

| | | | |
|---|--|---|------------------------------|
| Title: | Influence monitoring on reliability of predictions of settlements; Application isotache model | | |
| Invloed monitoring op betrouwbaarheid zettingsprognoses; Toepassing isotachen model report in Dutch | | | |
| Author: | Dr. P. Hölscher | Institute: | GeoDelft |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| Februari 2003 | | | |
| Number of pages | : | 21 | |
| Keywords (3-5) | : | monitoring, consolidation, creep, reliability | |
| DC-Publication-number | : | 01.01.07-07 | |
| Institute Publication-number (optional) | : | 710107.087 | GeoDelft |
| Report Type | : | <input checked="" type="checkbox"/> | Intermediary report or study |
| | : | <input type="checkbox"/> | Final projectreport |
| DUP-publication Type | : | <input checked="" type="checkbox"/> | DUP Standard |
| | : | <input type="checkbox"/> | DUP-Science |

Acknowledgement

This research has been sponsored by the Dutch Government through the ICES-2 programme and the Waardse Alliantie. The research is part of the Research programme of Delft Cluster. We thank the supportgroup for their critical comments.

Conditions of (re-)use of this publication

The full-text of this report may be re-used under the condition of a correct reference to this publication.

Other Research project sponsor(s):

| | | | | | |
|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|
| GeoDelft | TNO bouw | Waardse Alliantie | Bouwdienst Rijkswaterstaat | Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde | project organisatie HSL-zuid |
|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|

Abstract

In this study a method to introduce the results of monitoring of settlements of an embankment into the prediction of residual settlements is elaborated. It shows that such a monitoring reduces the uncertainty in the predictions of residual settlements.

The case studied here is the construction of an embankment for a new railway on soft soil.

The settlements are predicted using the isotache model. In this special case, the uncertainty of the parameters in the model is taken into account. Both the soil parameters and the loading are considered as stochastic variables and described by a mean value and de standard deviation. The residual settlement is calculated by a Monte-Carlo simulation, thus leading to a mean value and standard deviation. A characteristic value can be calculated.

Now the result of the monitoring is introduced. Taking into account a reasonable range around the measured settlement, the settlement on time curves which are in agreement with the measurement can be selected. Using only these curves, the improved prediction of the residual settlements can be made. Also the choice of parameters can be improved by this method.

It turns out that a big gain in certainty can be expected by using this method.

| | | | |
|-------------------|--|-------------------|-----------------|
| PROJECT NAME: | Monitoringsfilosofie Hermes | PROJECT CODE: | 01.01.07 |
| BASEPROJECT NAME: | Measuring, Monitoring and Exploration | BASEPROJECT CODE: | 01.01 |
| THEME NAME: | Soil and Structures | THEME CODE: | 01 |

Executive Summary

In the Delft Cluster project Rational Monitoring HerMes a rational approach for monitoring projects is developed. In order to create rational monitoring a work description is developed. An existing monitoring plan can be judged on its rationality by a checklist. The consequences and applications of this approach are shown in several case-studies. This report describes one case study.

This case study points at the utilisation of the monitoring results during the construction of a heavy embankment for a railroad. The settlements of the sand-embankment is studied. For this embankment the residual settlements must be very limited. During the construction of the embankment the contractor has to decide about the total amount of elevation. The question arises: does monitoring of the settlements help in making this decision.

For one location along a railway line in very soft subsoil the prediction for the settlements is done once again, but now the isotache model is used and the uncertainty in the parameter choice is taken into account by a Monte Carlo simulation. After that the measured settlement is introduced in the calculation. This method shows a significant reduction in the uncertainty of the residual settlements.

The method presented in this report is very practical for introducing the results of monitoring during the construction of a large infrastructure work. It supports decision making during construction and it supports the decision which must be made during the delivery of the embankment.

| | | | |
|--------------------|--|--------------------|-----------------|
| PROJECT NAAM: | Monitoringsfilosofie Hermes | PROJECT CODE: | 01.01.07 |
| BASISPROJECT NAAM: | Measuring, Monitoring and Exploration | BASISPROJECT CODE: | 01.01 |
| THEMA NAAM: | Soil and Structures | THEMA CODE: | 01 |

General Appendix: Delft Cluster Research Programme Information

This publication is a result of the Delft Cluster research-program 1999-2002 (ICES-KIS-II), that consists of 7 research themes:

- ▶ Soil and structures, ▶ Risks due to flooding, ▶ Coast and river , ▶ Urban infrastructure,
- ▶ Subsurface management, ▶ Integrated water resources management, ▶ Knowledge management.

This publication is part of:

| | | | | |
|---------------------------------|---|---------------------------------------|----------|------------|
| Research Theme | : | Soil and structures | | |
| Baseproject name | : | Measuring, Monitoring and Exploration | | |
| Project name | : | Monitoringsfilosofie Hermes | | |
| Projectleader/Institute | | dr. P. Hölscher | GeoDelft | |
| Project number | : | 01.01.07 | | |
| Projectduration | : | 01-03-2000 | - | 31-12-2002 |
| Financial sponsor(s) | : | Delft Cluster | | |
| | | GeoDelft | | |
| | | TNO Bouw | | |
| | | Bouwdienst Rijkswaterstaat | | |
| | | Dienst Weg- en waterbouwkunde | | |
| | | project organisatie HSL-Zuid | | |
| | | Waardse Alliantie | | |
| Projectparticipants | : | GeoDelft | | |
| | | TNO Bouw | | |
| | | | | |
| Total Project-budget | : | €571.000 | | |
| | | | | |
| Number of involved PhD-students | : | 0 | | |
| Number of involved PostDocs | : | 0 | | |

Delft Cluster is an open knowledge network of five Delft-based institutes for long-term fundamental strategic research focussed on the sustainable development of densely populated delta areas.



Keverling Buismanweg 4
Postbus 69
2600 AB Delft
The Netherlands

Tel: +31-15-269 37 93
Fax: +31-15-269 37 99
info@delftcluster.nl
www.delftcluster.nl

Theme Managementteam: Ground and Construction

| Name | Organisation |
|---------------------|---------------------|
| Dr. P. van den Berg | GeoDelft |
| Dr. J. Rots | TNO-Bouw |
| | |

Projectgroep

During the execution of the project the researchteam included:

| Name | Organisation |
|-------------------------|---|
| 1 ir. F. J. Postema | Rijkswaterstaat Bouwdienst |
| 2 drs. B.G.H.M. Wichman | Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde |
| 3 ir. R.J. Aartsen | Projectorganisatie HSL Zuid |
| 4 ir. W.O. Molendijk | Waardse Alliantie |
| 5 dr. ir. P. Hölscher | GeoDelft |
| 6 ir. G.H. Wijnants | TNO Bouw |

Other Involved personnel

The realisation of this report involved:

| Name | Organisation |
|-----------------------------|---------------------|
| 1 ing. F.P.W. van den Berg | GeoDelft |
| 2 dr.ir. P. Hölscher | GeoDelft |
| 3 ir. W.O. Molendijk | GeoDelft |
| 4 dr. ir. J.B. Sellmeijer | GeoDelft |
| 5 ing. E.D.G. van Zantvoort | GeoDelft |
| | |

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Inleiding | 1 |
| 1.1 | Het project rationele monitoringfilosofie HerMes | 1 |
| 1.2 | Positie van dit project binnen het HerMes project | 1 |
| 1.3 | Uitwerking van de case in dit rapport | 2 |
| 2 | Uitwerking case studie | 3 |
| 2.1 | Algemeen | 3 |
| 2.2 | Parameter keuze | 3 |
| 2.2.1 | Algemeen | 3 |
| 2.2.2 | Belasting | 3 |
| 2.2.3 | Bodemprofiel | 5 |
| 2.2.4 | Bodemparemeters | 6 |
| 3 | Monte Carlo simulatie | 9 |
| 3.1 | Implementatie isotachen model in spreadsheet | 9 |
| 3.2 | Interpretatie berekeningsresultaten | 9 |
| 4 | De prognose met de monitoringsgegevens | 13 |
| 4.1 | Algemeen | 13 |
| 4.2 | Meetgegevens | 13 |
| 4.3 | Resultaten voor de restzetting | 15 |
| 4.4 | Resultaten voor parameters | 15 |
| 5 | Conclusies en aanbevelingen | 17 |
| 5.1 | Conclusies met betrekking tot de zakkingsproblematiek | 17 |
| 5.2 | Conclusies met betrekking tot de rationele monitoringfilosofie HerMes | 17 |
| | Bijlage 1 Bepaling consolidatie coëfficiënt | |
| | Bijlage 2 Uitwerking van het isotachenmodel | |

1 Inleiding

1.1 Het project rationele monitoringfilosofie HerMes

Monitoring van processen in de tijd is een voor de hand liggende manier om de betrouwbaarheid van de prognoses met een model te verhogen. Toch blijkt het vaak moeilijk om de resultaten van waarnemingen daadwerkelijk in verbeteringen van de modelprognose te vertalen.

