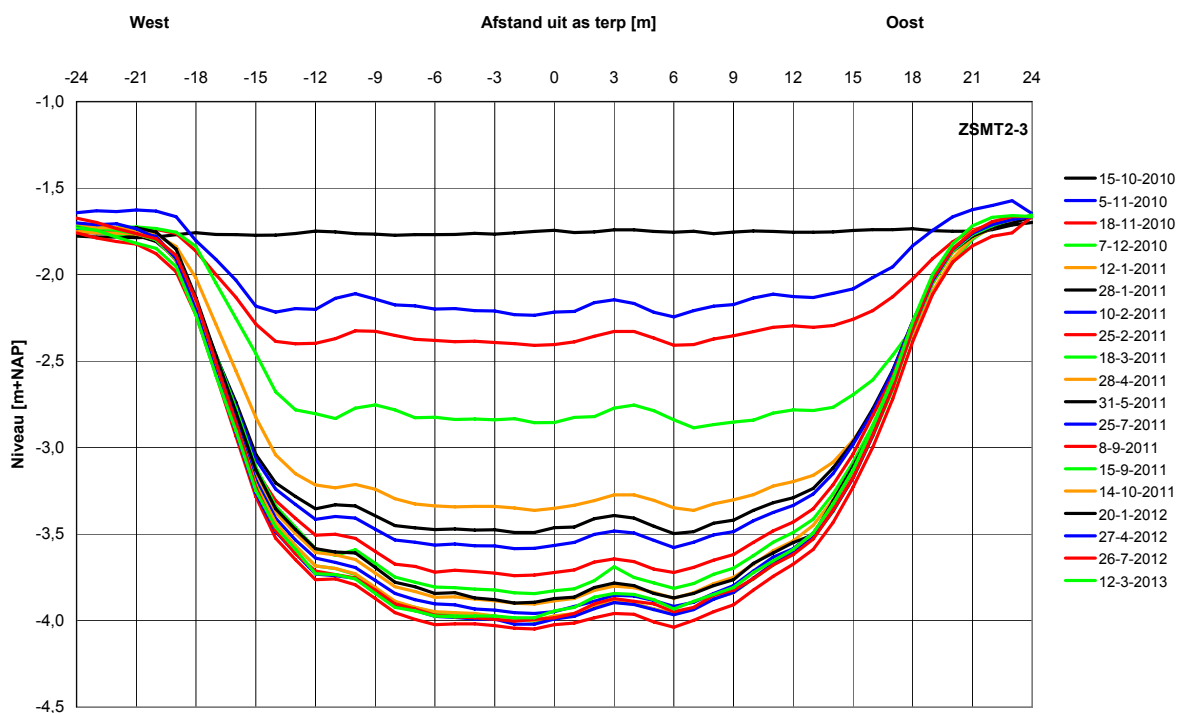
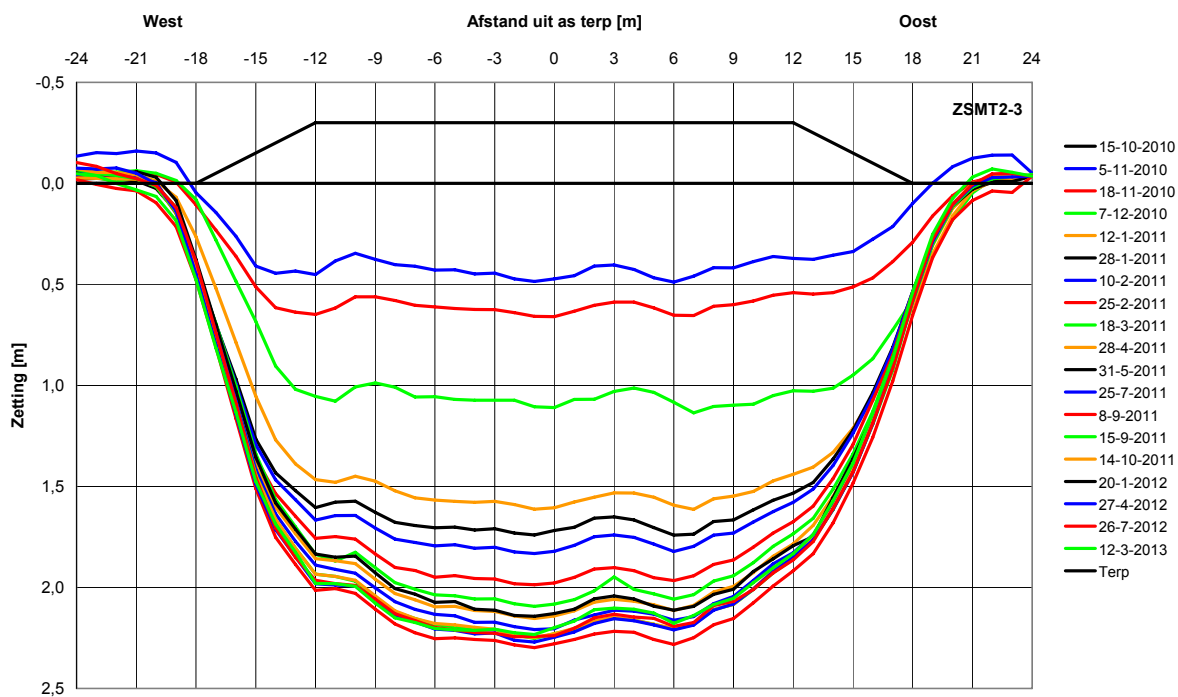