In dit kader is binnen het Delft Cluster de ontwikkeling van een monitoringonderzoek gestart. Dit onderzoek heeft geleid tot een theoretische uitwerking: de monitoringfilosofie HerMes [Koelewijn, 2000].

De theoretische uitwerking moet aan de praktijk getoetst worden. De betrokken Delft Cluster partners hebben dit elk op hun eigen specialistische werkterrein uitgewerkt: TNO bouw op het gedrag en de duurzaamheid van betonconstructies, GeoDelft op de sterkte van waterkeringen en de zettingen van aardebaanlichamen en gemeenschappelijk op de zettingen tijdens het boren van een grote diameter tunnel.

1.2 Positie van dit project binnen het HerMes project

Een rationeel monitoringsproject verloopt in een aantal projectfasen: initiatie, voorontwerp, ontwerp, realisatie, gebruik en ontmanteling. Dit rapport richt zich op een specifiek aspect in de gebruiksfase. In de gebruiksfase van het monitoringsproject worden regelmatig monitoringsgegevens verzameld en beoordeeld, zoals in het monitoringsplan beschreven is. Afhankelijk van de monitoringsresultaten wordt over noodzakelijke acties besloten.

In dit rapport wordt het aspect restzettingen van een baanlichaam in de vorm van een case studie uitgewerkt. Voor de Betuweroute is een aardebaanlichaam nodig. Het hiervoor benodigde zand moet in korte tijd aangebracht worden, terwijl er strenge restzettingseisen gelden.

De restzettingen van zo'n zwaar baanlichaam kunnen tijdens de bouwfase goed beïnvloed worden, terwijl na oplevering slechts beïnvloeding mogelijk is tegen hoge kosten. Daarom wordt bij de aanleg van de Betuweroute de actuele zetting van het baanlichaam gemonitord. Als op basis van de monitoringsgegevens van de actuele zetting geconcludeerd moet worden dat de restzetting naar verwachting groter zal zijn dan de geëiste restzetting, dan moet in een zo vroeg mogelijk stadium van het project actie ondernomen worden.

Hierbij treedt de volgende complicatie op: de restzetting is pas na lange tijd enigszins betrouwbaar te voorspellen. De vraag die in dit rapport beschouwd wordt luidt hoe met behulp van monitoring de betrouwbaarheid van de voorspelling van de restzettingen vergroot kan worden.

1.3 Uitwerking van de case in dit rapport

In dit rapport wordt eerst de beschikbare informatie van de bodem en de bijbehorende parameters uitgewerkt (hoofdstuk 2). Voor deze case wordt een Monte Carlo simulatie uitgevoerd. Deze leidt tot een kansverdeling op zettingen die in hoofdstuk 3 uitgewerkt wordt. Daarna wordt op basis van de monitoring een beperkt aantal mogelijkheden geselecteerd, zie hoofdstuk 4. Daarmee kan aangegeven worden of het mogelijk is op basis van monitoring van het zettingsverloop in de beginfase van de consolidatie, nauwkeurigere uitspraken te doen over de verwachte restzettingen.

Aan de uitwerking van dit rapport ligt de aanname ten grondslag dat het gebruikte model in staat is het fysische fenomeen correct te beschrijven. Dit moet gebleken zijn uit eerdere validatie studies.

Daarnaast moet de doelstelling van de monitoring voor de aannemer van het project beschouwd worden. Tijdens de oplevering moet de aannemer aannemelijk maken dat de zakkings in de toekomst gaan voldoen aan de gestelde eisen. Met welke methode en welke betrouwbaarheid dit moet gebeuren behoort in het contract vastgelegd te zijn, maar is voor deze studie niet essentieel.

2 Uitwerking case studie

2.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt de opzet van de simulatie uitgewerkt door aan alle parameters in het model een waarde en een betrouwbaarheid toe te kennen.

2.2 Parameter keuze

2.2.1 Algemeen

De case studie is uitgevoerd voor de locatie km 16.7 van het traject Sliedrecht Gorinchem van de Betuweroute. Voor deze locatie is voldoende grondonderzoek verricht en zijn voldoende monitoringsgegevens vlakbij de locatie van het grondonderzoek voor handen. De Betuweroute loopt hier door maagdelijk terrein.

De parameters worden zoveel mogelijk bepaald uit de bestaande modellering en metingen. Voor de probabilistische beschouwing is het noodzakelijk ook een standaardafwijking te schatten. Hiervoor wordt enerzijds gekeken naar proefresultaten, en anderzijds naar de kennis hierover bij experts.

Voor een normale verdeling wordt daarbij een bovengrens die opgegeven wordt beschouwd als een 95% bovengrens, zodat deze in 1 op de 20 gevallen overschreden wordt. Bij een normale verdeling volgt dan voor de standaardafwijking dat deze gelijk is aan 1/1.64 maal het verschil tussen de bovengrens en het gemiddelde. In dit geval is ook een ondergrens bruikbaar.

Voor een lognormale verdeling wordt uitgegaan van het gemiddelde en de ondergrens van de parameter, dat wil zeggen: de waarde die nooit overschreden zal worden.

2.2.2 Belasting

De bouw is begonnen met het verwijderen van de bovenste 42 cm van de topklaag. Verondersteld wordt dat gelijktijdig de eerste ophoging aangebracht is. Daarna is het baanlichaam in 5 ophoogslagen aangebracht. Ruim een jaar later, wordt volgens de planning de overhoogte verwijderd en wordt het spoor en de ballast aangebracht.

Tabel 2.1 geeft een overzicht van de belastingen in de tijd.

| datum | aantal dagen | activiteit | ophoging [m] |
|--------------|--------------|--|--------------|
| 9 jun 2000 | 0 | verwijderen toplaag, eerste ophoging | 1.29 |
| 2 aug 2000 | 54 | plaatsen zakbaak | |
| 24 sep 2000 | 107 | tweede ophoging | 1.03 |
| 10 jan 2001 | 215 | derde ophoging | 1.04 |
| 20 mrt 2001 | 284 | vierde ophoging | 0.87 |
| 23 jul 2001 | 409 | vijfde ophoging | 0.69 |
| (1 sep 2002) | | verwijderen overhoogte en aanbrengen ballast | |

Tabel 2.1 Werkvolgorde ophoging

Deze werkwijze in het veld moet omgezet worden in een belasting voor de berekening. Hierbij treedt als complicatie op dat bij de berekeningen voor dit project (in een spreadsheet) geen rekening gehouden kan worden met het onderwaterzakken van het ophoogzand. Dit aspect is als volgt verwerkt: uitgaande van de bestaande Msettle berekening is bekend hoeveel zand er naar verwachting onderwater zakt. Dit wordt per belastingsstap en ook tijdens de consolidatie als gelijktijdige ontlasting in de berekening ingevoerd. Het feit dat deze berekening niet exact is wordt als extra onzekerheid in de belasting ingevoerd.

De standaardafwijking van de belasting voor het ‘onderwaterzakken’ is bepaald uit de aanname dat de zettingsprognose, die voor het bepalen van de belasting door onderwaterzakken gebruikt is, een afwijking van maximaal 30% heeft. Dat betekent dat 130% van de berekende waarde overeenkomt met de bovengrens van het éézijdige 95% betrouwbaarheidsinterval. Dit geeft een variatiecoëfficiënt (standaardafwijking/gemiddelde) van $0.3/1.64 = 0.18$.

Bij het aanbrengen van het zandlichaam wordt altijd een zekere overhoogte aangebracht, om er zeker van te zijn dat er in een later stadium geen extra belasting meer aangebracht hoeft te worden om de vereiste ophoging te halen. Voor de overhoogte tot het moment van aanbrengen ballast wordt *maximaal* 0.50 m aangehouden. Dit getal gaat ervan uit dat later extra belasting zeer onwenselijk is, dus het kan geïnterpreteerd worden als gemiddeld 0.25 m met een 95% bovengrens van 0.50. De bijbehorende standaardafwijking is dan 0.15 m.

De standaardafwijking is bepaald voor het belastingsincrement. Dit is wenselijk, omdat de onzekerheid in de voorgaande stappen eenmaal getrokken in de Monte Carlo simulatie voor de resterende tijd constant moet zijn.

Deze aanpak levert voor de belastingen de waarden volgen Tabel 2.2 op. De tijdstippen tot een jaar zijn gekozen op basis van de werkelijk uitgevoerde ophoogslagen, deze kunnen bepaald worden uit de zakbaakaflezings: er is een snelle stijging van de zettingen direct na de ophoogslag. De tijdstippen later zijn gebaseerd op de contractplanningen van de Waardse Alliantie:

- de recente zakbaak aflezings: 29 nov 2001 en 10 mrt 2002
- start afwerken baan 1 sep 2002
- de oplevering 11 nov 2003
- de zetting 1, 3, 10 en 30 jaar na oplevering.

| datum | dagnummer | geschatte increment van de belasting | standaardafwijking in belasting increment |
|-------------|-----------|---|--|
| | [-] | [kPa] | [kPa] |
| 9 jun 2000 | 0 | 7.10 | 1.09 |
| 2 aug 2000 | 54 | -2.08 | 0.37 |
| 24 sep 2000 | 107 | 15.18 | 1.53 |
| 10 jan 2001 | 215 | 12.80 | 2.00 |
| 20 mrt 2001 | 284 | 11.02 | 1.62 |
| 23 jul 2001 | 409 | 9.86 | 1.08 |
| 29 nov 2001 | 538 | -1.20 | 0.22 |
| 10 mrt 2002 | 639 | -0.48 | 0.09 |
| 1 sep 2002 | 813 | -0.40 | 2.77 |
| 11 nov 2003 | 1250 | -0.40 | 0.07 |
| 11 nov 2004 | 1615 | -0.24 | 0.04 |
| 11 nov 2006 | 2345 | -0.40 | 0.07 |
| 11 nov 2013 | 4900 | -0.64 | 0.12 |
| nov 2033 | 12200 | -1.20 | 0.22 |

Tabel 2.2 Definitie belasting op bodem

2.2.3 Bodemprofiel

Het bodemprofiel is ontleent aan eerder onderzoek uitgevoerd onder CO-710402. Voor deze studie zijn een aantal aannames gedaan om het gebruikte profiel zo realistisch mogelijk te houden.

1. De toplaag (klei van Tiel) wordt vrijwel geheel afgegraven (ten behoeve van het opzetten van perskades). De resterende 9 cm klei is verder niet in de beschouwing betrokken en opgevat als zand.
2. De laag Hollandveen en Gorkum licht heeft gezamenlijk een redelijk constante dikte (op basis van grondonderzoek in de omgeving). Deze is gekozen op 6.43 m met een bovengrens van ongeveer 7 m. Dit geeft voor de standaardafwijking van de ligging van de laagscheiding 0.36 m.
3. De laagscheiding Hollandveen en Gorkum licht is veel minder zeker. Hier komen wel afwijkingen van 1 m voor. Dit geeft voor de ligging van deze laagscheiding een gemiddelde van 5.14 m en een standaardafwijking van $1/1.64 = 0.61$ m. Echter, uit praktische overwegingen is de dikte van het Gorkum licht in de berekening als stochast opgevat.
4. In de Hollandveen laag is in het oorspronkelijke lagen model uitgegaan van 3 sub-lagen. Deze drie sub-lagen hebben in principe wel dezelfde eigenschappen, maar de actuele waarden worden als ongecorreleerd getrokken. Er worden drie lagen gemaakt om diepte afhankelijke parameters te verdisconteren. Om de parameters die niet diepte afhankelijk zijn de juiste standaardafwijking te geven moet deze vermenigvuldigd worden met de wortel uit het aantal lagen, in dit geval $\sqrt{3} = 1.73$.

5. Voor het basisveen geldt dezelfde overweging. Daarom is deze laag als enkele laag ingevoerd. De dikte is bepaald op 0.46 m. Deze dikte is vrij zeker, de standaardafwijking is eenvoudigheidshalve op 0.10 m gesteld.
6. De laag van Kreftenheye is gesteld op 0.75 m met een standaardafwijking van $0.25/1.64 = 0.15$ m.

De volgende trekkingsprocedure wordt toegepast:

1. de dikte van het totale pakket Hollandveen en Gorkum licht wordt bepaald
2. de dikte van Gorkum licht wordt bepaald
3. de dikte van het basisveen wordt bepaald
4. de dikte van Kreftenheye wordt bepaald.

Voor de laagdiktes in het profiel leidt dit tot de waarden in

| laagnaam | stochast | verdeling | gemiddeld [m] | standaardafwijking [m] |
|-----------------------------|--------------|------------|---------------|------------------------|
| Hollandveen en Gorkum licht | totale dikte | normaal | 6.43 | 0.36 |
| Gorkum licht | dikte | lognormaal | 1.29 | 0.20 (*) |
| Basisveen | dikte | normaal | 0.46 | 0.10 |
| Kreftenheye | dikte | normaal | 0.75 | 0.15 |

Tabel 2.3 Bodemprofiel

(*) dit is de ondergrens van de lognormale verdeling

De Hollandveenlaag wordt nog in drie sub-lagen gedeeld. De diktes van deze drie sub-lagen zijn (van boven naar onder: 25%, 35% en 40% van de totale laag. Deze relatieve diktes worden opgevat als stochasten met een relatief kleine afwijking van 1.5% voor de eerste en 2.1% voor de tweede sub-laag. De dikte van de derde sub-laag volgt uit het feit dat de totale dikte al bekend is.

2.2.4 Bodemparameters

Tenslotte moeten de modelparameters (materiaalparameters) voor elke laag bepaald worden. Het betreft de volgende parameters:

- volumieke gewicht (γ)
- a-coëfficiënt isotachenmodel
- b-coëfficiënt isotachenmodel
- c-coëfficiënt isotachenmodel
- pre-overburden pressure (POP)
- consolidatiecoëfficiënt (c_v)

Het volumieke gewicht is op basis van monsters in het laboratorium bepaald. Ervaring leert dat hier meestal geen afwijkingen van meer dan 10% voorkomen, wat resulteert in een variantiecoëfficiënt van $0.10/1.64 = 0.061$.

De volgende vier modelparameters (de coëfficiënten a, b en c en de POP) worden bepaald uit laboratorium proeven. Er zijn proeven voor twee locaties (11.7 km en 16.7 km) beschikbaar. De standaardafwijking wordt beïnvloed door enerzijds de ruimtelijke spreiding en anderzijds de meetresultaten in het laboratorium. Deze metingen zijn in dit geval zonder onderscheid naar afkomst verwerkt. Als de standaardafwijking onder de 6% komt, wordt deze opgehoogd naar 6%. De bepaalde afwijkingen lijken voldoende klein om zonder problemen de verdeling als normaal op te vatten. Voor de POP van het basisveen is de standaardafwijking op 6% gesteld, omdat de bewerking van de twee metingen een onwaarschijnlijk kleine standaardafwijking opleverde. Voor de parameters van de laag van Kreftenheye is voor de standaardafwijking 6% aangehouden

Tenslotte de consolidatie coëfficiënt. Deze is op basis van de laboratoriumproeven via linearisatie (zie bijlage 1) bepaald en hangt nauw samen met de doorlatendheid. De doorlatendheid is echter aan grote onzekerheid onderhevig. Daarom wordt hiervoor een log-normale verdeling gekozen met als ondergrens 1/10 van het gemiddelde.