ZETTINGMEETSLANG

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 8

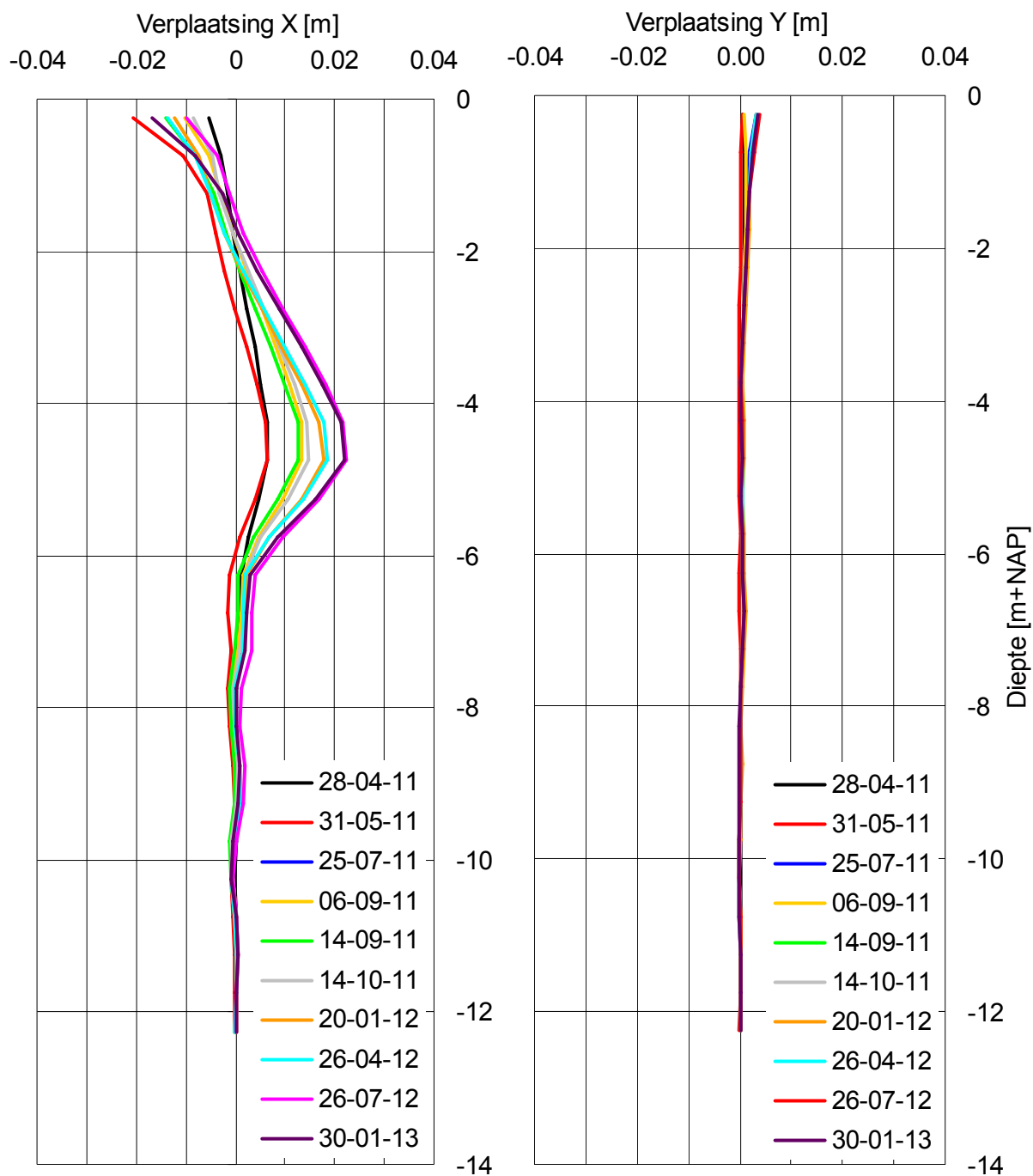


ZETTINGMEETSLANG

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 9

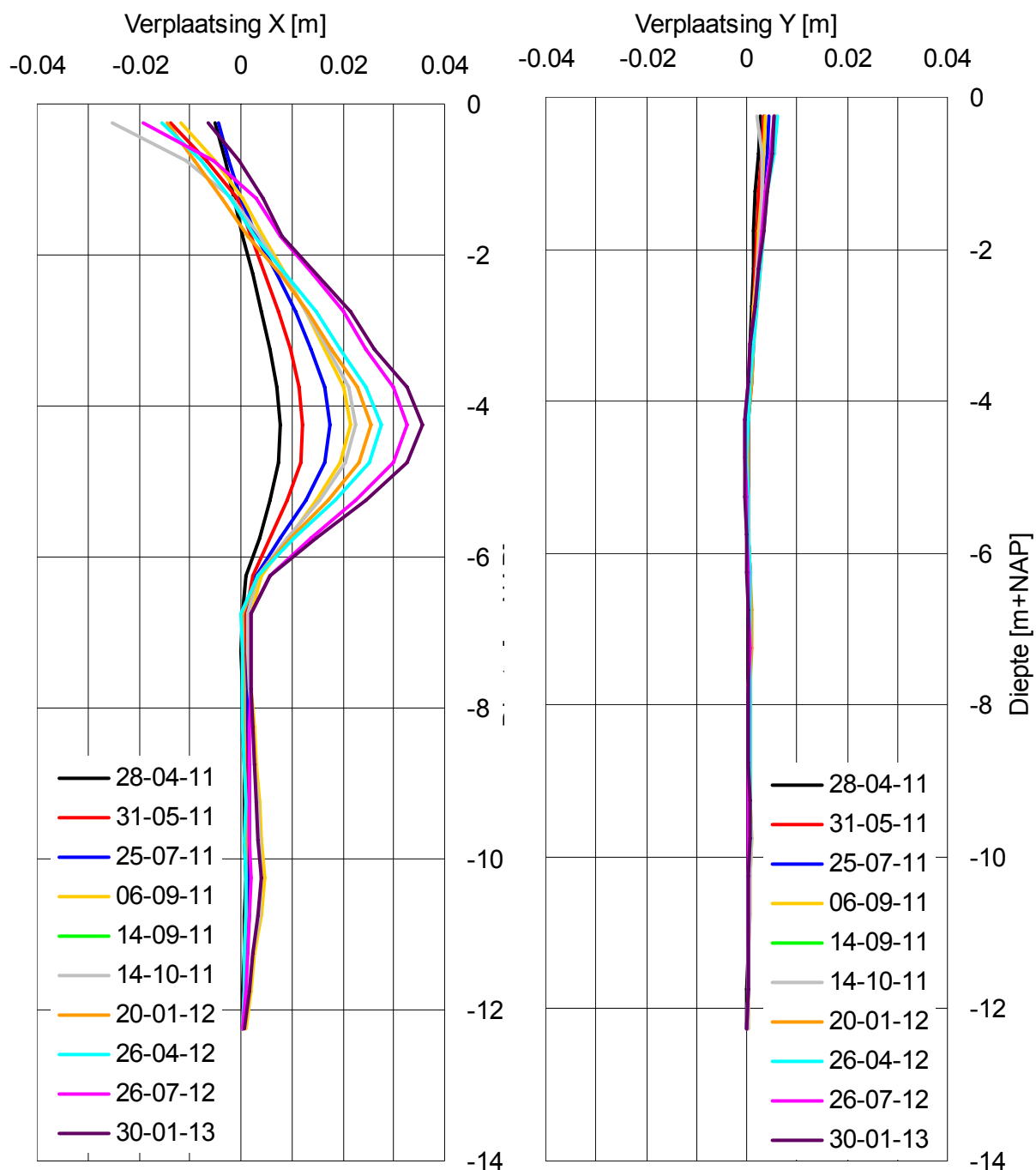


HELLINGMEETBUIS HT1-1

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 10

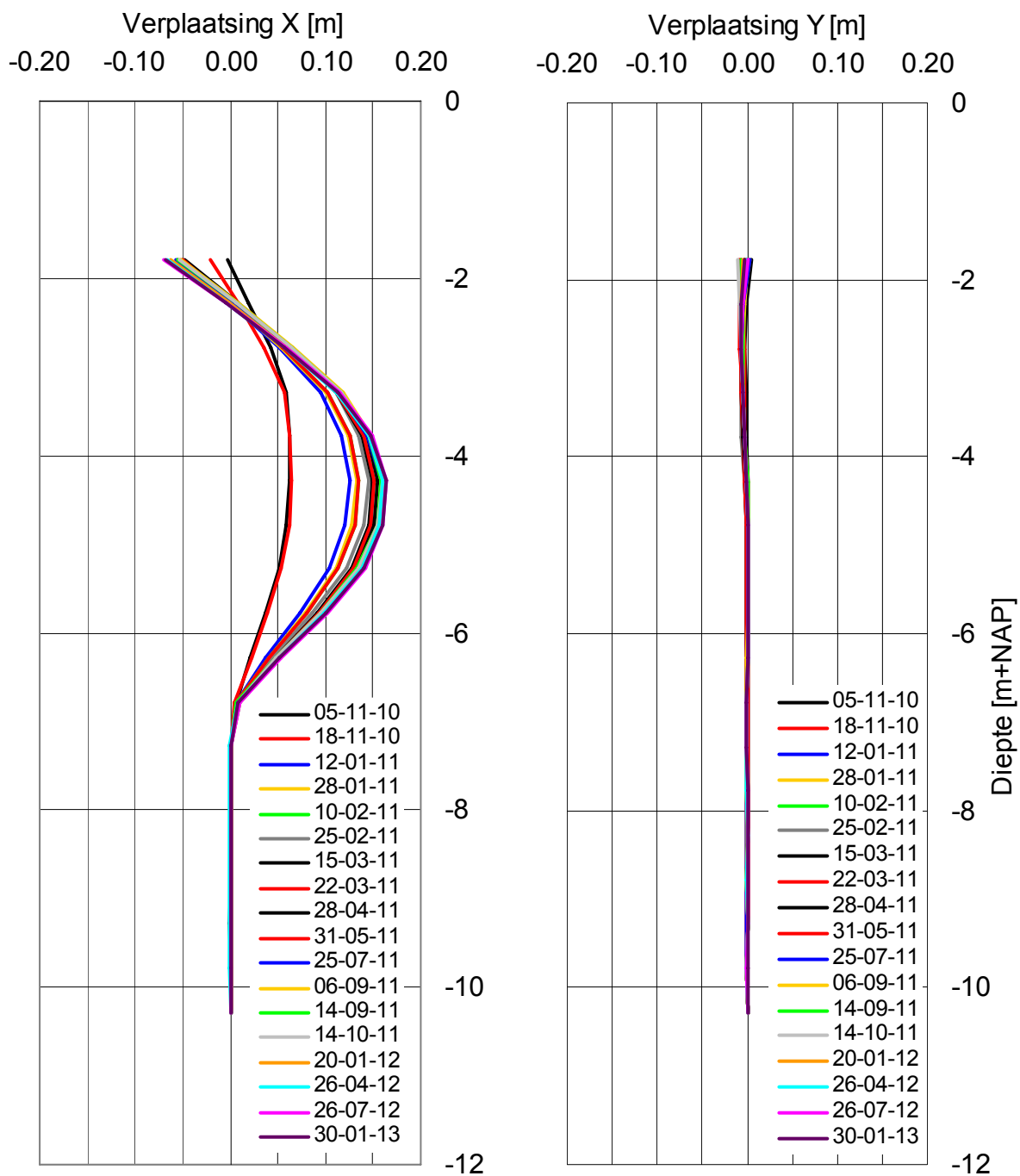


HELLINGMEETBUIS HT1-2

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 11

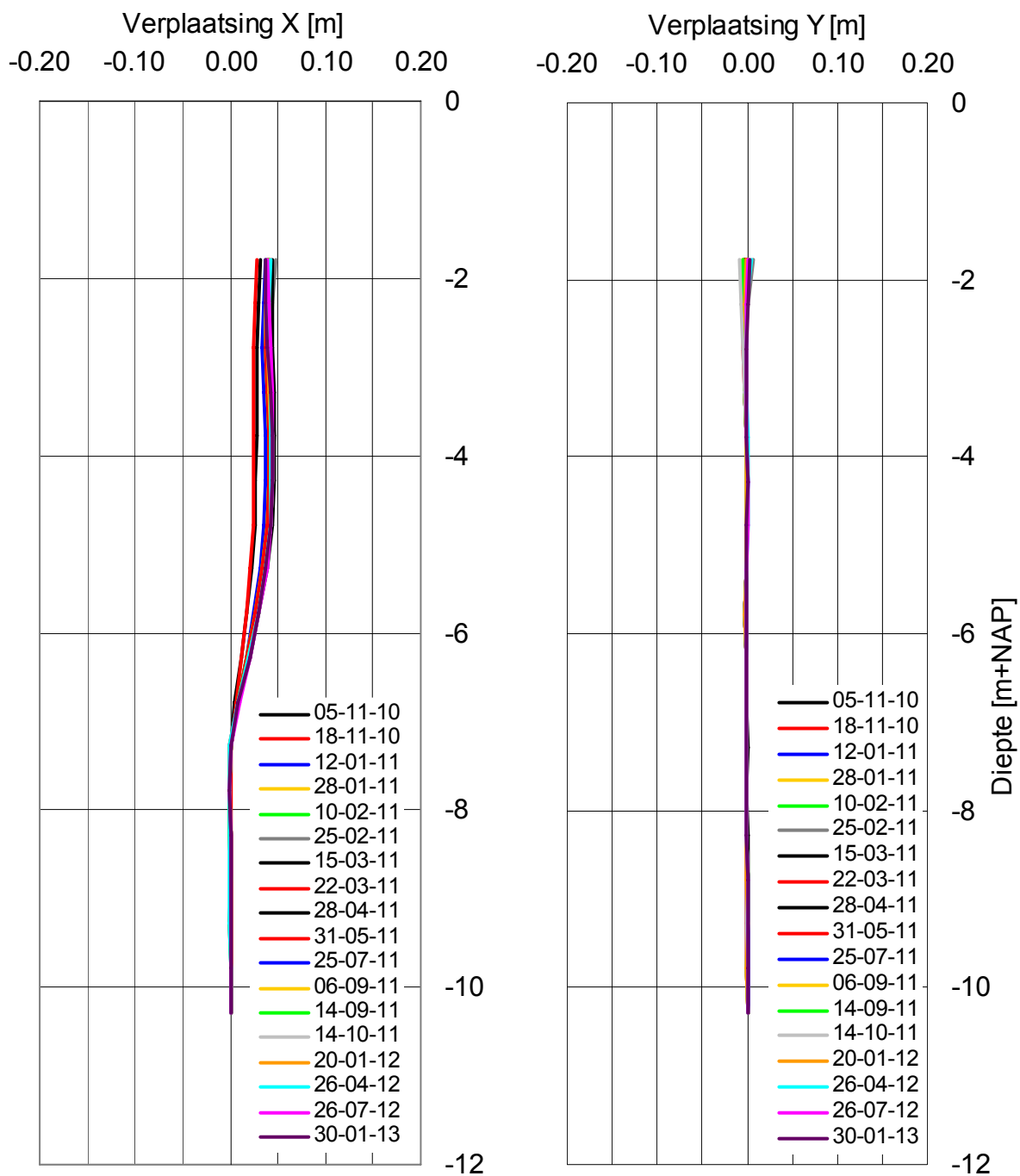


HELLINGMEETBUIS HT1-3

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 12