De resultaten van deze beschouwingen worden in twee tabellen weergegeven:

- één voor de gekozen gemiddelde waarden, zie tabel 2.4
- één voor de gekozen standaardafwijkingen, zie tabel 2.5
- de variatiecoëfficiënten zijn gegeven in Tabel 2.6

| laag | Vol. gew. [kN/m ³] | a-coef. | b-coef. | c-coef. | POP [kN/m ²] | c _v [m ² /s] |
|----------|-----------------------------------|---------|---------|---------|-----------------------------|---------------------------------------|
| H. veen | 10.4 | 0.033 | 0.295 | 0.023 | 9.47 | 2.4E-7 |
| | | | | | | 4.4E-7 |
| | | | | | | 5.3E-7 |
| Gorkum I | 12.4 | 0.024 | 0.237 | 0.016 | 6.78 | 3.5E-8 |
| Basisv. | 10.6 | 0.035 | 0.311 | 0.032 | 55.3 | 7.5E-7 |
| Kreften. | 18.5 | 0.0035 | 0.069 | 0.0033 | 12.6 | 2.5E-7 |

Tabel 2.4 Gemiddelde waarden modelparameters

| laag | Vol. gew. [kN/m ³] | a-coef. | b-coef. | c-coef. | POP [kN/m ²] | c _v [m ² /s] |
|-----------|-----------------------------------|---------|---------|---------|-----------------------------|---------------------------------------|
| verdeling | Normaal | normaal | normaal | normaal | normaal | lognorm |
| H. veen | 0.63 | 0.0060 | 0.0177 | 0.0020 | 1.61 | 0.24E-7 |
| | | | | | | 0.44E-7 |
| | | | | | | 0.53E-7 |
| Gorkum I | 0.76 | 0.0020 | 0.0160 | 0.0020 | 0.91 | 0.35E-8 |
| Basisv. | 0.65 | 0.0021 | 0.0187 | 0.0050 | 3.32 | 0.75E-7 |
| Kreften. | 1.13 | 0.0002 | 0.0041 | 0.0002 | 0.76 | 0.25E-7 |

Tabel 2.5 Standaardafwijking modelparameters (voor normale verdeling) en ondergrens (voor lognormale verdeling)

Voor de Hollandveenlaag moet de correctie voor de onderverdeling in de lagen nog aangebracht worden

| laag | Vol. gew. | a-coef. | b-coef. | c-coef. | POP | cv |
|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| verdeling | Normaal | normaal | normaal | normaal | normaal | lognorm |
| H. veen | 6.1% | 18.2% | 6.0% | 8.7% | 17.0% | 10.0% |
| | | | | | | 10.0% |
| | | | | | | 10.0% |
| Gorkum I | 6.1% | 8.3% | 6.8% | 12.5% | 13.4% | 10.0% |
| Basisv. | 6.1% | 6.0% | 6.0% | 15.6% | 6.0% | 10.0% |
| Kreften. | 6.1% | 5.7% | 5.9% | 6.1% | 6.0% | 10.0% |

Tabel 2.6 Variatie coëfficiënten voor modelparameters

3 Monte Carlo simulatie

3.1 Implementatie isotachen model in spreadsheet

Omdat er momenteel nog geen versie van Msettle is waarmee de hier noodzakelijke berekeningen gemaakt kunnen worden, is een vereenvoudigde versie van het isotachen model in een spreadsheet geïmplementeerd.

Hiertoe zijn wat beperkingen ten opzichte van het volledige model ingevoerd. Hierbij wordt verondersteld dat de consolidatie vooral in het begin na de belastingsstap optreedt en dat de kruip pas relevant wordt als de consolidatie vrijwel afgelopen is. Dit model is door dr. ir. Sellmeijer in Bijlage 2 theoretisch uitgewerkt. Het is door ing. E.D.G. van Zantvoort in een set van Excel worksheets geïmplementeerd.

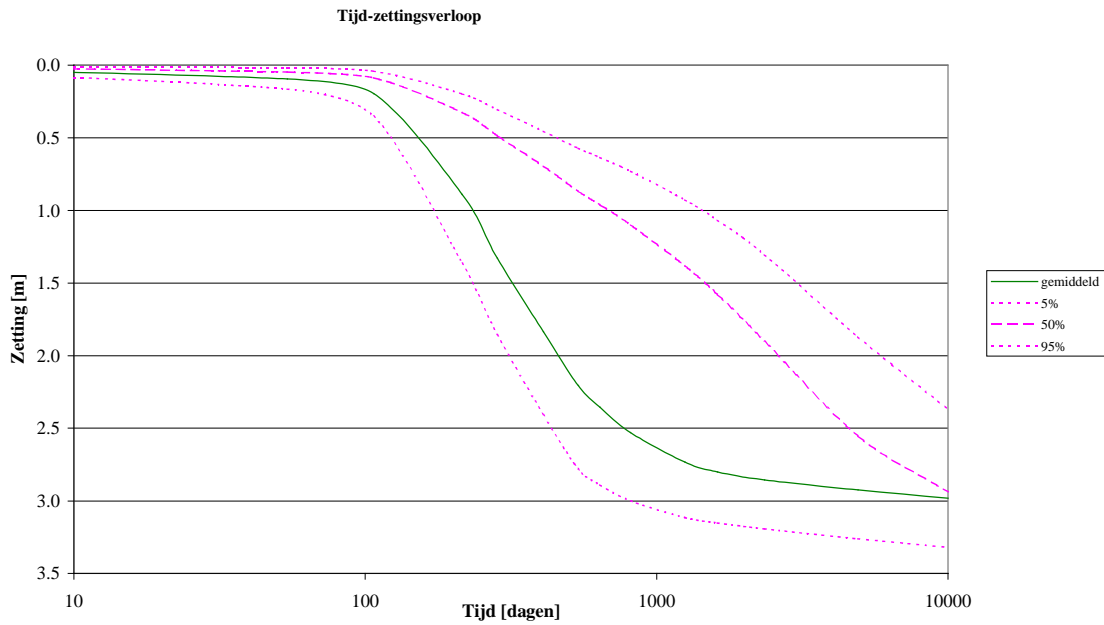
Bij de implementatie is het begin van de consolidatie voor alle belastingsstappen gekozen op het tijdstip $t = 0$. Correcte implementatie van het begin van consolidatie is binnen het kader van spreadsheets niet haalbaar

De Monte Carlo simulatie is uitgevoerd door 10000 parametersets te bepalen. Voor elke parameterset is een zakkingslijn als functie van de tijd bepaald voor de tijdstippen die in Tabel 2.2 genoemd zijn.

De berekeningen in het spreadsheet zijn voor enkele bijzondere situaties vergeleken met de resultaten van Msettle-sommen en deze bleken goed overeen te komen.

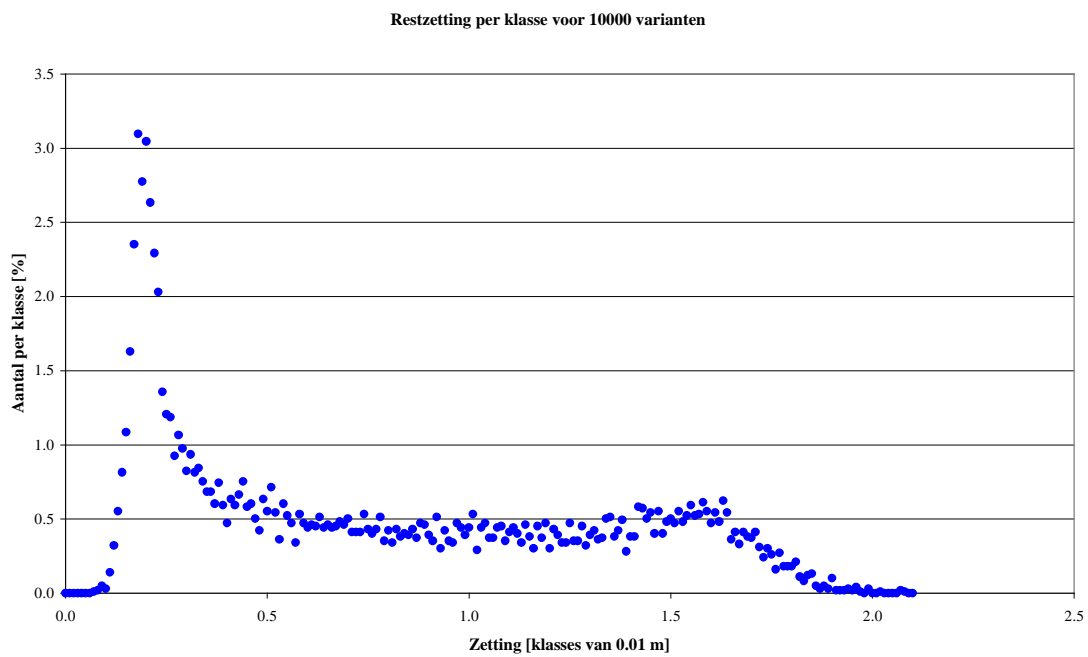
3.2 Interpretatie berekeningsresultaten

Figuur 3.1 geeft de zetting het gemiddelde, de mediaan en de 5% onder en bovengrens, steeds op een tijdstip berekend over de bijna 10000 simulaties. Wat opvalt is het grote verschil tussen de gemiddelde en mediane zakking en de grote spreiding in zakking tussen 1000 en 10000 dagen.



Figuur 3.1 Gemiddelde zakking in de tijd met boven- en ondergrens (de datum van een dagnummer is vermeld in Tabel 2.2)

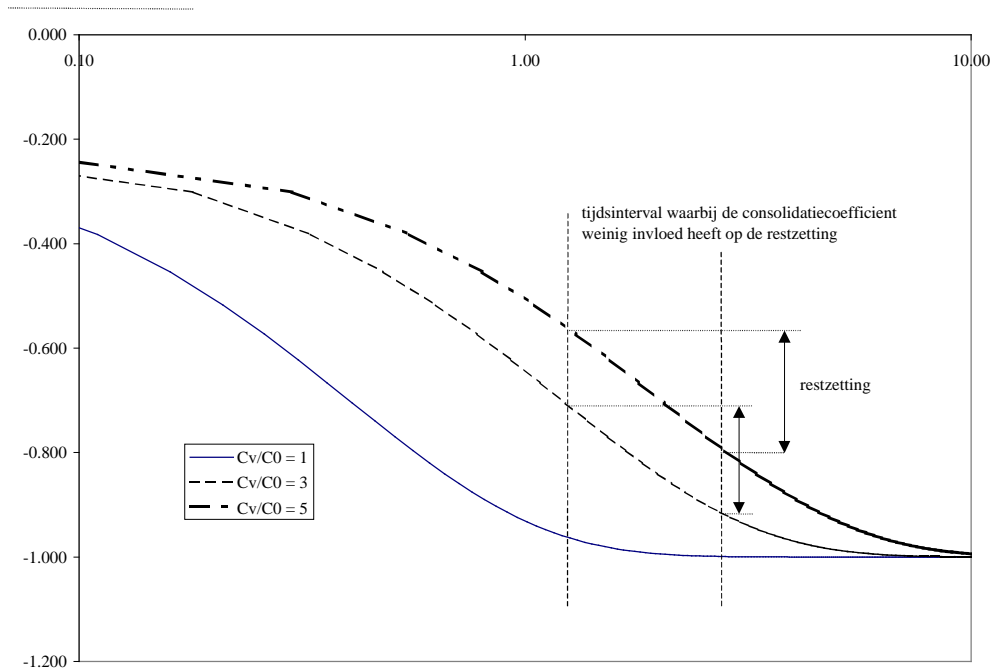
Op basis van de 10000 berekeningen kan een histogram getekend worden, zie Figuur 3.2. Dit histogram geeft de frequentieverdeling van de restzettingen van af het tijdstip van oplevering tot 30 jaar na aanvang van de bouw.



Figuur 3.2 Histogram voor de restzetting van alle 10000 curven

De verdeling blijkt erg scheef te zijn met een eerste piek bij restzetting 0.2 m en een tweede piek bij restzetting 1.6 m. Deze vreemde verdeling is nader geanalyseerd en blijkt de volgende fysische achtergrond te hebben. Figuur 3.3 licht dit nog enigszins toe. Bij de gemiddelde

consolidatie-coëfficiënt treedt een restzetting van gemiddeld 0.2 m op. Deze restzetting wordt vooral bepaald door de kruip in de grond. Bij de gegeven parameters veroorzaakt de kruip altijd een zetting die groter is dan 0.08 à 0.10 m. Echter, voor een kleinere waarde van de consolidatie-coëfficiënt treedt er in het beschouwde tijdsinterval wel meer consolidatie op. In een bepaald interval is de restzetting nagenoeg onafhankelijk van de consolidatie-coëfficiënt. Hierdoor neemt in die klasse het aantal gevonden berekeningsresultaten toe.



Figuur 3.3 Restzetting onafhankelijk van consolidatie coëfficiënt

Het blijkt dat de spreiding in de consolidatiecoëfficiënt de kans op een overschrijding van de geëiste restzetting (0.30 m) erg groot maakt. Op basis van de oppervlakken onder de lijn in het histogram is deze kans 70%.

4 De prognose met de monitoringsgegevens

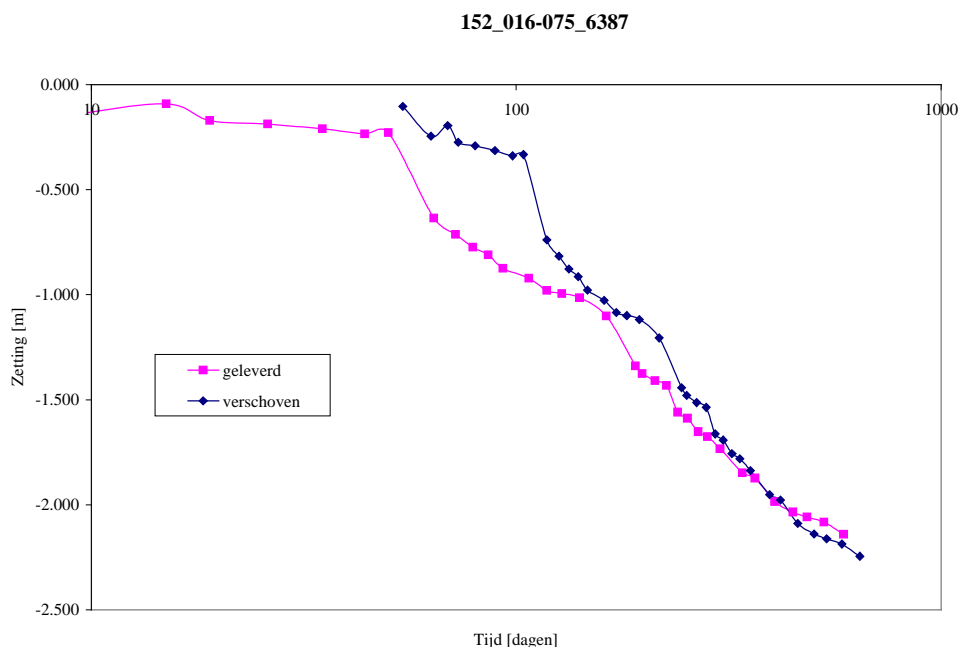
4.1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt nagegaan of de prognose van de restzetting nauwkeuriger kan worden door de monitoringgegevens van de zettingen in de beschouwing te betrekken. De vraag is langs welke stappen een betrouwbaarder eindresultaat gerealiseerd kan worden, rekening houdend met onzekerheden in de meting en de voorspelling.

4.2 Meetgegevens

Er wordt gebruik gemaakt van meting 152_016-075_6387, die geleverd is door de Waardse Alliantie. Deze meting moet aangepast worden aan de tijd-as, die in de berekening gebruikt is. Er moet rekening gehouden worden met het feit dat de monitoring pas 54 dagen na aanvang van de werkzaamheden begonnen is. Op dat moment is er al enige zakking geweest. Deze is bepaald uit de gemiddelde zakking na 54 dagen uit de spreadsheet berekeningen. Dit is een bron van onzekerheid, die overigens door eerdere start van de monitoring beperkt kan worden. In formele zin moet deze waarde als schatting van de gemiddelde zakking opgevat worden en zou de standaardafwijking hiervan in de beschouwing betrokken moeten worden. Dit is niet gebeurd, om de gevolgde aanpak overzichtelijk te houden. Verwacht wordt dat deze late start de betrouwbaarheid van de restzetting (in negatieve zin) sterk kan beïnvloeden.