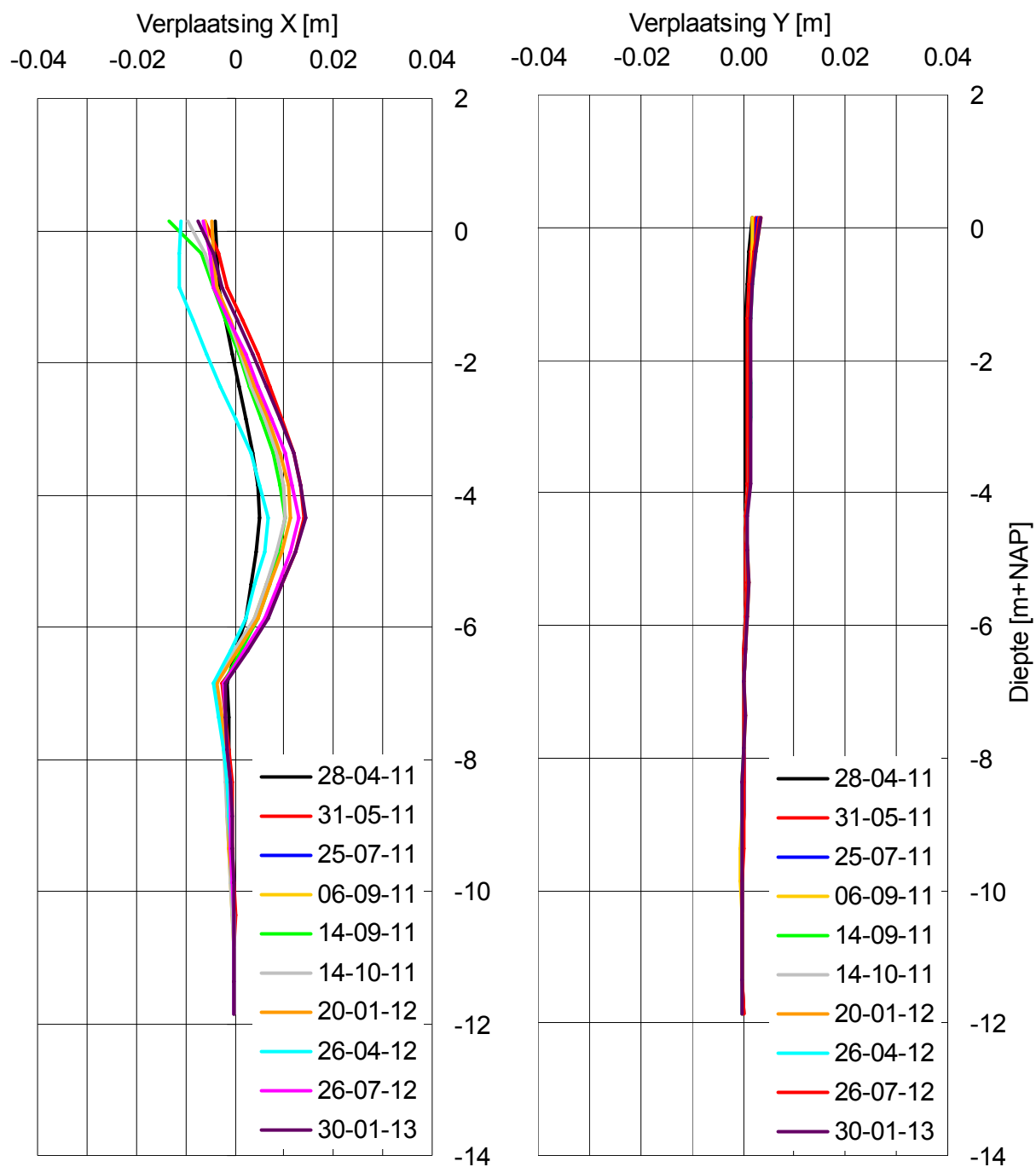


HELLINGMEETBUIS HT1-4

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 13

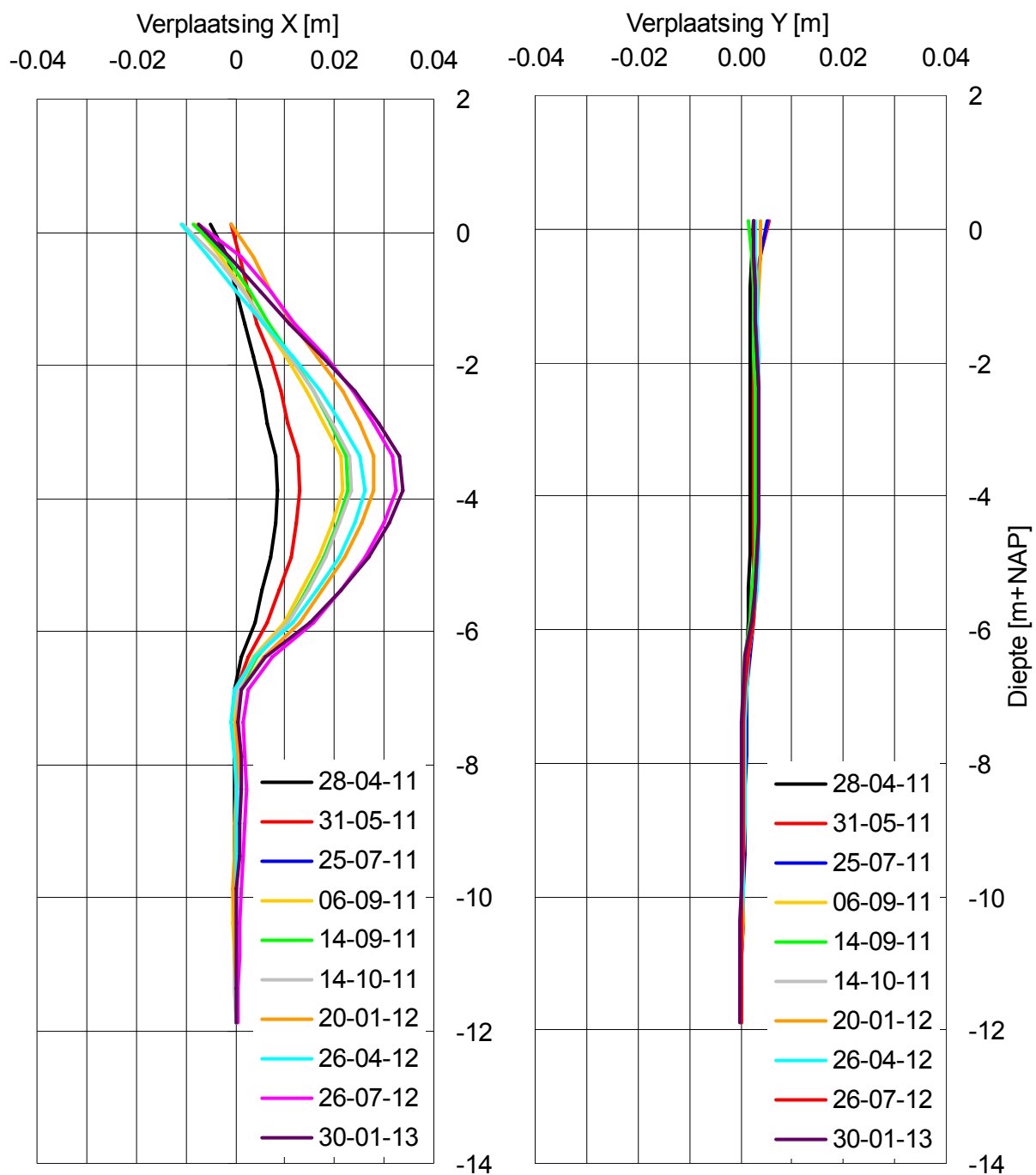


HELLINGMEETBUIS HT2-1

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 14

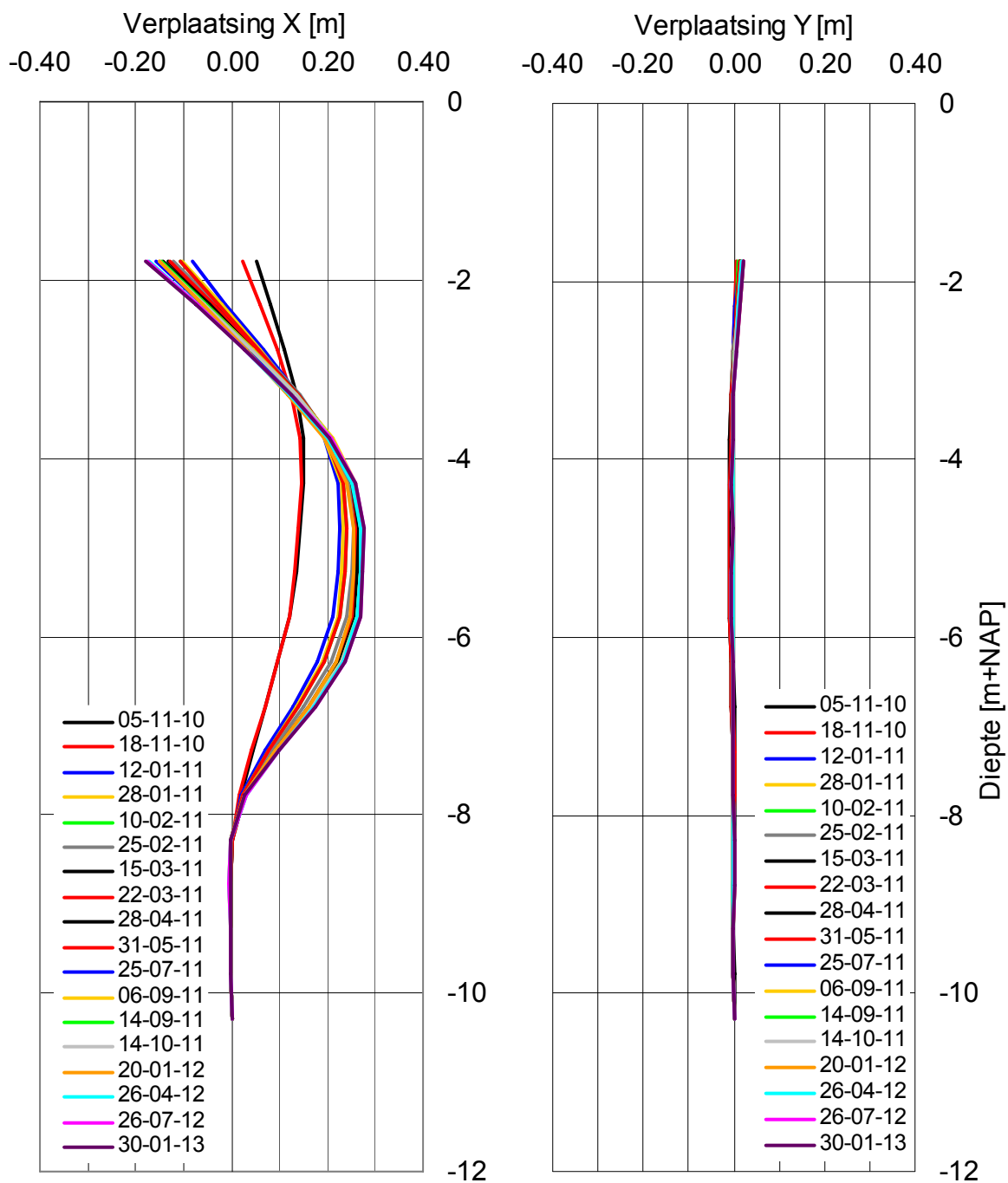


HELLINGMEETBUIS HT2-2

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 15

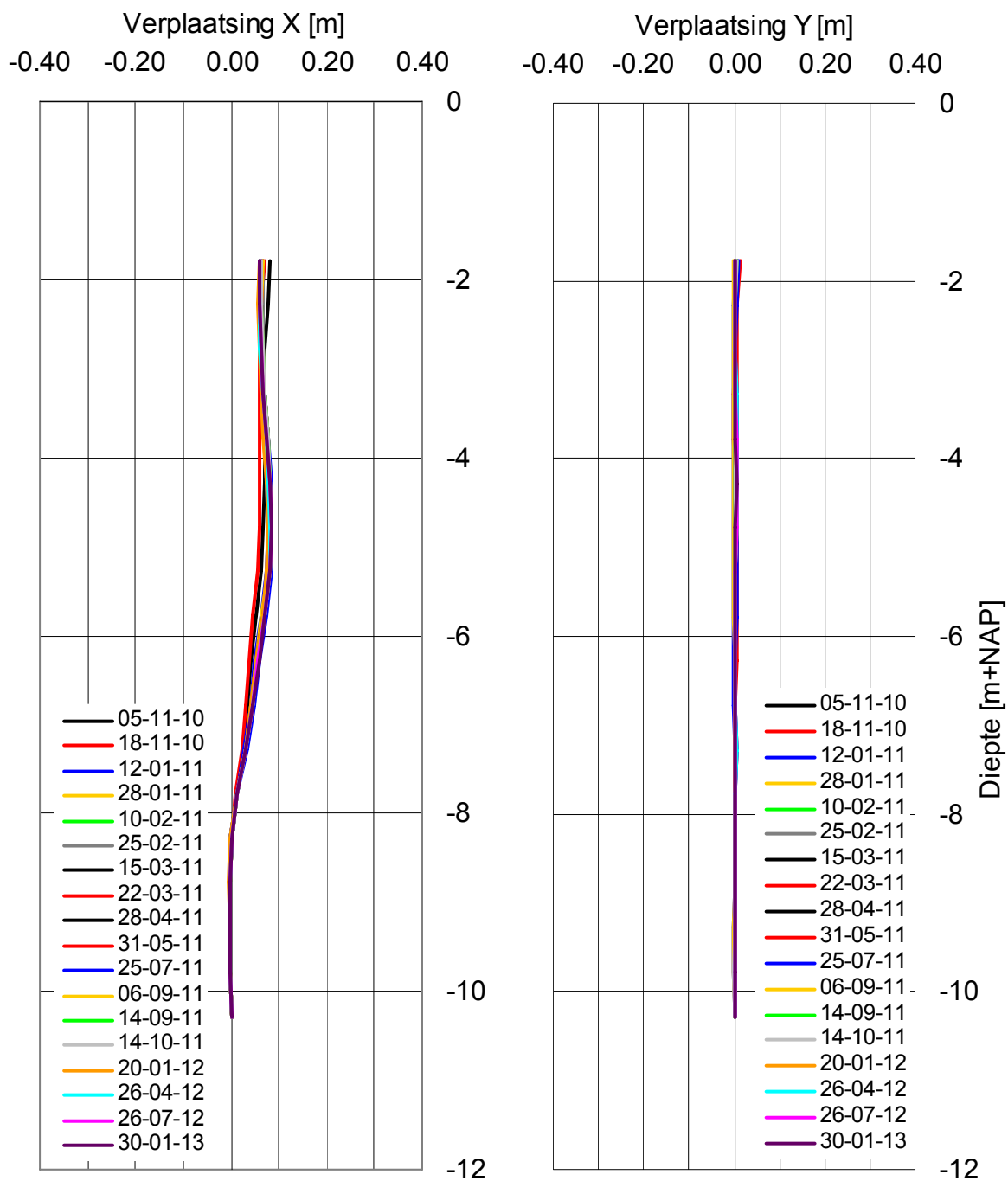


HELLINGMEETBUIS HT2-3

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 16



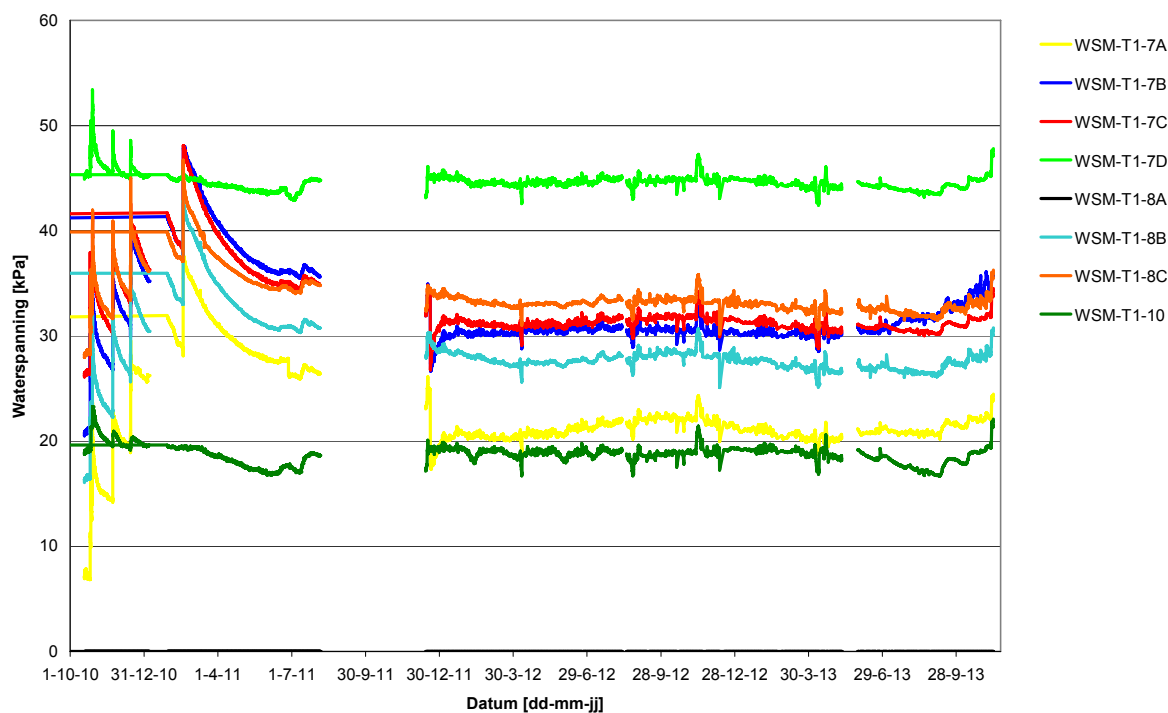
HELLINGMEETBUIS HT2-4