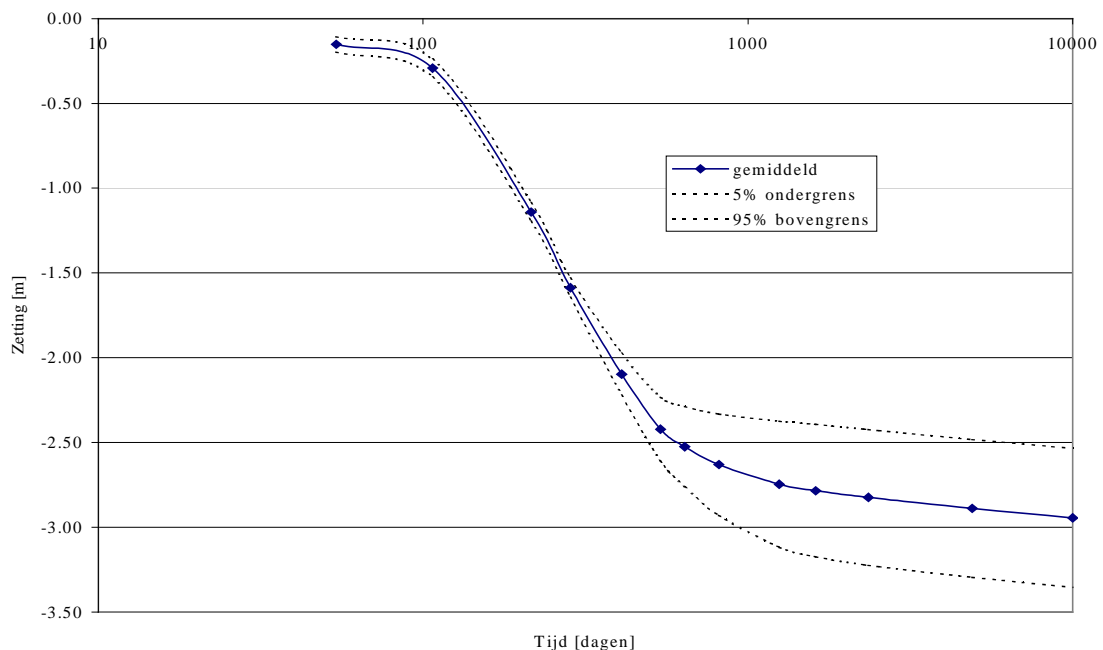
De in dit geval gebruikte meting staat in Figuur 4.1 vermeld als ‘vershoven’.



Figuur 4.1 Resultaten monitoring

Verder is de betrouwbaarheid van de meting nodig. Er zijn verschillende bronnen van onzekerheid. Hierbij valt te denken aan een standaard meetfout en de verschuiving door de latere start van de monitoring. Aangenomen is dat een berekende curve die voor de beschikbare meetpunten minder dan 0.10 m afwijkt, voldoet aan de meting. Hierbij wordt opgemerkt dat deze keuze invloed heeft op de uiteindelijk bepaalde betrouwbaarheid. De gekozen betrouwbaarheid van de meting heeft tot gevolg dat 83 van de bijna 10000 berekende curven nog aan de meting voldoen. Het gemiddelde en het 90% betrouwbaarheidsinterval van deze 83 curven zijn getoond in Figuur 4.2.

Deze figuur toont duidelijk dat de lijnen tot ongeveer 300 dagen in een nauw gebied lopen. Daarna waaieren deze lijnen uit. Opvallend is dat de lijnen na ongeveer 3000 dagen evenwijdig lopen. Dit is periode van de kruip, zoals in paragraaf 3.2 aangegeven is.



Figuur 4.2 Gemiddelde en 90% betrouwbaarheidsinterval voor 83 geselecteerde curven

De resultaten in Figuur 4.2 zijn vergelijkbaar met de oorspronkelijke resultaten in Figuur 3.1. Het blijkt dat door de monitoring de range waarin de zettingen nog kunnen lopen veel smaller is geworden.

Bij de vergelijking van figuur 4.2 met figuur 4.1 dient men zich te realiseren dat het model (figuur 4.2) het *effectieve* gedrag op een beperkt aantal tijdstippen weergeeft, terwijl in figuur 4.1 nog “hobbels” aanwezig zijn door ophoogslagen en mogelijk tijdelijke invloedsfactoren (bijvoorbeeld variatie grondwater niveau). Tevens zijn de assen anders geschaald.

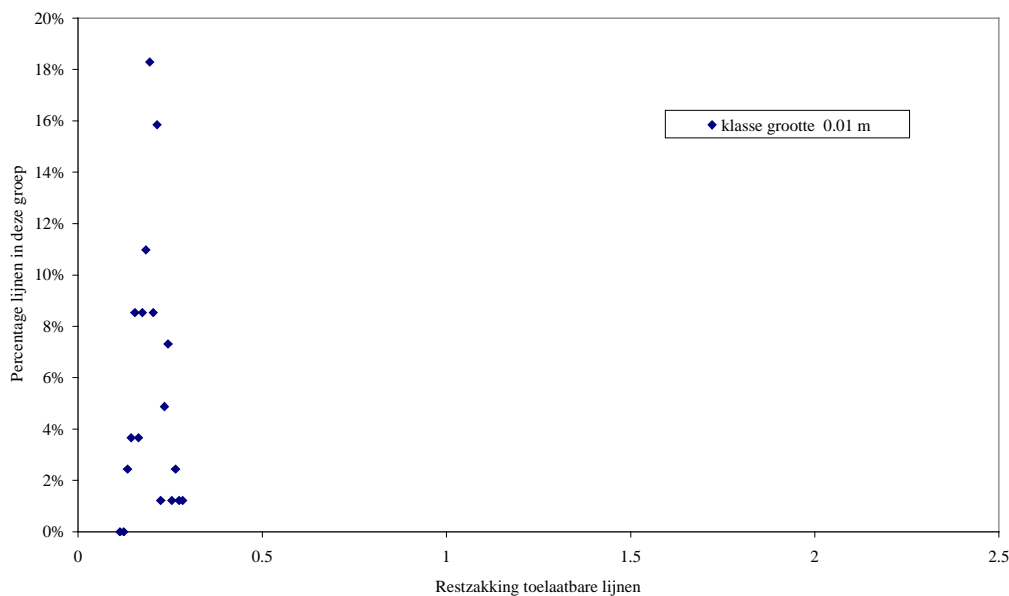
Vanuit monitoringsoogpunt wordt nog opgemerkt dat de gemiddelde waarde en de spreiding van de totale zetting (op 10000 dagen) nauwelijks beïnvloed wordt door de uitgevoerde monitoring.

4.3 Resultaten voor de restzetting

Bij de aanleg van een aardebaan is men vooral geïnteresseerd in de restzetting. De restzetting is de zetting die optreedt vanaf de dag van oplevering (dag 1250) tot 30 jaar later (ongeveer dag 10000). Vergelijking van oorspronkelijke prognoses (Figuur 3.1) en de prognoses met monitoring (Figuur 4.2) geeft aan dat door monitoring de spreiding in de restzettingsprognose aanzienlijk verkleind is.

De verdeling van de restzettingen van dag 1250 (oplevering) tot 10000 (na 30 jaar) is gegeven in Figuur 4.3. Hierbij is op de horizontale as de restzetting uitgezet op dezelfde schaal als in figuur Figuur 3.2. Het betreft niet zoveel curven (83 stuks), waardoor dit histogram niet erg continue verloopt.

Onder de aanname dat de restzetting normaal verdeeld is, volgt voor het gemiddelde 0.20 m en de standaard deviatie 0.035 m. De kans dat de restzettingseis van 0.30 m overschreden wordt is dan 0.21 %. Dit is aanzienlijk kleiner dan de oorspronkelijke 70%, zie paragraaf 3.2. Of deze overschrijdingskans voldoende klein is moet uit het opgestelde contract blijken. Deze vraag is voor het principe avn de aanpak niet relevant



Figuur 4.3 Histogram voor geselecteerde curven

4.4 Resultaten voor parameters

Tabel 1 geeft de gemiddelde consolidatie-coëfficiënt voor de lagen van zowel de gehele trekking als de selectie. Bij de interpretatie van deze tabel moet rekening gehouden worden met het feit dat de consolidatie-coëfficiënt log-normaal verdeeld is verondersteld. Toch lijkt deze figuur aan te geven dat de werkelijke consolidatie-coëfficiënten voor alle lagen minder dan een factor

2 afwijken dan de oorspronkelijk aangenomen waarden. Dat houdt in dat in dit geval de oorspronkelijk aangenomen spreiding (binnen een factor 10) wat groot is geweest.

| Laag | gemiddeld trekkingen | gemiddeld selectie | factor |
|----------|----------------------|--------------------|--------|
| laag 31a | 3.41E-06 | 3.66E-06 | 1.07 |
| laag 32d | 6.98E-06 | 1.23E-05 | 1.76 |
| laag 34d | 6.92E-06 | 4.98E-06 | 0.72 |
| laag 36d | 4.90E-07 | 7.77E-07 | 1.58 |
| laag 37b | 9.69E-06 | 9.33E-06 | 0.96 |
| laag 37c | 3.63E-06 | 5.23E-06 | 1.44 |

Tabel 1 Gemiddelde consolidatie-coëfficiënt trekking en selectie

Ook uit het feit dat de piek in de histogrammen in Figuur 3.2 en Figuur 4.3 op vrijwel dezelfde plaats ligt, geeft aan dat in gemiddelde waarde de parameterschatting heel redelijk is geweest.