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

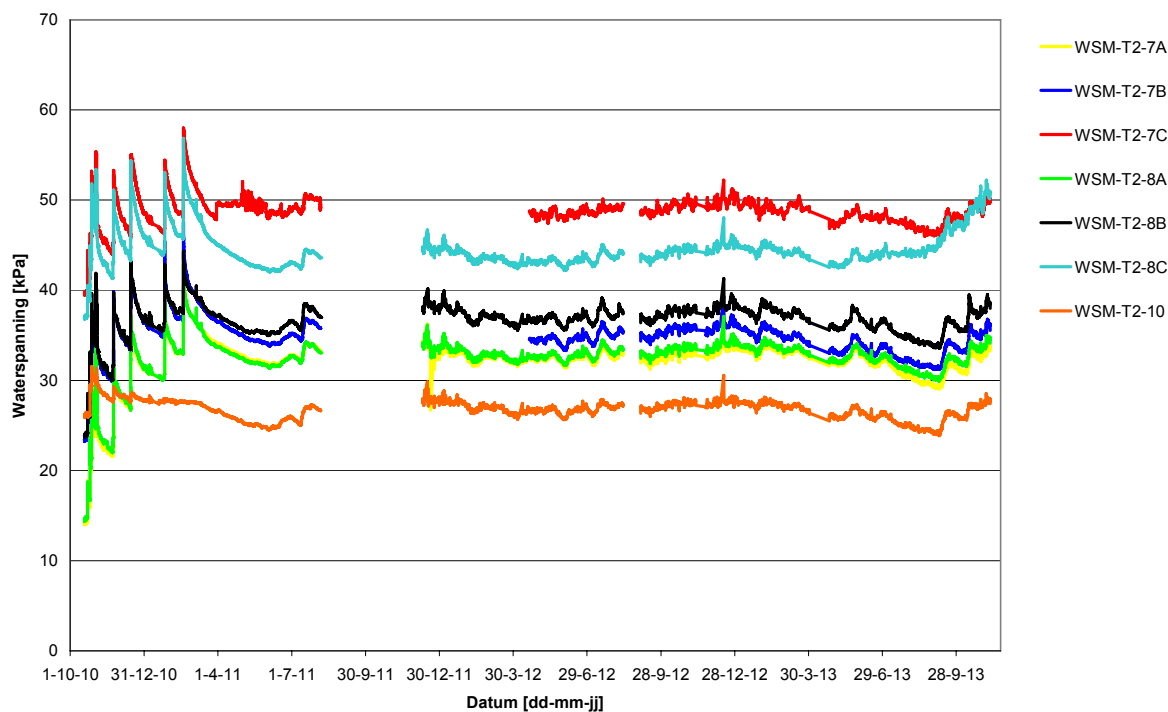
Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 17

Terp 1



Terp 2

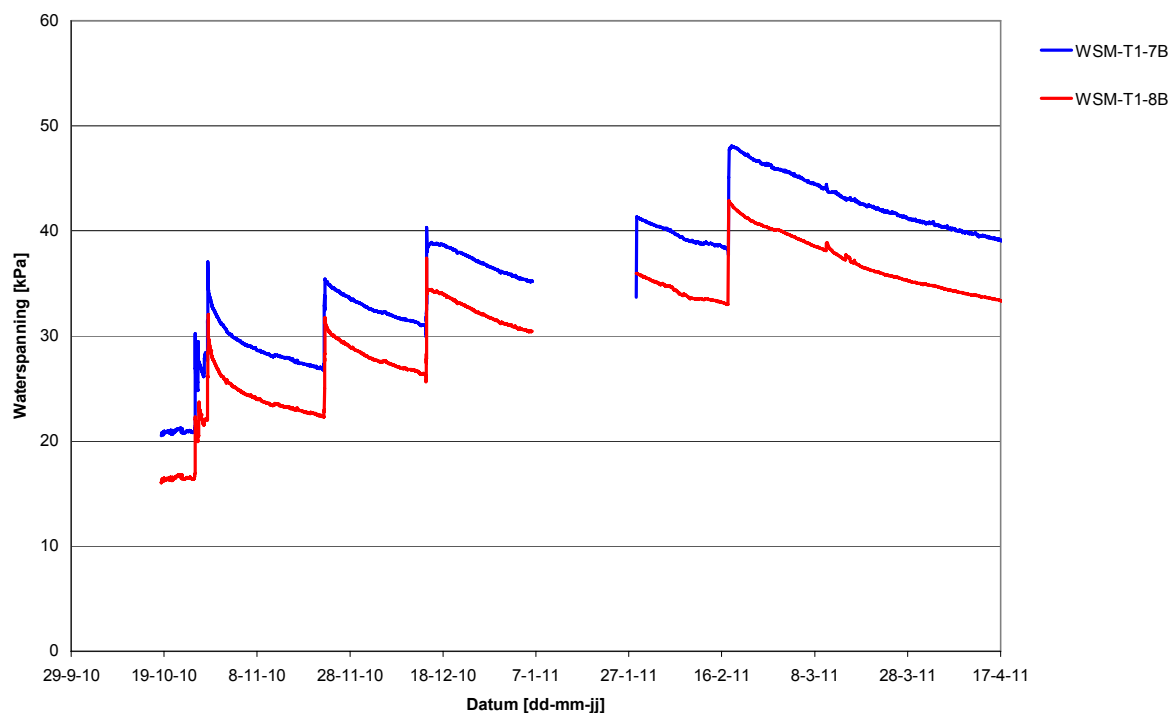


WATERSPANNINGSMETINGEN MIDDEN VEENLAAG

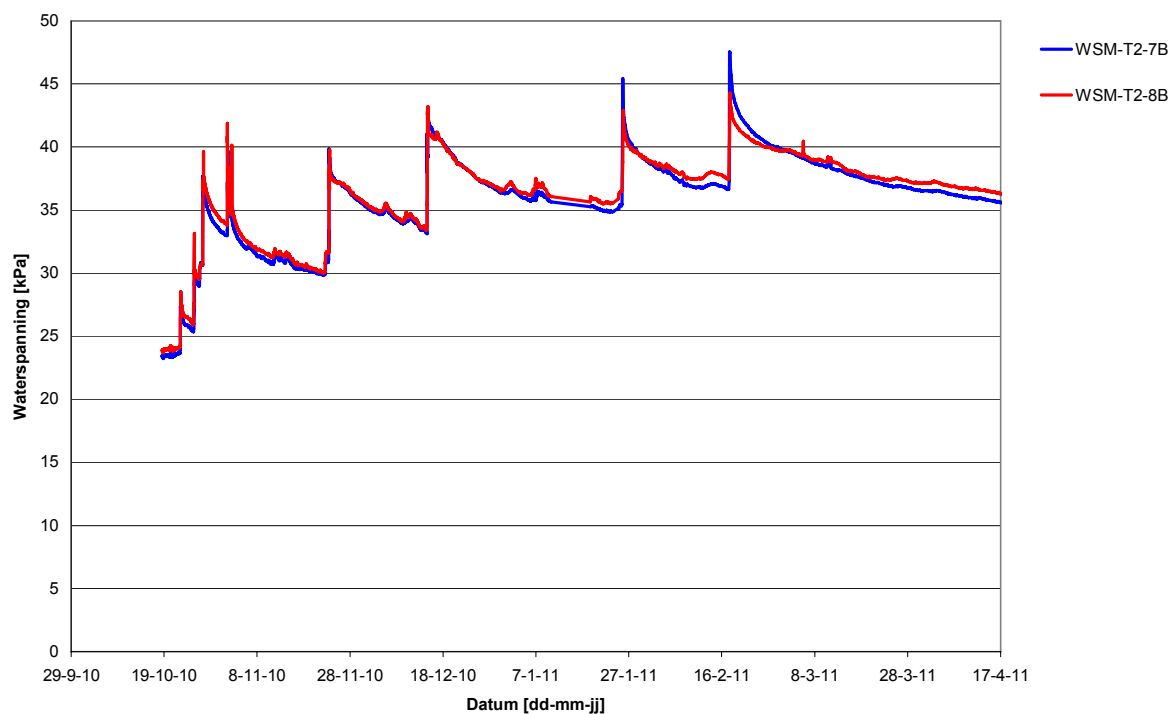
EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 18

Terp 1



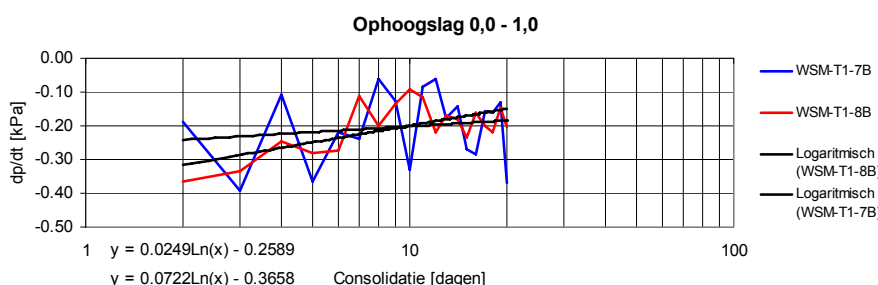
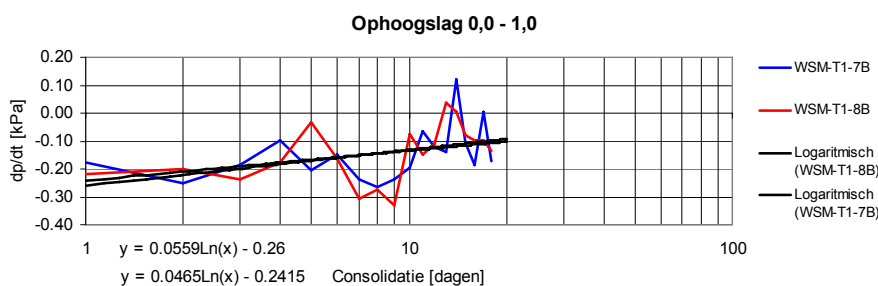
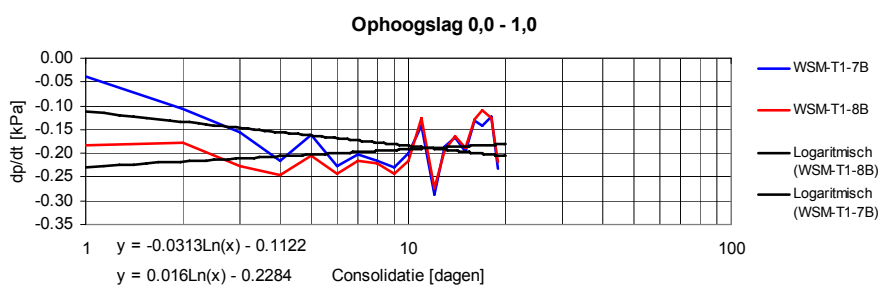
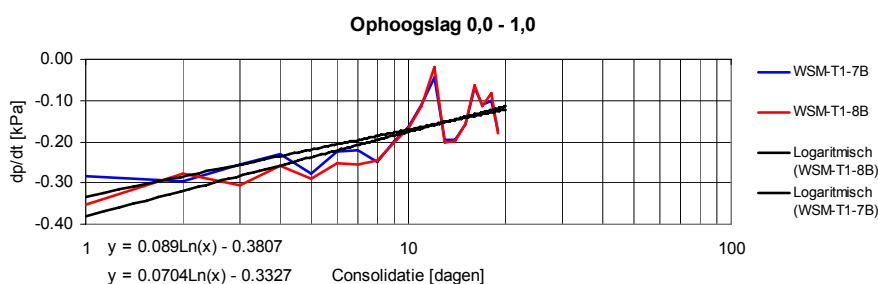
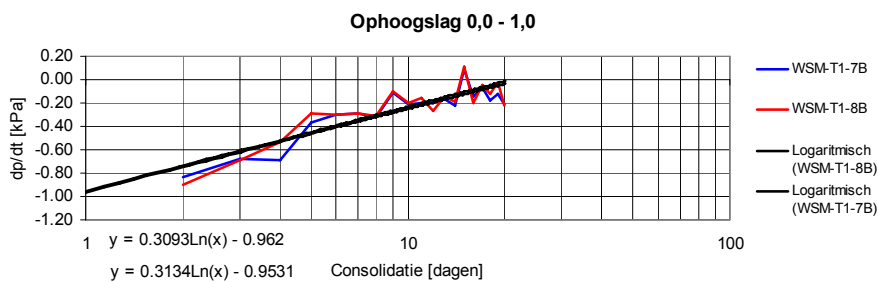
Terp 2