De spreiding in de consolidatie-coëfficiënt van de selectie is ook kleiner geworden dan de spreiding in de trekking: was eerst een factor 10 aangehouden, in de 83 geselecteerde curven is dit nog een factor 3 à 4.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies met betrekking tot de zakkingsproblematiek

Uit deze analyse blijkt dat monitoring een aanzienlijke reductie van de onzekerheid met zich meebrengt. Bij de gemiddelde parameterkeuze voldeed het ontwerp aan de restzettingseis, maar rekening houdend met de mogelijke spreiding bleek de kans op overschrijding aanzienlijk.

De monitoringsgegevens zijn geïnterpreteerd en geven aan dat de spreiding veel minder is. Momenteel wordt de kans op overschrijding van de restzettingseis voor de beschouwde doorsnede op minder dan 1% geschat. Bij de interpretatie van dit getal moet wel rekening gehouden worden met het feit dat hieraan een aantal aannames ten grondslag liggen, die binnen het huidige case niet verder onderbouwd zijn. Het betreft onder meer de betrouwbaarheid van de meting en de invloed van de eerste consolidatie.

De case maakt duidelijk dat het noodzakelijk is de monitoring direct bij het begin van de ophoging te starten. Dit verkleint de onzekerheid.

5.2 Conclusies met betrekking tot de rationele monitoringsfilosofie HerMes

De in dit rapport gepresenteerde techniek is praktisch bruikbaar in de opzet van een monitoringssysteem voor een beheersmatige impuls.

De Monte-Carlo simulatie kan in de ontwerpfase (van het monitoringssysteem) uitgevoerd worden. Eigenlijk behoort een dergelijke simulatie ook thuis in de ontwerpfase van het totale project 'aanleg baanlichaam'.

Tijdens de monitoring kan na elke aflezing een verbeterde voorspelling van de restzetting gemaakt worden, waarbij steeds geëvalueerd moet worden of naar verwachting de restzettingseis met een overeengekomen aanvaardbare kans gehaald zal worden. Zo niet, dan kunnen maatregelen genomen worden. Bij het ontwerp van het monitoringssysteem moet wel bepaald zijn welke maatregelen dat zijn en of die maatregelen nog wel zin hebben.

Een aantal aspecten zijn in dit rapport niet bekeken, terwijl deze voor de praktijk wel relevant zijn:

- het betrouwbaarheids criterium voor de zettingseis. Dit moet uit het overeengekomen contract volgen.
- de bijdrage van de modelonzekerheid is klein verondersteld ten opzichte van de parameter onzekerheid. Dit zou formeel aangetoond moeten worden
- de onzekerheid in de meting is op basis van engineering judgement gekozen. De invloed hiervan op het eindresultaat is nog niet beschouwd.
- de ruimtelijke spreiding van de parameters (en dus de restzetting) is nog niet in de beschouwing opgenomen.

Het belang van deze aspecten moeten in een vervolg uitgewerkt worden

Bijlage 1 Bepaling consolidatie coëfficiënt

Door: dr. ir. E.J. den Haan

De consolidatiecoëfficiënt c_v is niet constant. Het is samengesteld uit de doorlatendheid en de compressibiliteit volgens

$$c_v = k / (m_v \gamma_w)$$

waarin c_v = consolidatiecoëfficiënt [m²/s]

k = doorlatendheid [m/s]

m_v = compressibiliteit [1/kPa]

γ_w = volumiek gewicht water [kPa/m]

Noch k , noch m_v zijn constant. In de K_0 -C.R.S. proeven wordt de doorlatendheid indirect bepaald uit het hydraulisch gradiënt over de hoogte van het monster en de snelheid van verandering van de hoogte (debiet). Het resultaat wordt gefit met

$$k = k_0 10^{-e/C_k}$$

De incrementele compressibiliteit is te bepalen als

$$m_v = \frac{de}{ds'_v}$$

In het maagdelijke gebied geldt

$$b = \frac{de^H}{d \ln s'_v} = \frac{de}{ds'_v} \frac{s'_v}{(1-e)}$$

waarbij b redelijk constant is. Dan is c_v te bepalen uit de parameters k_0 , C_k en b voor een bepaalde rek en spanning. In het algemeen resulteert geen constante waarde van c_v . Bovendien geldt $b = \text{constant}$ alleen in het maagdelijke gebied, terwijl in het algemeen de effectieve spanning toeneemt van een waarde ruim vóór de grensspanning tot een waarde ergens in het maagdelijke gebied. Daarom wordt er de voorkeur aan gegeven om een waarde van c_v te kiezen bij een gemiddelde waarde van de effectieve spanning. De terreinspanning varieert van 3 tot 8 kPa; de spanningsverhoging door de ophoging is circa 60 kPa. Als gemiddelde waarde van de spanning wordt 30 kPa genomen.

Bij 30 kPa is voor alle uitgevoerde K_0 -C.R.S. proeven, de bijbehorende rek bepaald. Hieruit volgt de doorlatendheid. Door regressie van een aantal (ϵ, σ_v') punten vóór en na 30 kPa is m_v bepaald. Daaruit volgt dan c_v . De resultaten staan hieronder.

| | ϵ bij 30kPa | c_v | c_v |
|------|----------------------|---------|---------|
| | | M^2/s | m^2/y |
| 30a | - | - | - |
| 31a | 0.204 | 2.4E-07 | 7.5 |
| 32d | 0.255 | 4.4E-07 | 13.7 |
| 34d | 0.190 | 5.3E-07 | 16.9 |
| 36d | 0.255 | 3.5E-08 | 1.1 |
| 37b | 0.125 | 5.2E-07 | 16.5 |
| 37b2 | 0.139 | 9.8E-07 | 30.9 |
| 37c | 0.046 | 2.5E-07 | 7.9 |

Bijlage 2 Uitwerking van het isotachenmodel

door: dr. ir. J.B. Sellmeijer

Lijst met symbolen

OCR [kPa] : Over Consolidation Ratio

POP [kPa] : PreOverburden Pressure

OFF [kPa] : Offset Pressure

a [-] : directe compressie index

b [-] : seculaire compressie index

c [-] : coëfficiënt van seculaire compressie snelheid

h [m] : laagdikte

p [Pa] : gronddruk

s [m] : zetting

t [s] : verlopen tijd

v [m³] : volume

e [-] : natuurlijke rek

index_d : direct

i : initieel

r : referentie

s : seculair

MSettle: Isotache model, ontkoppelde waterspanningen

Algemeen

Kruip is beschreven als een reksnelheid die afhangt van effectieve spanning en vervorming. In het geval van belastingen is deze reksnelheid constant langs rechte lijnen in het logaritmische spanning-vervorming vlak. Deze lijnen worden isotachen genoemd; lijnen, waarlangs de snelheid gelijk is.

Een belangrijke complicatie is de aanwezigheid van water. Door een belastingverhoging zal de grond samen willen drukken. Dit is elast(o-plast)isch gedrag. Maar ook de kruip draagt bij aan de volumeverkleining. Dit is viskeus gedrag. De aanwezigheid van water verzet zich tegen volume verandering. Het gevolg is een proces van consolidatie, waarin de aanpassingen vertraagd verlopen.

Het berekenen van het gecombineerde consolidatie-kruip proces is gecompliceerd. Het systeem van bergingvergelijking, grondmodel en evenwicht moet worden opgelost. Dit is een delicate numerieke klus. De vraag is aan de orde om de aanpak te ontkoppelen. Dit wordt bij de regels van Koppejan of NEN zo uitgevoerd.

Een belastingverhoging zal aanvankelijk voor een groot gedeelte door waterspanningen gecompenseerd worden. Het consolidatie proces zorgt er uiteindelijk voor dat de effectieve spanningen de belasting zullen

dragen. Omdat op voorhand de waterspanningen niet bekend zijn, is een geïntegreerde berekening zo moeilijk uit te voeren.

Daarom is in de zettingbepaling volgens de regels van Koppejan of NEN het optreden van wateroverspanningen genegeerd. De idee hierachter is, dat de consolidatie voornamelijk plaats heeft op de directe zakking. Tijdens de kruip spelen wateroverspanningen een ondergeschikte rol. Tijdens een samendrukkingsproef is dit inderdaad het geval. In een doorsnee praktijkgeval is dit twijfelachtig.

Een grote meevaller is het feit dat de afloop van het consolidatie proces niet van invloed is op de grootte van de zettingen. Hoe groot de wateroverspanningen aanvankelijk ook geweest zijn, het zettinggedrag voor grote waarden van de tijd is altijd eender. Het puur seculaire proces is alleen enigszins vertraagd (opgeschoven) in de tijd.

Bij Koppejan en NEN wordt dit niet van groot belang geacht. De zettingen worden over het gehele tijddomein bepaald zonder wateroverspanningen. Het directe deel van de zettingen, echter, wordt gecorrigeerd met behulp van een consolidatieratio. Deze wordt bepaald op grond van een oplossing voor elastische berging. Kruip speelt hierin dus geen rol.

Vanwege de eenvoud is het handig om deze aanpak ook over te nemen voor het isotache grondmodel. In deze notitie wordt aangegeven hoe dit verwezenlijkt kan worden.

Spanning-rek model

Eerst zal voor de duidelijkheid de spanning-rek-relatie geformuleerd worden. De rek bestaat uit een directe en seculaire component. De rek is niet gerelateerd aan het oorspronkelijke volume maar aan het huidige. Deze rek wordt natuurlijke rek genoemd. Er geldt:

$$\epsilon = \epsilon_d + \epsilon_s = -\frac{\dot{\epsilon}}{v} = -\ln v$$

De primaire rek is eenvoudig gerelateerd aan de spanning via een spanningsafhankelijke stijfheid:

$$\epsilon_d = a \frac{\dot{\epsilon}}{p} = \ln(p^a)$$

In het isotache model wordt gesteld dat de kruipnelheid logaritmisches toeneemt in de richting loodrecht op de rechte isotachen. Dit wordt gerekend ten opzichte van een referentiepunt dat met een index r wordt aangegeven. In formulevorm laat zich dit schrijven als:

$$c \ln\left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_r}\right) = \ln\left(\frac{v}{v_r}\right) + b \ln\left(\frac{p}{p_r}\right)$$

Substitutie van de primaire en seculaire rek in de uitdrukking voor de natuurlijke rek resulteert in:

$$\ln(v p^a) = \frac{(v p^a)}{v p^a} = -\epsilon_r \left(\frac{v}{v_r}\right)^{\frac{1}{c}} \left(\frac{p}{p_r}\right)^{\frac{b}{c}}$$

Deze relatie kan worden uitgeïntegreerd:

$$\left(\frac{v p^a}{v_r p_r^a}\right)^{\frac{1}{c}} = \left(\frac{v_i p_i^a}{v_r p_r^a}\right)^{\frac{1}{c}} + \int_0^t \frac{\epsilon_r}{c} \left(\frac{p}{p_r}\right)^{\frac{b-a}{c}} dt$$

De index i geeft het initiële tijdstip aan. Het resultaat wordt gefatsoeneerd tot:

$$\left(\frac{v p^a}{v_i p_i^a}\right)^{\frac{1}{c}} = 1 + \left(\frac{v_i p_i^b}{v_r p_r^b}\right)^{\frac{1}{c}} \frac{c}{c} \int_0^t \left(\frac{p}{p_i}\right)^{\frac{b-a}{c}} dt$$

De term vóór de integraal is de definitie van de kruipsnelheid voor het initiële tijdstip. Het blijkt dat het referentie punt uitgewisseld kan worden met het initiële punt:

$$\left(\frac{v p^a}{v_i p_i^a}\right)^{\frac{1}{c}} = 1 + \frac{c}{c} \int_0^t \left(\frac{p}{p_i}\right)^{\frac{b-a}{c}} dt$$

Let wel! Dit is alleen juist in het geval van belasten. Indien de referentiedruk ooit hoger geweest is, is het beter de referentie grootheden te laten staan:

$$\left(\frac{v p^a}{v_i p_i^a}\right)^{\frac{1}{c}} = 1 + \left(\frac{v_i p_i^a}{v_r p_r^a}\right)^{\frac{1}{c}} \frac{c}{c} \int_0^t \left(\frac{p}{p_r}\right)^{\frac{b-a}{c}} dt$$

Nu is in de term vóór de integraal ontlasten aan de orde, waardoor het resultaat gelijk wordt aan 1 :

$$\left(\frac{v p^a}{v_i p_i^a}\right)^{\frac{1}{c}} = 1 + \frac{c}{c} \int_0^t \left(\frac{p}{p_r}\right)^{\frac{b-a}{c}} dt$$

Er zijn aldus twee gelijklopende uitdrukkingen verkregen. Het rechterdeel ervan wordt òf in het referentie punt uitgedrukt, òf in het initiële punt.

De kruipsnelheid kan gemeten worden in het laboratorium. Deze is gelijk aan de coëfficiënt van seculaire compressie snelheid per referentietijd: c / t . De referentietijd wordt op een dag gesteld. Deze snelheid is onafhankelijk van de druk.

Het uiteindelijke resultaat kan dus geschreven worden als:

$$\left(\frac{v p^a}{v_i p_i^a}\right)^{\frac{1}{c}} = 1 + \frac{1}{t} \int_0^t \left(\frac{p}{p_r}\right)^{\frac{b-a}{c}} dt \quad p_r = \max(p_r, p_i)$$

In feite vervult p_r de functie van grensspanning. Onder deze spanning blijven de vervormingen erg klein, erboven zijn ze veel groter. Dit mechanisme wordt meestal uitgedrukt in PreOverburden Pressure aanpak (POP) of de Over Consolidation Ratio aanpak (OCR). In het eerste geval wordt de initiële spanning verhoogd met de ooit opgetreden extra bovenbelasting: $p_i = p_i + POP$; In het laatste geval worden de initiële spanningen een factor verhoogd.: $p_i = p_i * OCR$.

In formulevorm luidt dit:

$$\left(\frac{v p^a}{v_i p_i^a}\right)^{\frac{1}{c}} = 1 + \frac{1}{t} \int_0^t \left(\frac{p}{p_i OCR + POP}\right)^{\frac{b-a}{c}} dt$$

In principe is het POP òf OCR, niet beide. Dus òf $POP = 0$, òf $OCR = 1$.

Stapsgewijze belasting

De belasting wordt aangebracht in stappen. Omdat er geen rekening gehouden hoeft te worden met waterspanningen, zijn de effectieve spanningen op voorhand bekend. De integratie in de uitdrukking voor de vervorming kan dus onmiddellijk worden uitgevoerd:

$$\left(\frac{v p_{m-1}^a}{v_i p_i^a} \right)^{\frac{1}{c}} = 1 + \frac{1}{t} \sum_{n=1}^m \left(\frac{p_{n-1}}{p_i OCR + POP} \right)^{\frac{b-a}{c}} (t_n - t_{n-1})$$

Stel er zijn N belastingstappen, van 0 t/m $N-1$. Tussen de $m-1^{\text{de}}$ en de m^{de} stap moet de zetting bepaald worden. Dan wordt bovenstaande formule gehanteerd met $t_m = t$.

Indien de hele tijdas moet worden doorgerekend, dan is het verstandig het rechterdeel van de uitdrukking uit te rekenen door steeds een increment te voegen bij het vorige resultaat. Daarna wordt de rek expliciet geschreven. De zakking is de som van alle elementaire rekken in de verticaal:

$$s = - \int_0^h \left(\frac{v}{v_i} - 1 \right) dz = \int_0^h \left[1 - \frac{p_i^a}{p_{m-1}^a} \left\{ 1 + \frac{1}{t} \sum_{n=1}^m \left(\frac{p_{n-1}}{p_i OCR + POP} \right)^{\frac{b-a}{c}} (t_n - t_{n-1}) \right\}^{-c} \right] dz$$