WATERSPANNINGSMETINGEN MIDDEN VEENLAAG

EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

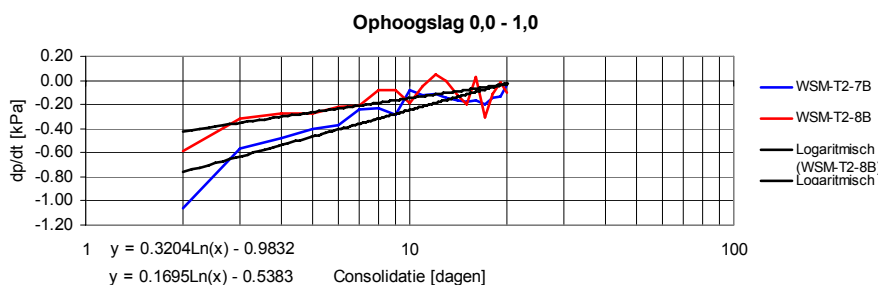
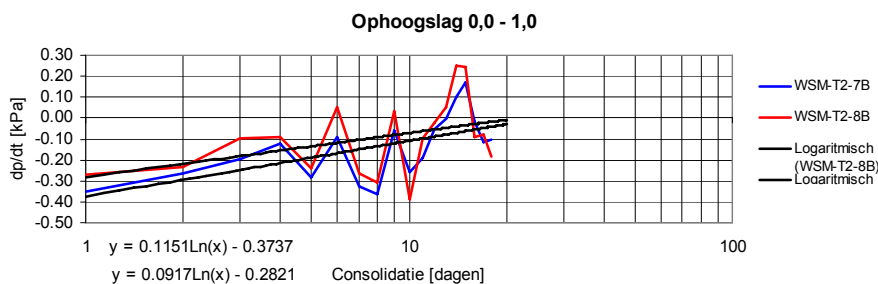
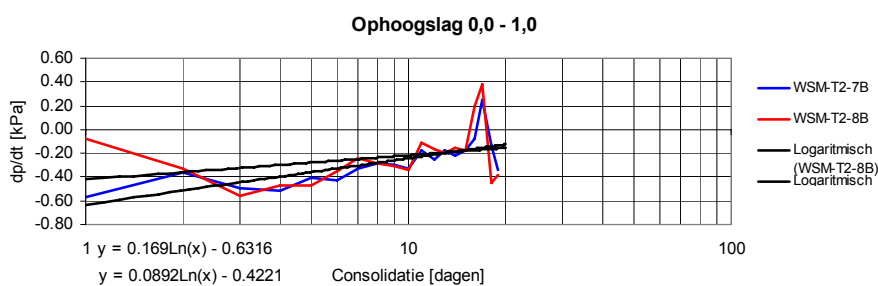
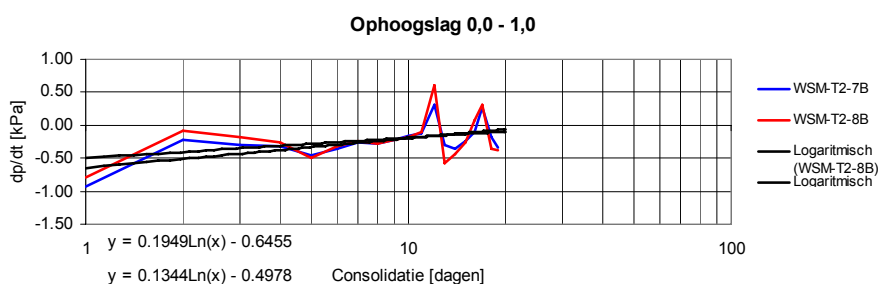
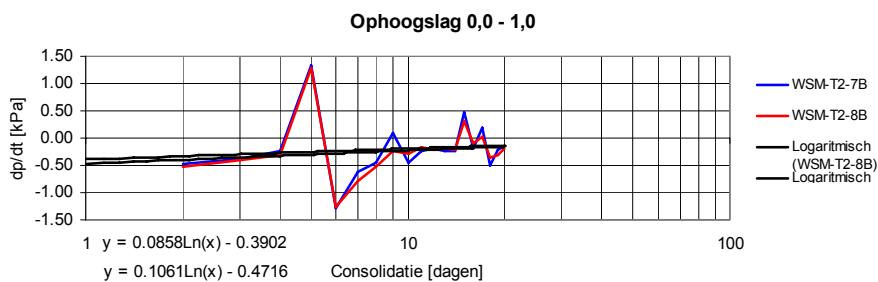
Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 19



WATERSPANNINGSMETINGEN TERP 1

EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 20

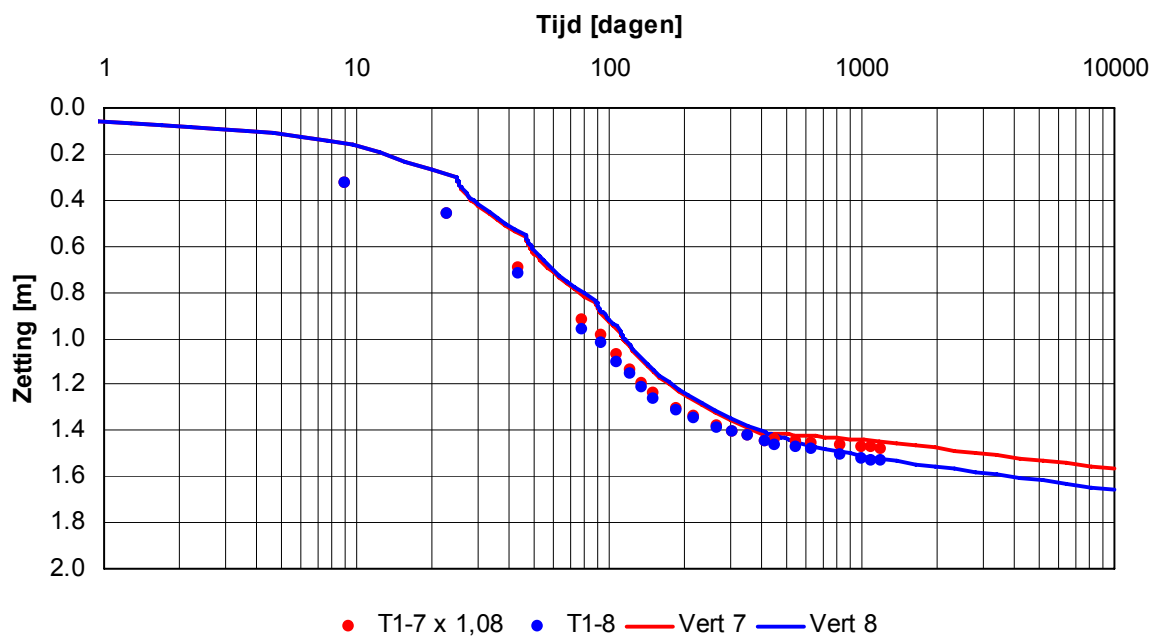


WATERSPANNINGSMETINGEN TERP 2

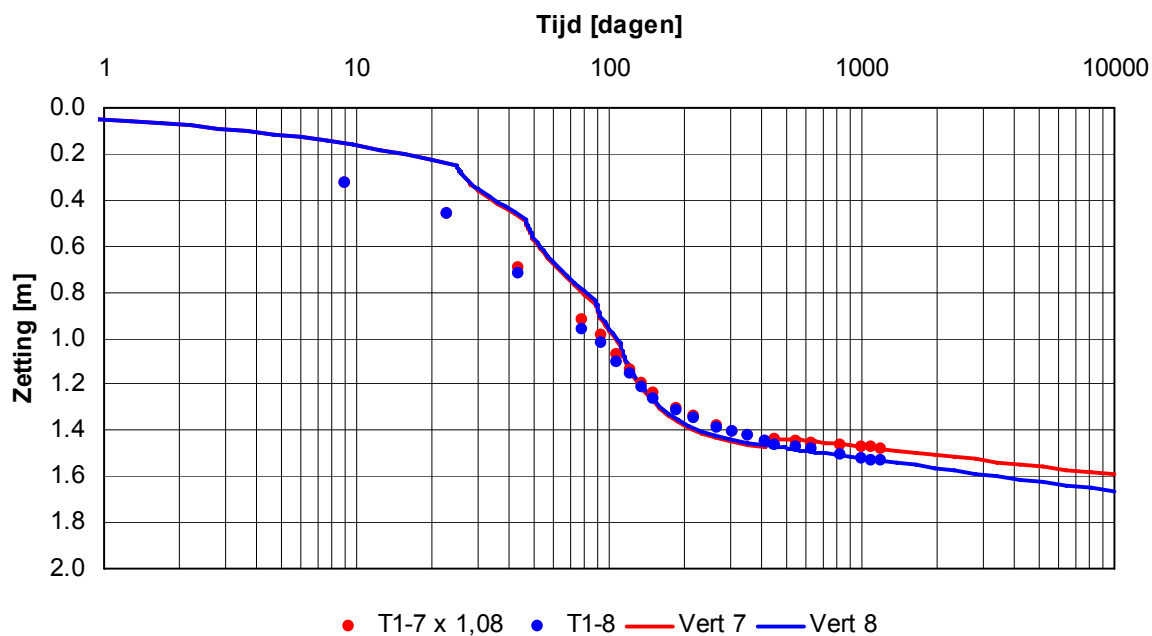
EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 21

Darcy met poriëngetal afhankelijke doorlatendheid



Terzaghi met constante c_v

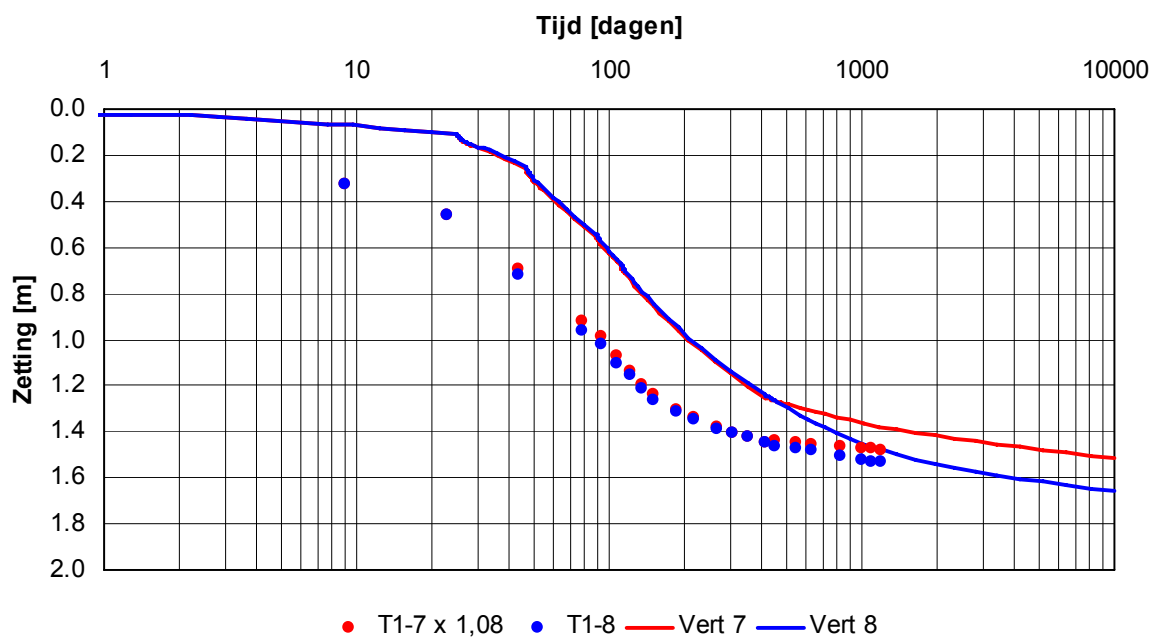


OVERZICHT POSTDICTIES TERP 1 KOPPEJAN

EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 22

Darcy met constante c_v

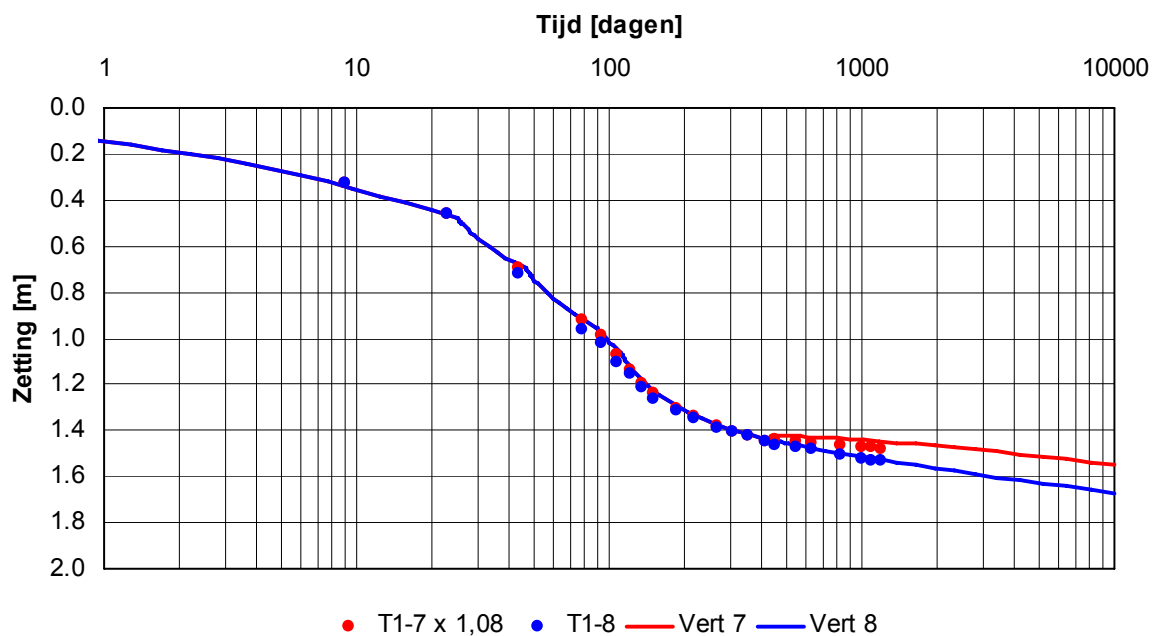


OVERZICHT POSTDICTIES TERP 1 KOPPEJAN

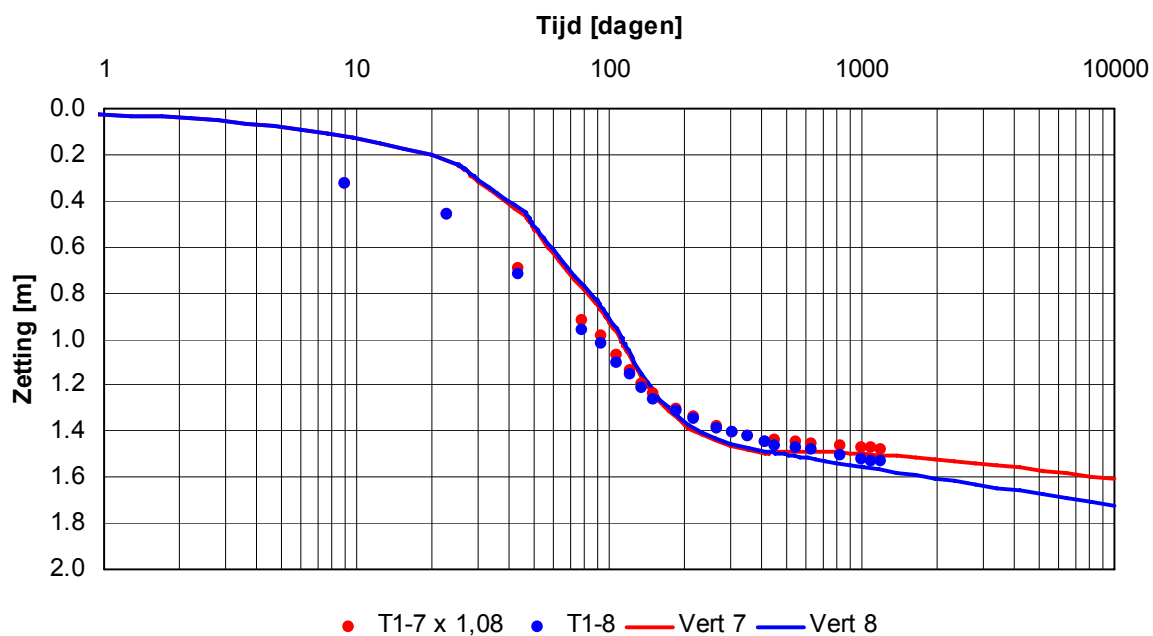
EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 23

Darcy met poriëngetal afhankelijke doorlatendheid



Terzaghi met constante c_v



OVERZICHT POSTDICTIES TERP 1 NEN-BJERRUM

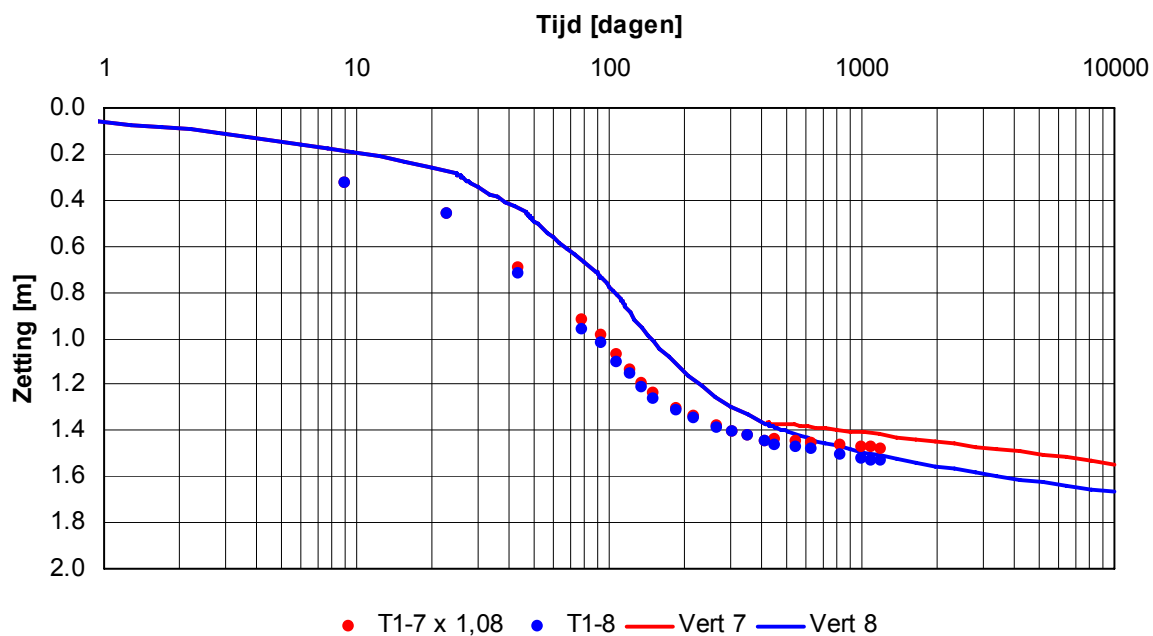
EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000

Bijl. : 24

Darcy met constante c_v

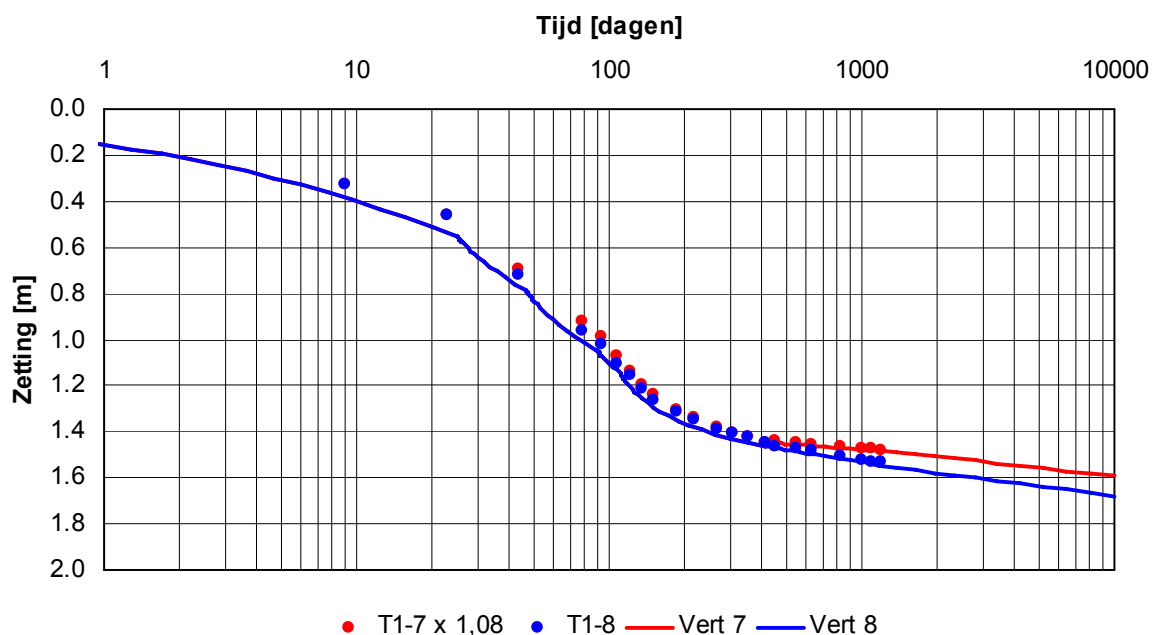


OVERZICHT POSTDICTIES TERP 1 NEN-BJERRUM

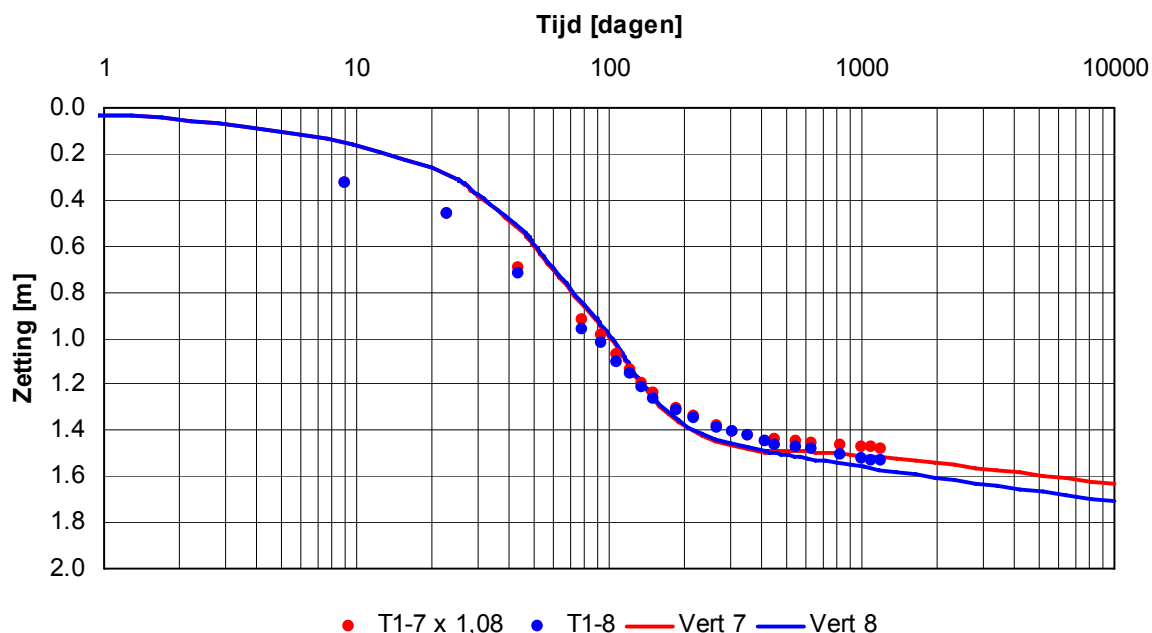
EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 25

Darcy met poriëngetal afhankelijke doorlatendheid



Terzaghi met constante c_v



OVERZICHT POSTDICTIES TERP 1 A,B,C-ISOTACHEN

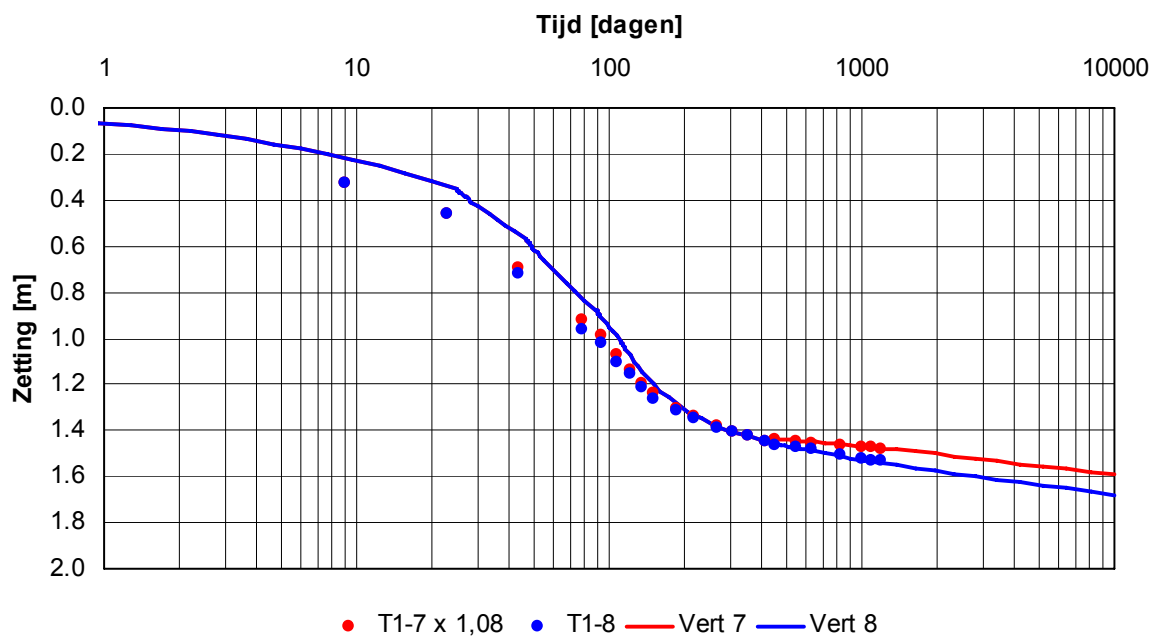
EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN

Opdr. : 3009-0261-000

PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Bijl. : 26

Darcy met constante c_v

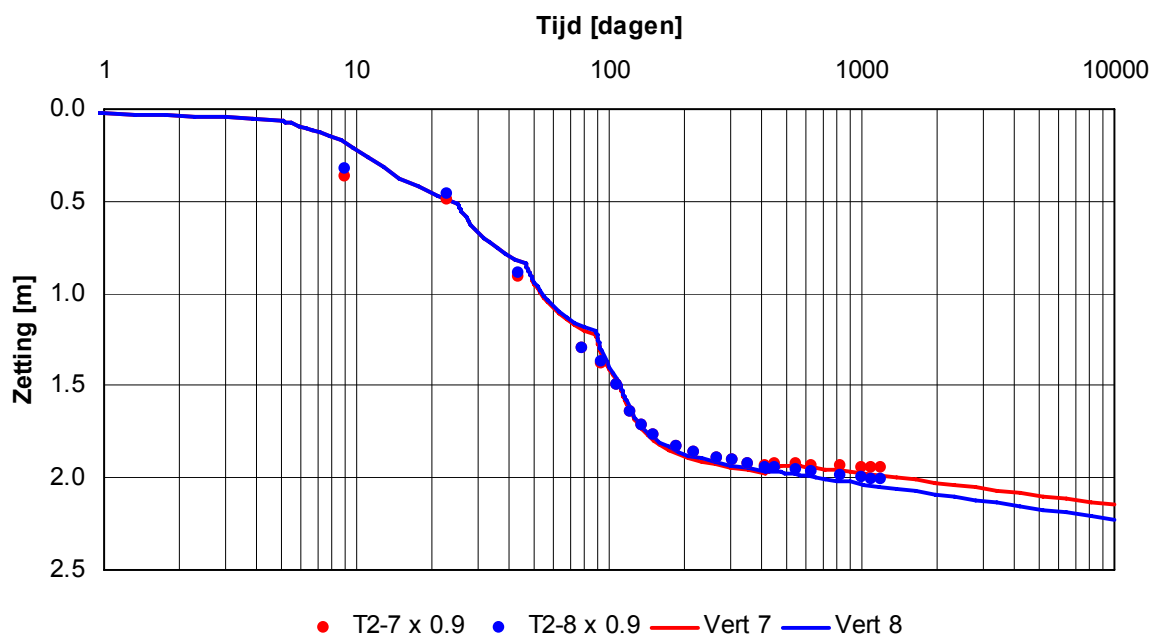


OVERZICHT POSTDICTIES TERP 1 A,B,C-ISOTACHEN

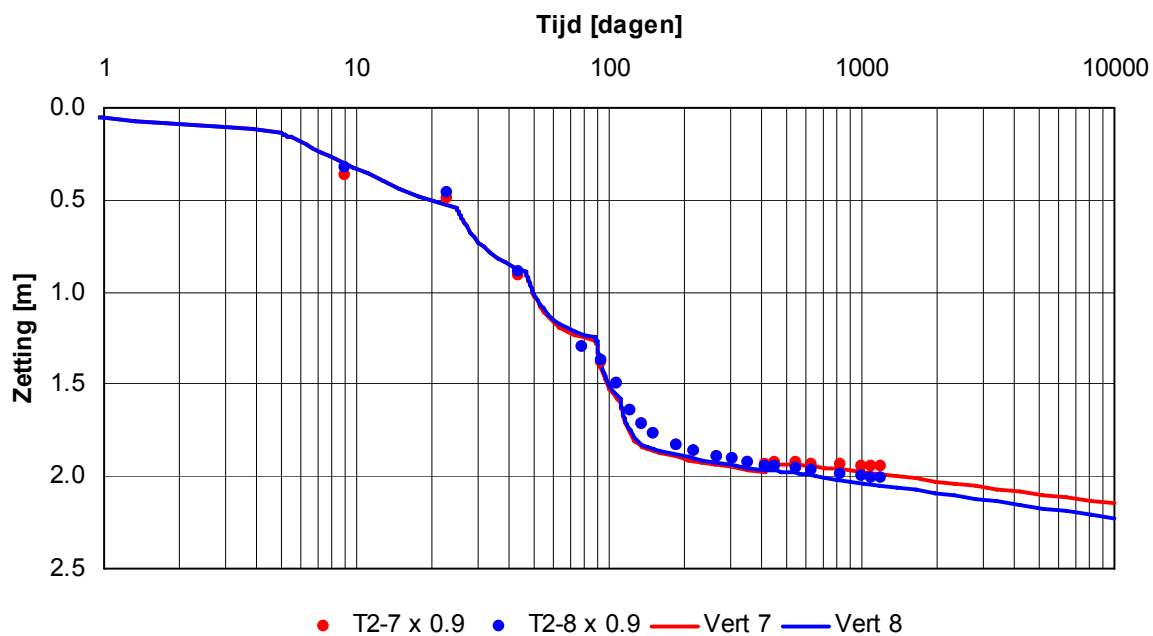
EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 27

Darcy met poriëngetal afhankelijke doorlatendheid



Terzaghi met constante c_v

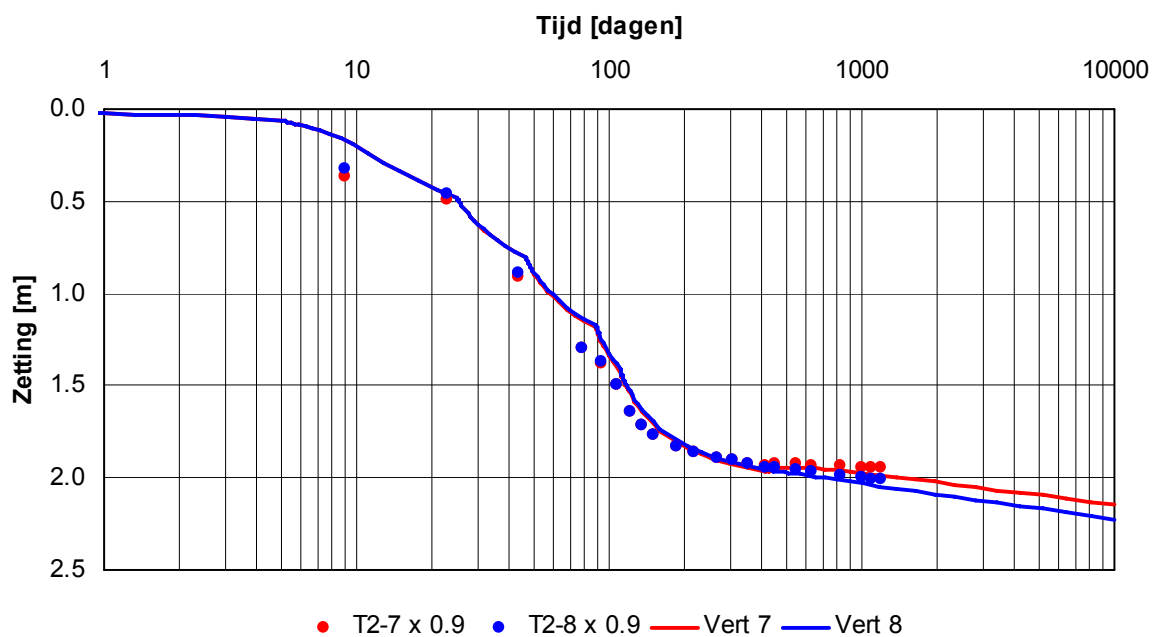


OVERZICHT POSTDICTIES TERP 2 KOPPEJAN

EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 28

Darcy met constante c_v

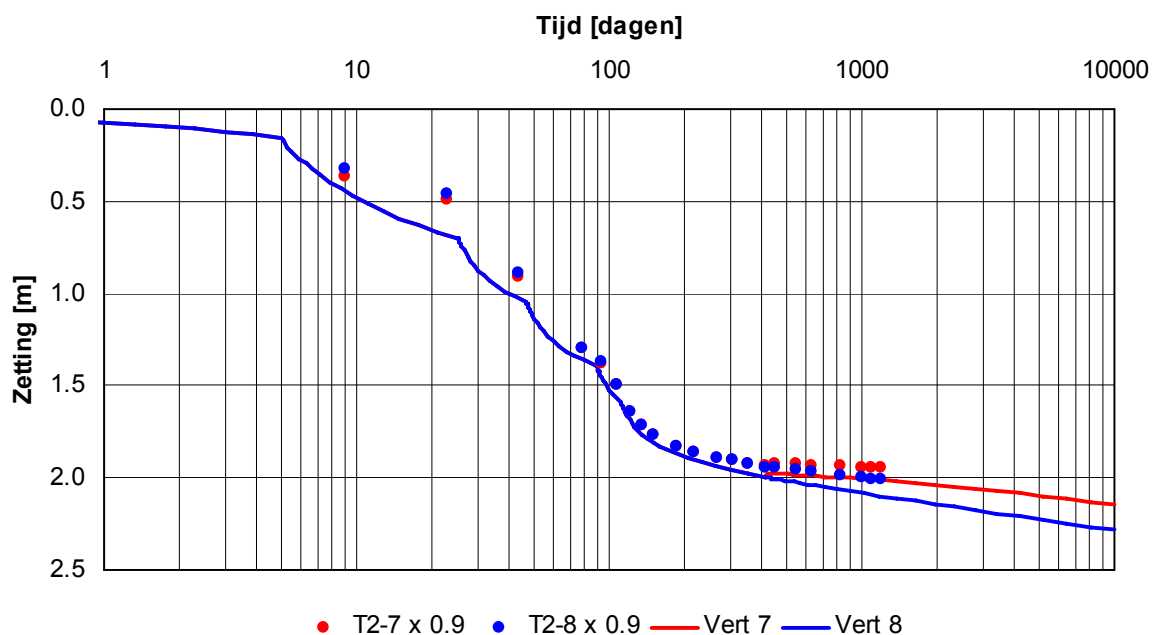


OVERZICHT POSTDICTIES TERP 2 KOPPEJAN

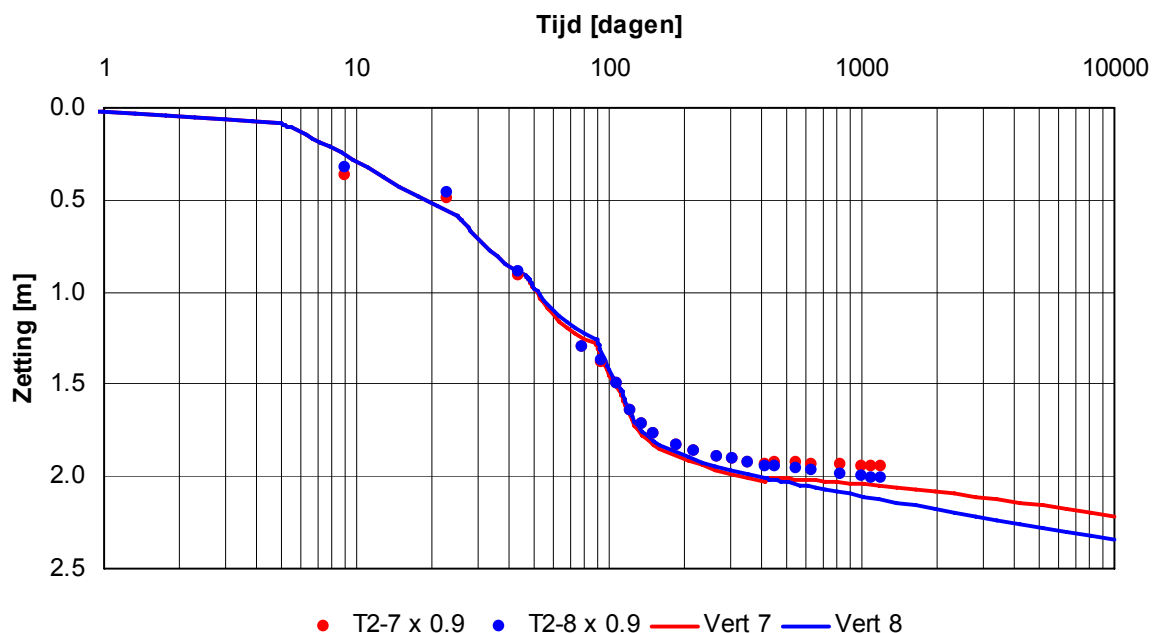
EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 29

Darcy met poriëngetal afhankelijke doorlatendheid



Terzaghi met constante c_v

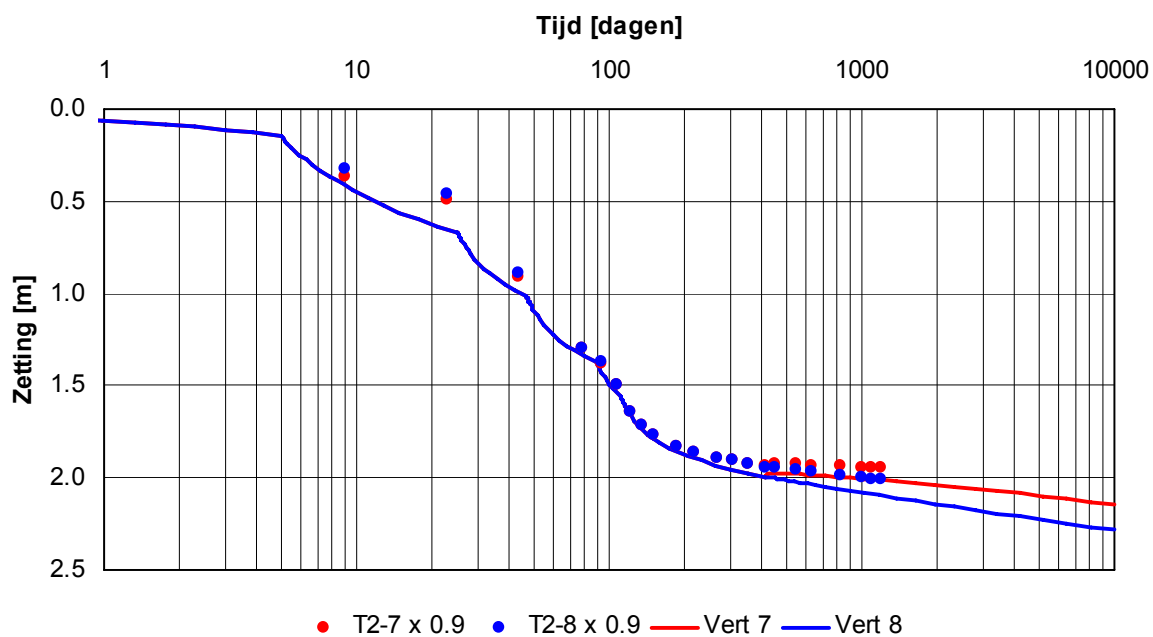


OVERZICHT POSTDICTIES TERP 2 NEN-BJERRUM

EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 30

Darcy met constante c_v

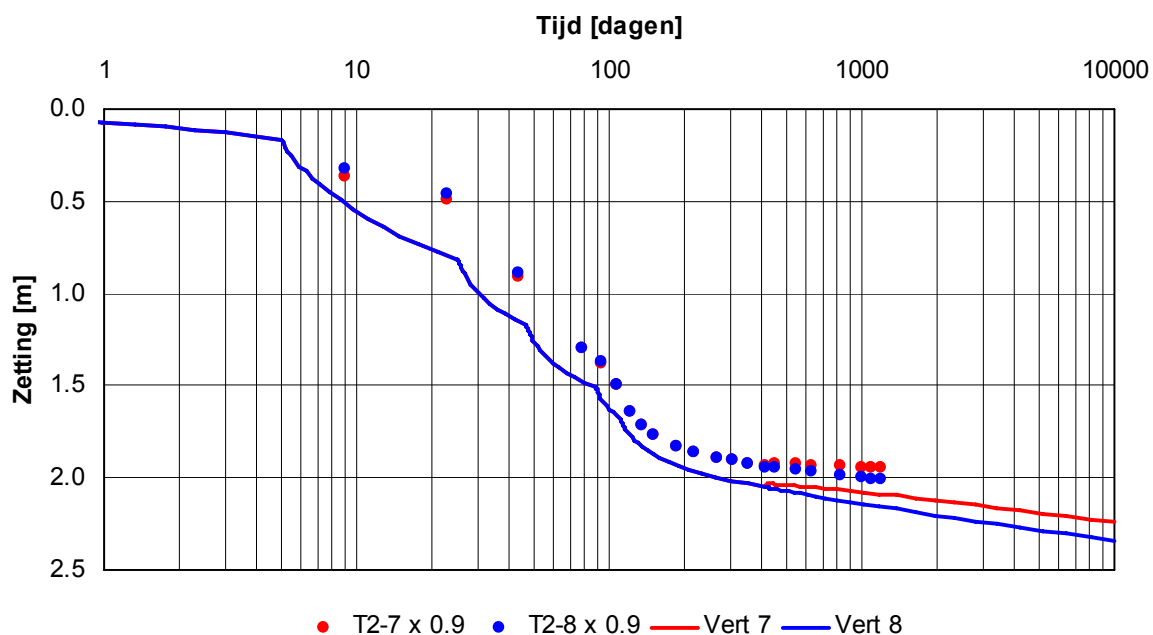


OVERZICHT POSTDICTIES TERP 2 NEN-BJERRUM

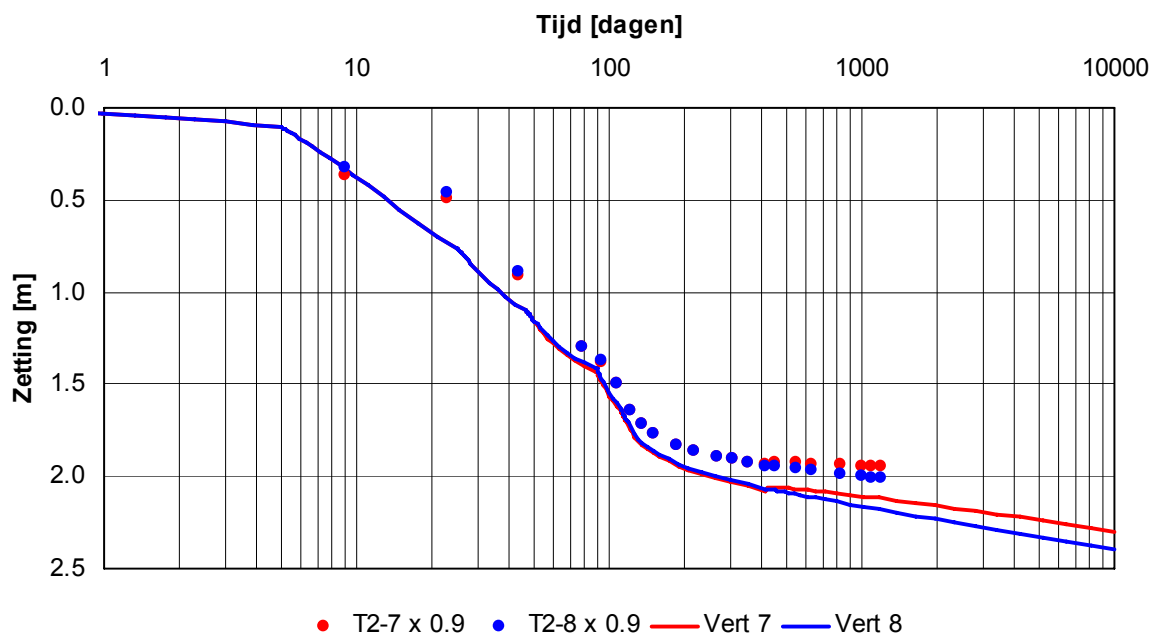
EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 31

Darcy met poriëngetal afhankelijke doorlatendheid



Terzaghi met constante c_v

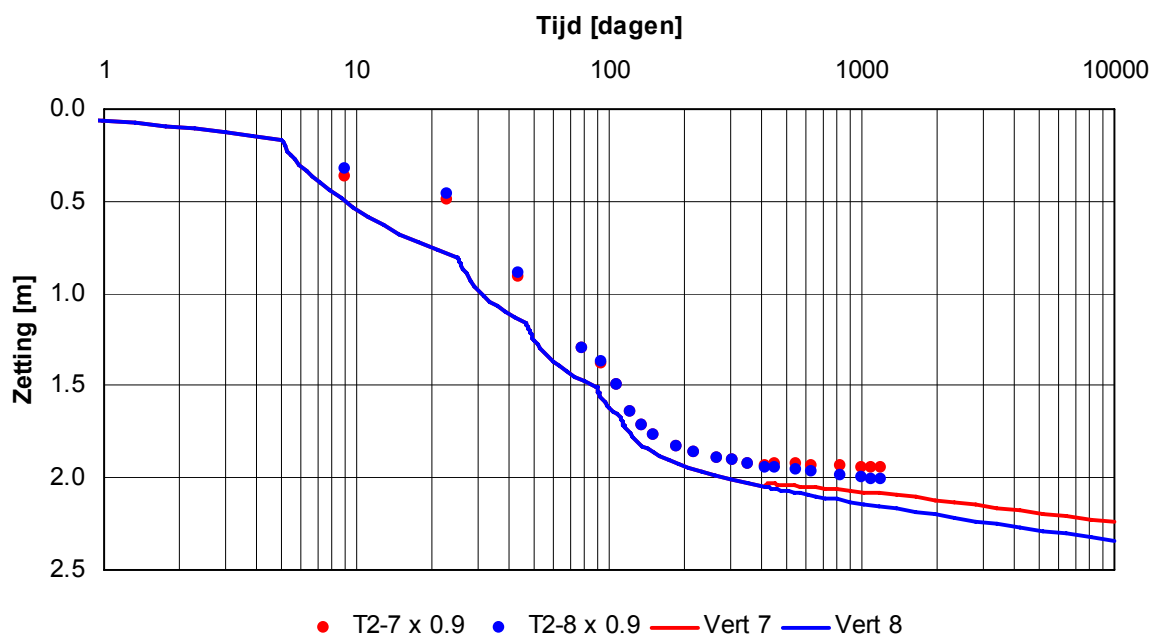


OVERZICHT POSTDICTIES TERP 2 A,B,C-ISOTACHEN

EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 32

Darcy met constante c_v



OVERZICHT POSTDICTIES TERP 2 A,B,C-ISOTACHEN

EVALUATIE ZAKBAAKMETINGEN
 PROEFTERPEN BLOEMENDALERPOLDER

Opdr. : 3009-0261-000
 Bijl. : 33